

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

В двух частях

Часть 2

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию в области автоматизации технологических процессов, производств и управления в качестве учебного пособия для магистрантов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям: «Автоматизация технологических процессов и производств», «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств», «Конструкторско-технологическое обеспечение автоматизированных машиностроительных производств»

Витебск
2021

УДК 621(075.8)
ББК 34.05
Н34

Авторы:

Н. В. Беляков, В. А. Горохов,
Ю. Е. Махаринский, В. И. Ольшанский

Рецензенты:

академик НАН Беларуси, д.т.н., проф. Клубович В.В.;

профессор кафедры технологии машиностроения
Белорусского национального технического университета,
д.т.н., проф. Каштальян И.А.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом
УО «ВГТУ», протокол № 6 от 26.02.2021.

Н34 Научные основы технологии машиностроения : учебное пособие.
В 2 ч. Ч. 2 / Н. В. Беляков [и др.]. – Витебск : УО «ВГТУ», 2021. – 366 с.

ISBN 978-985-481-677-7 (Ч.2)
ISBN 978-985-481-675-3

Приводится описание этапов жизненного цикла изделий машиностроения, их функционального назначения. Освещены аспекты качества промышленной продукции. Изложены основы технологического обеспечения точности изделий машиностроения, качества поверхностного слоя деталей машин, а также повышения эксплуатационных свойств деталей машин и соединений. Описаны элементы теории технологической наследственности в машиностроении и процессов самоорганизации в технологических системах. Описываются методы оценки эффективности технологических процессов изготовления деталей машин. Представлены методы и автоматизированные системы научных исследований в технологии машиностроения. Приведены научные основы совершенствования и создания новых технологических методов обработки деталей машин.

Издание предназначено для студентов второй ступени высшего образования в области машиностроения и может быть полезным инженерно-техническим и научным работникам предприятий. Может использоваться также в системе повышения квалификации и переподготовки кадров машиностроительного профиля.

УДК 621(075.8)
ББК 34.05

ISBN 978-985-481-677-7 (Ч.2)
ISBN 978-985-481-675-3

© УО «ВГТУ», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

5 Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений.....	7
5.1 Изменение качества поверхностного слоя деталей при эксплуатации	7
5.2 Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений.....	16
5.3 Технологическое повышение долговечности изделий машиностроения.....	23
5.3.1 Обработка поверхностным пластическим деформированием	23
5.3.1.1 Общая характеристика ППД.....	23
5.3.1.2 Регулярные микрорельефы и их разновидности.....	26
5.3.1.3 Взаимосвязь микрогеометрии рабочих поверхностей и свойств подповерхностного слоя материала с эксплуатационными свойствами деталей и соединений.....	29
5.3.1.4 Отделочно-упрочняющая обработка ППД, оборудование и инструменты.....	38
5.3.1.5 Приспособления, микрогеометрия поверхности и состояние металла при отделочно-упрочняющей обработке ППД	51
5.3.1.6 Комбинированные процессы и расчет параметров режима отделочно-упрочняющей обработки ППД	66
5.3.1.7 Формообразующая обработка ППД фасонных поверхностей.....	75
5.3.1.8 Упрочняющая обработка ППД	81
5.3.2 Ионная имплантация и лазерная обработка	86
5.3.2.1 Ионная имплантация	86
5.3.2.2 Лазерная обработка	100
5.3.3 Нанесение покрытий	103
5.3.3.1 Гальваническое хромирование	103
5.3.3.2 Твердое никелирование	109
5.3.3.3 Борирование	110
5.3.3.4 Оксидирование и фосфатирование	112
5.3.3.5 Химические способы нанесения никелевых, хромовых, кобальтовых, никель-кобальтовых покрытий	113
5.3.3.6 Наплавка материала	115
5.3.3.7 Напыление материала	118
5.3.3.8 Покрытие деталей пластмассами	120
5.3.3.9 Лакокрасочные покрытия	122
5.4 Вопросы для самоконтроля	124
6 Технологическая наследственность в машиностроении	128
6.1 Технологическая наследственность как база обеспечения качества машиностроительных изделий	128

6.2 Закономерности технологического наследования	136
6.3 Технологическая наследственность при изготовлении деталей машин	151
6.4 Теоретическое определение технологического наследования параметров качества	171
6.5 Технологическая наследственность при сборке изделий	176
6.6 Технологические регламенты	181
6.7 Вопросы для самоконтроля	184
7 Самоорганизующиеся технологические системы.....	187
7.1 Явления самоорганизующихся систем	187
7.2 Самоорганизация на этапе изготовления материала.....	190
7.3 Самоорганизация на этапе изготовления заготовок.....	192
7.4 Самоорганизация технологических систем при механической обработке и сборке	194
7.5 Нелинейность при самоорганизации технологических систем ...	203
7.6 Вопросы для самоконтроля	205
8 Эффективность технологических процессов изготовления деталей машин.....	207
8.1 Основные понятия	207
8.2 Функции, цели и модели ограничений параметрической оптимизации.....	211
8.3 Оптимизация показателей режимов резания для элементарного и инструментального перехода	216
8.4 Оптимизация показателей режима точения с переменной скоростью	220
8.5 Оптимизация показателей режима резания с учетом затрат на электроэнергию	225
8.6 Оптимизация режима обработки однородным блоком	227
8.7 Оптимизация режима обработки неоднородным блоком с общей частотой вращения и подачи	231
8.8 Влияние временной структуры операции на ее эффективность ..	235
8.9 Автоматическая оптимизация режимов резания	240
8.10 Оптимизация показателей алгоритма управления рабочим циклом врезного шлифования	250
8.10.1 Ограничения производительности при шлифовании.....	250
8.10.2 Граничный алгоритм управления рабочим циклом.....	254
8.11 Вопросы для самоконтроля	257
9 Методы и автоматизированные системы научных исследований в технологии машиностроения.....	260
9.1 Классификация научно-исследовательских работ и методов их организации	260
9.2 Основные уровни методов научных исследований	261
9.3 Методы научных исследований в технологии машиностроения	265

9.3.1 Теоретические и теоретико-экспериментальные исследования	265
9.3.2 Разновидности и задачи экспериментальных исследований. Общая схема эксперимента	267
9.3.3 Классификация переменных в технологических экспериментах	270
9.3.4 Классический эксперимент	272
9.3.5 Дисперсионный и корреляционно-регрессионный анализы ..	273
9.3.6 Планирование экстремальных экспериментов	280
9.3.7 Нейросетевое моделирование	283
9.3.8 Понятие крутого восхождения по градиенту и симплекс-планирования	290
9.4 Автоматизированные системы научных исследований в технологии машиностроения	291
9.4.1 Понятие АСНИ	291
9.4.2 Задачи и функции АСНИ	292
9.4.3 Особенности научных исследований как объекта автоматизации	293
9.4.4 Виды обеспечений АСНИ	294
9.4.5 Принципы построения АСНИ	294
9.4.6 Пример АСНИ для измерения сил резания	296
9.5 Вопросы для самоконтроля	298
10 Научные основы совершенствования и создания новых технологических методов обработки деталей машин и наукоемкие технологии	302
10.1 Признаки классификации методов обработки деталей машин...	302
10.2 Научные основы совершенствования технологических методов обработки деталей машин	311
10.3 Научные основы создания новых технологических методов обработки и процессов изготовления деталей машин	317
10.4 Наукоемкие конкурентоспособные технологии в машиностроении	325
10.5 Вопросы для самоконтроля	328
Список использованных источников	331
Приложения	341
Приложение А. Таблицы однозначности задания ориентации поверхностей	341
Приложение Б. Числовые значения неуказанных допусков перпендикулярности, соосности и симметричности	345
Приложение В. Установочные элементы	347
Приложение Г. Правила назначения вида компонента комплекта технологических баз	351

Приложение Д. Таблица сокращения вариантов технических решений	356
Приложение Е. Качество поверхностей заготовок	358
Приложение Ж. Допуски для размеров до 10 000 мм	364

Витебский государственный технологический университет

5 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

5.1 Изменение качества поверхностного слоя деталей при эксплуатации

В процессе эксплуатации рабочие поверхности деталей машин, так же как и при изготовлении, испытывают воздействие окружающей среды, силовых и температурных факторов. Если это воздействие значительно отличается от их воздействия при финишной обработке, то совершенно очевидно, что будет происходить изменение качества поверхностного слоя деталей, т.е. поверхность будет адаптироваться к условиям эксплуатации, что может привести к значительному уменьшению долговечности. Так, технологические остаточные напряжения растяжения при растяжении деталей будут налагаться на действующие эксплуатационные напряжения и уменьшать их допустимую величину. Сжимающие же остаточные напряжения наоборот будут увеличивать допустимые эксплуатационные напряжения растяжения [7–18].

Значительные изменения качества поверхностного слоя деталей происходят при их контактном взаимодействии. Так, при нормальном нагружении контактирующих поверхностей выступы шероховатости, первыми вступившие в контакт, пластически сдеформируются на величину, которая может быть рассчитана по формуле

$$y_{пл.в.ш} = Rp_{исх} \left(\frac{100N}{A_c t m_{исх} 3u_{исх} \sigma_m} \right)^{1/v_{исх}},$$

где $Rp_{исх}$ – высота сглаживания исходной шероховатости, вступившей в контакт; N – нагрузка на контактирующие поверхности; A_c – контурная площадь контактирующих деталей; $t m_{исх}$ – относительная длина опорной поверхности на уровне средней линии для исходной шероховатости; $u_{исх}$ – исходная степень наклепа контактирующей поверхности; σ_m – предел текучести контактирующей детали; $v_{исх}$ – параметр кривой опорной поверхности исходной шероховатости.

Объем металла при пластическом деформировании неизменный, поэтому перед исследователями вставал вопрос, куда исчезает металл при пластических контактных деформациях микронеровностей. Специально проведенные исследования по этому вопросу позволили выдвинуть гипотезу, что пластически сдеформированный металл вершин микронеровностей по мере увеличения фактического давления течет к их основанию и впадинам. Встречаясь с аналогичными волнами пластиче-

ски сформированного металла соседних микронеровностей, они приподнимают их впадины (рис. 5.1).

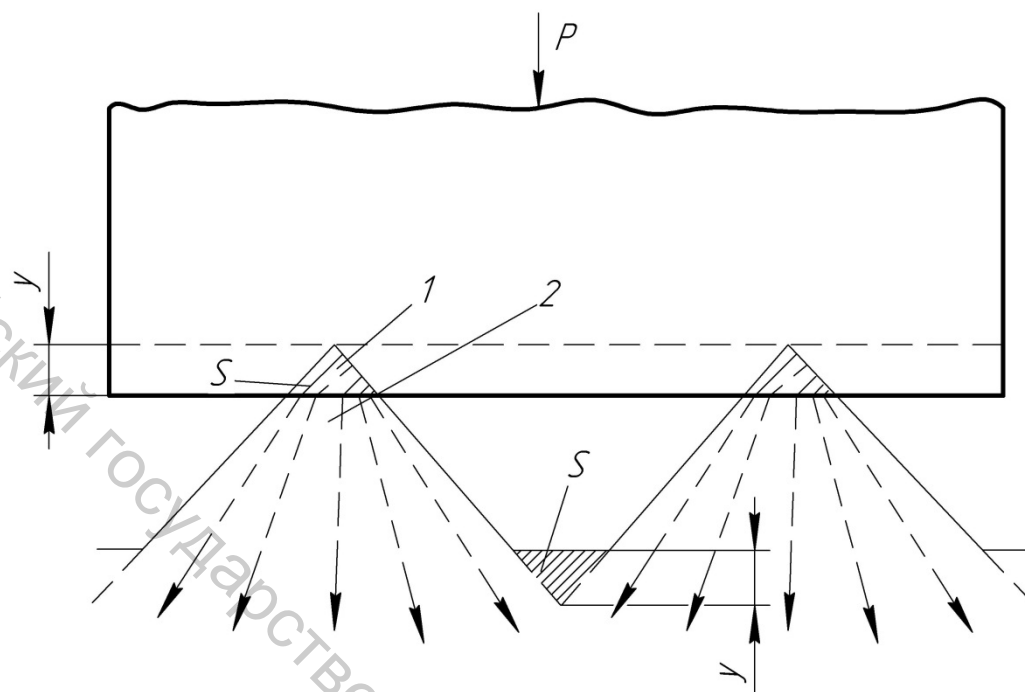


Рисунок 5.1 – Схема переформирования шероховатости при ее пластическом деформировании:

1 – исходная шероховатость; 2 – шероховатость после пластического деформирования

Тщательно проведенные эксперименты по изменению профиля шероховатости до и после пластических деформаций (рис. 5.2) убедительно подтвердили эту гипотезу. Эти исследования одновременно дали ответ на вопросы: куда исчезает металл и почему высота микронеровностей при их пластической деформации уменьшается на большую величину, чем $y_{пл.в.ш}$. Исходя из равенства объема металла до и после пластического деформирования это уменьшение будет $2y_{пл.в.ш}$ (см. рис. 5.1):

$$\Delta R_Z = 2y_{пл.в.ш}.$$

Шероховатость поверхности, не вступившей в контакт, естественно, остается без изменения. Таким образом, шероховатость контактирующих поверхностей будет находиться в диапазоне от $\Delta R_{Z_{экс}} = R_{Z_{исх}} - 2y_{пл.в.ш}$ до $R_{Z_{исх}}$.

Зависимость изменения шероховатости от давления за счет пластических деформаций при контактировании наглядно проявляется при вдавливании сферического индентора ($d=6$ мм) в шероховатую поверх-

ность (рис. 5.3). Наряду с шероховатостью таким же изменениям будет подвержена и волнистость контактирующих поверхностей. Дальнейшее увеличение контактных давлений приводит к распространению зоны пластических деформаций на волны и к их основанию, а следовательно, и к уменьшению их высоты на $2y_{пл.в.в}$.

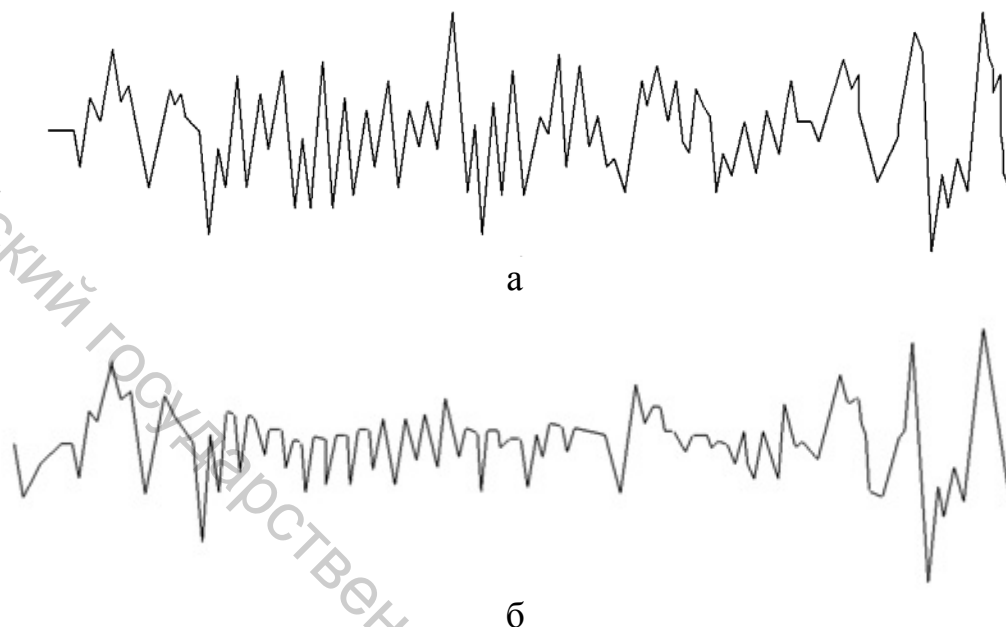


Рисунок 5.2 – Изменение профиля шероховатости при пластическом деформировании:

а – исходный профиль; б – профиль после пластического деформирования ($R_{z_{исх}}=20$ мкм, $R_{z_{экср}}=14$ мкм, $y_{пл.в.ш}=3$ мкм, вертикальное увеличение ВУ = 1000, горизонтальное увеличение ГУ = 50)

Шероховатость поверхности, не вступившей в контакт, естественно, остается без изменения. Таким образом, шероховатость контактирующих поверхностей будет находиться в диапазоне от $\Delta R_{z_{экср}} = R_{z_{исх}} - 2y_{пл.в.ш}$ до $R_{z_{исх}}$.

Зависимость изменения шероховатости от давления за счет пластических деформаций при контактировании наглядно проявляется при вдавливании сферического индентора ($d=6$ мм) в шероховатую поверхность (рис. 5.3). Наряду с шероховатостью таким же изменениям будет подвержена и волнистость контактирующих поверхностей. Дальнейшее увеличение контактных давлений приводит к распространению зоны пластических деформаций на волны и к их основанию, а следовательно, и к уменьшению их высоты на $2y_{пл.в.в}$.

Величина $2y_{пл.в.ш}$ может быть рассчитана по формуле

$$y_{пл.в.в} = \left(\frac{100NRp_{исх}^{v_{исх}} W z_{исх}^2}{6A_a t m_{исх} u_{исх} \sigma_m} \right)^{\frac{1}{v_{исх}+2}},$$

где $Wz_{исх}^2$ – исходная средняя высота волн; A_a – номинальная площадь контакта.

Аналогично шероховатости высота волн контактирующих поверхностей будет находиться в диапазоне от $Wz_{эсп} = Wz_{исх} - 2y_{пл.в.в}$ до $Wz_{исх}$.

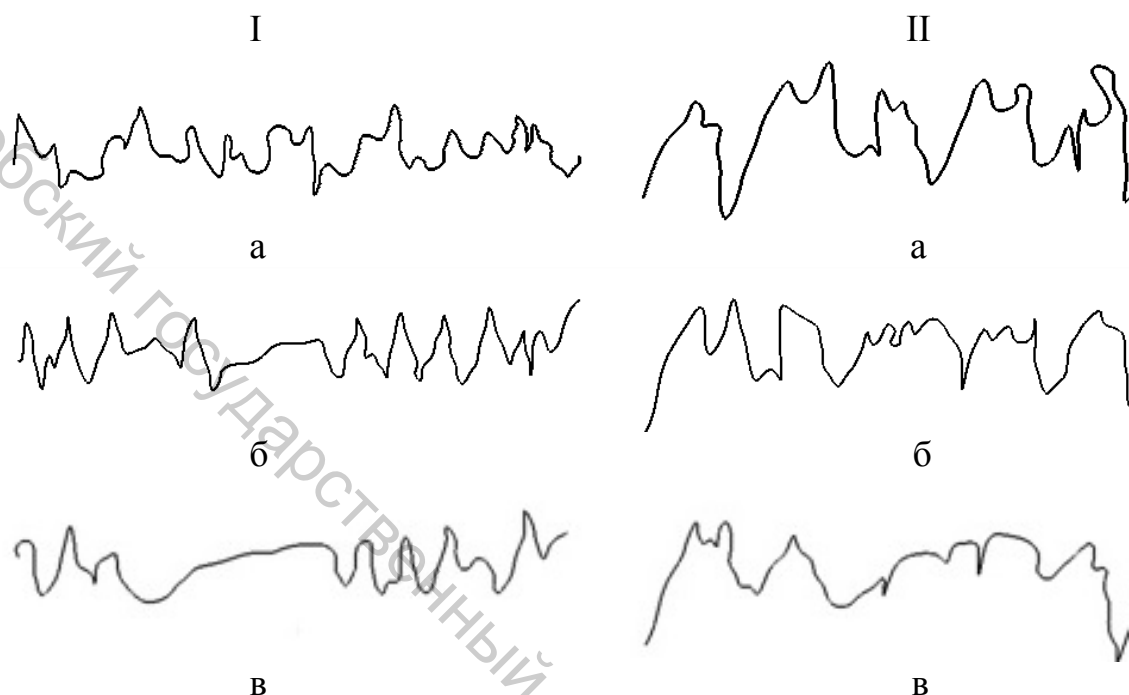


Рисунок 5.3 – Изменение шероховатости при пластическом деформировании

Экспериментально уменьшение высоты волн за счет не только пластических деформаций шероховатости, но и собственных пластических деформаций наглядно обнаруживается при контактировании единичной сферической шероховатой волны с гладкой поверхностью (рис. 5.4).

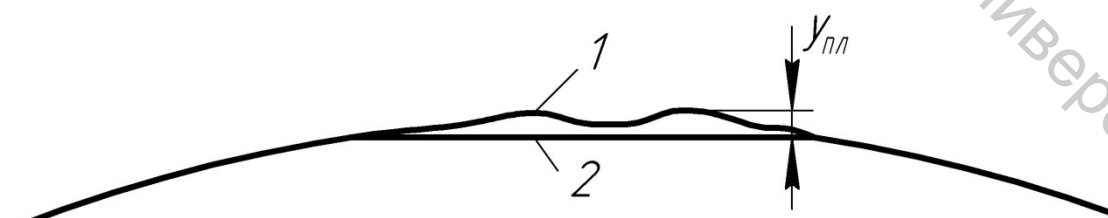


Рисунок 5.4 – Изменение профиля единичной волны в процессе пластических деформаций:

1 – исходный профиль, 2 – пластически деформированный

Уменьшение макроотклонения контактирующей поверхности составит

$$Y_{пл.м} = \left(\frac{100\pi R a_{исх}^{v_{исх}} W z_{исх}^2 H_{max\ isx}^2}{A t m_{исх} u_{исх} \sigma_m} \right)^{\frac{1}{v_{исх}+4}},$$

где A – геометрическая площадь контакта; $H_{max\ isx}^2$ – исходная величина макроотклонения.

При одновременном приложении нормальной и касательной нагрузок к контактирующим поверхностям величина пластических деформаций шероховатости, волнистости и макроотклонения может быть рассчитана по формуле:

$$Y_{пл.ш.ск.}(Y_{пл.в.ск.}; Y_{пл.м.ск.}) = (2\sqrt{1 + f^2 - 1}) Y_{пл.ш.}(Y_{пл.в.}; Y_{пл.м.}),$$

где f – коэффициент трения контактирующих поверхностей.

Приложение дополнительной вибрационной нагрузки к контактирующим поверхностям вызывает дополнительное уменьшение их исходной шероховатости, волнистости и макроотклонения на величину

$$Y_{пл} = \left(\frac{T}{T_{HB}} \right)^{\frac{m_1}{k}},$$

где T – текущее время с момента действия вибраций; T_{HB} – время испытания на твердость по Бринеллю; m_1 определяется по: $k = v_{исх}$ – для шероховатости; $k = v_{исх} + 2$ – для волнистости; $k = v_{исх} + 4$ – для макроотклонения.

Так как фактическая площадь контакта составляет малую часть по сравнению с геометрической, то на ее участках возникают высокие давления, вызывающие их пластические деформации и упрочнение. Вследствие этого, очевидно, микротвердость контактирующих поверхностей будет изменяться от ее исходного значения $H_{\mu исх}$ (для участков, не вступивших в контакт) до пластической твердости HD , при которой выступы неровностей, первыми вступившие в контакт, достигают своего пластического насыщения. Особенно сильно проявляется изменение качества поверхностного слоя деталей при трении и изнашивании.

Исследователи, занимающиеся вопросами трения и изнашивания, установили, что в период приработки шероховатость поверхности трения претерпевает значительные изменения. Одним из основных условий завершения процесса приработки было принято считать переход исходной технологической шероховатости к эксплуатационной. М.М. Хрущев и П.Е. Дьяченко экспериментально показали, что по окончании прира-

ботки на поверхности трения формируется шероховатость, не зависящая от исходной, полученной при механической обработке, а зависящая только от условий изнашивания. Эта шероховатость является оптимальной для данной пары и условий трения и обеспечивает минимальное изнашивание. Она может быть как меньше, так и больше исходной (рис. 5.5). И.В. Крагельский и В.С. Комбалов для шероховатости, сформировавшейся в процессе приработки, ввели понятие «равновесная шероховатость» и предложили безразмерный комплексный параметр ее оценки

$$\Delta = \frac{R_{max}}{rb^{\frac{1}{\nu}}},$$

где R_{max} – максимальная высота шероховатости; r – радиус скругления вершин микронеровностей; ν и b – параметры опорной кривой [7–18].

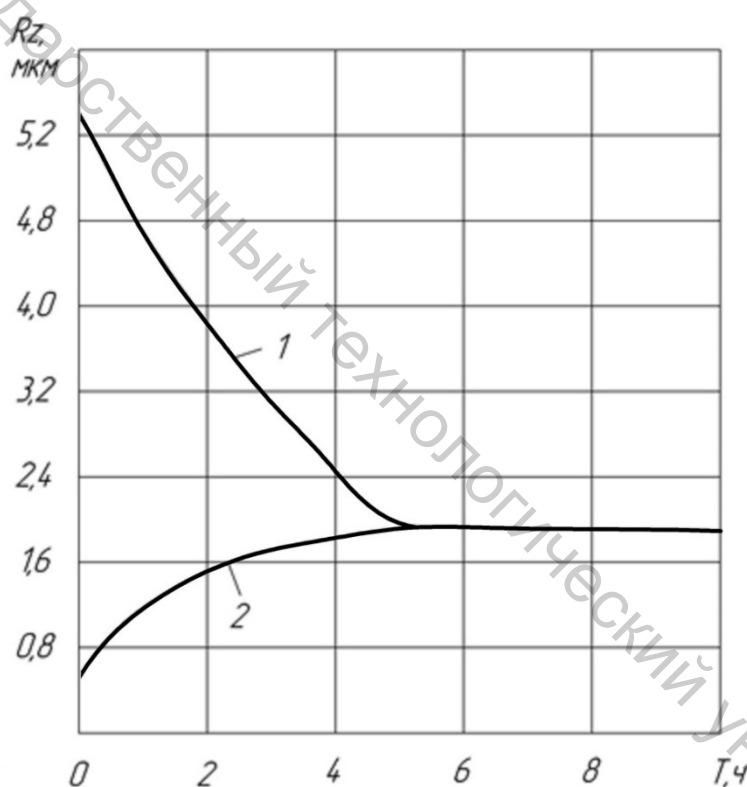


Рисунок 5.5 – Изменение шероховатости поверхности трения при изнашивании:

1 – $Rz_{исх} = 5,4$ мкм; 2 – $Rz_{исх} = 0,5$ мкм

Процесс формирования равновесной шероховатости поверхности трения схематически представлен на рисунке 5.6. Слева показан износ идеально гладкой поверхности, приводящей к схватыванию и вырыву частиц материала, возникновению шероховатости и постепенному ее переходу к равновесной; справа – износ поверхности трения, имеющей

большую шероховатость, приводящую к микрорезанию, ее уменьшению и переходу к равновесной; посередине – износ поверхности с исходной шероховатостью, близкой к равновесной.

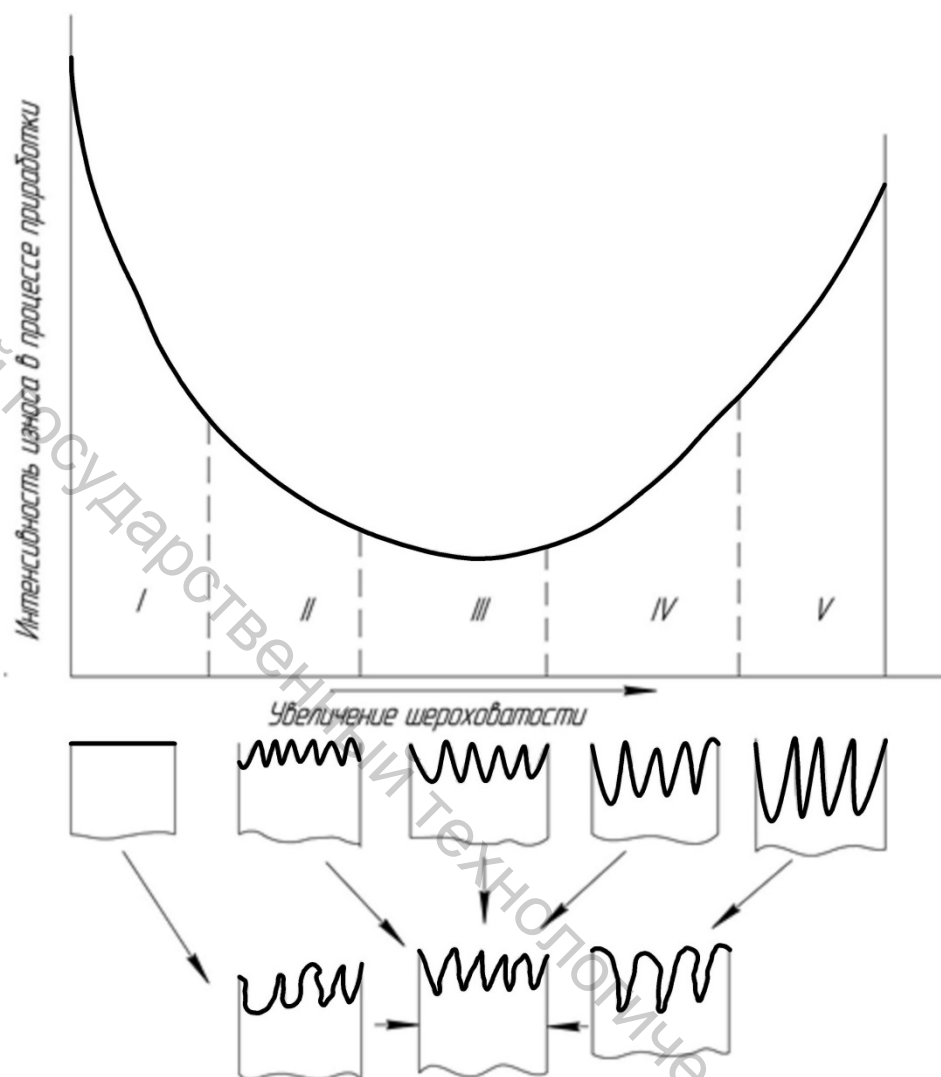


Рисунок 5.6 – Схематическое представление формирования равновесной шероховатости

Среднее арифметическое значение профиля равновесной шероховатости, сформировавшейся на поверхности трения после приработки, можно рассчитать по формуле (при $\nu = 2$):

$$R_a = 32 \left[\left(\frac{\tau_a}{\alpha_r} \right)^{1/2} \theta^{3/4} p_c^{-1/2} \right]^{1/2},$$

где τ_a – адгезионное свойство материала поверхности трения; α_2 – коэффициент гистерезисных потерь при скольжении, $\alpha_2 = 2,2\alpha$ (α – коэф-

фициент гистерезисных потерь для материала при одноосном растяжении–сжатии); θ – постоянная физико-механических свойств материала, $\theta = (1 - \mu^2)/E$; p_c – контурное давление.

Безразмерный комплексный параметр равновесной шероховатости определяется из уравнения

$$\Delta = 16 \left(\frac{\tau_a}{\alpha_r} \right)^{5/4} \theta^{3/4} p_c^{-1/2}.$$

В период стационарного изнашивания равновесная шероховатость воспроизводится на всем последующем процессе нормальной работы пары трения. Все это позволило некоторым исследователям сделать вывод, что технология обработки поверхности трения не оказывает влияния на ее долговечность. Но совершенно очевидно, что чем больше исходная шероховатость поверхности трения отличается от оптимальной, тем больше будет износ в период приработки, а следовательно, тем меньше долговечность пары трения (рис. 5.7). Это говорит о том, что технология обработки поверхности трения оказывает значительное влияние на ее долговечность, а также указывает на необоснованность стремления конструкторов к завышению требований к шероховатости рабочих поверхностей трения деталей машин.

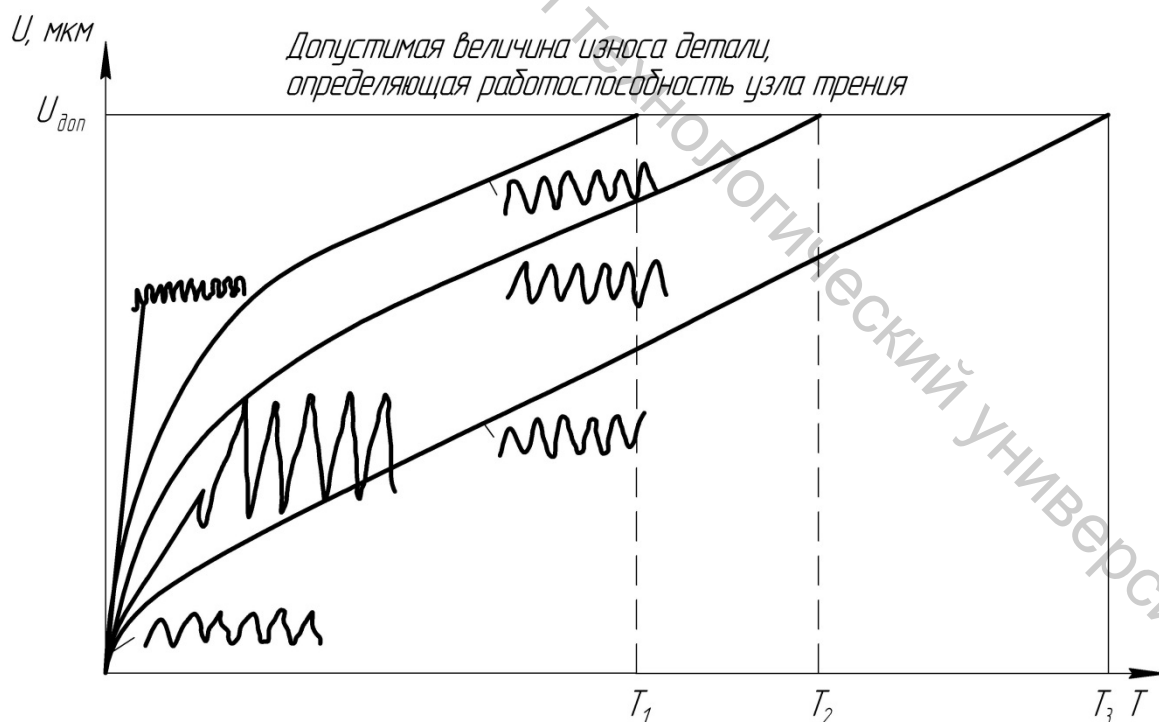


Рисунок 5.7 – Взаимосвязь долговечности поверхности трения с ее исходной шероховатостью

Наряду с шероховатостью в процессе приработки претерпевают изменения и другие параметры поверхности трения: макроотклонение, волнистость и физико-механические свойства. Величина макроотклонения при изнашивании будет постоянно уменьшаться за счет износа контактирующих участков. Волнистость поверхности трения в зависимости от условий изнашивания и ее исходного значения в процессе приработки будет изменяться аналогично шероховатости. Малые волны при больших нагрузках могут вызвать «плечное голодание», схватывание и вырывы значительных объемов, т.е. их увеличение. К увеличению волн приводят вибрации в узлах трения. При большой исходной волнистости происходит ее вершинный износ и уменьшение.

Изменению физико-механических свойств поверхностных слоев при трении посвящены работы Б.И. Костецкого, И.М. Любарского, Н.А. Буше.

Анализ физико-химических процессов, протекающих на поверхностях трения в период приработки, позволил Б.И. Костецкому установить, что происходит образование вторичных структур. И.М. Любарский показал, что для сталей, имеющих гетерогенное строение, структурные изменения в процессе приработки приводят к образованию особого слоя, определяющего износостойкость материала. Н.А. Буше в своих работах также подтверждает процесс структурных изменений в поверхностном слое деталей при трении. Эти структурные изменения зависят как от материалов контактирующих деталей, так и от условий трения. Это позволило ему научно подойти к выбору материала деталей для различных узлов трения [7–18].

Следует отметить, что процесс изменения макроотклонения, волнистости, шероховатости и физико-механических свойств поверхностей трения в процессе приработки будет взаимосвязанным. Уменьшение макроотклонения и волнистости будет приводить к увеличению номинальной и контурной площадей контакта и числа контактирующих микронеровностей и постепенному переходу контактных пластических деформаций к упругим, т.е. к изменению физико-механических свойств поверхностей трения. Очевидно, что значение формируемой равновесной шероховатости будет зависеть от других параметров поверхности трения, в частности макроотклонения, волнистости и физико-механических свойств. Все это позволило сформулировать понятие «равновесное состояние поверхности трения» и предложить комплексный параметр для его оценки.

Уравнение для расчета оптимального значения этого комплексного параметра поверхности трения имеет следующий вид:

$$C_x = I \left(\frac{25\pi^{7/6}}{\chi p^{7/6}} \right) \frac{\sigma_m^{2/3} E^{1/2} n}{(1-\mu^2)^{1/2}},$$

где I – допустимая интенсивность изнашивания поверхностного слоя детали; χ – коэффициент; n – число циклов воздействия, которое приводит к разрушению материала; p – нормальное давление на поверхности трения.

Все это говорит о том, что в процессе эксплуатации происходит взаимосвязанное изменение параметров качества поверхностного слоя деталей машин и только технологическое обеспечение оптимального значения комплексного параметра позволяет в значительной мере повысить их долговечность.

5.2 Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений

В настоящее время решение проблемы обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин и соединений сводится к решению двух задач:

- задачи конструктора по выбору материала деталей, определению их размеров, точности и параметров качества поверхностного слоя, обеспечивающих необходимые эксплуатационные свойства исходя из их функционального назначения;
- задачи технолога по технологическому обеспечению точности размеров и параметров качества поверхностного слоя деталей, назначенных конструктором [7–18].

Конструктор практически не может определить оптимальное сочетание параметров качества поверхностного слоя деталей, в частности параметров шероховатости Ra , Sm и tp при необходимости обеспечения износостойкости, так как десятки вариантов могут обеспечивать одинаковую интенсивность изнашивания. Оптимальным будет то сочетание, которое обеспечивается с наименьшей технической себестоимостью, что является уже задачей технолога. Это привело к появлению нового научного направления в технологии машиностроения – технологическому обеспечению эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений.

Имеются экспериментальные данные взаимосвязи эксплуатационных свойств деталей машин непосредственно с условиями их обработки и предпринимаются попытки теоретически описать эту взаимосвязь. Эти попытки реализуются по двум направлениям:

- методом подстановки теоретических зависимостей по расчету параметров качества поверхностного слоя деталей с условиями их обработки в теоретические уравнения эксплуатационных свойств;

– на основе единства процессов силового, температурного и химического воздействий на деталь как при ее изготовлении, так и при эксплуатации.

Возможности самых распространенных методов обработки в обеспечении контактной жесткости наружных и внутренних поверхностей вращения приведены в таблице 5.1.

Взаимосвязь контактной жесткости деталей с режимами обработки описывается следующими эмпирическими уравнениями:

Чистовое наружное точение:

– с учетом только шероховатости:

$$j_l = 0,004 \frac{v^{0,29} HB^{1,2}}{s^{0,47}}; j_n = 0,35 \frac{HB^{0,82}}{s^{0,33}};$$

– с учетом шероховатости и волнистости:

$$j_l = 0,004 \frac{v^{0,34} HB^{1,45}}{s^{0,52}}; j_n = 0,01 \frac{v^{0,39} HB^{1,02}}{s^{0,31}}.$$

Данные уравнения адекватно описывают взаимосвязь при $\varphi = 45^\circ$, при $\varphi_1 = 45^\circ$, $t=1$ мм, Т15К6, $r_0 = 1$ мм, $s=0,1 \dots 0,4$ мм/об, $v=80 \dots 180$ м/мин, $HB=105 \dots 290$.

Таблица 5.1 – Возможности методов обработки в обеспечении нормальной контактной жесткости поверхностей

Методы обработки	с учетом только шероховатости		с учетом шероховатости и волнистости	
	j_l , Па/мкм	J_n , Па/мкм	j_l , Па/мкм	J_n , Па/мкм
Точение				
черновое	0,24–19,74	0,43–41,1	0,15–11,6	0,38–27,63
получистое	1,79–35,38	4,98–63,18	0,67–27,93	1,5–54,42
чистовое	4,41–41,6	17,18–78,51	1,72–32,76	9,01–58,98
Круглое шлифование				
черновое	17,35–51,91	42,35–103,55	13,32–45,35	33,78–89,79
получистое	22,4–57,37	59,73–122,91	17,15–48,73	45,63–100,34
чистовое	33,73–65,89	78,08–137,94	24,35–58,94	63,18–125,74
Растачивание				
черновое	0,11–12,97	0,27–29,43	0,05–9,94	0,17–22,79
получистое	1,58–43,78	4,97–81,92	0,79–33,49	1,91–65,91
чистовое	5,09–51,04	19,06–101,72	4,1–38,96	13,25–83,85
Внутреннее шлифование				
черновое	18,17–50,29	45,19–103,89	14,21–44,73	37,72–89,11
получистое	26,94–53,74	65,5–116,34	19,17–45,78	41,42–97,52
чистовое	35,93–61,67	76,01–129,25	28,45–56,76	70,52–116,16

Круглое чистовое шлифование:

– с учетом только шероховатости:

$$j_I = 11,4 \frac{HB^{0,37}}{s^{0,18} z^{0,24}}; j_n = 23,7 \frac{HB^{0,35}}{s^{0,13} z^{0,17}};$$

– с учетом шероховатости и волнистости:

$$j_I = 7,18 \frac{HB^{0,41}}{s^{0,36} z^{0,32}}; j_n = 18,4 \frac{HB^{0,34}}{s^{0,27} z^{0,19}}.$$

Эти зависимости адекватны при $s = (0,2 \dots 0,3)B$, $z = 10 \dots 25$, $HB = 105 \dots 290$, $t = 0,005$ мм, $v = 30 \dots 35$ м/с.

Аналогичный характер имеют и эмпирические уравнения для расчета контактной жесткости при растачивании, фрезеровании, внутреннем и плоском шлифовании поверхностей деталей.

Их анализ показал, что условия обработки обладают достаточно широкими возможностями в управлении контактной жесткостью деталей машин.

Вопросам *технологического обеспечения износостойкости* деталей машин посвящено большое число научных работ. Почти каждая из них имеет свою методику испытаний, что затрудняет их систематизацию и практически не позволяет равнозначно установить возможности различных методов обработки деталей в обеспечении их износостойкости. Ниже приводятся экспериментальные данные о взаимосвязи износостойкости образцов, поверхности трения которых обработаны различными методами [7–18].

Так, на рисунке 5.8 приведена зависимость износа образцов из закаленной стали от пути трения для различных методов их окончательной обработки.

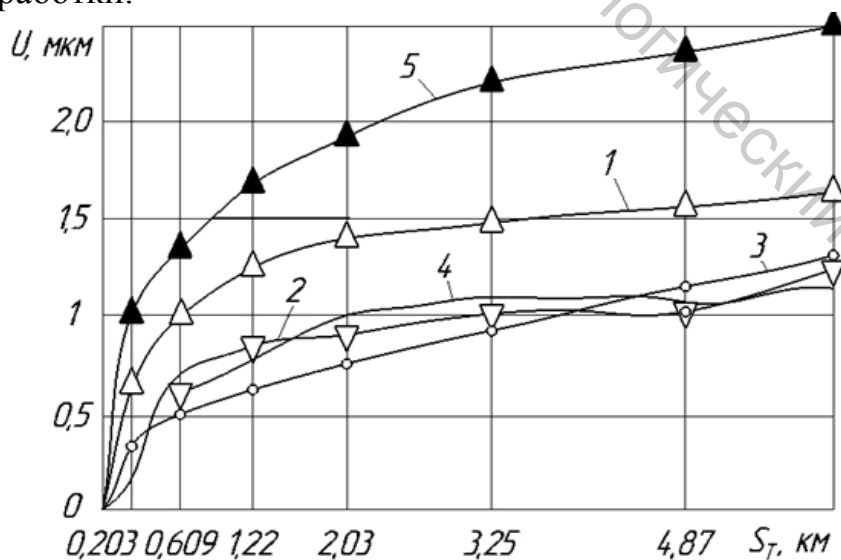


Рисунок 5.8 – Зависимость износа образцов от пути трения в процессе приработки для закаленной стали:

1 – алмазное шлифование; 2 – притирка алмазными пастами;
3 – накатка; 4 – ЭМО; 5 – круглое шлифование

Для образцов из серого чугуна СЧ21, обработанных различными методами, кривые износа имеют различный характер. Кривые 1–3 соответствуют трению по чугуну СЧ21, а 4–6 – трению по молибденовому покрытию (рис. 5.9).

Наряду с методами обработки значительное влияние на износостойкость поверхности трения деталей оказывают условия обработки внутри каждого метода.

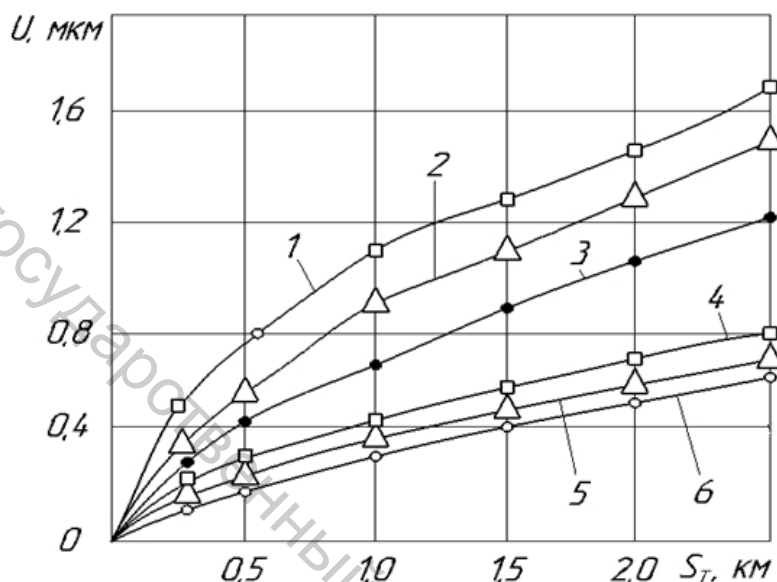


Рисунок 5.9 – Зависимость величины износа чугунных образцов в процессе приработки от пути трения и метода их обработки:

1, 4 – шлифование периферией круга; 2, 5 – шлифование торцом эльборового круга; 3, 6 – суперфиниш алмазным бруском

Анализ этих рисунков показывает, что условия обработки позволяют в 2–5 раз изменять износ деталей в процессе их приработки.

Результаты экспериментальных исследований **коррозионной стойкости** образцов при различных методах их механической обработки приведены в таблице 5.2.

Анализ приведенных результатов убедительно показывает, что за счет выбора только методов механической обработки можно в значительной мере управлять коррозионной стойкостью деталей машин.

Прочность деталей машин, работающих при переменных нагрузках, в значительной степени зависит от условий их обработки. Так, на рисунке 5.10 и в таблице 5.3 приведены данные проф. М.А. Елизаветина, убедительно подтверждающие это.

На рисунке 5.10 по оси ординат отложены значения коэффициента P , характеризующие влияние метода обработки на предел выносливости в зависимости от предела прочности:

$$\beta = \frac{\sigma_{-1}^{\cdot}}{\sigma_{-1}},$$

где $\sigma_{-1}^{\cdot}$ – предел выносливости образцов, обработанных данным методом; σ_{-1} – предел выносливости тщательно отполированных образцов.

Таблица 5.2 – Коррозионная стойкость образцов (сталь 45, HRC 30–35)

Метод обработки	Параметры шероховатости по ГОСТ 2789-73					Степень наклепа u_n	Потеря в массе кг/м ²	Требования по ГОСТ 5212		
	Ra , мкм	Rp , мкм	$Rmax$, мкм	tm , %	Sm , мм			Проницаемость мм/год	Группа стойкости	Балл
Накатывание после шлифования	2,1	3,03	10,4	59	0,133	1,35	2,437	0,00380	Весьма стойкие	2
	1,25	4,1	7,6	52	0,144	1,63	7,625	0,01189	Стойкие	4
	0,17	0,28	0,82	65	0,036	1,30	7,437	0,01160	То же	4
	0,25	0,5	1,4	57	0,042	1,52	3,562	0,00556	Весьма стойкие	3
Магнитоабразивная обработка	0,17	0,51	1,2	56	0,030	1,10	2,437	0,00380	Весьма стойкие	2
	0,058	0,164	0,27	57	0,028	1,12	0,562	0,00088	Совершенно стойкие	1
Точение	12,5	46,0	81,0	40	0,150	1,12	6,25	0,00975	Весьма стойкие	3
	1,36	2,6	6,6	47	0,055	1,08	3,0	0,00468	То же	2
Шлифование	2,0	4,5	9,4	52	0,08	1,15	2,685	0,00419	Весьма стойкие	2
	0,24	0,6	1,18	54	0,033	1,18	2,3212	0,00361	То же	2
Накатывание после точения	1,05	3,96	8,6	53	0,061	1,40	7,315	0,0115	Стойкие	4
	1,12	1,6	6,2	63	0,064	1,50	38,12	0,05947	То же	5
	6,2	11,2	25,3	55	0,115	1,45	9,0	0,01403	То же	5
	3,54	5,1	17,1	65	0,140	1,58	6,25	0,0975	Весьма стойкие	3

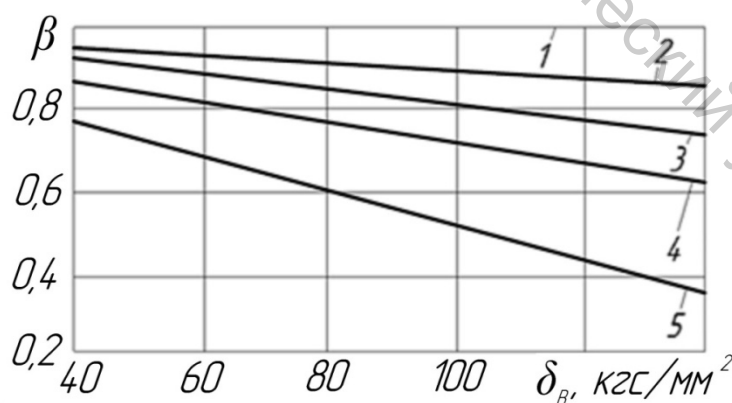


Рисунок 5.10 – Влияние метода окончательной обработки поверхности на предел выносливости стали различной прочности:
1 – полирование; 2 – шлифование; 3 – тонкое точение; 4 – грубое точение; 5 – наличие окалины

Таблица 5.3 – Влияние режимов резания и износа по задней поверхности резца при обработке точением на выносливость титанового сплава BT-2

Режимы резания и величина износа h_3 по задней грани резца	σ_{-1} в кгс/мм ² при температуре, °С	
	20	400
Подача s в мм/об (при $v = 30$ м/мин, $t = 1,5$ мм, $h_3 = 0$):		
0,8	42	38
0,2	25	28
0,4	18	18,5
Глубина резания в мм (при $v = 30$ м/мин, $s = 0,2$ мм/об, $h_3 = 0$):		
0,5	33	31
1,5	25	28
3,0	–	22
Износ по задней поверхности резца h_3 в мкм (при $v = 30$ м/мин, $s = 0,2$ мм/об, $t = 1,5$ мм):		
0	25	28
0,2	33	30
0,5	33	32
0,8	30	33

Прочность посадок с натягом напрямую зависит от коэффициента трения в соединении, который в значительной мере определяется по технологии сборки и обработки сопрягаемых поверхностей (табл. 5.4).

Таблица 5.4 – Коэффициенты трения в соединении

Диаметр соединения, мм	Материал, метод обработки		Коэффициент трения f
	втулки	вала	
1	2	3	4
Сборка с нагревом			
18	Стали 35,40 (220 HB), развертывание	Стали 36,40 (190 HB), шлифование	0,37
30	Сталь 38ХС, улучшение (340 HB)	Сталь 18Х2Н4МА, цементация и закалка (58–59 HRCэ), шлифование Сталь 18Х2Н4МА (220 ЯЛ), шлифование	0,30 0,45
48	Сталь 45, расточка	Сталь 45, накатка с последующим шлифованием	При $t = 50^\circ\text{C}$ $f = 0,31$, при $t = 20^\circ\text{C}$ $f = 0,34$
80	Сталь 40 (190 HB), шлифование	Чугун СЧ28 (210 HB)	0,28
100	Сталь 30 (175 HB), шлифование	Стали 30 (175 HB), шлифование	0,23
140	Сталь 30 (175 HB), шлифование	Сталь 30 (175 ЯЛ), шлифование	0,35
150	Сталь 40, чистовое растачивание	Сталь 40, шлифование	0,25
Сборка с охлаждением			
8	Стали 35, 40 (220 HB), развертывание	Стали 35, 40 (140 HB), шлифование	0,25

Окончание таблицы 5.4

1	2	3	4
40	Сталь 40 (190 HB), шлифование	Бронза БрАЖ9–4 (140 HB), шлифование	0,28
50	Сталь 50, нормализация, развертывание	Сталь 50, чистое точение	0,35
50	Сталь 50, нормализация, шлифование	Бронза БрАЖ9–4 (140 HB), шлифование	0,24
60	Сталь 40 ($Ra = 5$ мкм)	Сталь 40 ($Ra = 5$ мкм)	0,41
	Сталь 40 ($Ra = 1,25$ мкм)	Сталь 40 ($Ra = 2,5$ мкм)	0,31
80	Сталь 40 (190 HB)	Чугун СЧ28 (210 HB)	0,21
90	Сталь 40, чистовое растачивание	Сталь 40, чистовое точение	0,42
100	Сталь 30, шлифование	Сталь 30, шлифование	0,29
140	Сталь 30, шлифование	Сталь 30, шлифование	0,37

Анализ этой таблицы показывает, что даже при одинаковой точности соединений с натягом технологически можно изменять их прочность почти в 2 раза.

Влияние условий механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений приведено в таблицах 5.5–5.7.

Таблица 5.5 – Влияние условий лезвийной обработки на эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений

Технологические формы	Контактная жесткость		Износостойкость	Коррозионная стойкость	Геометричность соединений	Статическая и усталостная прочность	Прочность посадок
	Первое нагружение	Повторное нагружение					
1	2	3	4	5	6	7	8
Подача	—*	—*	—*	—*	—*	—*	—*
Скорость резания	+	+	+	+	+	+	+
Глубина резания	+	—	+	—*	—	+	—
Углы в плане	—	—	—*	—	—	—	+
Передний угол	+	—	+	—*	0	+	0
Задний угол	—	+	—	+	0	—	—
Угол наклона режущей кромки	+	—	+	—*	0	+	0
Радиус вершины	+	+	+	—	+	+	0

Окончание таблицы 5.5

1	2	3	4	5	6	7	8
Радиус скругления режущей кромки	+	–	+	–*	0	+	0
Жесткость технологической системы	+	+	+	+	+	+	+
СОСТ	+	+	+	+	+	+	0
Примечания. 1. Знак «+» означает, что увеличение или уменьшение данного технологического фактора (при неизменности остальных технологических факторов) способствует увеличению или уменьшению соответствующего эксплуатационного свойства. 2. Знак «–» означает, что увеличение или уменьшение данного технологического фактора (при неизменности остальных технологических факторов) способствует уменьшению или увеличению соответствующего эксплуатационного свойства. 3. Знак «0» означает, что увеличение или уменьшение данного технологического фактора (при неизменности остальных технологических факторов) не оказывает влияния на соответствующее эксплуатационное свойство. 4. Знак «*» означает, что данный технологический фактор оказывает основное влияние на соответствующее эксплуатационное свойство.							

Их анализ показывает, что при лезвийной обработке основными технологическими факторами, оказывающими влияние на все эксплуатационные свойства, являются подача и жесткость технологической системы, при алмазно-абразивной обработке – подача и зернистость, при ОУО ППД – рабочее давление и приведенный радиус инструмента.

5.3 Технологическое повышение долговечности изделий машиностроения

5.3.1 Обработка поверхностным пластическим деформированием

5.3.1.1 Общая характеристика ППД

Широкими возможностями в повышении долговечности изделий машиностроения обладает обработка пластическим деформированием. В зависимости от назначения методы пластического деформирования можно разделить на три основных класса (рис. 5.11) [7, 98–102].

К первому классу относятся все методы обработки заготовок, связанные с пластическим деформированием только их поверхностных слоев и практически не изменяющие исходную точность размеров. Это накатывание, обкатывание, раскатывание, выглаживание, виброобработка, динамическое упрочнение, электромеханическая и комбинированная обработка различных поверхностей деталей машин. Причем в зависимости от функционального назначения изделия за счет изменения

рабочего давления обработку можно производить на отделочных, упрочняющих и промежуточных отделочно-упрочняющих режимах.

Таблица 5.6 – Влияние условий алмазно-абразивной обработки на эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений

Технологические формы	Контактная жесткость		Износостой- кость	Коррозионная стойкость	Геометричность соединений	Статическая и усталочная прочность	Прочность посадок
	Первое нагруже- ние	Повторное нагруже- ние					
Скорость резания	+	+	+	+	+	+	+
Круговая или ли- нейная скорость детали	–	–	–	–	–	–	–
Подача	–*	–*	–*	–*	–*	–*	–*
Глубина резания	+	–	+	–	+	–	+
Зернистость	–*	–*	–*	–*	–*	+	–
Концентрация	+	+	+	–	+	+	+
Число выхаживаний	+	+	+	+	+	+	+
Жесткость техноло- гической системы	+	+	+	+	+	+	+
СОТС	+	+	+	+	+	+	0
Примечания. См. табл. 5.5.							

Таблица 5.7 – Влияние условий ОУО ППД на эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений

Технологические формы	Контактная жесткость		Износостой- кость	Коррозионная стойкость	Геометричность соединений	Статическая и усталочная прочность	Прочность посадок
	Первое нагруже- ние	Повторное нагруже- ние					
Скорость	–	–	–	+	–	–*	–
Подача	–*	–*	–*	–	–	–*	–
Раб.давление	+	+	+	–*	–*	+	–*
Число раб.ходов	+	+	+	–	–	+	+
Радиус рабочего шарика и индикато- ра	+	+	+	+	+	+	+
Диаметр раб.ролика	+	+	+	+	+	+	+
Профильный радиус ролика	+	+	+	+	+	+	+
Задний угол вдавливания ролика	–	–	–	–	–	–	–
Жесткость техн. системы	+	+	+	+	+	+	+
СОТС	+	+	+	+	+	+	0
Примечания. См. табл. 5.5.							

Во втором классе предусмотрены методы обработки заготовок, формирующие форму и размеры отдельных их элементов пластическим деформированием (накатывание зубьев, шлицев, резьб, фасонных поверхностей). Дальнейшим их развитием является создание так называемых гладкорезьбовых соединений (резьбовая шпилька вворачивается в гладкое отверстие). Эту обработку можно применять для заготовок из материалов, обладающих достаточной пластичностью.

К третьему классу относятся методы, осуществляющие ОУО поверхности без изменения ее формы при пластическом деформировании практически всей заготовки (калибрование наружных и внутренних поверхностей вращения и дорнование). Дальнейшим развитием этих методов является одновременная обработка с запрессовкой. Достоинством этих методов обработки является то, что они наряду с улучшением состояния поверхностного слоя позволяют повысить точность размера.

В отдельный класс можно отнести упрочняющую обработку.

Все методы обработки заготовок пластическим деформированием имеют широкие возможности в управлении параметрами состояния поверхностного слоя деталей машин, а следовательно, и их эксплуатационными свойствами. Однако их применение для этих целей требует научно обоснованного подхода, так как каждый из этих методов имеет вполне определенные экономически целесообразные области применения.

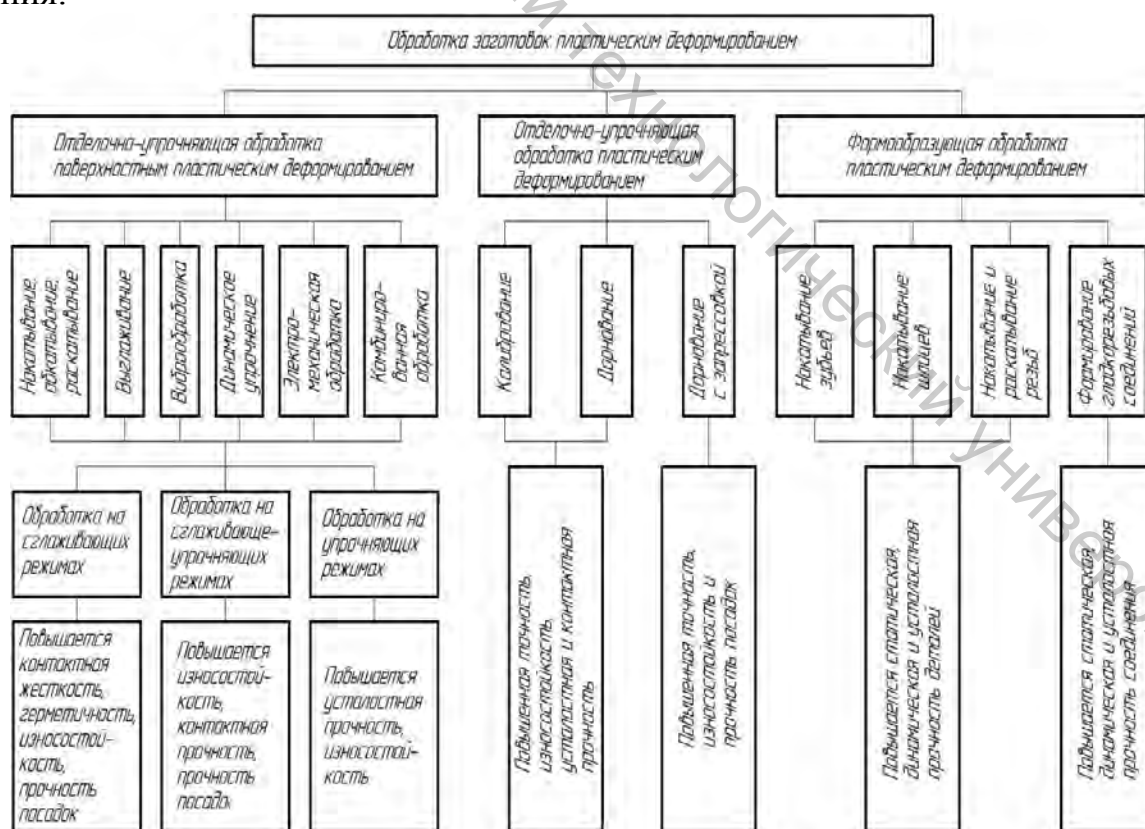


Рисунок 5.11 – Классификация методов обработки заготовок пластическим деформированием

5.3.1.2 Регулярные микрорельефы и их разновидности

Вызывает восхищение умение природы сводить к минимуму потери энергии, придавая своим творениям симметричность и упорядоченность форм и микрогеометрии поверхностей. Для уменьшения скольжения, например, у пресмыкающихся в процессе эволюции образовался регулярный микрорельеф брюшной части поверхности тела. Подобную роль играет и капиллярный рисунок на опорных поверхностях конечностей млекопитающих. А в целях увеличения скольжения существует регулярный микрорельеф поверхности кожи дельфинов, плоскоидной чешуи у быстроходных рыб и т.п. Примеры природы привели к мысли об упорядочении, оптимизации и регуляризации микрогеометрии технических поверхностей деталей, работающих в различных парах и условиях [98–101].

Попытки образования регулярного микрорельефа (РМР) предпринимались во многих странах мира. Так, в США применено протравливание на поверхностях лунок через трафареты с закономерно расположенными отверстиями. В Германии и Франции для образования РМР использованы копировальные системы и специальное оборудование со сменными копиями. В Японии созданы специальные способы шлифования, с помощью которых на поверхностях образуются регулярно расположенные системы рисок. Но описанные и другие запатентованные за рубежом способы образования РМР не универсальны, требуют специального оборудования и его сложной настройки и перенастройки при экспериментальном поиске оптимальной микрогеометрии поверхностей, приводят к необходимости изготовления большого количества дорогостоящих специальных трафаретов, копиров, управляющих систем, инструмента и поэтому практически не нашли применения в промышленности.

Проблема регуляризации микрорельефов решена в СНГ, благодаря чему положено новое начало в теории микрогеометрии технических поверхностей и практике технологического обеспечения требуемых эксплуатационных свойств деталей и функциональных характеристик машин и приборов. В результате многолетних исследований разработаны теоретические основы, созданы и внедрены в производство простые в использовании способы и технологии образования на рабочих поверхностях деталей регулярных микрорельефов, многократно улучшающих эксплуатационные свойства деталей. Для реализации способов созданы инструменты, приспособления для виброобработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) с источниками вибрации и без них, семейство станков и виброустановок.

В результате образования регулярной микрогеометрии в виде полностью регулярного микрорельефа (ПРМР) и частично регулярного

микро рельефа (ЧРМР) можно за счет изменения параметров вибронака-
тывания (вибровыглаживания) и инструмента обеспечивать разные зна-
чения относительных опорной площади F_{on} и площади F_H канавок (вы-
ступов), глубины h канавок (высоты выступов) неровностей, числа $N_э$
элементов на единице площади поверхности, углов направления γ (γ_1 и
 γ_2) следов обработки и θ , $\gamma_э$, $\beta_э$ элементов, плотности N_n и N_p и шага S_K
расположения неровностей, превышения h_n регулярных поднутренных
неровностей (РПН) в виде приканавочных наплавов над уровнем $Rz(R)$,
радиусов r округления выступов неровностей, отношения r/R_{max} и дру-
гих параметров микрогеометрии поверхностей деталей. Следует также
отметить факторы физико-механических свойств обработанного ППД
материала и, в частности, микроструктуры M_c , микротвердости H_μ , тол-
щины упрочненного слоя h_σ , напряжений в подповерхностном слое σ .

Все РМР можно подразделить на одноуровневые (ОУРМР) с по-
стоянными значениями параметров и двухуровневые (ДУРМР) с чере-
дующимися двумя значениями переменных параметров с РПН и без них
(рис. 5.12 и 5.13). Поперечные сечения поверхностей с ЧРМР (а) и
ПРМР (б) и виды на РМР сверху (в, г) показаны на рисунке 5.14.

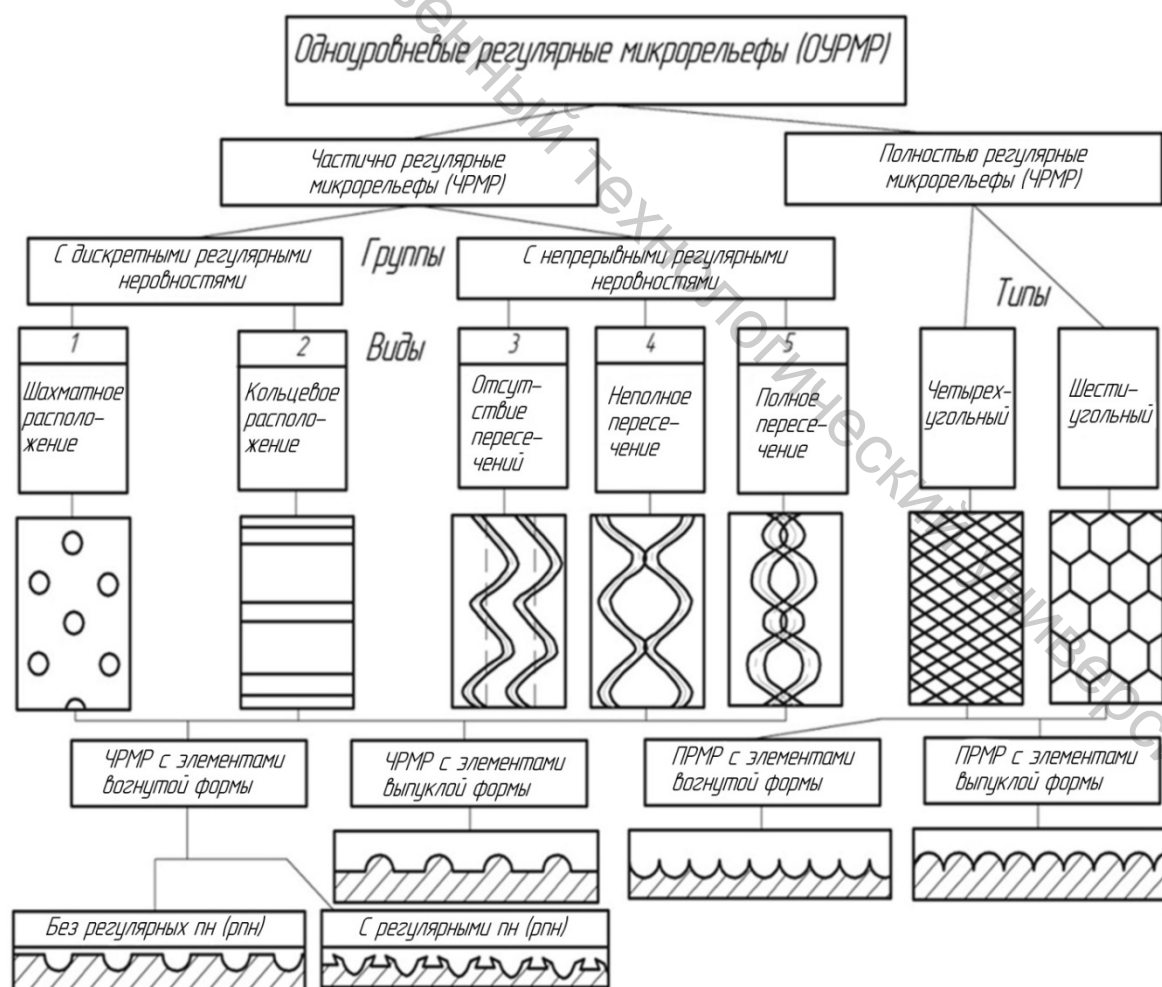


Рисунок 5.12 – Классификация одноуровневых РМР

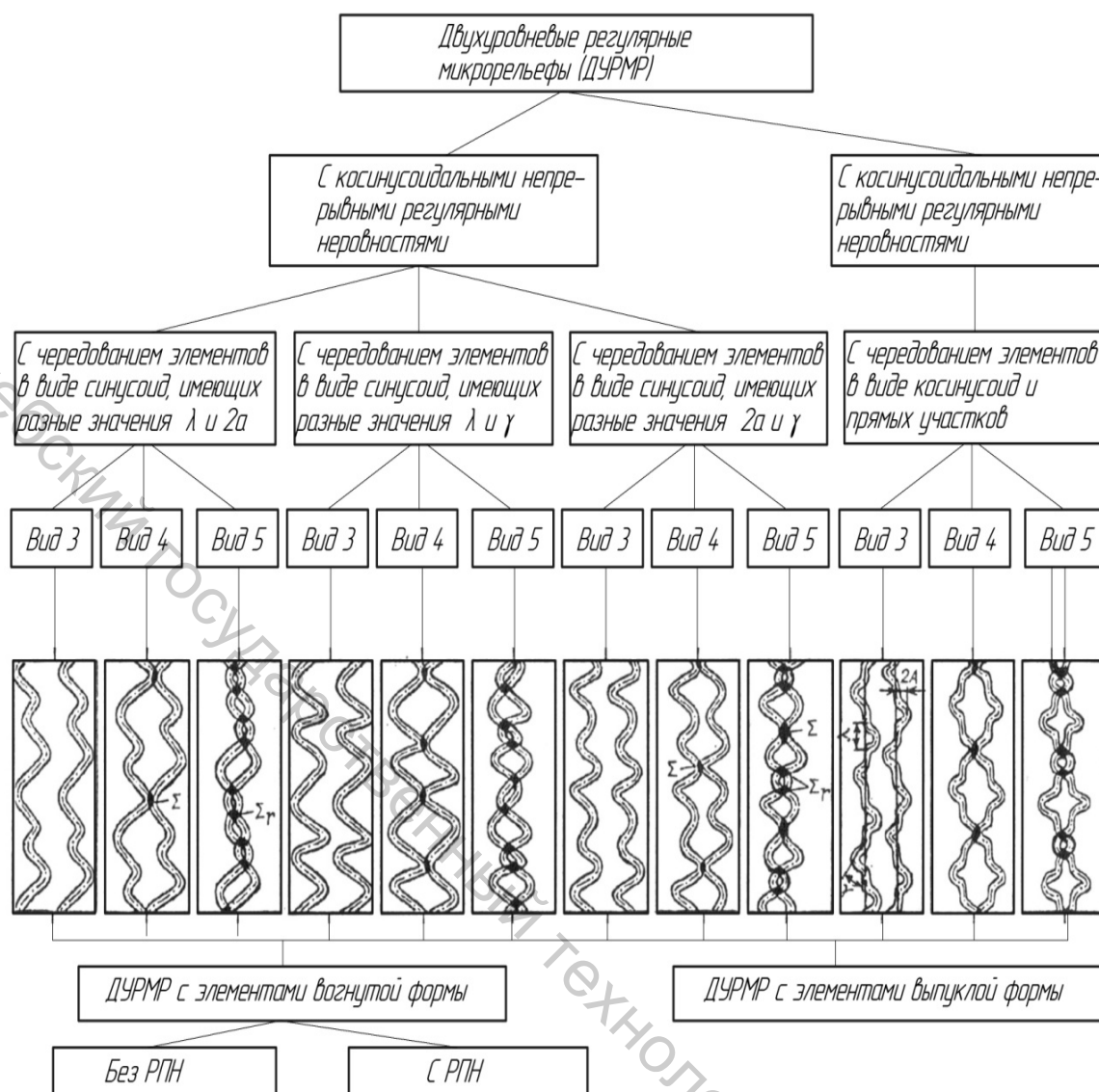


Рисунок 5.13 – Классификация двухуровневых РМР

В отличие от абразивных видов отделочной обработки предложенные способы вибрационного ППД имеют решающие преимущества, обусловленные экологической чистотой, простотой, дешевизной и надежностью образования РМР, а также созданием упрочненного подповерхностного слоя материалов деталей. Виды обработки ППД представлены ниже. Для всех технологий обработки выявлены зависимости получаемых параметров РМР от параметров режимов обработки ППД (частоты вращения и вибрации, подача и сила поджима инструмента к поверхности, радиусы сферы шаров и алмазных наконечников и скругления роликов, амплитуда колебаний и размах гофр инструмента и др.) для разных по твердости материалов и различных по размерам и конфигурации деталей.

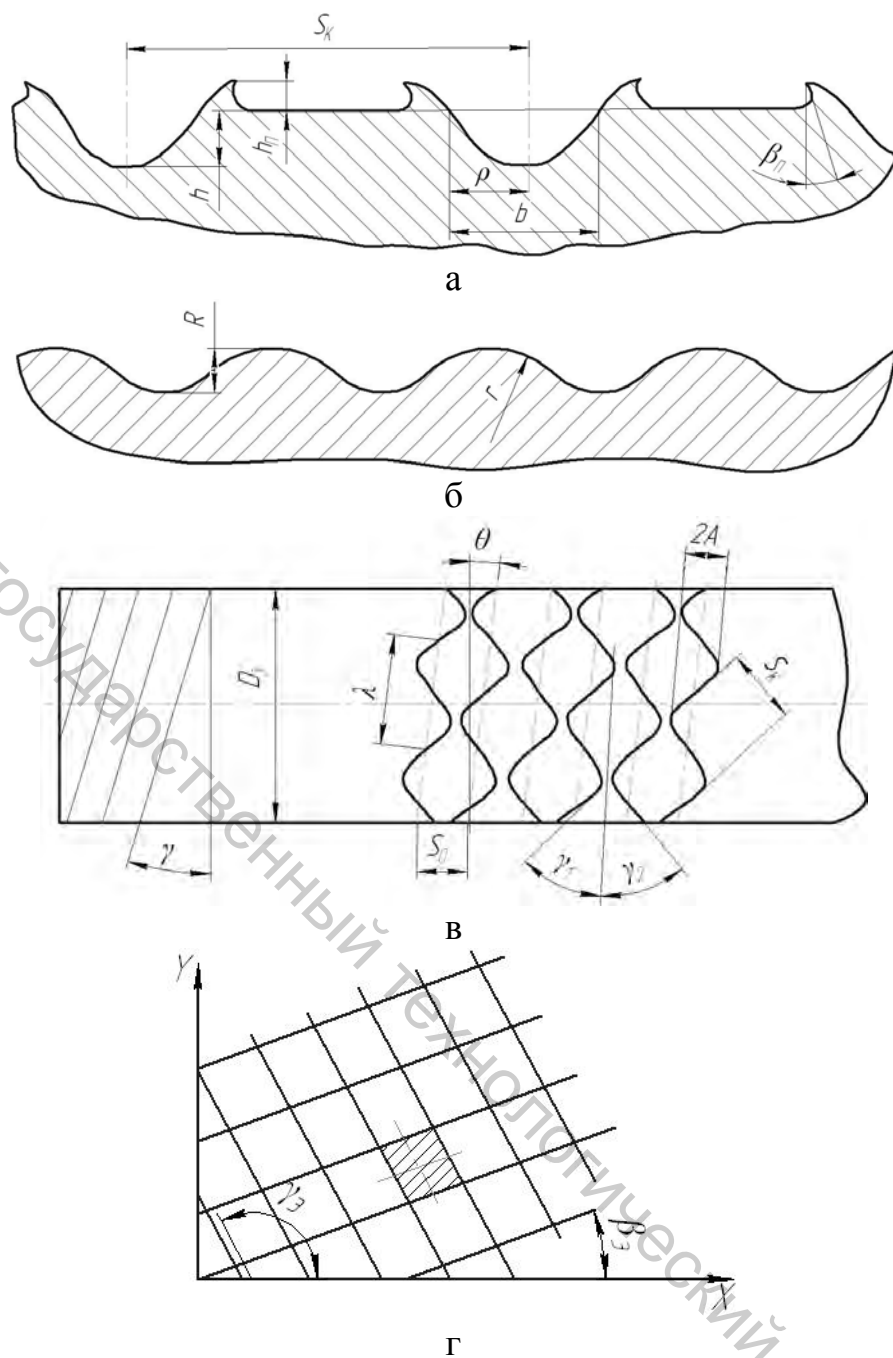


Рисунок 5.14 – Поперечное сечение (профиль) поверхностей:
а – с ЧРМР, б – ПРМР, в, г – вид на РМР сверху

5.3.1.3 Взаимосвязь микрогеометрии рабочих поверхностей и свойств подповерхностного слоя материала с эксплуатационными свойствами деталей и соединений

Практика использования в изделиях машино- и приборостроения деталей с различными параметрами микрогеометрии поверхностей поз-

волила выявить взаимосвязь более 40 эксплуатационных свойств деталей и пар с различными параметрами микрогеометрии поверхностей и подповерхностного слоя материала деталей. Зависимость некоторых свойств от параметров микрогеометрии и материала представлена на рисунке 5.15 [98–101].

Ниже приведены примеры машино- и приборостроительных изделий, эффективность использования которых повысилась благодаря регуляризации микрогеометрии поверхностей и упрочнения подповерхностного слоя материала деталей.

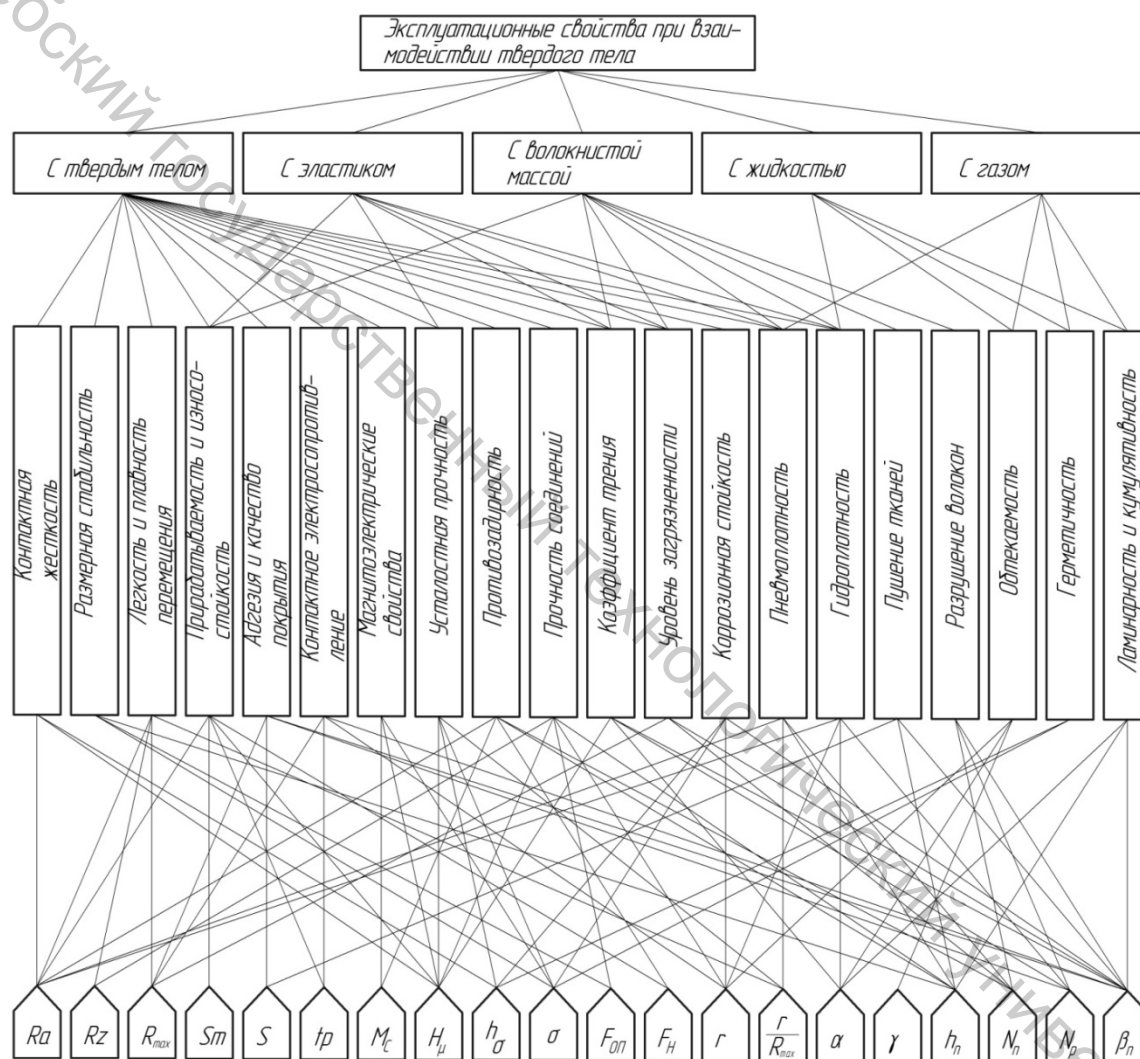


Рисунок 5.15 – Эксплуатационные свойства деталей и соединений и их зависимость от параметров микрогеометрии рабочих поверхностей и состояния подповерхностного слоя материала

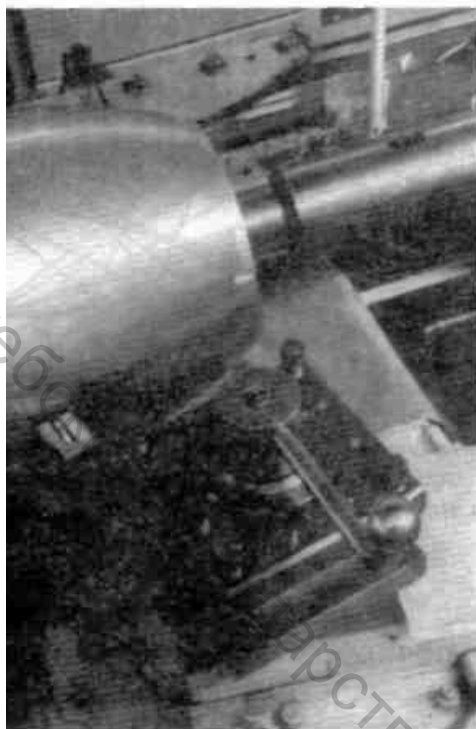
Литые корпуса из алюминиевого сплава марки АЛ4 используются для размещения приборов, работающих в морской воде. Основными требованиями к корпусам являются герметичность, чистота поверхности и подповерхностного слоя литого (пористого) основного материала пе-

ред покрытием, тщательная отделка фасонной поверхности и наименьшее отклонение формы от заданного контура. Традиционно корпуса обрабатывались обтачиванием по копиру, затем шлифовались гибкой абразивной лентой для обеспечения шероховатости поверхности $Ra = 0,32 - 1,25$ мкм. При снятии литейной корки вскрывались раковины и поры металла, которые способствовали загрязнению поверхности и подповерхностного слоя материала и приводили к нарушению герметичности корпусов. Возникающая течь устранялась заваркой с последующей зачисткой и термообработкой заготовок. При этом искажалась форма обточенного корпуса из-за появления в местах заварки утяжки, снижалась прочность корпусов из-за разнородности основного металла и металла в местах заварки, появлялись значительные дополнительные затраты на заварку, доработку и термообработку заготовок. До 27 % обработанных на 90 % заготовок уходило в брак. При вибрационном ППД перечисленные недостатки устраняются.

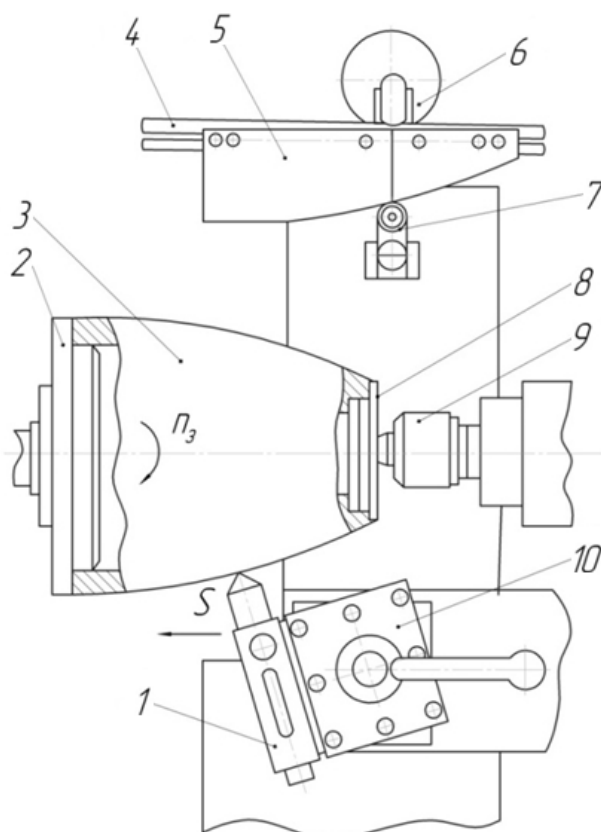
Обработка корпусов вибронакатыванием профильным роликом на токарно-винторезном станке показана на рисунке 5.16. Корпус 3 цилиндрической поверхностью большой горловины устанавливается на палец планшайбы 2 передней бабки и через съемную планшайбу 8, размещаемую своим пальцем в отверстие малой горловины, подпирается вращающимся центром 9 задней бабки. Поперечная каретка суппорта отключается от винта подачи. С помощью специального натяжного устройства, состоящего из кронштейнов, шкивов, троса и груза 6, соединенный с суппортом станка ролик 7 постоянно контактирует с установленным на раме 4 копиром 5.

При продольном перемещении с подачей S суппорт вместе с приспособлением 1, установленным в резцедержателе 10, с профильным роликом описывает кривую в соответствии с рабочим контуром копира 5. Таким образом, поджимаемый к заготовке профильный ролик образует на поверхности ПРМР, закатывает поры и раковины (размерами до 0,3 мм), упрочняет подповерхностный слой материала толщиной до 0,5 мм, исключает абразивную обработку и загрязнение поверхности и металла. Более 80 % мест течи при этом устраняется, обеспечиваются требуемая точность контура, высокое качество покрытия и упрочнение корпусов. В результате более чем в 5 раз уменьшается необходимость заварки, возрастает прочность корпусов, улучшается адгезия лакокрасочных покрытий, надежно обеспечивается герметичность корпусов, а брак деталей по отклонению контура фасонной поверхности и поломкам при гидropневмоиспытаниях снижается с 27 до 2 %.

Путем обработки заготовок ППД можно повышать сопротивление коррозии деталей за счет увеличения радиусов выступов и впадин микронеровностей при образовании ПРМР, а также за счет повышения адгезии и закатывания пор гальванически или химически наносимых металлических покрытий.



а



б

Рисунок 5.16 – Отделочно-упрочняющая обработка литых корпусов:
а – на токарно-винторезном станке мод. 16К20, оборудованном рамой с копирным устройством, б – схема обработки ППД по копиру

На рисунке 5.17 показан палец дифференциала из стали 18ХГТ трактора Х-151, левая сторона которого обработана алмазным выглаживанием сферическим наконечником из искусственного алмаза на токарно-винторезном станке с обеспечением Ra от 0,18 до 0,32 мкм, а правая сторона по ранее существующей технологии была подвергнута шлифованию с обеспечением шероховатости Ra 0,22 мкм.

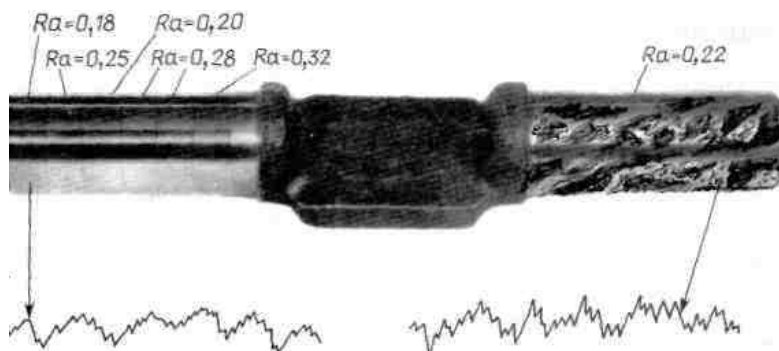


Рисунок 5.17 – Палец дифференциала трактора Т-151 после испытания на коррозионную стойкость и профилограммы рабочих поверхностей пальца слева с ПРМР и справа с шероховатостью

После года хранения правая сторона пальца, обработанная шлифованием, интенсивно корродировала, при этом первые следы коррозии появились уже на 11-й день после обработки. На левой стороне, обработанной ППД с обеспечением ПРМР, за год хранения детали появились лишь первые признаки коррозии. В прецизионных парах азимутальных шаровых гироскопов от состояния сферической рабочей поверхности аэродинамической опоры (чаши) зависят точность и надежность работы ротора и всей механической системы. Отделочно-упрочняющая обработка чаш виброраскатыванием и вибровыглаживанием обеспечивает изменение параметров микрогеометрии сферической поверхности и состояния подповерхностного слоя литого материала (бронзы марки БрО8С12), приводит к закатыванию (заглаживанию) мелких пор и раковин, исключает загрязнение поверхности и металла продуктами шлифования и доводки, повышает противозадирность деталей. Приобретенные после вибрационного ППД характеристики рабочей поверхности и металла послужили основой для создания аэродинамической опоры с новыми свойствами (табл. 5.8).

На рисунке 5.18 показаны новая чаша-опора и схема работы подвеса ротора в аэростатическом ($\langle \text{---} \rangle$) и аэродинамическом ($\langle \text{----} \rangle$) режимах. В новой опоре (табл. 5.8, рис. 5.18) цилиндрическая выточка заменена на коническую с углом наклона образующей $10\text{--}12^\circ$. Рабочая поверхность опоры 2 имеет пологие обтекаемой формы микроповерхности 3 в направлении движения газа в режиме эксплуатации гироскопа. Из рассмотрения разверток 4 круговых сечений *A* и *B* следует, что микро-рельеф поверхности имеет равные число и суммарную площадь впадин во всех круговых сечениях опоры, что достигается постоянным значением числа $n_{\text{дв. х.}}$ двойных ходов инструмента при виброраскатывании (вибровыглаживании) сферической поверхности. Это обеспечивает равномерное давление во всех точках зазора, что очень важно для запуска гироскопа, когда газ под давлением подается через отверстие опоры и проходит через зазор между ротором 1 и опорой 2.

Таблица 5.8 – Характеристики рабочей поверхности

Характеристика	Опора		Изменение характеристик новой опоры по сравнению с существовавшей
	Ранее существовавшая	Новая	
Конструкция			
Форма поверхности выточки	Цилиндрическая	Коническая	Угол между образующей конуса 10–120
1	2	3	4
Параметры микрогеометрии			
R_{max} , мкм	2	1,67	Уменьшение на 16,5 %
σ_p , мкм	0,81	0,30	Уменьшение в 2,7 раза
r , мкм	41	5000	Увеличение в 122 раза
r/R , мкм	20,5	3000	Увеличение в 146 раз
α , град	14,5	3,5	Уменьшение в 4,6 раза
γ_{cp} , угл. мин	10	4,2	Увеличение в 90 раз
$F_{он}$, %	0,31	4,2	Увеличение в 13,5 раз

Окончание таблицы 5.8

1	2	3	4
Количество впадин круговых сечений.	Переменное	Постоянное	Улучшение свойств
Сумма площадей впадин круговых сечений.	Переменное	Постоянное	Улучшение свойств
Наличие поднутренных неровностей	Есть	Нет	Улучшение свойств
Физико-механические свойства подповерхностного слоя материала			
Микротвердость H_μ	210	275	Увеличение на 30 %
Степень упрочнения, %	21,1	56,1	Увеличение в 2,7 раза
Толщина упрочненного слоя h_σ мкм	15,6	28,6	Увеличение в 1,8 раза
Эксплуатационные свойства			
Коэффициент трения в паре опора – ротор.	0,18	0,13	Уменьшение на 28 %
Противозадириность, число запусков-остановок до появления задигов.	2	9	Увеличение в 4,5 раза
Движение газа в зазоре.	Турбулентное	Ламинарное	Повышение работоспособности опоры и аэродинамического подвеса ротора; улучшение качества и надежности работы гироскопа
Давление газа в зазоре.	Переменное	Постоянное	
Работа подвеса и гироскопа	Неспокойная, с нестабильными показаниями	Спокойная, со стабильными показаниями	
Примечание: σ_p – среднее квадратическое отклонение высотных параметров микрогеометрии поверхности.			

После достижения ротором частоты вращения $n_p > 5000 \text{ мин}^{-1}$ (при $D_p = 101 \text{ мм}$, $v > 1586 \text{ м/мин}$) гироскоп переводится на аэродинамический режим работы, когда подъемная сила создается клиновым эффектом при нагнетании (самозатягивании) газа, например гелия, в зазор поверхностью вращающегося ротора.

Испытания на вибростенде и практика использования в изделиях показали, что среднее число касаний ротора с обработанными ППД чашами составляет 33,2, а с расточенными – 143,6. Таким образом, новые чаши обеспечивают высокую степень ламинарности перемещения газа в зазоре и спокойную, стабильную работу аэродинамического подвеса. Они обладают высокими противозадиристыми свойствами и снижают загрязненность зазора в процессе эксплуатации гироскопа за счет исключения загрязнений на рабочей поверхности (в подповерхностном слое материала) и «выдувания» их в зазор, а также разрушения (отрыва) поднутренных неровностей в виде микрозаусенцев от поверхности детали потоком газа, что способствует также повышению точности и надежности работы гироскопа. При этом исправимый брак деталей (необходимость переработки) снизился с 97 до 6 %, ресурс работы гироскопа повысился в 4,5 раза, а затраты на обслуживание гиросистемы снизились в 2 раза.

Эффективным в отношении прочности неподвижных соединений оказалось образование ЧРМР в виде системы канавок (ОУРМР вида 4 с

РПН на рисунке 5.12 с $F_H = 30 \%$, $h = 0,04$ мм, $h_n = 0,02$ мм) взамен ранее производившихся грубого обтачивания или нарезания резьбы на стальном стержне, предназначенной для предотвращения смещения резиновой втулки относительно этого стержня. Такое соединение обеспечивается надеванием радиально растянутой и обработанной холодом (замороженной) резиновой втулки на стержень с последующим размораживанием резины и используется в резинометаллических подшипниках в шарнирных соединениях гусеничных тракторов. В результате образования ЧРМР прочность соединения возросла более чем на 25 %, а осевое смещение втулок на стержнях в период эксплуатации тракторов исключено вплоть до полного изнашивания деталей и выхода из строя подшипника по износу.

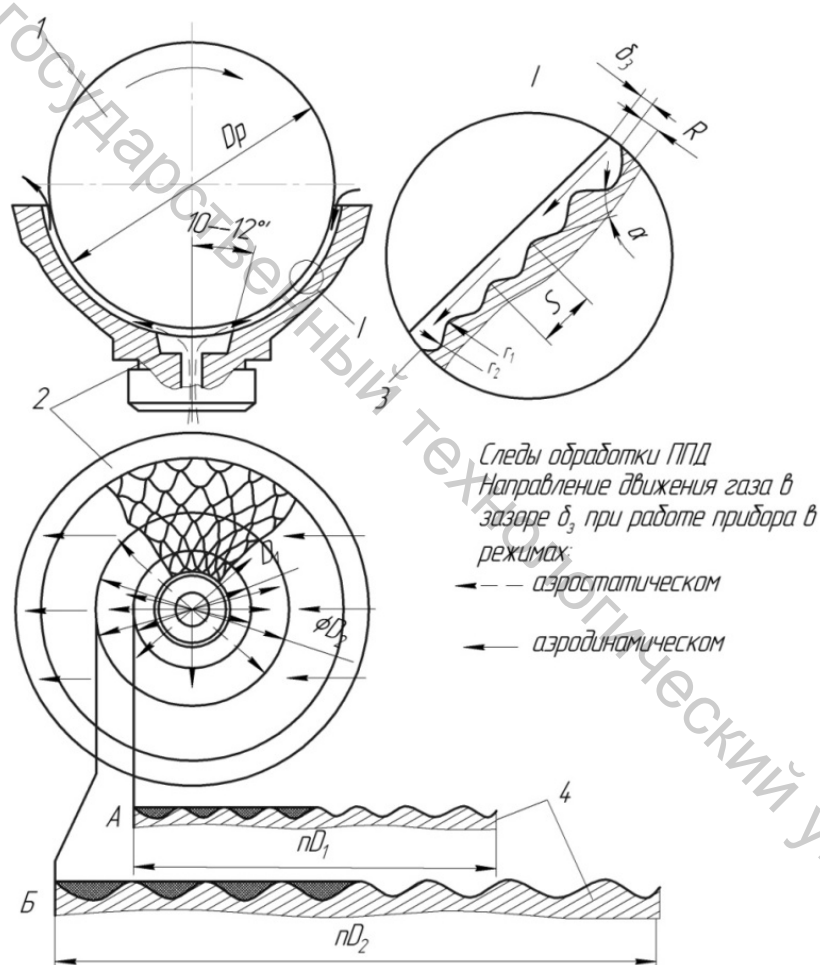


Рисунок 5.18 – Аэродинамическая опора (подшипник) с ПРМР на сферической рабочей поверхности, ее характеристики и схема работы аэродинамического подвеса ротора

Вибрационное ППД в режиме образования ЧРМР различных сочетаний может повышать маслосъемность поверхностей и сопротивление деталей изнашиванию и схватыванию. На рисунке 5.19 показаны детали

двигателей внутреннего сгорания с ЧРМР, ресурс работы которых увеличен в 1,7–2,2 раза.

Приведенные примеры использования деталей с нерегулярной (шероховатостью) и регулярной (РМР) микрогеометрией поверхностей, с неупрочненным (малоупрочненным) и упрочненным ППД подповерхностным слоем материалов показывают, что улучшение свойств деталей наиболее эффективно достигается за счет комплексного влияния факторов микрогеометрии их рабочих поверхностей и физико-химического состояния подповерхностного слоя материалов.

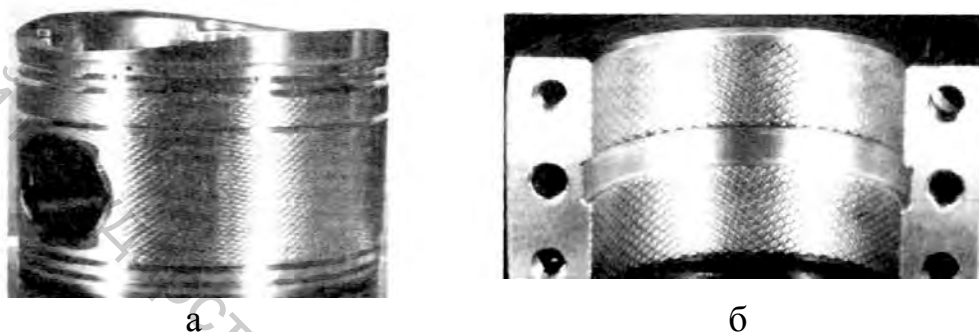


Рисунок 5.19 – Поршень и крышка подшипника детали двигателя с регулярным микрорельефом на наружной и внутренней цилиндрических рабочих поверхностях:

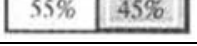
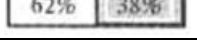
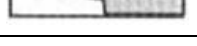
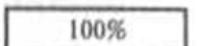
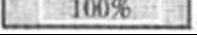
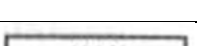
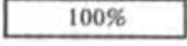
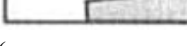
а – поршень; б – крышка подшипника

В таблице 5.9 приведены ориентировочные показатели улучшения некоторых эксплуатационных свойств и характеристик деталей и соединений с учетом воздействующих факторов, обеспечиваемых как механической обработкой, так и покрытиями, химико-термическим, лазерным, ультразвуковым и другим воздействием на материалы.

Таблица 5.9 – Показатели улучшения некоторых эксплуатационных свойств и характеристик деталей

Свойство и характеристика	Повышение (+), снижение (-) показателей	Предел улучшения показателей	Влияние факторов микрогеометрии поверхности и со- стояния материала
1	2	3	4
Коэффициент трения: титановые сплавы другие материалы	- -	До 3 раз	
Загрязненность поверхно- стей и зазоров	-	На 10–30 %	
Размерная стабильность и точность	+	В 10 и 2,5 раза	
Электросопротивление ма- териала	+	В 2 раза	

Окончание таблицы 5.9

1	2	3	4
Переходное электросопротивление соединений	-	До 11 %	
Магнитные характеристики деталей	+	На 25 %	
Время приработки и прирабочный износ	-	На 30 %	
Износостойкость	+	В 1,4–9 раз	
Противозадирность	+	В 1,12–5,3 раза	
Прочность деталей и неподвижных соединений	+	В 1,18–2 раза	
Легкость сдвига и плавность перемещения деталей в соединениях	+	До 2,7 раза	
Ламинарность перемещения газа в малых зазорах	+	В 4 раза	
Коммулятивность струи	+	Значительно	
Герметичность деталей	+	На 80 %	
Гидроплотность и ресурс безотказной работы подвижных соединений	+	В 2 раза	
Пневмоплотность и ресурс безотказной работы подвижных соединений	+	До 3,2 раза	
Коррозионная стойкость	+	Значительно	
Адгезия слоя покрытия	+	На 21–31 %	
Примечание:  – влияние фактора микрогеометрии рабочих поверхностей;  – влияние фактора физико-химического состояния материала;  – преимущественное влияние одного из факторов качества деталей (в данном случае микрогеометрии рабочих поверхностей).			

Таким образом, регуляризация микрогеометрии технических поверхностей и упрочнения материалов открывает новые возможности в технологии обработки материалов. При этом улучшаются качество и эксплуатационные свойства деталей и соединений, снижаются затраты на обработку и уменьшается брак заготовок, повышается ресурс и надежность работы изделий, уменьшаются средства на ремонт и обслуживание машин и приборов.

5.3.1.4 Отделочно-упрочняющая обработка ППД, оборудование и инструменты

При поверхностном пластическом деформировании (ППД) возрастают прочностные характеристики и снижаются параметры пластичности обработанных материалов, искажается их структура, создаются благоприятные сжимающие напряжения, повышаются твердость, степень упрочнения и толщина подповерхностного упрочненного слоя. Кроме изменения физико-механических свойств подповерхностного слоя металла, при обработке ППД происходит сглаживание неровностей, оставшихся от предшествующей обработки (рис. 5.20). Деформирующий инструмент 6 поджимается с силой P к вращающейся с частотой n_3 заготовке 5 и перемещается с подачей S вдоль ее оси [98–101].

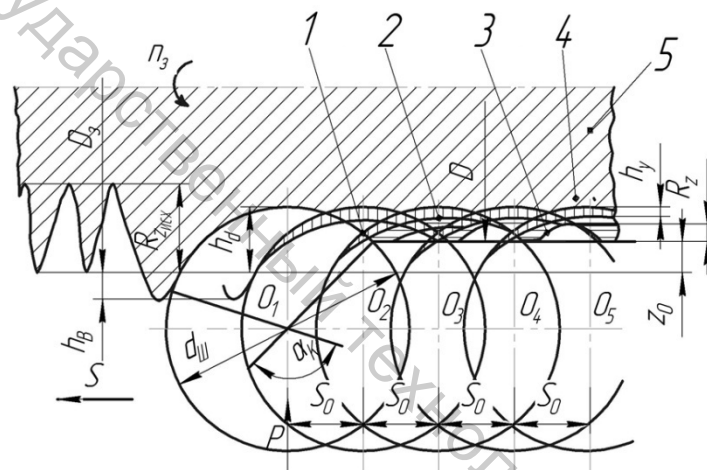


Рисунок 5.20 – Схема деформации поверхности и материала при отделочно-упрочняющей обработке ППД:

- 1 – зона пластической деформации; 2 – зона упругой деформации;
- 3 – поперечная шероховатость поверхности после обкатывания;
- 4 – профиль следа шара; 5 – заготовка; 6 – инструмент; O_1-O_5 – положения центра шара при перемещении с подачей S_0 , на оборот заготовки; $Rz_{исх}$, Rz – высоты неровностей исходной и накатанной поверхностей; Z_0 – пластическая деформация поверхности; h_y – упругая деформация материала; h_d – глубина внедрения инструмента; h_b – высота выступа деформируемого материала; α_k – угол контакта шара обрабатываемым материалом

В настоящее время используются различные приемы обработки ППД, в том числе и способы, осуществление которых связано с трением качения и трением скольжения инструмента по обрабатываемой поверхности, вибрацией инструмента, ударным воздействием рабочих тел и

инструмента на обрабатываемую поверхность, а также комбинированные и совмещенные процессы обработки с применением ППД.

На использовании трения качения основаны различные способы накатывания поверхностей. В качестве деформирующих элементов при этом применяются стальные и твердосплавные шары и ролики различной формы. По целевому назначению накатывание подразделяется на сглаживающее, формообразующее, калибрующее и упрочняющее.

На использовании трения скольжения основаны процессы выглаживания поверхностей, дорнование и редуцирование. Наибольшее распространение получили алмазное выглаживание и дорнование. Способ выглаживания поверхностей алмазными наконечниками можно применять при обработке деталей из металлов различной твердости, включая закаленные стали, и нельзя для обработки титановых сплавов, циркония и ниобия, что связано со специфическими свойствами этих металлов и возможным взаимодействием их с алмазом.

Дорнованием называется процесс ППД при поступательном скольжении деформирующего инструмента по охватываемой поверхности деформируемого материала. Дорнование используется для обработки отверстий, когда инструмент – дорн 2 (рис. 5.21) с силой P_T проталкивается через обрабатываемое отверстие заготовки 1.

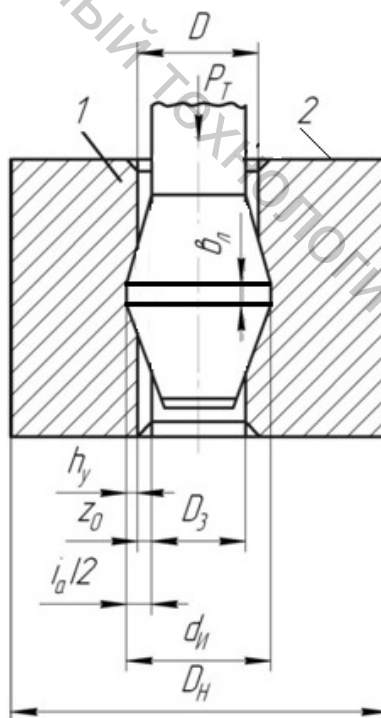


Рисунок 5.21 – Параметры дорна и режима дорнования:

1 – обрабатываемая заготовка; 2 – дорн; h_y – упругая деформация материала; z_0 – пластическая деформация; P_T – сила проталкивания дорна через отверстие; i_a – натяг

Важное место среди способов обработки ППД занимают процессы с вибрацией деформирующего инструмента. В настоящее время получил распространение способ обработки ППД – вибрационное накатывание.

Установлено, что с усложнением кинематики движения инструмента при ППД значительно улучшаются условия протекания процесса пластической деформации. Это можно наблюдать по изменению глубины h формируемой на поверхности канавки (рис. 5.22) при обкатывании заготовки диаметром 39,5 мм шаром $d_{ш} = 5,6$ мм (1 – без подачи; 2 – с подачей; 3 – с подачей и вибрацией инструмента). По мере усложнения кинематики движения шара глубина канавки h возрастает и достигает максимального значения при виброобкатывании. Глубина следа инструмента зависит также от материала обрабатываемой заготовки.

По источнику возникновения колебаний вибрационная обработка ППД может быть трех видов: с источником вибрации, который является специальным устройством; включающая сочетание двух движений, например вращательных; с использованием специального инструмента с колеблющимся в процессе накатывания рабочим контуром. Наиболее распространен первый вид обработки, но он связан с необходимостью создания специальных виброголовок, с усложнением обработки фасонных поверхностей, а также с отрицательным влиянием вибрации на оборудование и высокого уровня шумов на человека. Вибрационная обработка второго типа успешно используется для сферических поверхностей деталей, однако для целого ряда деталей ее возможности ограничены. Все более широкое применение находит обработка третьего вида, осуществляемая с помощью специальных роликов без источников вибрации.

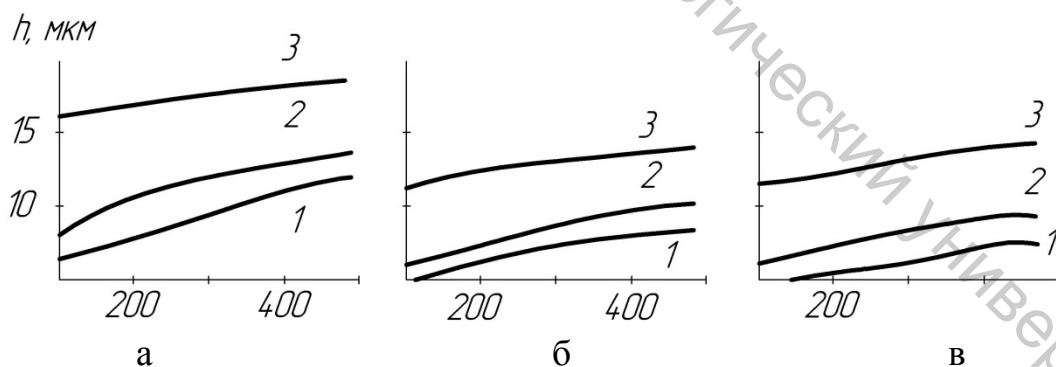


Рисунок 5.22 – Изменение глубины канавки h при обкатывании:
а – стали 12X18H10T, б – никелевого сплава ХН67ВМТЮ,
в – титанового сплава ВТЗ-1 (в)

Устройства для возбуждения вибрации подразделяются по виду привода на механические и электромеханические, механогидравлические, электромагнитные, пневматические и др.

С помощью вибрации инструмента в осевом направлении (в направлении подачи) успешно решаются такие сложные вопросы механической обработки ППД, как образование высокоэффективных регулярных микрорельефов и повышение эффективности пластической деформации материала. Вибрация в радиальном (перпендикулярном к обрабатываемой поверхности) направлении используется при ультразвуковых процессах ППД. Переменное направление вибрации имеет место, например, при выглаживании вращающимся сферическим алмазным наконечником, ось сферы которого смещена относительно оси вращения.

Наибольшими возможностями из существующих способов вибрационной обработки ППД обладают накатывание и выглаживание с низкочастотной вибрацией.

На рисунке 5.23 показаны схемы вибрационной обработки заготовки типа вала поверхностным пластическим деформированием с источником вибрации – обкатыванием шаром или выглаживанием алмазным наконечником (а, б); без источников вибрации – обкатыванием фасонным наклонным (в), профильными синусоидальным с радиальными гофрами в виде синусоид в сечении (г) и косинусоидальными с гофрами в виде косинусоид, перемежающимися с прямыми участками (д), роликами. Вибрация инструмента с частотой f_B при обработке деталей осуществляется в направлении подачи S (рис. 5.23 а, б). Обкатывание фасонными и профильными роликами (рис. 5.23 в-д) может служить примером вибрационной обработки, обеспечиваемой конструкцией обрабатывающего инструмента. Ультразвуковое выглаживание (рис. 5.23 е) осуществляется с вибрацией ультразвуковой частоты f_{BU} в направлении действия силы прижима P .

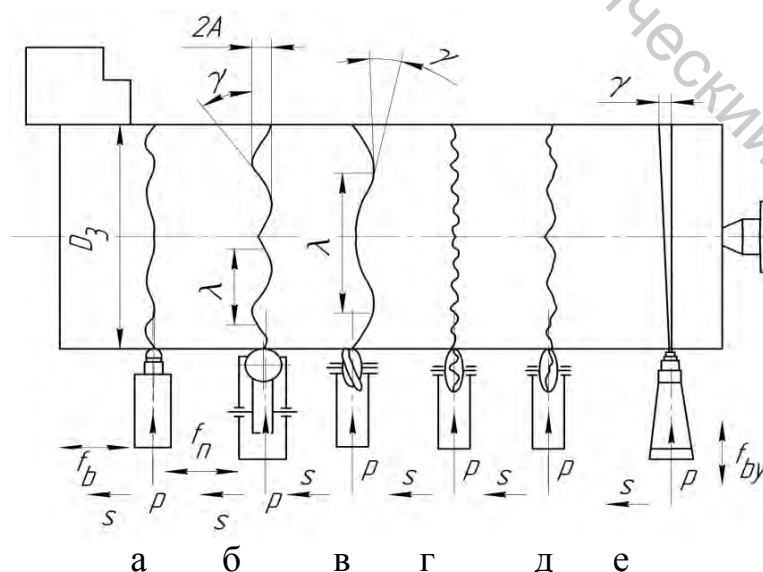


Рисунок 5.23 – Схемы вибрационной обработки ППД и параметры наносимых следов

Осуществление вибрационной обработки ППД шарами и алмазными наконечниками возможно с помощью виброустановок ВУ-2 – ВУ-5, оснащенных виброголовками резцедержателя. В ряде случаев для этих целей создается специальное оборудование, высокопроизводительные станки-автоматы и полуавтоматы для вибронакатывания и вибровыглаживания.

При изготовлении прецизионных деталей целесообразно использовать накатывание, алмазное выглаживание, вибронакатывание и вибровыглаживание. Особое место занимает вибронакатывание профильными роликами, не требующее виброголовок, исключаящее отрицательное влияние вибрации на станки и высокого уровня шума на человека и позволяющее без особых затруднений осуществлять обработку фасонных поверхностей по копиру.

Автоматизированное оборудование для обработки заготовок ППД наиболее эффективно при использовании в массовом и крупносерийном производствах.

Станок-автомат мод. 115ФСС для алмазного выглаживания заготовок деталей типа пальцев, осей, втулок (рис. 5.24) состоит из бункера 8 с трубчатым питателем 9, двух валков 12, привода 2, 3 с клиноременной передачей 13 и каретки с поджимающим 11 и выглаживающим 10 устройствами.

Устройства загрузочной зоны смонтированы наклонно к станине 1 так, что при загрузке создается гравитационный поток, облегчающий прохождение заготовок и самоподачу их при выглаживании.

Бесцентровое выглаживание заготовок реализуется с помощью выглаживающего устройства и двух приводных валков, размещенных на станине. Вращение валков осуществляется электродвигателем 2 через одноступенчатый редуктор 3 и клиноременную передачу 4. Для обеспечения бесступенчатой продольной подачи заготовок приводные валки установлены таким образом, что их оси в вертикальной плоскости перекрещиваются под определенным углом, величина которого может регулироваться. Обрабатываемые заготовкижимаются к приводным валкам двумя подпружиненными упорами устройства 11.

Автоматическая подача заготовок в зону обработки производится из загрузочного бункера по трубчатому питателю. Для облегчения заполнения заготовками последнего в загрузочном бункере предусмотрен ворошитель 7, приводимый в действие посредством червячного редуктора 6 и клиноременной передачи 5. Необходимая сила поджима алмазного выглаживателя к обрабатываемой поверхности обеспечивается размещенной в устройстве тарированной пружинной, сжатие которой регулируется.

Станок позволяет обрабатывать заготовки диаметром 10–20 мм и длиной 40–65 мм. Сила прижима инструмента 200–220 Н; частота вра-

щения приводных валков 40 мин^{-1} ; подача (бесступенчатая) – $0,1\text{--}0,10 \text{ мм/об}$; производительность $100\text{--}210 \text{ шт/ч}$.

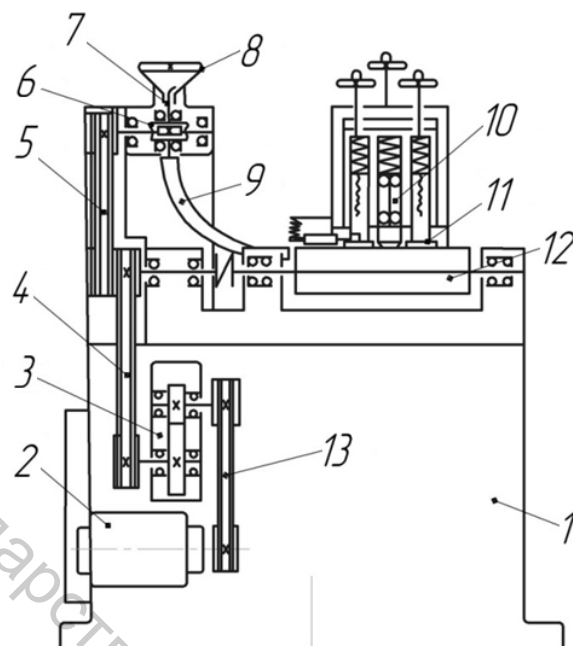


Рисунок 5.24 – Станок-автомат мод. 115ФСС для бесцентрового алмазного выравнивания цилиндрических гладких заготовок деталей типа пальцев, осей и длинных втулок

Наиболее часто в практике машиностроительных заводов для обработки ППД используются универсальные металлорежущие станки и станки с ЧПУ, оснащенные соответствующими приспособлениями.

Для обработки ППД, основанной на трении качения, используются деформирующие инструменты (рис. 5.25): шары (а); цельные без цапф и с цапфами ролики (б); прямые ролики с отверстиями диаметром $d_o(b)$, включающие сферические ролики с $r_p = d_p/2$, закругленные с $r_p < d_p/2$, с цилиндрической ленточкой и с торовой поверхностью; фасонные ролики (г), включающие клиновидные для обработки галтелей и наклонные ролики; профильные ролики (д), включающие синусоидальные ролики с постоянными и переменными параметрами рабочего контура и косинусоидальные ролики.

В качестве деформирующих шаров используются шарики от стандартных шарикоподшипников из стали ШХ15, а также шары из твердых сплавов ВК6М, Т15К6 и других материалов. Ролики обычно изготавливаются из сталей У10А, ХВГ, ШХ15, ЭХ12, а также из твердых сплавов ВК6М, ВК8М, минералокерамики марок ЦМ-332, ВОК-60, ОНТ-20. Минералокерамические ролики с цилиндрической или торовой поверхностью (рис. 5.25 в) используются для ротационного выравнивания. При этом наряду с поступательным движением вдоль обрабатываемой поверхности ролик сообщается за счет сил взаимодействия с обрабаты-

емой поверхностью дополнительно вращательное движение вокруг геометрической оси, которая перпендикулярна или наклонена к направлению подачи. Постоянная смена участка контакта инструмента с поверхностью в связи с непрерывным вращением ролика, активное воздействие смазочно-охлаждающих средств, непосредственно подаваемых на рабочую поверхность инструмента, периодическое восстановление на ней адсорбированных пленок окислов, малая теплопроводность, высокие адгезионная стойкость, твердость и красностойкость инструментальной минералокерамики позволяют при высокой стойкости инструмента обеспечивать скоростное высокоэнергетическое воздействие на поверхность и подповерхностный слой материала деталей. В результате специфических условий деформации в подповерхностном слое формируются мелкодисперсная структура и остаточные напряжения сжатия, сочетающиеся с высокой твердостью обработанного ППД материал и малой шероховатостью обработанной поверхности.

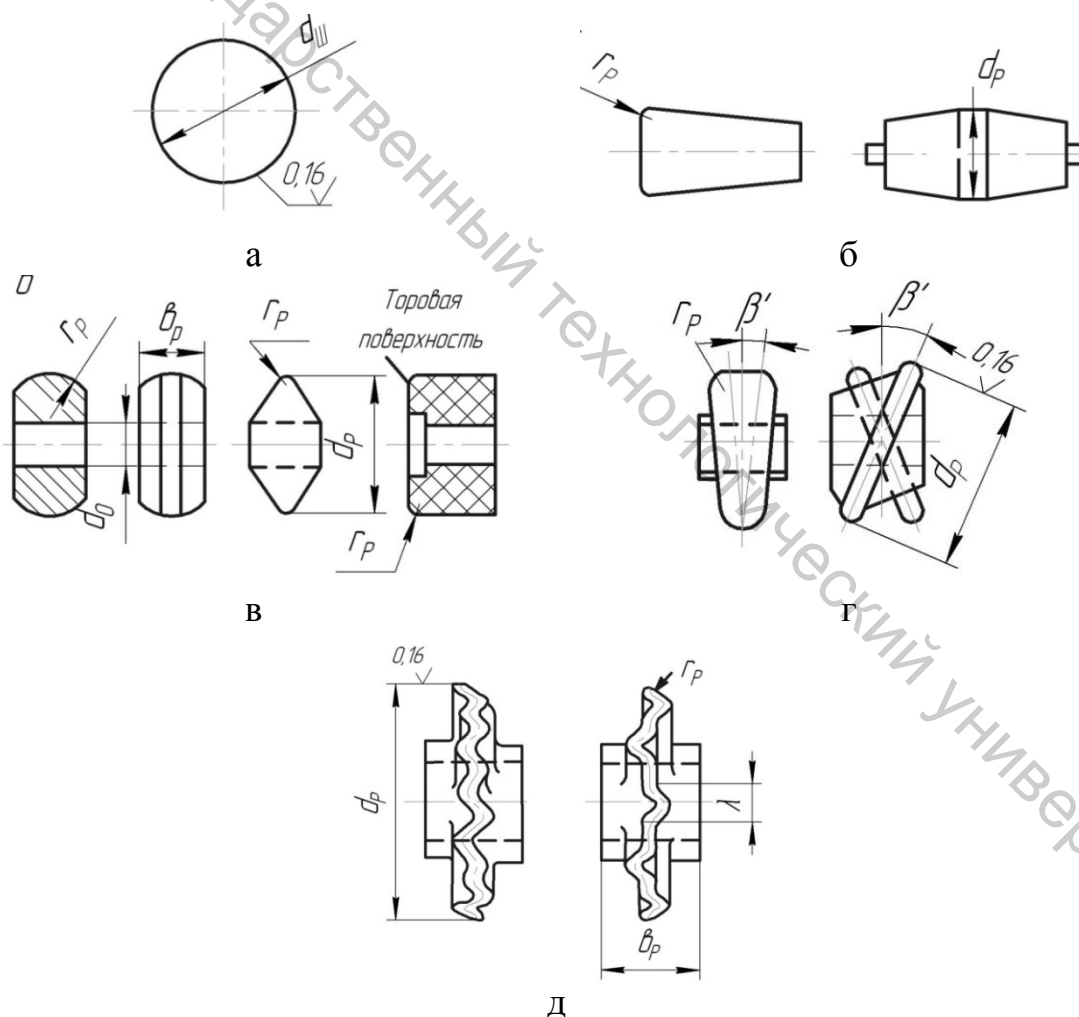


Рисунок 5.25 – Деформирующие инструменты, работающие в условиях трения качения:

а – шар; б – цельные ролики и ролики с отверстием:
в – прямые; г – фасонные; д – профильные

Ротационное выглаживание минералокерамическими роликами выполняется со скоростями и подачами, в 2–3 раза превышающими максимально допустимые при обычных схемах обработки. Метод обычно осуществляется на станках токарной группы и обеспечивает высокие результаты. Так, при выглаживании рабочих поверхностей заготовок из стали 40Х с исходными твердостью 180–197 *HВ* и шероховатостью по $Ra = 1,2\text{--}2,8$ мкм торковым роликом из минералокерамики ЦМ-332 при скорости $v = 10\text{--}120$ м/мин, подаче $S = 0,2\text{--}0,3$ мм/об достигаются шероховатость поверхности по $Ra = 0,08\text{--}0,2$ мкм; степень упрочнения 1,8–2,2; толщина упрочненного слоя 180–260 мкм; сжимающие остаточные напряжения 1200–1320 МПа, мелкозернистая структура подповерхностного слоя материала с ярко выраженной текстурой. Стойкость ротационного выглаживателя 100–120 мин.

Наклонные ролики наносят на поверхность следы в виде синусоиды (рис. 5.25 г) с длиной волны $\lambda_1 = \pi d_p$. Подобные следы оставляют при обработке галтелей и клиновидные ролики.

Профильные ролики с постоянными параметрами синусоидальных гофр образуют на поверхности следы с постоянными значениями параметров синусоид. Ролики с переменными параметрами гофр в виде синусоид и косинусоид в сечении, чередующихся с прямыми участками рабочего профиля, позволяют создавать двухуровневые регулярные микрорельефы (РМР). На рисунке 5.26 показаны разновидности профильных роликов.

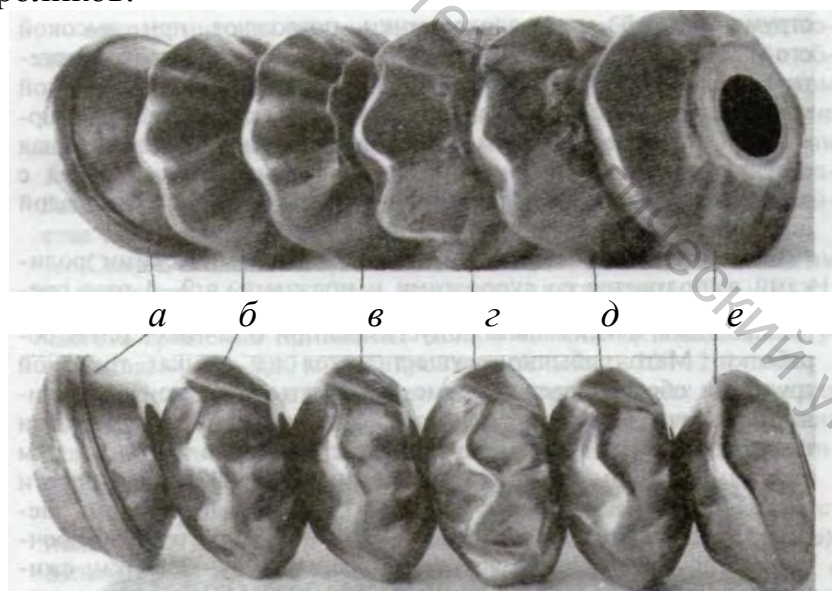


Рисунок 5.26 – Разновидности роликов:

а – прямой, б – синусоидальный с постоянными параметрами;
в-д – синусоидальные с переменными параметрами; е – косинусоидальный

Ролики с различным профилем рабочей поверхности наносят на поверхность разные следы обработки. На рисунке 5.27 показаны развертки следов обработки, производимых профильными роликами на ци-

линдрическую поверхность заготовок диаметром D_3 , с подачей S . Прямые синусоидальными роликами наносятся следы с постоянными значениями λ и $2A$ (рис. 5.27 а), с переменными значениями λ и $2A$ и постоянными значениями γ (рис. 5.27 б), с переменными значениями λ и γ и постоянным значением $2A$ (рис. 5.27 в), с переменными значениями $2A$ и γ и постоянным значением λ (рис. 5.27 г).

Применение наклонных профильных роликов обеспечивает нанесение синусоидальных или косинусоидальных следов, наложенных на синусоиду с длиной волны λ_i и амплитудой δ (рис. 5.27 д). Косинусоидальные ролики образуют след (рис. 5.27 е), состоящий из прямых участков, расположенных под углом γ_1 (к линии развертки), и участков в виде косинусоид, размещенных по обе стороны линии развертки цилиндрической поверхности заготовок под углом γ_2 .

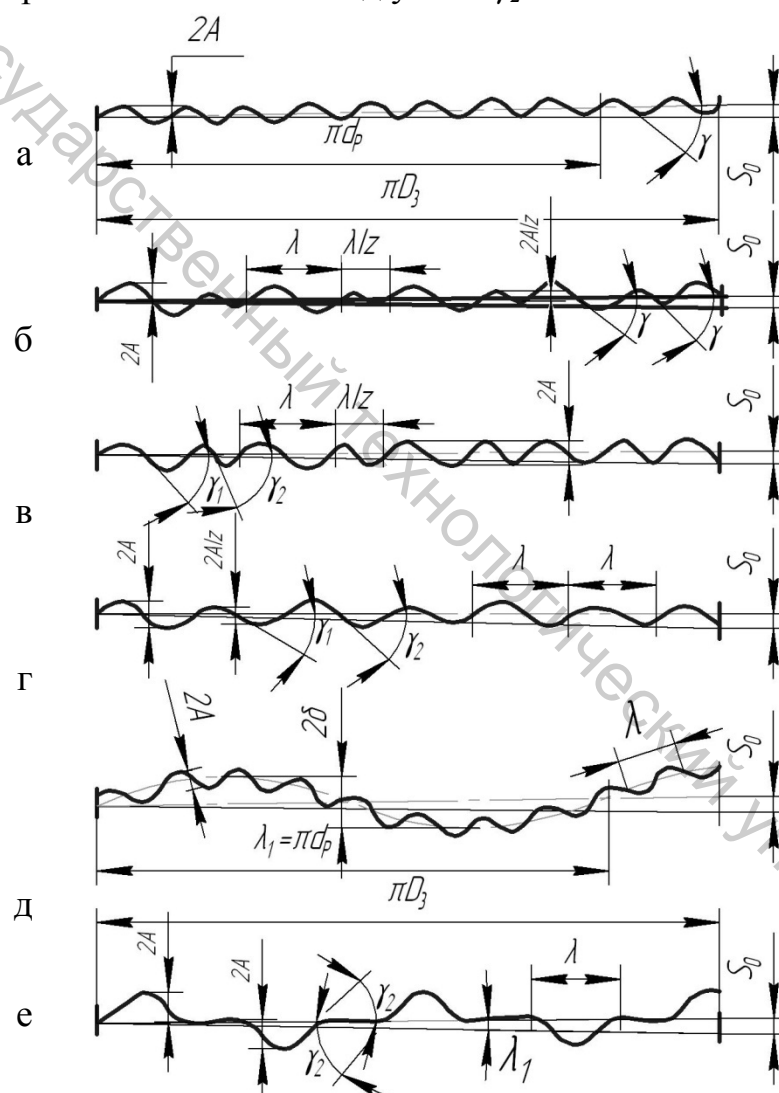


Рисунок 5.27 – Развертки следов обработки, наносимых профильными роликами

В зависимости от формы рабочего профиля ролика на обрабатываемую поверхность наносятся следы с постоянными или переменными

параметрами синусоид и косинусоид, что является основой переменного кинематического воздействия ролика на поверхность заготовки и создания поверхностей с переменными, заранее заданными направлениями следов обработки.

Расчет профильного ролика начинается с выбора угла γ наклона следов обработки из условий работы детали в машине. Установлено, что в большинстве случаев для улучшения износостойкости деталей целесообразно принимать $\gamma = 31\text{--}35^\circ$; для повышения сопротивления схватыванию $\gamma \approx 45^\circ$; для обеспечения улучшенных прочностных характеристик $\gamma \approx 60\text{--}65^\circ$.

По выбранному значению γ и принятой амплитуде $2A$ размаха гофр ролика (обычно $2A = 1\text{--}10$ мм) определяется длина волны λ гофр по формуле

$$\lambda = 4A / \operatorname{tg} \gamma,$$

где λ и $2A$ – в мм; γ – в град.

Для профильных синусоидальных роликов с переменными параметрами λ и $2A$ следует задавать коэффициент кратности z . Например, в случае, когда оба параметра переменные, то гофры в виде синусоид с λ и $2A$ будут попеременно чередоваться с гофрами в виде синусоид, имеющих параметры $\lambda_1 = \lambda/z$ и $2A_1 = 2A/z$. При этом угол γ следов обработки будет постоянным (рис. 5.27 б). Возможен и такой вариант, когда переменным задается один из параметров, например λ . Тогда синусоиды с λ и $2A$ будут попеременно чередоваться с синусоидами, имеющими параметры $\lambda_1 = \lambda/z$ и $2A$. При этом угол γ будет иметь значение γ_1 и γ_2 (рис. 5.27 в). В профильных косинусоидальных роликах длина прямых участков обычно равна длине косинусоид λ гофр.

Далее определяется диаметр ролика d_p , мм, по формулам:

– для синусоидального ролика с постоянным значением λ

$$d_p = \lambda m / \pi;$$

– для синусоидального ролика с переменным значением λ

$$d_p = (\lambda + \lambda/z) m / \pi;$$

– для косинусоидального ролика

$$d_p = 2\lambda m / \pi,$$

где λ – длина волны синусоиды (косинусоиды), мм; m – количество синусоид, косинусоид и прямых участков, укладываемое целое число

раз на длине πd_p (значение t принимается по конструктивным соображениям для обеспечения рационального значения d_p).

Ширина ролика b_p (см. рис. 5.25) в месте контакта с осью выбирается конструктивно. Диаметр d_o отверстия ролика под ось (цапфу) определяется из условия отсутствия контактных деформаций смятия в соответствии с принятым значением b_p по формуле

$$d_o = P/b_p [\sigma_{см}],$$

где P – сила поджима инструмента (обработки), Н; $[\sigma_{см}]$ – допускаемое напряжение смятия, МПа (обычно $[\sigma_{см}] = 15\text{--}25$ МПа).

Радиус r_p округления рабочего профиля ролика принимается равным 1–12 мм. Значение r_p зависит от твердости обрабатываемого материала и требований к шероховатости обработанной поверхности. Чем ниже твердость и выше требования к шероховатости по высотным параметрам, тем большее значение должен иметь радиус r_p .

Профильные ролики можно изготавливать различными способами, в том числе механической и слесарной обработкой, штамповкой, порошковой металлургией. Ниже изложена технология изготовления роликов механической и слесарной обработкой, наиболее приемлемой в мелкосерийном и единичном производствах. Этапы изготовления профильных роликов (рис. 5.28): 1 – изготовление заготовки на токарном станке с отверстием под чистовую обработку после термообработки; 2 – разметка профильной ленточки на наружной поверхности; 3 – фрезерование радиальных гофр и формирование профильной ленточки опилованием; 4 – радиусное округление ленточки опилованием и термообработка заготовки (сталь У10, закалка и отпуск до твердости 63 – 65 HRC); 5 – зачистка поверхностей от окалины, шлифование отверстия и полирование рабочего профиля ролика (6, 7).

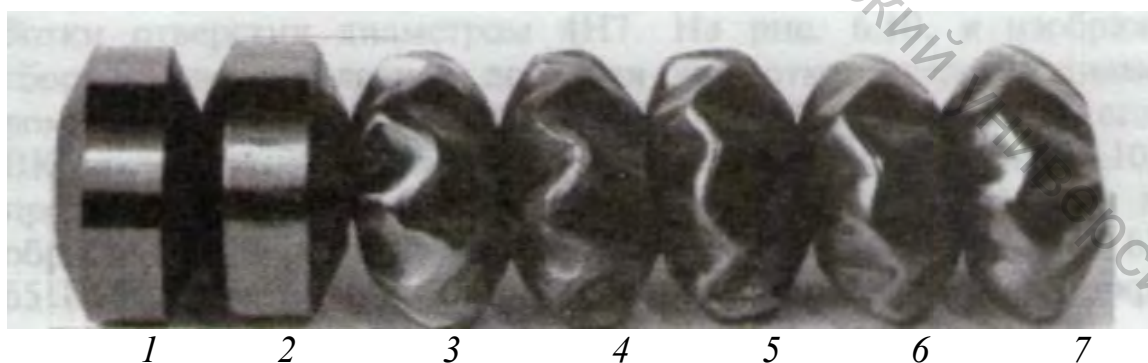


Рисунок 5.28 – Этапы изготовления профильных роликов механической и слесарной обработки

Применение профильных роликов вместо виброголовок оправдано технически и экономически. При накатывании профильными синусои-

дальними роликами шеек валов из стали 45 диаметром 50 мм шероховатость снижается при силе поджима $P = 500$ Н с исходной $Ra = 7,5$ мкм до 1,3 мкм, т.е. более чем в 5 раз.

Применение профильных роликов с переменным кинематико-динамическим воздействием значительно снижает необходимую силу поджима. Если для достижения шероховатости с $Ra = 1,3$ мкм при использовании обычного синусоидального ролика (с постоянным значением параметров волн синусоид) требуется сила $P = 550$ Н, то с применением косинусоидального ролика такого же диаметра и радиуса округления рабочего профиля необходима сила $P = 350$ Н, т.е. на 36 % меньше. При накатывании обычным синусоидальным роликом с силой поджима $P = 350$ Н шероховатость возрастает до $Ra = 2$ мкм. Эффект снижения потребной силы на 10–18 % наблюдается также при применении синусоидальных роликов с переменными параметрами гофр.

Для обработки ППД в условиях трения скольжения используются алмазные наконечники и дорны. Алмазные наконечники (рис. 5.29 а) могут быть армированы искусственными или естественными алмазами. Переполировка алмазных выглаживателей в случае их изнашивания может производиться на ограночных или универсально-заточных станках с помощью различных приспособлений для полирования сферических поверхностей.

Дорны могут быть однопоясковые и многопоясковые. В качестве материалов для них используются стали У12А, Х12Ф, ХВГ, 38ХМЮА, 9ХС, ШХ15 и твердые сплавы ВК6, ВК6М, Т15К6, а также другие материалы. Наибольшую ценность для обработки деталей из труднообрабатываемых материалов представляют твердосплавные и хромированные дорны. На рисунке 5.29 б показан монолитный дорн из твердого сплава ВК8 для обработки отверстия диаметром 4Н7. На рисунке 5.29 в изображен сборный твердосплавный дорн для обработки отверстий диаметром 9Н7 (направление – сталь ХВГ или ШХ15, втулка – сплав ВК8, хвостовик – сталь 45, пайка латуны). На рисунке 5.29 г представлен трехпоясковый стальной хромированный дорн для обработки отверстий диаметром 3Н7 (сталь ХВГ, твердость 63–65 HRC₃, хвостовик 46 HRC₃, толщина слоя хромового покрытия 10 мкм).

Твердосплавные монолитные дорны получают путем спекания порошковой массы в пресс-формах. Дальнейшая их обработка связана с чисто механическими операциями. При изготовлении сборных дорнов с механическим креплением колеи или с помощью пайки необходимо обеспечить плотное прилегание отверстия твердосплавного кольца к поверхности оправки дорна. Последняя шлифуется под размер внутреннего отверстия твердосплавного кольца для обеспечения посадки Н7/г6. Кольца с повышенной овальностью и конусностью по отверстию перед сборкой следует доводить для обеспечения указанной посадки, так как неплотное прилегание сопрягаемых поверхностей при работе дорнов

может вызвать появление кольцевых трещин и разрушение твердосплавных колец.

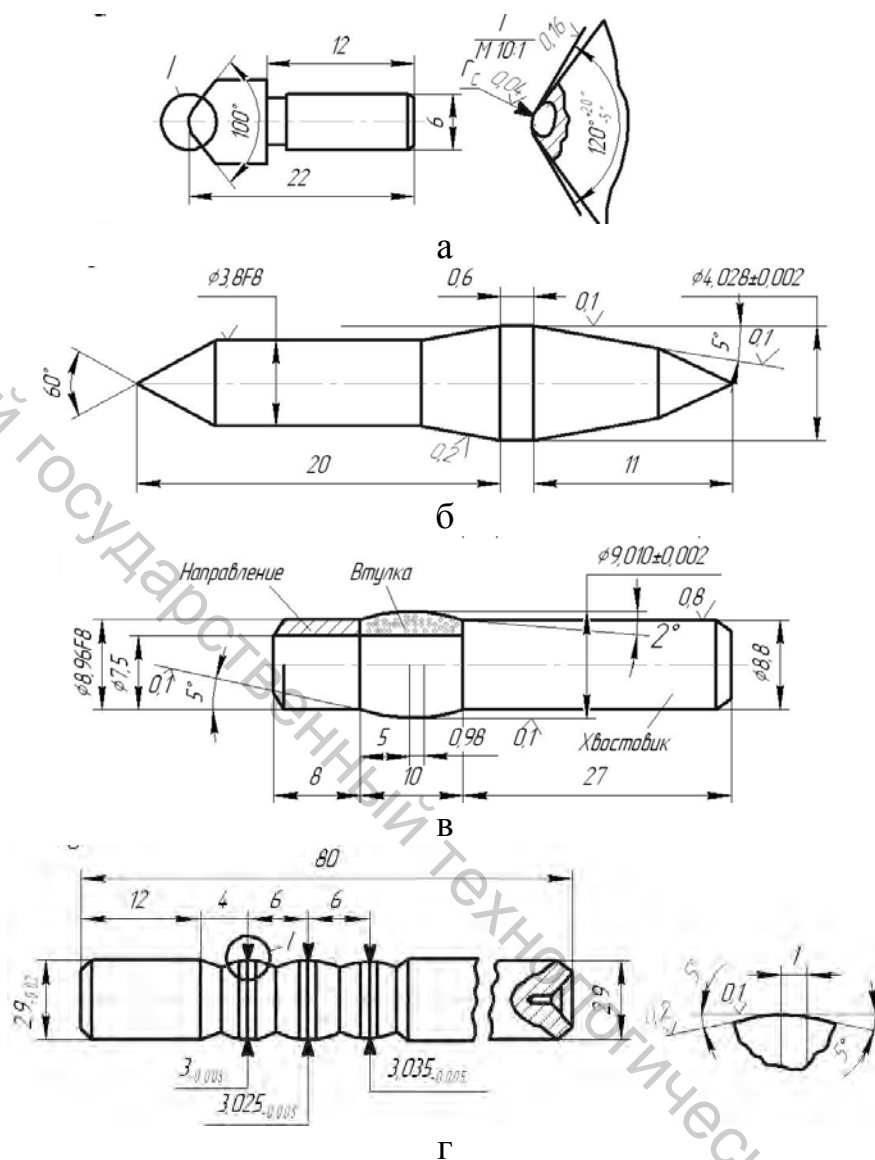


Рисунок 5.29 – Деформирующие инструменты, работающие в условиях трения скольжения:
а – алмазный наконечник; б-г – дорны

Особенности изготовления хромированных дорнов заключаются в том, что заготовка из сталей У12А, ХВГ, ШХ15 обрабатывается с припуском 0,6–0,8 мм на диаметр для последующего шлифования. Затем производится закалка заготовки до твердости 63–65 HRCэ. Для прочного сцепления (адгезии) слоя хрома рабочий профиль дорна должен после шлифования (обязательно без прижогов) подвергаться полированию или алмазному выглаживанию с обеспечением шероховатости поверхности с $Ra = 0,1$ мкм. В этом случае слой покрытия получается равномерным, а сцепление хрома со сталью – наилучшим.

Время хромирования при заданной толщине слоя покрытия определяется по формуле

$$t_x = 1,5h_x / q,$$

где h_x – толщина слоя хромового покрытия, мм (обычно $h_x = 0,01$ мм);
 q – плотность тока, А/дм².

Твердость хромового покрытия должна быть 63–67 HRCэ. Для обеспечения необходимой прочности хромового покрытия толщина его не должна превышать 0,02 мм. Нагрев хромированных дорнов до 423–473К и выдержка их при этой температуре в течение 2–3 ч с последующим охлаждением на воздухе способствуют удалению поглощенного в процессе хромирования водорода, что повышает прочность слоя покрытия и адгезию его с металлом дорна.

Важными условиями при обработке отверстий заготовок прецизионных деталей из труднообрабатываемых материалов являются геометрическая точность дорнов и длительное сохранение размеров их рабочих поверхностей. В этом плане положительно выделяются твердосплавные и стальные хромированные дорны, размерная износостойкость которых соответственно в 7 и 3 раза выше износостойкости стальных дорнов без покрытия. Вместе с тем твердосплавные дорны требуют больших сил проталкивания через обрабатываемые отверстия, обладают пониженной прочностью из-за хрупкости твердого сплава. В контакте их рабочих поверхностей с материалом заготовки наиболее часто наблюдается схватывание, в процессе изготовления они более трудоемки и дороги. Поэтому в производстве прецизионных деталей из труднообрабатываемых материалов более широкое применение нашли стальные хромированные дорны. В целях улучшения их эксплуатационных свойств предложена дополнительная обработка – электролитическое сульфидирование. Установлено, что хромированные дорны с сульфидированием обладают износостойкостью, превышающей в 2 раза износостойкость хромированных дорнов без сульфидирования.

5.3.1.5 Приспособления, микрогеометрия поверхности и состояние металла при отделочно-упрочняющей обработке ППД

Система приспособлений для ППД, предназначенная для использования в гибком легкоперенастраиваемом на выпуск новой продукции производстве, позволяет применять одни и те же приспособления при изготовлении различных деталей из разных материалов и осуществлять обработку ППД на различных станках [98–101].

Универсальные приспособления обеспечивают наладку на обработку различных заготовок без замены деталей и сборочных единиц, универсально-наладочные – с их заменой. Комбинированные приспособления позволяют обеспечивать как накатывание, так и выглаживание поверхностей заготовок путем смены обрабатывающих инструментов. Комбинированные приспособления по форме обрабатываемых поверхностей могут использоваться, например, для обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей или наружных цилиндрических и фасонных поверхностей по копиру. В приспособлениях предусмотрены точные отсчетные устройства для обеспечения заданных сил прижима инструмента и настройки на прецизионную обработку.

Малогабаритные шаровая и алмазная головки (рис. 5.30) могут использоваться для обработки как наружных, так и внутренних цилиндрических и сферических поверхностей. Шаровая головка работает следующим образом (рис. 5.30 а). Шар 7 располагается во втулке-сепараторе 6 и в процессе работы обкатывается по поверхности шарикоподшипника 4, расположенного на оси 8. Вилка 9 направляющим хвостовиком входит в отверстие корпуса 1 и свободно перемещается в пределах перемещения штифта 3 по пазу корпуса. Необходимая сила прижима шара 7 обеспечивается тарированной пружиной 5. Регулирование значения силы в пределах $P = 10\text{--}100\text{Н}$ обеспечивается гайкой 2.

В качестве деформирующего элемента алмазной головки (рис. 5.30 б) используется наконечник типа НК от твердомера Роквелла с кристаллом алмаза, переполированным под сферу с радиусами от 1,5 до 4 мм. Наконечник 5 свободно перемещается своим направляющим хвостовиком в отверстии корпуса 1 в пределах перемещения штифта 2 в пазу корпуса. Необходимая сила прижима выглаживателя обеспечивается тарированной пружиной 4 путем сжатия ее гайкой 3. Хвостовик головки крепится в резцедержателе или приспособлении для предварительной обработки. Головки могут использоваться как при жестком, так и при упругом контакте деформирующего инструмента с обрабатываемой поверхностью.

Приспособление для вибронакатывания цилиндрических поверхностей (виброголовка с резцедержателем), встроенное в виброустановку ВУ-2, показано на рисунке 5.31. Оно работает следующим образом. Обрабатываемая заготовка устанавливается в патроне или центрах станка и получает вращательное движение от шпинделя виброустановки ВУ-2. Резец (накатная шаровая головка, алмазный выглаживатель) 10 крепится в резцедержателе 9, который вибрирует вдоль оси обрабатываемой заготовки на направляющих корпуса 6. Вибрация резцедержателя 9 с инструментом 10 обеспечивается через рычаг 4 жестко закрепленным на валу электродвигателя 1 ($N = 3\text{ кВт}$) кулачком 2 с эксцентриситетом e . Рычаг 4 колеблется вокруг оси хвостовика опоры 7, размещенной в от-

версии ползуна 5. Вибрация от рычага 4 передается непосредственно на резцедержатель осью 8.

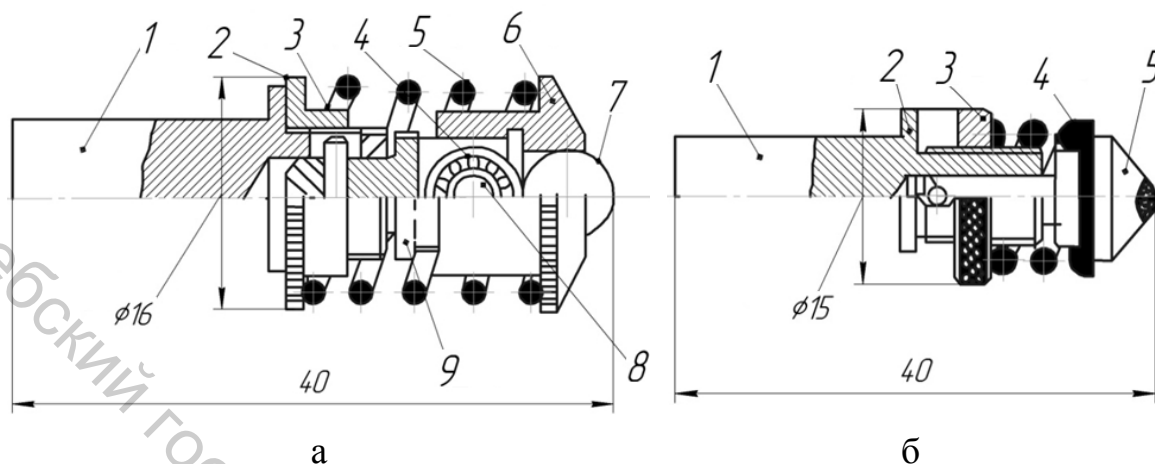


Рисунок 5.30 – Универсальные малогабаритные головки:
а – шаровая, б – алмазная

Частота вибрации f_v резцедержателя определяется частотой вращения электродвигателя 1 и может регулироваться. Амплитуда колебаний $2A$ инструмента зависит от величины эксцентриситета e сменного кулачка 2 и соотношения плеч рычага 4. Изменение плеч рычага 4 осуществляется смещением с помощью винта 3 ползуна 5 с опорой 7. При смещении опоры 7 вправо плечо «резцедержатель – опора» увеличивается, а плечо «опора – кулачок» уменьшается. При этом амплитуда вибрации инструмента возрастает. С обратным изменением плеч рычага амплитуда вибрации уменьшается.

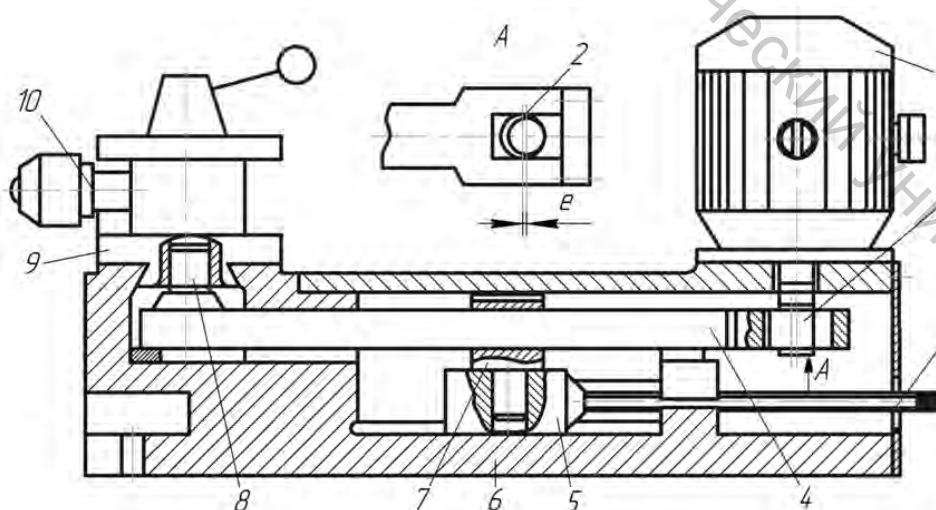


Рисунок 5.31 – Универсально-переналаживаемое приспособление для вибронакатывания шаром и алмазного вибровыглаживания с электромеханическим приводом

Для вибронакатывания поверхностей профильными роликами используется приспособление, показанное на рисунке 5.32 а. В процессе обработки ролик 6 подводится к поверхности обрабатываемой заготовки до соприкосновения и вращается на оси 8, размещенной в отверстиях вилки 9. Крышки 7 предотвращают выпадение оси из вилки и предохраняют соединение «ролик – ось – вилка» от загрязнения. Вилка 9, хвостовик которой располагается во втулках корпуса 1, соединяется посредством резьбы с пробкой 5. Необходимая сила поджима ролика к обрабатываемой поверхности обеспечивается тарированной пружиной 4 за счет ее предварительного сжатия подвижной пробкой 3, сидящей на резьбе винта 2. При вращении винта 2 риска на ползуне 11 совмещается с делением шкалы 10, соответствующим выбранной силе поджима P . Вилка 9 сменная, что облегчает переналадку приспособления на обработку заготовок различными роликами. Сменные вилки с синусоидальным и косинусоидальным профильными роликами показаны на рисунке 5.32 б, в. Процесс обработки представлен на рисунке 5.33.

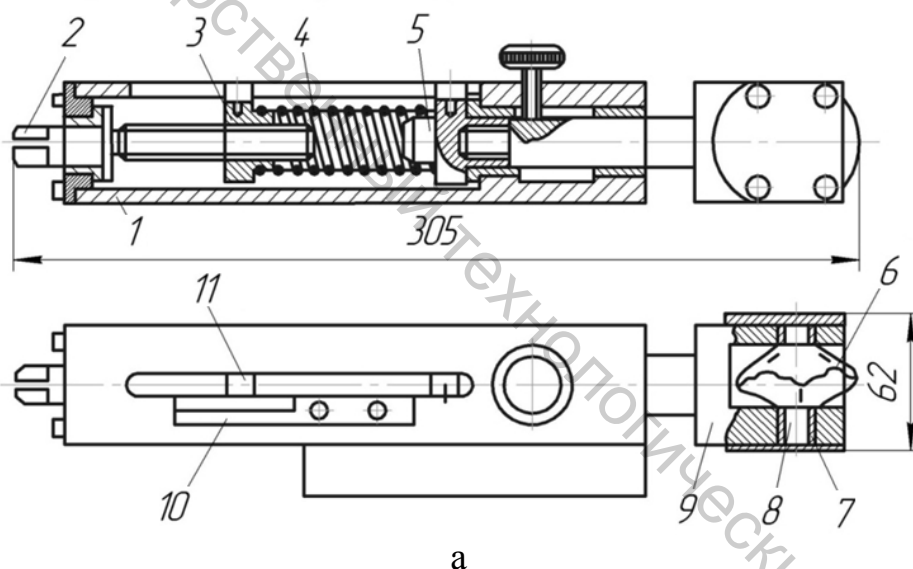
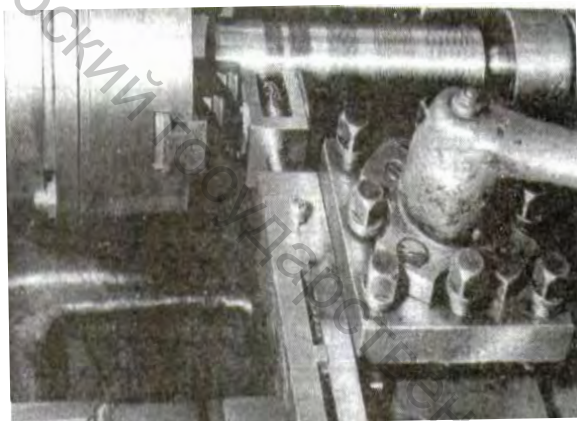
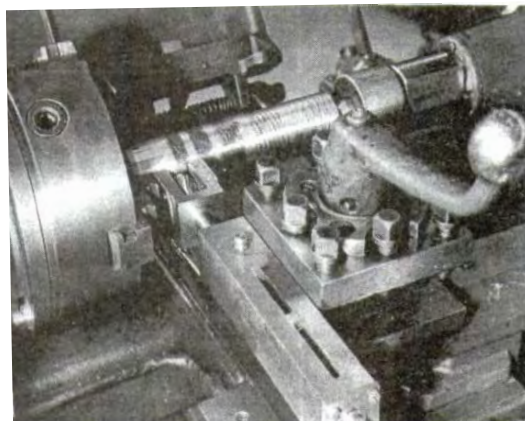


Рисунок 5.32 – Приспособления для вибронакатывания наружных цилиндрических и фасонных поверхностей профильными роликами со сменными вилками

Для повышения производительности обработки ППД наружных цилиндрических поверхностей длинных нежестких заготовок деталей типа валов и осей используются многоинструментальные приспособления. На рисунке 5.34 показано трехроlikовое приспособление для нака- тывания на токарных станках длинных заготовок. Оно изображено в пе- риод установки заготовки на станок. При этом крышка с верхним роли- ком, шарнирно соединенная с корпусом приспособления, откидывается для удобства размещения в нем заготовки. Силы поджима роликов к об- рабатываемой поверхности обеспечиваются тремя встроенными пнев- моцилиндрами.



а



б

Рисунок 5.33 – Вибронакатывание цилиндрической поверхности профильными роликами с помощью одного приспособления со сменными вилками:

а – синусоидальным, б – косинусоидальным



Рисунок 5.34 – Трехроlikовое пневматическое приспособление в момент установки заготовки на станок

На рисунке 5.35 показано переналаживаемое приспособление для алмазного выглаживания и раскатывания шаром отверстий малого диаметра (от 12 мм и больше). Приспособление (рис. 5.35 а) устанавливается в резцедержатель токарного станка с помощью державки 7, которая шарнирно соединена с оправкой 2 посредством оси 8. Сила поджима инструмента обеспечивается тарированной пружиной 6, регулируется винтом 5, контактирующим с оправкой 2 при помощи самоустанавливающейся шайбы 4, и контролируется по шкале 3. Алмазный наконечник 9 устанавливается в отверстие оправки 2 и крепится винтом 1.

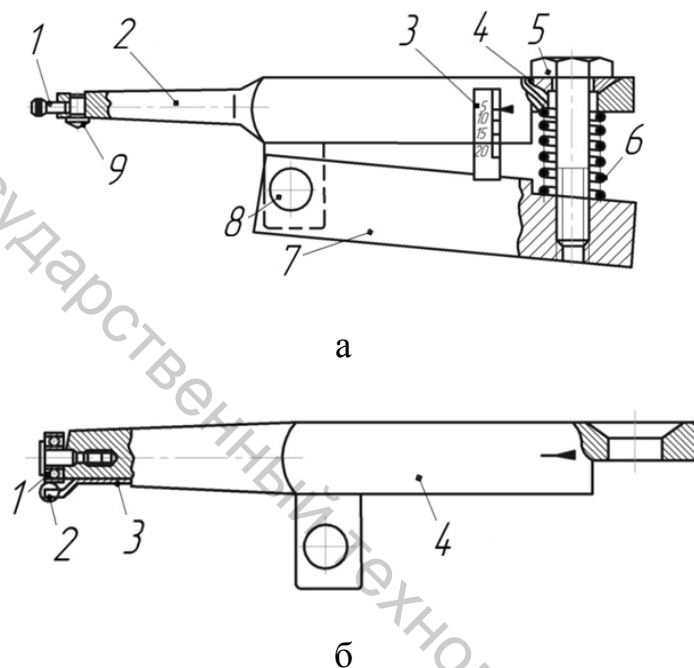


Рисунок 5.35 – Переналаживаемое приспособление для обработки отверстий малого диаметра:
а – алмазным наконечником, б – шаром

При раскатывании отверстий державка 7 (рис. 5.35 а) заменяется на державку 4 (рис. 5.35 б). Шар 2 удерживается в определенном положении планкой-сепаратором 3. В процессе раскатывания отверстий шар 2 обкатывается по поверхности наружной обоймы шарикоподшипника 1. Это приспособление может использоваться для обработки ступенчатых отверстий с плавно уменьшающимся по диаметру отверстиями. Величина необработанной шаром части отверстия по длине определяется диаметром шара $d_{ш}$ и равна $(d_{ш} / 2) + 0,2$ мм. Если по условиям эксплуатации деталь с необработанным пояском отверстия использовать нельзя, то в конце отверстия одного диаметра (перед торцом отверстия меньшего диаметра) необходимо сделать канавку глубиной до 0,1 мм.

Изображенное на рисунке 5.36 однороликовое приспособление предназначено для обработки профильными роликами плоских (линей-

чатых) поверхностей на строгальных станках. Оно устанавливается державкой 7 в резцедержателе станка и работает в двух направлениях. Необходимая сила обработки создается тарированной пружиной 4, сжатие которой на заданную величину обеспечивается вращением гайки 1 на винте 3. Винт удерживается от проворота рычагом-вилкой 5 с помощью лысок.

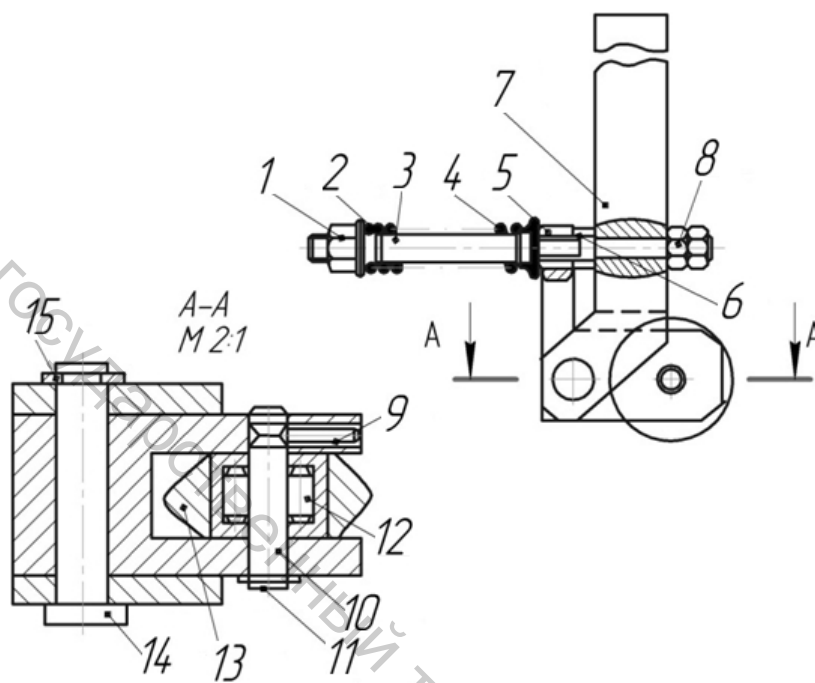


Рисунок 5.36 – Однорولیковое приспособление для обработки плоских поверхностей на строгальных станках:

- 1, 8 – гайки; 2, 6 – шайбы; 3, 9 – винты; 4 – пружина; 5 – рычаг-вилка;
7 – державка; 10 – ось; 11, 15 – кольца; 12 – подшипник игольчатый;
13 – ролик; 14 – палец

Многорولیковое приспособление (рис. 5.37) для вибронакатывания плоских поверхностей заготовок устанавливается на оправку шпинделя вертикально-фрезерных станков вместо торцовой фрезы. Необходимые силы поджима инструментов к заготовке обеспечиваются сменными пружинами 7. Основными требованиями при настройке на обработку являются точная установка приспособления на шпинделе станка и отсутствие торцевого биения корпуса 2 и выступающих профильных роликов 9.

Одной из разновидностей описанного приспособления является головка для совмещенной обработки резанием и ППД. В этих целях на корпусе головки предусмотрены пазы для установки резцов, расположенных по осям O_1-O_4 (рис. 5.37). Резцы размещаются на радиусе $R_2 > R_1$.

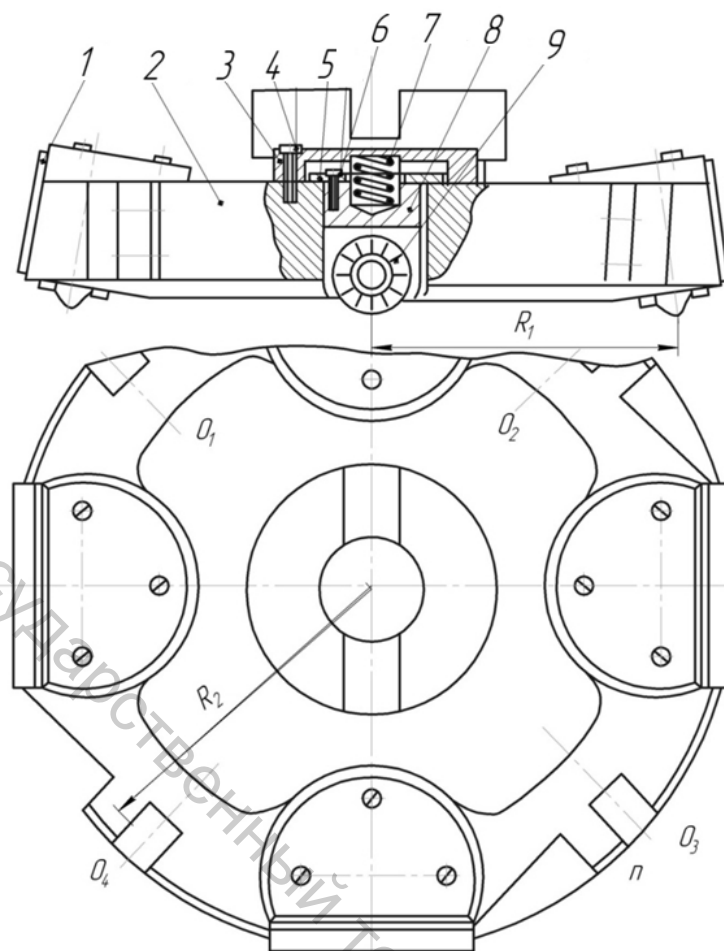


Рисунок 5.37 – Четырехроликовое приспособление для вибронакатывания плоских поверхностей на вертикально-фрезерных станках:

1, 3 – крышки; 2 – корпус; 4, 6 – винты; 5 – упор; 7 – пружина;
8 – державка; 9 – профильный ролик

Вибровыглаживание наружной сферической поверхности алмазным наконечником можно осуществлять с помощью устройства, обеспечивающего сочетание двух вращательных движений (рис. 5.38). Один, два или несколько сферических алмазных наконечников устанавливаются и закрепляются во вращающейся державке, при этом ось вращения державки не совмещена с осью инструмента и инструмент «обегают» сферическую поверхность. Заготовка устанавливается таким образом, чтобы ось сферической поверхности в направлении оси шпинделя станка располагалась под углом к оси вращения заготовки. При этом обеспечивается определенное значение отношения n/n_3 (здесь n и n_3 – частоты вращения соответственно инструмента и заготовки). Чем больше величина указанного отношения, тем меньше размеры ячеек сетки наносимых следов инструмента. За каждый оборот инструмента заготовка поворачивается на некоторый угол и на сферическую поверхность наносится один виток спирального следа. За один оборот заготовки на всем

обрабатываемом участке сферической поверхности создается сетка пересекающихся следов обработки. Изменением угла наклона осей вращения заготовки и инструмента относительно оси сферы в направлении шпинделя станка можно создать сетку следов на различных участках сферической поверхности.

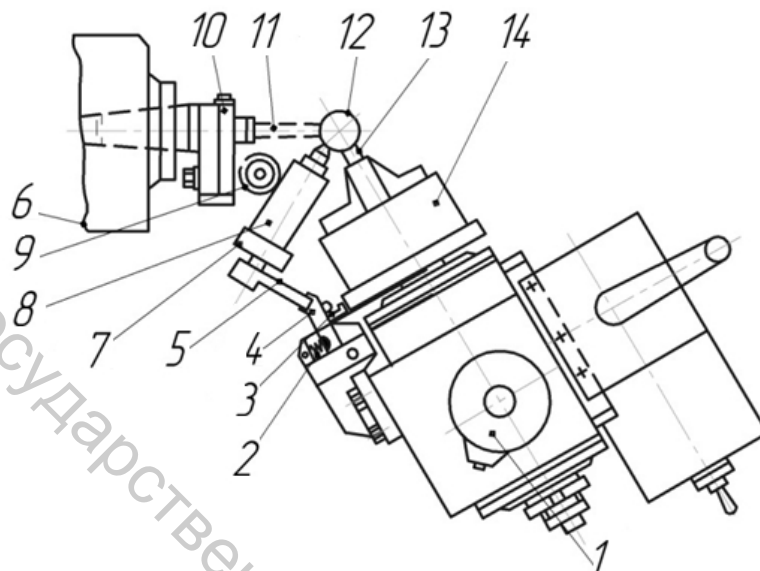


Рисунок 5.38 – Устройство для алмазного вибровыглаживания наружных сферических поверхностей

Алмазный наконечник 12 (рис. 5.38) размещен в специальной державке 10, которая состоит из стойки 9, стакана 8, гайки 7, флажка 5, штыря 11. В стакане 8 находятся элементы для создания необходимой силы поджима инструмента и автоматического отвода его после окончания обработки. Регулирование величины силы обеспечивается при помощи гайки 7. Автоматический отвод инструмента осуществляется при помощи флажка 5. Штырь 11 служит для правильной установки заготовки перед вибровыглаживанием. Державка устанавливается в шпинделе 6 токарного станка. Заготовка 13 закрепляется в патроне 14, размещенном на шпинделе устройства.

Вращение заготовке передается от электродвигателя 1 через редуктор, содержащий червячную пару и три пары цилиндрических шестерен. После полного оборота заготовки инструмент отводится взаимодействием флажка 5 с упором 4, соединенным с кронштейном 3 и пружиной 2.

Устройство позволяет обрабатывать заготовки диаметром 10–200 мм, длиной 80–200 мм. Частота вращения заготовки 1 об/мин.

Обработка ППД внутренних сферических поверхностей может производиться малогабаритными головками на токарных станках с помощью устройства (рис. 5.39) для растачивания сферической поверхно-

сти. Обработку следует производить за одну установку сразу же после растачивания. Заготовка 2 устанавливается в оправку 1, размещенную в шпинделе станка. Движение подачи обрабатывающей малогабаритной головке 17 сообщается при повороте вокруг оси стола 16, осуществляемом червячной передачей. Вращение червячной шестерне, жестко соединенной со столом 16, передается от ходового валика 12 станка с помощью ременной передачи, включающей в себя детали 9–11, 13 и 14, редуктор 8 и валик 7. Приспособление для раскатывания устанавливается на суппорте станка вместо резцедержателя. Для настройки устройства и осуществления ручной подачи головки 17 можно пользоваться (при снятом валике 7) маховиком 6, соединенным с валом червяка. Установку вылета головки 17 можно осуществлять с помощью винта и маховика 4. Контролируется вылет головки по шкале маховика, а поворот стола 16 – по шкале 5.

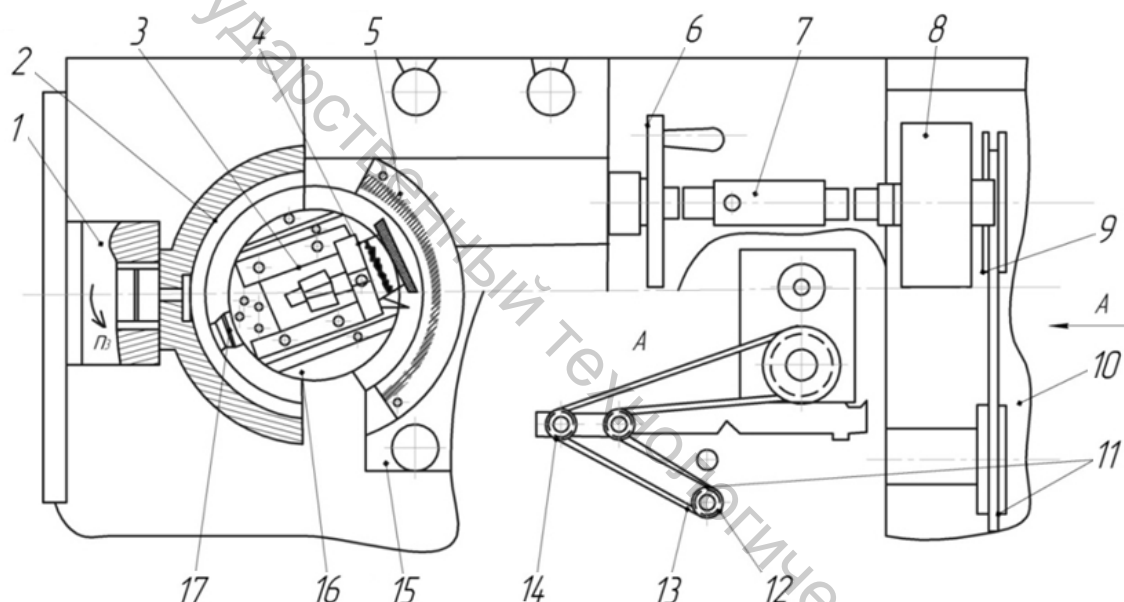


Рисунок 5.39 – Схема прецизионного устройства и обработка внутренней сферической поверхности аэродинамической опоры ротора:

1 – оправка; 2 – заготовка; 3 – инструментальная каретка; 4 – маховик перемещения инструмента; 5 – шкала; 6 – маховик настройки; 7 – регулируемый валик; 8 – редуктор; 9, 10, 13, 14 – шкивы; 11 – ремень; 12 – ходовой валик станка; 15 – основание; 16 – стол; 17 – обрабатывающая малогабаритная головка

Для исключения завалов кромок поверхностей прецизионных деталей, какими являются опоры азимутальных шаровых гироскопов, приспособление описанного устройства следует настраивать по касанию инструмента головок 17 к поверхности и микрометрической шкале маховика 4 (рис. 5.39). При помощи фольги или индикатора определяется касание сферы инструмента с обрабатываемой поверхностью. После

этого головка 17 подается «к заготовке» на величину Z_0 , обеспечивающую «зависание» сферы и инструмента в пределах высоты микронеровностей исходной поверхности.

На состояние обработанной ППД поверхности в значительной степени оказывает влияние предшествующая обработка. Шероховатость исходной поверхности должна быть равномерной. Неравномерности по шагу и высоте приводят к неоднородности обработанной ППД поверхности и соответственно геометрических и физико-механических параметров поверхности и подповерхностного слоя материала. Более высокие требования к равномерности неровностей исходной поверхности должны предъявляться при обработке ППД менее пластичных материалов, например чугунов, магнитных сплавов ЮНДК-12 и др. Наиболее предпочтительной обработкой, предшествующей ППД, следует признать лезвийную обработку, которая обеспечивает по сравнению с абразивной более равномерные неровности шероховатости и практически исключает загрязнение поверхности инородными включениями. Абразивная обработка (шлифование, доводка пастами, хонингование) менее желательна, так как в этом случае возможны загрязнение поверхности и подповерхностного слоя материала остатками абразива (шаржирование) и другими продуктами обработки, а также значительная неравномерность неровностей по высоте и форме. Пластичность и малая твердость конструкционного материала, как и наличие в нем пор и мелких раковин, способствуют еще большему загрязнению поверхностей и подповерхностных слоев заготовок, обрабатываемых шлифованием, доводкой и полированием.

В зависимости от требований, которые предъявляются к деталям, назначаются геометрические параметры исходной поверхности. Следует иметь в виду, что при обработке ППД, как правило, шероховатость обрабатываемых поверхностей по высотным параметрам уменьшается в 2–15 раз. Поэтому исходные значения параметров Ra и Rz могут быть в 2–15 и даже более раз выше, чем требуется чертежом детали. Нижний предел уменьшения шероховатости соответствует менее пластичным металлам (когда пластическая деформация и перераспределение микрообъемов металла при ППД затруднены), а верхний предел – более пластичным металлам.

Обычно под обработку ППД с упругим контактом деформирующего инструмента с обрабатываемой заготовкой исходная поверхность должна обрабатываться с точностью, установленной чертежом. При жестком контакте деформирующего инструмента с поверхностью возможно исправление формы поверхностей в пределах высоты неровностей шероховатости. Исправление геометрической формы поверхностей наблюдается и при обработке ППД инструментом, установленным в пределах высоты неровностей обрабатываемой поверхности путем прецизионной настройки. Исключения составляют формообразующие отде-

лочно-упрочняющие процессы, когда форма поверхностей создается деформирующим инструментом.

При обработке ППД изменяются размеры поверхностей. Это связано с изменением высоты неровностей после пластической деформации подповерхностного слоя материала.

Изменение диаметрального размера цилиндрических поверхностей в результате пластической деформации при обработке ППД («припуск» на обработку) можно определять по формуле

$$2z_{II} = K(Rz_{исх} - Rz) = 4K(Ra_{исх} - Ra),$$

где K – коэффициент, зависящий от свойств материала (табл. 5.10); $Rz_{исх}$, $Ra_{исх}$ – параметры шероховатости исходной поверхности, мкм; Rz , Ra – параметры шероховатости поверхности после обработки ППД, мкм.

Таблица 5.10 – Коэффициент в формуле «припуска» на обработку

Материал	k	Материал	k
Стали:		ВТ5	1,26
45	1,32	ВТ6	1,24
12Х1810Т	1,33	Медь и медные сплавы	
12Х13А	1,21	М1Т	1,27
40Х18Н2М	1,28	Бр08С12	1,36
У10А	1,41	Бр0ЦС4- 4- 2,5	1,32
ШХ15	1,38	Бр0ЦС6- 6- 3	1,35
Чугуны :		ЛС59-1	1,23
СЧ18, СЧ20	1,36	Л62, Л63	1,25
Никелевый сплав		Железоникелевые сплавы	
ХН67ВМТ10	1,39	МП, 79НМ	1,29
Титановые сплавы:		Алюминиевые сплавы	
ВТ1-1	1,37	Д1, АЛ4	1,30
ВТ3-1	1,28		

С целью исключения завалов кромок, западания инструмента в канавки, пазы, отверстия при обработке прерывистых поверхностей и исключения поломки, например, алмазных наконечников, необходимо использовать приспособления, в которых движение инструмента 1 (наконечника, шара, ролика) в направлении к обрабатываемой поверхности заготовки 2 ограничено упором 3 (рис. 5.40). Когда шток 5 находится в крайнем переднем положении, пружина 4 сжата и обеспечивает силу P поджима инструмента. Прецизионная настройка на обработку осуществляется путем подачи приспособления в направлении обрабатываемой поверхности после касания с ней деформирующего элемента на величину Z_0 . Момент касания инструмента с обрабатываемой поверхно-

стью заготовки определяется по рискам на подвижных и неподвижных элементах приспособления с помощью индикатора или по фольге, которая зажимается между заготовкой и инструментом. Значение Z_0 определяется по формуле

$$Z_0 = 0,75 Rz_{\text{исх}} + \Delta + t_{\phi} + P/j = 3Ra_{\text{исх}} + \Delta + t_{\phi} + P/j,$$

где Δ – биение, отклонение формы обрабатываемой поверхности, мкм; t_{ϕ} – толщина фольги для определения момента касания инструмента с поверхностью, мкм; P – сила поджима инструмента, Н; j – жесткость приспособления, обычно $j = 80\text{--}200$ Н/мкм.

Динамику изменения параметров шероховатости стальной обточенной цилиндрической поверхности (рис. 5.41 а, случай 1) при обкатывании ее шаром с $d_{\text{ш}} = 9,5$ мм и различными силами P поджима можно проследить по рисунку 5.41. На этом рисунке случаи 2, 3, 4, 5, 6, 7 соответствуют силе P , равной 100, 200, 300, 400, 500 и 600 Н. Из рисунка 5.41 б следует, что необходимый уровень сближения с целью обеспечения $t_p = 75\%$ для приведенных случаев различен. Чем меньше p , тем быстрее и с меньшим износом приработается поверхность.

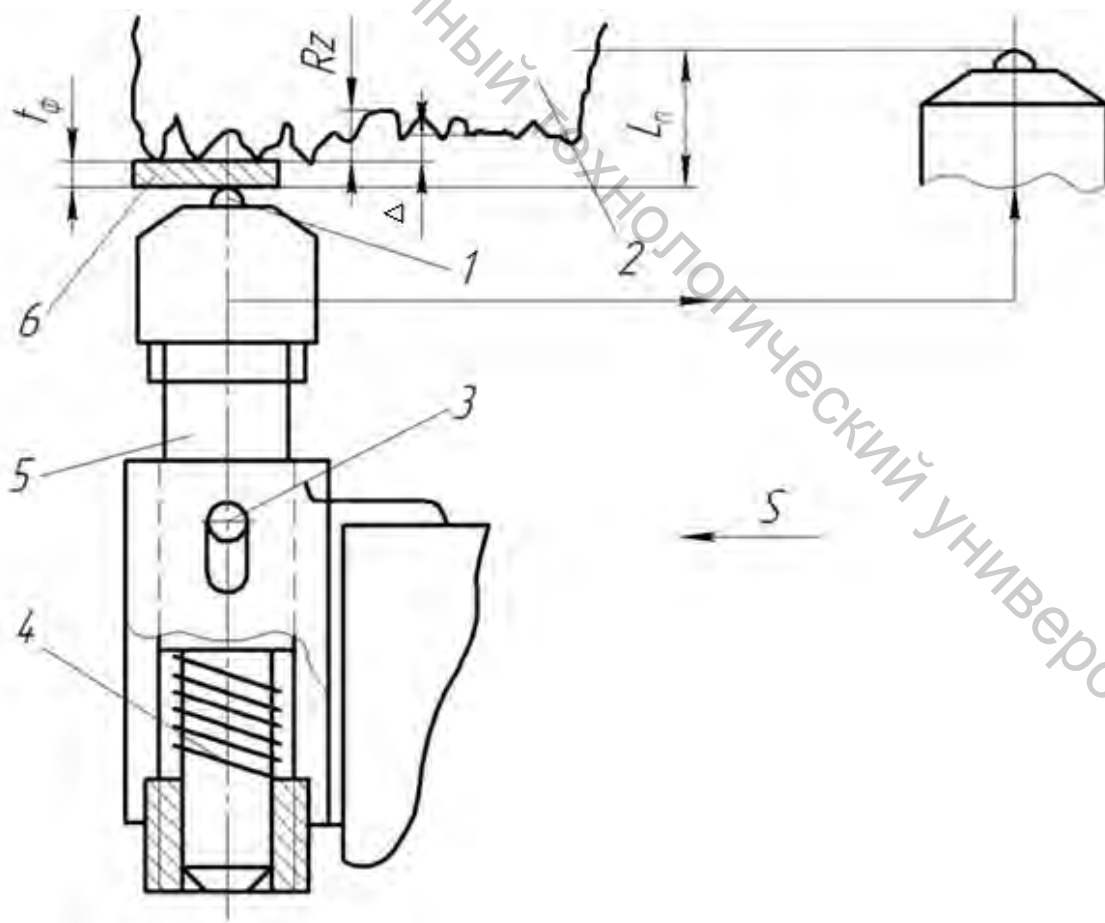


Рисунок 5.40 – Прецизионная настройка инструмента

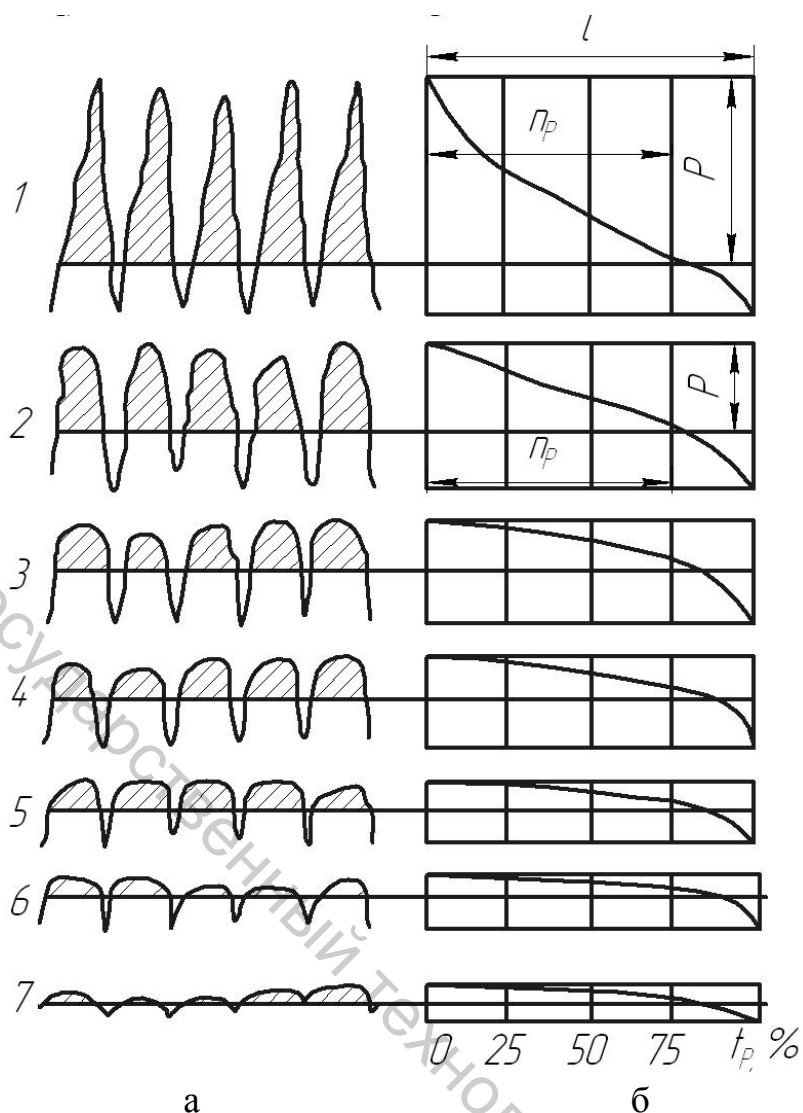


Рисунок 5.41 – Динамика изменения микрогеометрии обточенной цилиндрической поверхности стали 38ХНВА при обкатывании шаром: а – профилограммы поперечной шероховатости (увеличение вертикальное $\times 2000$, горизонтальное $\times 80$), б – кривые относительной опорной длины профиля

Наиболее полно контактирование реальных поверхностей характеризует относительная опорная площадь F_{on} , которая вычисляется по формуле

$$F_{on} = (A_r / A_n) \cdot 100 \%,$$

где A_r – фактическая площадь контакта; A_n – номинальная площадь контактирующей поверхности.

Для определения F_{on} используется метод построения кривой фактической площади контакта A_r по двум профилограммам. Сущность метода заключается в том, что с поверхности снимаются профилограммы продольной и поперечной шероховатости. По профилограммам строятся

кривые зависимости опорной длины профиля t_p от высоты (уровня сечения) p ее расположения относительно линии выступов (ГОСТ 2789-73). Абсциссы кривых, соответствующие одному и тому же уровню сближения (уровню сечения профиля p по ГОСТ 2789), перемножают и строят кривую A_n . Из сказанного следует, что значение F_{on} на определенном уровне сближения p можно найти по формуле

$$F_{on} = (n_{p\ nон} n_{p\ np} / l^2) \cdot 100 \%,$$

где $n_{p\ nон}$ – опорная длина профиля поперечной шероховатости на уровне p в пределах базовой длины l ; $n_{p\ np}$ – опорная длина профиля продольной шероховатости на том же уровне p в пределах той же базовой длины; l – базовая длина.

Поверхности с частично регулярными микрорельефами (ЧРМР) в соответствии с ГОСТ 24773 могут быть пяти видов. Вибронакатыванием обеспечиваются виды 3–5. При этом на обрабатываемую поверхность наносятся регулярные неровности вогнутой формы – канавки, являющиеся следом деформирующего инструмента. Поверхности с ЧРМР характеризуются относительной площадью F_n , занимаемой регулярными неровностями (канавками):

$$F_n = (A_k / A_n) \cdot 100 \%,$$

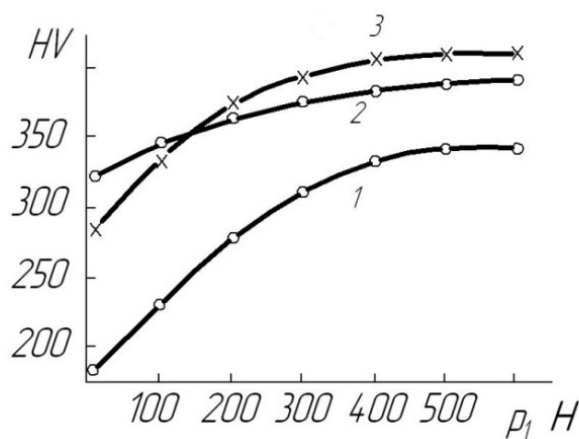
где A_k – площадь поверхности, занятая канавками.

В результате исследований и математической обработки их результатов выведены зависимости для аналитического расчета поверхностей с ЧРМР.

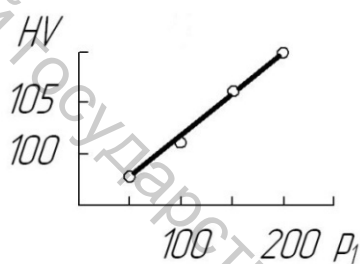
Отделочно-упрочняющая обработка ППД приводит к изменению состояния подповерхностного слоя материала и, в частности, его микроструктуры, твердости, остаточных напряжений, микротвердости, степени упрочнения и толщины упрочненного слоя. Для примера на рисунке 5.42 показана зависимость поверхностной твердости HV от силы P поджима инструмента и размера $d_{ин}$ инструмента при накатывании шаром сплавов ХН67ВМТЮ и ВТЗ-1, стали 12Х18Н10Т и других материалов.

Из рисунка 5.42 а следует, что HV с возрастанием P увеличивается: для стали 12Х18Н10Т – от исходного значения 181 до 342 (кривая 1); для титанового сплава ВТЗ-1 – от 319 до 390 (кривая 2) и для никелевого сплава ХН67ВМТЮ – от 282 до 412 (кривая 3).

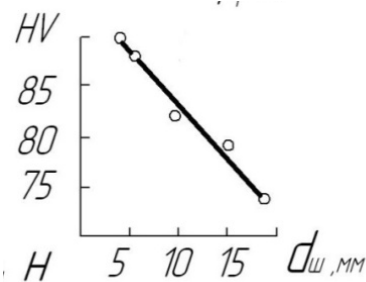
При обработке ППД заготовок из бронзы БрО8С12 поверхностная твердость HV материала повышается от 78 до 95 при обкатывании шаром с $d_{ин} = 7,1$ мм; до 96,5 при обкатывании шаром с $d_{ин} = 4,75$ мм; до 99,2 при алмазном выглаживании наконечником с радиусом сферы $r_c = 3,25$ мм.



а



б



в

Рисунок 5.42 – Влияние силы поджима и размера инструмента на поверхностную твердость при накатывании:

а, в – шаром; б – роликом

Зависимости HV от силы P при обкатывании роликом наружной цилиндрической поверхности заготовки из силумина АЛ4 (исходная твердость 68 HV) и размера инструмента при обкатывании роликом и шаром показаны на рисунке 5.42 б и в. Из рисунка 5.42 б видно, что с увеличением P от 50 до 200 Н при обкатывании цилиндрической поверхности диаметром $D_3 = 90,5$ мм роликом ($d_p = 45$ мм, $r_p = 4$ мм) твердость повышается до 110 HV . Из рисунка 5.42 в следует, что при обкатывании ($P = 50$ Н) с увеличением $d_{ш}$ от 4 до 19 мм величина снижается с 90 до 74. Такое явление связано с уменьшением давления в контакте при увеличении $d_{ш}$.

5.3.1.6 Комбинированные процессы и расчет параметров режима отделочно-упрочняющей обработки ППД

Комбинированная обработка обычно состоит из двух или нескольких последовательно или одновременно осуществляемых процессов. В производстве наиболее часто используются комбинации двух способов

ППД, ППД с последующей химико-термической или химической обработкой [98–101].

Эффективность применения комбинированной обработки ППД можно оценить на примере плунжеров топливных насосов из закаленных сталей ХВГ и У10А (твердость 62–65 HRCэ). Испытание плунжеров на износостойкость проводилось в паре с гильзами из закаленной стали 45. При испытании плунжеры были разбиты по обработке рабочих поверхностей диаметром 12 мм на 4 группы. Плунжеры 1-й группы были обработаны доводкой; 2-й – выглаживанием алмазным наконечником ($z_c = 1,5$ мм, $P = 200$ Н, $n_z = 2000$ мин⁻¹, $S = 0,02$ мм/об); 3-й – вибровыглаживанием алмазным наконечником ($r_c = 1,5$ мм, $P = 550–700$ Н, $n_z = 120–170$ об/мин, $S = 2$ мм/об, $f_n = 47$ Гц, $2A = 1,6–1,8$ мм); 4-й – вибровыглаживанием в режиме создания ЧРМР с $F_H = 64–73$ % (глубина канавок $h = 1,5–3$ мкм) с последующим выглаживанием алмазным наконечником. Комбинированная обработка осуществлялась с параметрами режима, указанными для групп 2 и 3.

Комбинированная обработка плунжеров обеспечивает шероховатость рабочих поверхностей с $Ra = 0,025–0,1$ мкм ($Ra_{исх} = 0,2–0,4$ мкм) и исключает доводку пастами. При ППД уменьшение диаметра плунжеров не превышает 0,3 мкм, точность их геометрической формы сохраняется, поверхностная твердость HRCэ возрастает на 1–2 единицы, а HV – от 762 до 803. За критерии изнашивания принят массовый и размерный износ плунжеров. В результате испытания установлено, что износ плунжеров 1-й группы составляет 1,38 мг по массе и 1,2 мкм по размеру; 2-й – соответственно 1,0 мг и 0,8 мкм; 3-й – 0,88 мг и 0,7 мкм и 4-й группы – 0,8 мг и 0,6 мкм. Износостойкость плунжеров с комбинированной обработкой ППД (4-я группа) возрастает по сравнению с 1-й группой в 1,73 раза по массе и в 2 раза по размеру; со 2-й группой соответственно в 1,28 и 1,33 раза; с 3-й – в 1,1 и 1,16 раза. Производительность комбинированной обработки ППД на 25–45 % выше, чем при обработке доводкой.

Рассмотренное повышение износостойкости плунжеров можно объяснить действием следующих факторов: 1) некоторым упрочнением подповерхностного слоя материала; 2) образованием на рабочих поверхностях системы канавок, являющихся масляными «карманами» и «ловушками» для абразивных продуктов изнашивания; 3) повышенной несущей способностью рабочих поверхностей за счет образования микрогеометрии с неровностями, имеющими радиус скругления 2 мм и более.

Известно, что наиболее перспективными для упрочнения термически неупрочняемых титановых сплавов процессами химико-термической обработки для промышленного применения являются оксидирование (особенно вакуумное), азотирование и диффузионное

насыщение подповерхностного слоя титановых сплавов ферромарганцем, осуществляемые после обработки ППД.

Для повышения производительности обработки заготовок все большее распространение получает совмещенная обработка, позволяющая соединить в один процесс резание и последующее ППД: точение, накатывание или алмазное выглаживание, виброточение и вибронакатывание с помощью виброустановки ВУ-2, а также опережающее ППД, совмещенное с резанием, и другие способы комбинированной обработки. Для совмещенной обработки предусмотрены приспособления, изображенные на рисунке 5.43. Большие возможности для расширения подобной обработки ППД накатыванием (алмазным выглаживанием) и вибронакатыванием открывает применение профильных роликов, позволяющих накатывать поверхности без виброголовок. Для совмещенного фрезерования и вибронакатывания плоских поверхностей может служить, например, приспособление, изображенное на рисунке 5.37.

Применение совмещенной комбинированной обработки является хорошим технологическим резервом в решении задач улучшения эксплуатационных свойств деталей и соединений и повышения производительности обработки заготовок из различных материалов.

К параметрам режима накатывания шарами и гладкими роликами относятся сила P прижима инструмента к заготовке, подача S , частота вращения n_3 . При вибронакатывании и вибровыглаживании шарами и алмазными наконечниками добавляется еще частота f_s и амплитуда $2A$ вибрации инструмента.

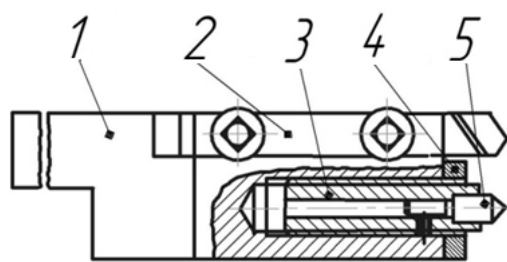
Параметры режима обработки ППД зависят от способа обработки и материала, а также от вида поверхности, используемого инструмента и его характеристик.

Скорость накатывания не оказывает существенного влияния на качество обработки, поэтому она выбирается в зависимости от значения D_3 и ряда частот вращения шпинделя станка в пределах от 30 до 150 м/мин. При алмазном выглаживании диапазон рекомендуемых скоростей зависит от твердости заготовки. Для цветных сплавов и мягких сталей ($< 330 HB$) $V = 10-60$ м/мин, а для сталей средней и высокой твердости ($35-64 HRC_3$) $V = 200-280$ м/мин.

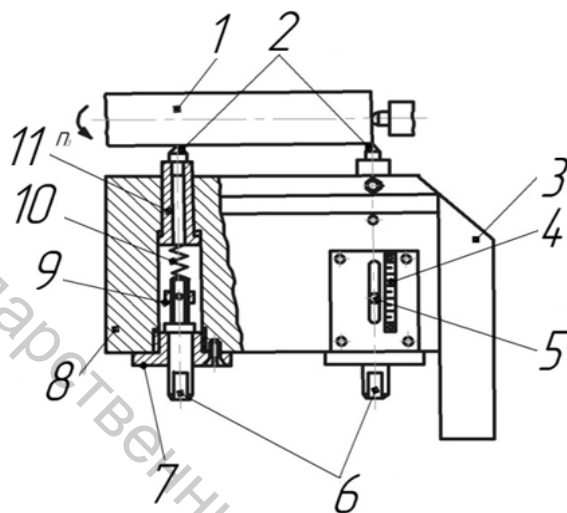
Сила P при накатывании, алмазном выглаживании, вибронакатывании и вибровыглаживании в режиме создания ПРМР инструментом сферической формы может определяться по формуле

$$P = K_p(D_3 d_{ш} / (D^3 + d_{ш}))^2,$$

где K_p – коэффициент силы, равный 2,8–6,5 (табл. 5.11); $d_{ш}$ – диаметр шара (сферы) алмазного наконечника.



А



Б

Рисунок 5.43 – Приспособления для совмещенной обработки:
 а – обтачивание и алмазное выравнивание с жестким поджимом наконечника к поверхности заготовки (1 – корпус, 2 – резец, 3 – держатель, 4 – гайка, 5 – алмазный наконечник); б – алмазное выравнивание одновременно двумя наконечниками с упругим поджимом инструмента (1 – заготовка, 2 – наконечники, 3 – планка, 4 – шкала, 5 – стрелка, 6 – винты, 7 – втулка, 8 – корпус, 9 – упор, 10 – пружина, 11 – держатель наконечника)

При накатывании и вибронакатывании роликами в режиме создания ЧРМР сила P определяется по формуле

$$P = K_p (D_3 r_p / (D_3 + 2r_p)) 2 \sqrt{d_p / r_p},$$

где K_p – коэффициент силы, равный 8–12,3 для роликов с постоянными параметрами, и 5,7–10,3 – для роликов с переменными параметрами (табл. 5.11).

При вибронакатывании с обеспечением ЧРМР сила P выражается для обработки инструментом сферической формы следующим образом:

$$P=(hd_{ш}^{0,809}D_3^{0,329}/12,357K_{но}^{0,723})^{1,389};$$

для обработки профильными роликами

$$P=(hr_p^{0,8}D_3^{0,3}/14,706K_{но}^{0,81})^{1,4}\sqrt{d_p/r_p},$$

где h – глубина канавки, задается из условий эксплуатации детали от 0,002 до 0,015 и более, мм; $K_{но}$ – коэффициент обрабатываемости материала относительно сплава ВТ1-1, принимается по таблице 5.12.

Таблица 5.11 – Значения коэффициента K_p

Инструмент	Способ обработки ППД	Материал заготовки			
		Сталь незакаленная	Титановые сплавы	Никелевые сплавы	Цветные сплавы
Шар, сферический наконечник	Обкатывание и выглаживание	3,4–3,8	3,2–4,5	4,5–5,01	2,2–3,2
	Вибро ППД; Наружное Внутреннее	2,8–3,0	3,0–4,2	3,8–4,2	2,0–2,4
		3,0–3,2	3,3–4,4	4,0–4,3	2,2–2,8
Ролик гладкий	Накатывание	8,3–8,6	11,8–12,1	11,0–11,4	5,2–6,1
Синусоидальный ролик с постоянными параметрами	Вибрационное: накатывание раскатывание	7,9–8,3	8,5–11,8	11,4–11,6	5,5–7,4
		8,2–9,8	9,3–12,4	11,6–12,1	6,2–7,6
Синусоидальный ролик с переменными параметрами	Вибрационное накатывание	6,7–7,1	7,2–10,4	9,5–9,7	4,1–5,2
		7,1–7,6	7,9–10,6	10,1–10,3	4,6–5,6
Косинусоидальные ролики	Вибрационное накатывание	5,6–5,8	5,9–8,3	7,8–6,0	3,6–4,2
		5,8–6,5	6,6–8,7	8,3–8,5	3,7–4,4

При накатывании (выглаживании) и вибронакатывании (вибровыглаживании) в режиме создания ПРМР подача S , мм/об, может определяться из выражений:

для обработки инструментом сферической формы

$$S=0,8\sqrt{d_{ш}Rz}=1,8\sqrt{d_{ш}Ra};$$

для обработки роликами

$$S=2,83\sqrt{r_pRz}=6,33\sqrt{r_pRa},$$

где $d_{ш}$ – диаметр шара и сферы алмазного наконечника, мм; r_p – радиус округления ролика, мм.

При вибронакатывании и вибровыглаживании (ЧРМР) инструментом сферической формы S может определяться по формуле

$$S = (2r_k / 0,03F_n) (2 + \sqrt{1 + (2Ai/D_3)^2})$$

или назначаться из следующих условий:

для ЧРМР вида 3 $S > 2(\rho_k + A \sin \pi i_0)$;

для ЧРМР вида 4 $S > 2 A \sin \pi i_0$;

для ЧРМР вида 5 $S > 2\rho_k (A - \sin \pi i_0)$;

где $\rho_k = b_k / 2$ (здесь b_k – ширина канавки, равная $1,2\sqrt{d_{ш}h}$ для шара и $1,24\sqrt{r_p h}$ для ролика); $i = f_e / n_{о.в.}$; i_0 – дробный остаток i .

Таблица 5.12 – Коэффициенты обрабатываемости резанием и ППД некоторых труднообрабатываемых резанием материалов

Материал	Термообработка	Предел прочности σ_b , МПа	Коэффициент обрабатываемости		
			по скорости резания K_v по сравнению со сталью 45	по твердости при обкатывании шаром $K_{но}$ по сравнению со	
				сталью 45	сплавом ВТ1-1
Сталь: 45	Отжиг Аустенизация	550-610	1,00	1,00	1,04
12X18H10T		550-600	0,50	1,10	1,15
Сплав: ВТ1-1	Отжиг » » »	550-700	0,45-0,60	0,96	1,00
ВТ3-1		950-1200	0,19-0,28	0,74	0,77
ВТ5		800-950	0,25-0,45	0,80	0,83
ВТ6		900-1100	0,20-0,32	0,75	0,78
ВТ16	Закалка и старение Аустенизация и старение	1115-1500	0,18-0,24	0,72	0,76
ХН67ВМТЮ		1000-1100	0,08-0,10	0,79	0,82

При вибронакатывании профильными роликами в режиме создания ЧРМР подачу следует принимать из соотношений: для ЧРМР вида 3 $S \geq b_k$, когда отношение D_3 / d_p является целым числом, и $S \geq 2A + b_k$, когда отношение D_3 / d_p не является целым числом; для ЧРМР вида 4 $2A - b_k < S < 2A + b_k$.

Для экспресс-определения значений подачи, если целью обработки является уменьшение шероховатости и создание полностью регулярных микрорельефов, то при обработке роликом со скругленным радиусом r_p профилем значение s можно выбрать по таблице 5.13. При обкатывании роликом с цилиндрическим пояском на поверхность наносится след шириной v_n (здесь v_n – ширина пояса), подача принимается $s =$

$0,3v_n K_1 K_2 K_3$ – коэффициенты, учитывающие условия обработки, принимаются по таблице 5.14.

При дорновании дорны диаметром d_n с цилиндрической ленточкой шириной b_n проталкиваются с силой P_m и абсолютным натягом i_a через отверстие, диаметром D_3 заготовки наружным диаметром D_n . В этом случае возникает упругая h_y и пластическая Z_0 деформация материала, а после обработки обеспечивается отверстие для снятия детали диаметром D .

Углы заборного и обратного конусов дорнов следует принимать $\theta_1 = 4-6^\circ$; $\theta_2 = 2-6^\circ$.

Диаметр d_n рабочего пояса дорна определяется по формуле

$$d = D_{\min} + i_a,$$

где $D_{\min}$ – наименьшее значение диаметра отверстия детали по чертежу, мм; a – абсолютный натяг, мм.

$$i_a = \lambda_0 D_3,$$

где λ_0 – относительный натяг; D_3 – диаметр отверстия заготовки перед дорнованием, мм.

Таблица 5.13 – Значения подачи

Радиус r_p скруг- ления ролика, мм	Требуемый параметр шероховатости, мкм						
	1,25			0,63		0,32	
	Исходный параметр шероховатости Ra, мкм						
	10*	5	2,5	5	2,5	2,5	1,25
5	0,07	0,15	0,30	0,07	0,15	0,07	0,15
10	0,15	0,29	0,56	0,15	0,29	0,15	0,21
20	0,29	0,58	0,80	0,29	0,42	0,29	0,30
32	0,47	0,94	1,00	0,47	0,54	0,39	0,39
40	0,58	1,12	1,12	0,58	0,60	0,43	0,43
50	0,74	1,24	1,24	0,66	0,66	0,48	0,48
63	0,92	1,40	1,40	0,72	0,72	0,54	0,54
80	1,17	1,60	1,60	0,84	0,84	0,60	0,60
100	1,45	1,80	1,80	0,96	0,96	0,66	0,66
125	1,80	2,00	2,00	1,05	1,05	0,75	0,75
160	2,25	2,25	2,25	1,23	1,23	0,85	0,85
200	2,55	2,55	2,55	1,35	1,35	0,95	0,95

* – обработка производится за 2–3 прохода.

* – обработка производится за 2–3 прохода.

Значение λ_0 зависит от отношения диаметров наружного D_n и отверстия заготовки D_3 и выбирается по таблице 5.15.

Натяг можно определить и другим путем. Так, при дорновании заготовок из легированных сталей

$$i_{a \max} = T + 4K_{жс} z_m Ra, \quad i_{a \min} = 4K_{жс} z_m Ra,$$

где T – допуск на диаметр отверстия детали, мм; Ra – параметр шероховатости поверхности перед дорнованием, мм; $K_{жс}$ – коэффициент, учитывающий жесткость заготовки; z_T – коэффициент, учитывающий твердость обрабатываемого материала.

Таблица 5.14 – Коэффициенты условий обработки

Твердость заготовки HV	K_1	Ra		K_2	Число проходов	K_3
		требуемый	исходный			
До 160	1,2	1,25	10 5	0,25	1	0,5
160–300	1,0	0,63	5 2,5	0,35 0,85	2	1
300–375	0,4	0,32	5 2,5 1,25	0,14 0,24 0,40	3	1,4

Таблица 5.15 – Значение λ_0

Способ обработки отверстий перед дорнованием	Ra поверхности отверстия перед дорнованием, мм	Оптимальный относительный натяг при		
		$D_n / D_3 < 1,4$	$D_n / D_3 < 1,4-2,0$	$D_n / D_3 > 2,0$
Протягивание	0,6–2,5	0,0043–0,0050	0,0032–0,0038	0,0028–0,0032
Развертывание	1,2–2,2	0,0050–0,0065	0,0040–0,0055	0,0032–0,0040
Шлифование	0,6–2,4	0,0050–0,0065	0,0040–0,0055	0,0032–0,0042
Растачивание	1,0–1,8	0,0063–0,0084	0,0055–0,0070	0,0054–0,0060
Вибросверление	0,5–2,4	0,0065–0,0086	0,0058–0,0073	0,0056–0,0075

Значения коэффициента $K_{жс}$ в зависимости от отношения D_M/D_3 принимаются

D_M / D_3	3,3	2–3,3	2
$K_{жс}$	3,5	5	6

Значения коэффициента z_m в зависимости от твердости HV можно принимать:

HV	278–384	166–272	131–168	131
z_T	1,2	1,0	0,85	0,7

Допуск на изготовление дорна по диаметру может приниматься равным $\pm 1/8$ допуска на дорнуемое отверстие. Ширина цилиндрической

ленточки дорна $b_d = 1/3 d_n + 0,3$ мм. Диаметр отверстия под дорнование $D_3 = (d_n - i_a) - 0,007$ мм.

Допуск на диаметр отверстия перед дорнованием должен быть в пределах 10 квалитета точности для отверстий по 7 квалитету и в пределах 8 квалитета для отверстий по 5...6 квалитетам точности. Скорость дорнования, как правило, составляет 10–60 м/мин.

Давление p , МПа, создаваемое между поверхностью заготовки и дорном, можно определить из решения задачи Лямэ для толстостенных оболочек:

$$p = \frac{10i_a}{D_3 \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right)},$$

где i_a – абсолютный натяг, мм; D_3 – диаметр заготовки, мм;

$$C_1 = I - \mu_1; C_2 = (D_n^2 + D_3^2)/(D_n^2 - D_3^2) + \mu_2;$$

где D_n – наружный диаметр заготовки, мм; μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона материалов соответственно дорна и заготовки, для сталей $\mu = 0,3$.

Сила P_m проталкивания дорна через отверстие определяется из выражения

$$P_m = f \cdot p \cdot \pi \cdot D_3 \cdot l_{акт},$$

где f – коэффициент трения скольжения, для пары сталь по стали $f = 0,15$; $l_{акт}$ – активная длина контакта дорна, для однозубого дорна $l_{акт} = b_d$ (здесь b_d – ширина цилиндрической ленточки), для многозубого дорна $l_{акт} = b_d n_a$. Здесь n_a – максимальное число зубьев, одновременно находящихся в процессе дорнования в отверстии.

Управление микрогеометрией рабочих поверхностей прецизионных деталей из различных материалов можно осуществлять двумя путями. Первый заключается в регулировании уровня «зависания» поверхности деформирующего инструмента в пределах высоты неровностей обрабатываемой заготовки. Второй позволяет управлять микрогеометрией, изменением силы поджима инструмента к поверхности. Первый путь осуществим при обработке поверхностей с большой исходной шероховатостью и требует приспособлений с весьма высокой точностью перемещения деформирующего инструмента «к заготовке» и от нее при настройке на обработку. Этот вариант можно использовать для исправления геометрической формы поверхностей, но он меньше применяется

для управления шероховатостью прецизионных деталей из-за малой ее высоты и сложности настройки на обработку.

Поэтому для прецизионных деталей более приемлемым является второй путь, заключающийся в переменном силовом воздействии деформирующего инструмента на поверхность. Для получения поверхностей с отсутствием ПН необходимо осуществлять ППД в режиме создания ПРМР при значении P , полученном по приведенным ранее формулам. Изменение значений N_n и h_n может осуществляться обработкой ППД поверхностей при уменьшенных значениях P , рассчитанных по указанным выше формулам.

5.3.1.7 Формообразующая обработка ППД фасонных поверхностей

Формообразование фасонных поверхностей накатыванием заготовок в холодном состоянии отличается по сравнению с обработкой резанием высокой производительностью, пониженной стоимостью и повышенным качеством деталей. Их высокая механическая и усталостная прочность объясняются тем, что при формообразовании накатыванием волокна заготовок не перерезаются, что, например, имеет место при формообразовании резанием, а как бы повторяют профиль вновь созданной поверхности детали. Профиль накатываемых заготовок образуется вдавливанием выступов инструмента в материал и выдавливанием части материала во впадины инструмента. При этом подповерхностный слой накатанных деталей оказывается упрочненным, а поверхность не нуждается в дополнительной отделке. Формообразующая обработка ППД может выполнять функции черновой, чистовой и отделочной обработок и используется для получения резьб, мелких шлицев на валах и зубчатых венцов мелко модульных колес [98–101].

Накатывание резьб обычно производится до термической обработки заготовок. Распространенным способом является образование резьбы плашками (рис. 5.44 а). Заготовка 2 размещается между неподвижной 1 и подвижной 3 плашками, на рабочих поверхностях которых нарезаны рифления. Профиль и расположение рифлений соответствуют профилю и шагу накатываемой резьбы. При перемещении Ds_{np} подвижной плашки заготовка катится между инструментами, а на ее поверхности образуется резьба. Резьбу можно сформировать роликами (рис. 5.44 б). Ролики 1, 2 получают принудительное движение D_p , заготовка 2 свободно обкатывается (n_3) между ними. Ролику 3 придается радиальное (поперечное) движение Ds_n для вдавливания в материал заготовки на необходимую глубину. При этом достигается формообразование резьбы при меньших силах, чем при формообразовании плашками. Поэтому с

помощью роликов накатываются резьбы с большим шагом, чем с помощью плашек.

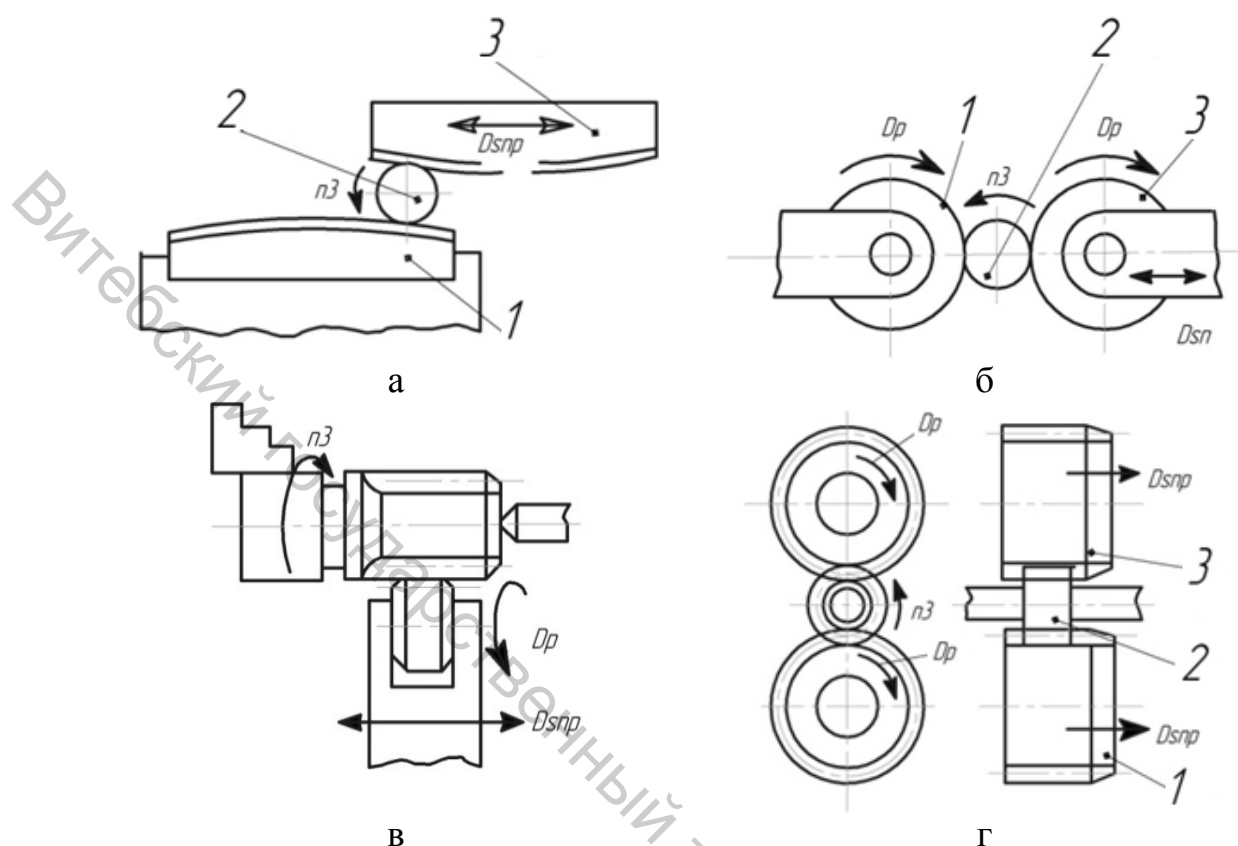


Рисунок 5.44 – Схемы формообразующего накатывания

Накатывать мелкие шлицы на валах (рис. 5.44 в) можно с помощью накатного ролика, имеющего профиль шлицев. Ролик внедряется в поверхность вращающейся (n_3) заготовки при вращении (D_p) и при поступательном движении (D_{snp}) вдоль вала.

Накатывание цилиндрических (рис. 5.44 г) и конических мелко-модульных колес в 15–20 раз производительнее зубонарезания. Процесс можно производить на станках накатниками 1 и 3, которые закреплены на суппорте и перемещаются с продольным движением подачи D_{snp} . Каждый накатник имеет заборную (конусную) часть для постепенного образования накатываемых зубьев на заготовке 2. Для накатывания применяется автоматизированное оборудование.

Универсальный резьбонакатной полуавтомат мод. 5933 (рис. 5.45 а) предназначен для наружного накатывания метрических и дюймовых резьб двумя накатными роликами. На станине полуавтомата размещена ножевая опора 1 для установки и обеспечения поддержки заготовок, относительно которой на станине б слева установлена неподвижная бабка 2, а справа – подвижная бабка 3. В зону обработки по трубопроводу 4 подается СОЖ. На неподвижной бабке установлен кулачок поперечной

подачи, который взаимодействует с роликом упора бабки 5. На неподвижной бабке 2 за шкивом ременной передачи установлены сменные колеса.

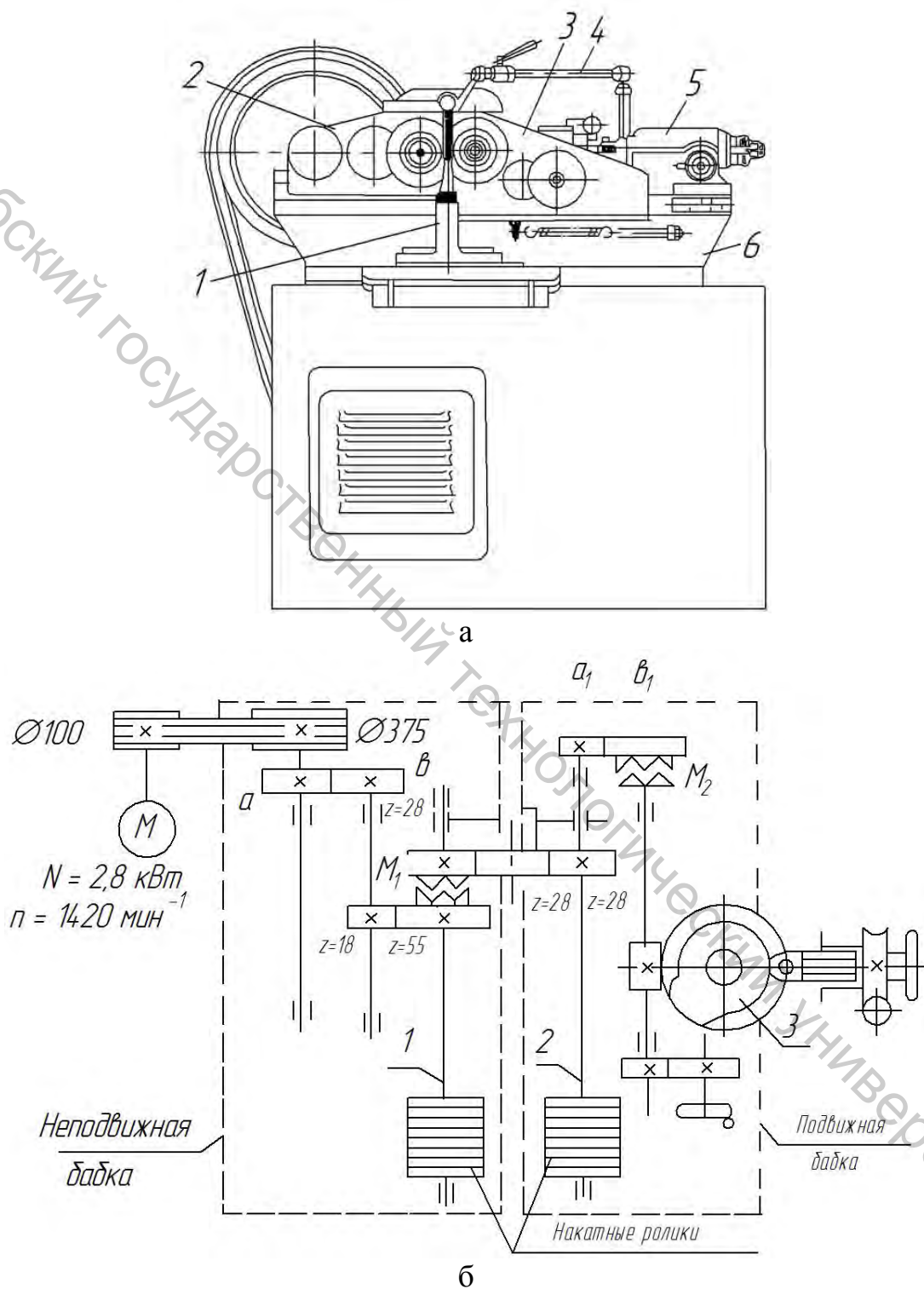


Рисунок 5.45 – Резьбонакатной полуавтомат мод. 5933:
а – общий вид, б – кинематическая схема

Диаметр накатываемой резьбы – 6–30 мм; наибольшая длина резьбы – 40 мм; наибольший шаг резьбы – 2,5 мм; направление резьбы – правое и левое.

Вращение накатному ролику сообщается от электродвигателя M через клиноременную передачу 100/375, сменные зубчатые колеса a/b , зубчатую передачу 18/55, муфту M_1 . Уравнение кинематического баланса имеет вид:

$$1420 \cdot \frac{100}{375} \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{18}{35} = n_p.$$

Набором сменных колес a , b можно регулировать частоту вращения накатного ролика в пределах 39–265 мин⁻¹. От шпинделя 1 накатного ролика через зубчатые колеса $z = 28$ вращение с такой же частотой передается на шпиндель 2. Поперечное перемещение подвижной бабки обеспечивается кулачком 3, которому сообщается вращение от шпинделя 2 через сменные зубчатые колеса a_1/b_1 , зубчатую муфту M_2 и червячную передачу. Частота вращения кулачка устанавливается сменными колесами a_1 , b_1 в зависимости от времени накатывания резьбы.

Перед работой вершины выступов резьб роликов смещают относительно друг друга на половину шага накатываемой резьбы. Для этого размыкается зубчатая муфта M_2 с $z = 100$ и разворачивается полумуфта на необходимое число зубьев. Поворот одной полумуфты относительно другой на один зуб обеспечивает смещение вершины резьб на 0,01 шага накатываемой резьбы. Накатывание наружных резьб можно осуществлять посредством накатных головок на металлорежущих станках.

Для накатывания наружных резьб используются накатные ролики (рис. 5.46 а) из сталей Х12М, Х68Ф, Х12Ф для обработки материалов твердостью 201–400 НВ. Размеры роликов колеблются в следующих пределах: $D_H = 75–207$ мм, $B = 25–125$, $d_0 = 45–100$ мм.

Накатывание (раскатывание) внутренних резьб диаметром 1–36 мм осуществляется бесстружечными метчиками (метчиками-раскатниками), а большего диаметра – раскатными головками. Метчики-раскатники показаны на рисунке 5.46 б-д. Размеры метчиков-раскатников следующие: $d = 1–16$ мм, шаг $t = 0,25–2$, $L = 36–100$, $l = 6–24$ мм, длина заборного конуса для сквозных отверстий $l_1 = 1,5–12$ мм, $d_1 = 2,24–12,5$ мм; для метчиков с $d = 3–7,5$ мм, $d_3 = 2,12–7,5$ мм, $l_3 = 4,5–15,6$ мм.

Резьбонакатные нераскрывающиеся головки выполнены в виде сборного инструмента (рис. 5.47 а) с установленными в корпусе 1 на осях роликами 2, которые вращаются и наклонены под углом, равным углу подъема резьбы. По окончании накатывания головка свинчивается

с резьбы. Ролики имеют заборную часть и по шагу смещены друг относительно друга на $1/i$ (здесь i – число роликов).

Наиболее распространены резьбонакатные самораскрывающиеся головки. В конце накатывания ролики этих головок расходятся, а накатанная заготовка освобождается без свинчивания.

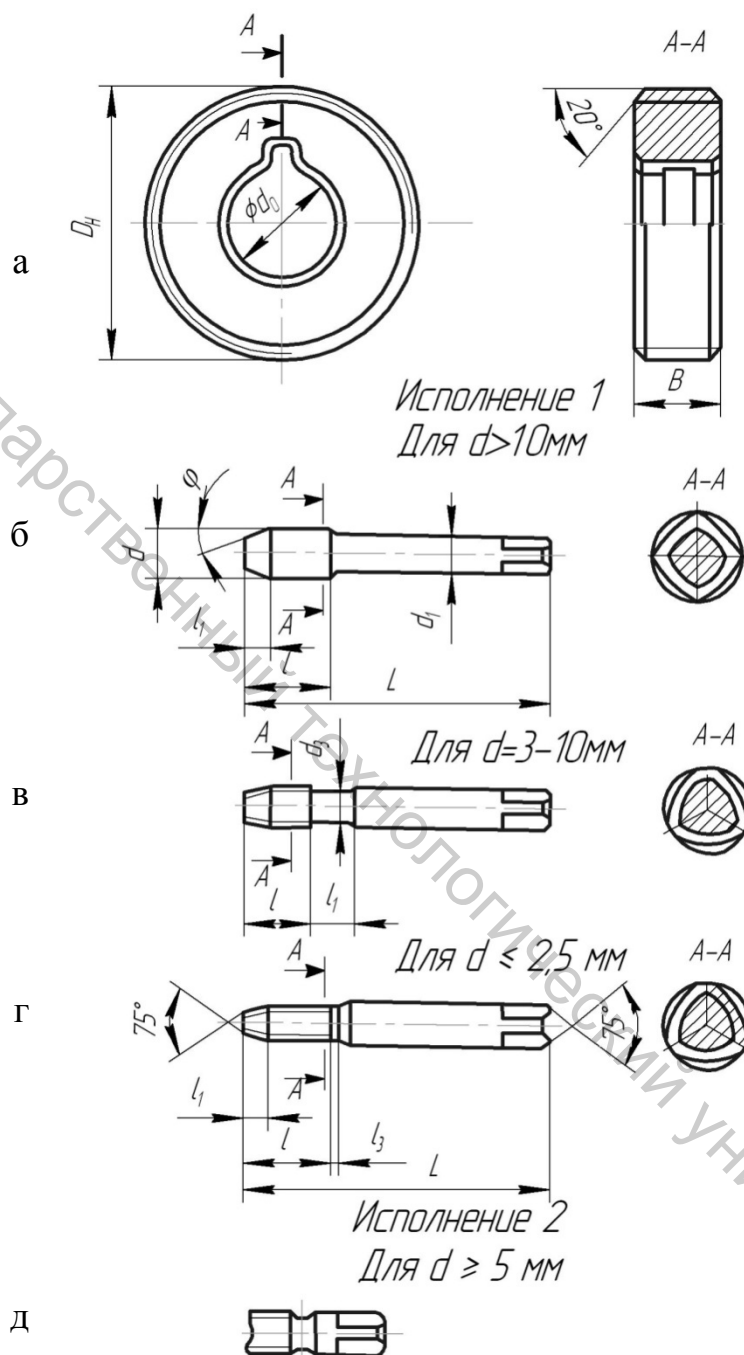


Рисунок 5.46 – Резьбонакатной инструмент:

а – ролик; б, в, г – метчики-раскатники для резьб соответственно с $d > 10$ мм, $d = 3-10$ мм, $d < 2,5$ мм; д – исполнение 2 хвостовика для метчиков с $d > 5$ мм

Двухроликовые тангенциальные головки (рис. 5.47 б) применяются на токарных станках. Вращение роликов в них осуществляется под действием принудительно вращающейся заготовки. Окончание накатывания происходит тогда, когда оси роликов и заготовки окажутся в одной плоскости, а вершины ниток одного ролика будут расположены против впадин другого.

При накатывании резьбы плашками средняя скорость накатывания, м/мин, и частота вращения заготовки, мин⁻¹, рассчитываются по формулам:

$$v = \frac{2Ln_{\text{дв.х}}}{1000}, n_3 = \frac{L_{\text{н.п}} n_{\text{дв.х}}}{pd_2},$$

где L – путь ползуна с плашкой, мм; $n_{\text{дв.х}}$ – число двойных ходов в мин; $L_{\text{н.п}}$ – длина неподвижной плашки, мм; d_2 – средний диаметр накатываемой резьбы, мм.

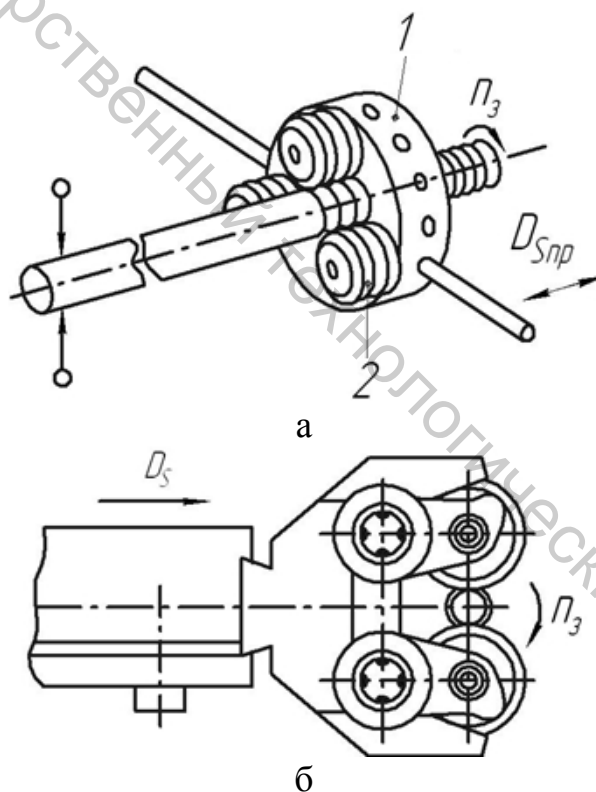


Рисунок 5.47 – Резьбонакатные головки

Силы накатывания плоскими плашками: радиальная (нормальная к профилю резьбы) составляющая

$$P = 0,72 \frac{l_p H_1 \sqrt{h_b (2r - H_1)}}{t \cos \alpha / 2 \cos \omega} (HB + 22);$$

тангенциальная составляющая (по образующей профиля)

$$P_m = (0,15-0,18)P_r,$$

где l_p – длина накатываемой резьбы, мм; H_l – высота профиля; h_b – глубина резьбы, мм; r – радиус заготовки, мм; t – шаг резьбы, мм; α – угол профиля резьбы; ω – угол подъема винтовой поверхности резьбы; HB – твердость материала по Бринеллю.

При накатывании роликами скорость накатывания составляет для латуни 100–120 м/мин; для мягкой стали 80–100; для стали средней твердости 40–60; для твердой стали 15–20; для титановых сплавов 12–14 м/мин.

Силы накатывания метрической резьбы роликами определяются по формулам

$$P_r = 3,5 \sqrt{\frac{\sigma_m^3}{E} \frac{D_H}{D_H + d_1}} d_1 \left(a + \frac{D_3 - d_1}{\cos \alpha / 2} \right) K, P_m = 0,08 P_r,$$

где P_r – радиальная сила, Н; σ_m – предел текучести металла, МПа; D_H – наружный диаметр ролика, мм; E – модуль упругости металла, МПа; d_1 – внутренний диаметр накатываемой резьбы, мм; a – ширина впадины резьбы, мм; D_3 – диаметр заготовки, мм; α – угол профиля резьбы, град; K – число накатываемых ниток резьбы; P_m – тангенциальная сила, создающая момент вращения заготовки вокруг оси, Н.

При накатывании внутренних резьб метчиками скорость резьбоформообразования принимается для алюминия и его сплавов 22–30 м/мин; для меди 15–22; для латуни 10–15; для стали 8–10 м/мин.

В качестве СОЖ при резьбонакатывании используются сульфол-резол, олеиновая кислота, В29, В31, В32-К, В35 и др.

5.3.1.8 Упрочняющая обработка ППД

Упрочняющая обработка ППД подразделяется на дробеструйную (обработка дробью) и виброударную. Дробеструйная обработка может осуществляться сухой дробью и дробью с СОЖ; виброударная с помощью стальных закаленных шаров (дробин) или с помощью смеси, состоящей из шаров и абразивных гранул (шлифзерна) [98–102].

Дробеструйная обработка характеризуется скоростью полета дроби 1–100 м/с, количеством одновременно участвующей в работе дроби

6–1400 кг/мин, частотой ударов $103\text{--}104\text{ с}^{-1}$ на поверхности диаметром 60 мм.

Дробь изготавливается из различных материалов (чугун, сталь, стекло или материал заготовки) и характеризуется методом изготовления (литая, рубленая из проволоки, шары для подшипников), диаметром (0,025–5 мм), неправильной (литая дробь) и правильной (шары) формой.

Очаг деформирования представляет собой круговой отпечаток диаметром d_0 и глубиной h с толщиной деформированной зоны h_σ . Отпечаток при обработке сухой дробью отличается от отпечатка при обработке с СОЖ. Если пространство под отпечатком представить в виде столбиков (рис. 5.48 а, б), то степень и направление пластического деформирования этих столбиков изменяется от центра к периферии. Деформирование металла в центре отпечатка затруднено, а на его периферии облегчено.

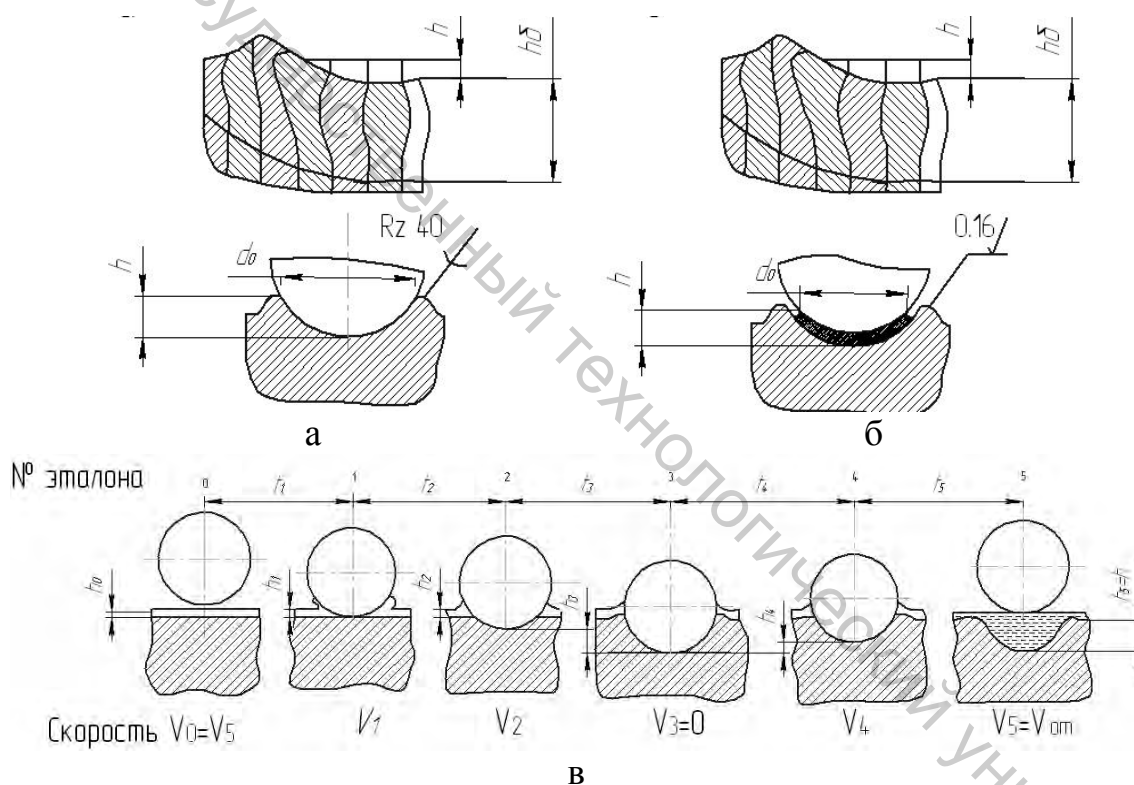


Рисунок 5.48 – Характер контактной зоны: а – без СОЖЭ, б – с СОЖ, в – этапы взаимодействия дроби с обрабатываемой поверхностью при обработке

При пневмодробеструйном упрочнении (ПДУ) обрабатываемый металл «сцепляется» в зоне контакта с поверхностью дроби, поэтому ПД самой поверхности затруднено: подповерхностные слои металла деформируются более интенсивно, чем сама поверхность (рис. 5.48 а). Наплеты имеют более заостренную и наклоненную форму в виде ПН, в верх-

нем слое создаются растягивающие (+) напряжения, а в более глубоких слоях – сжимающие (–).

При гидродробеструйном упрочнении (ГДУ) под поверхностью дробин обрабатываемый металл деформируется свободно, создавая по краям отпечатка наплывы более пологой формы. В этом случае создаются только сжимающие остаточные напряжения (рис. 5.48 б). При обработке дробью обычно имеет место прямой удар, когда шар (дробинка) внедряется в металл, а не скользит по поверхности. Процесс внедрения шара в материал при ударе состоит из нескольких этапов (рис. 5.48 в): преодоление шаром слоя (пленки) СОЖ толщиной $h_{жс}$ при скорости $v_0 = v_y$ (v_y – скорость удара), $h_1 = 0$, v_1 ; внедрение шара на глубину h_2 с обеспечением скорости v_2 , дополнительное внедрение его на глубину h_3 с обеспечением $v_3 = 0$; отскок шара на расстояние h_4 со скоростью v_4 , при этом энергия упругонапряженного металла сообщается шару, и он теряет связь с поверхностью; продолжение отскока шара, который затрачивает энергию на преодоление молекулярного сцепления с жидкостью; на поверхности остается лунка глубиной $h = h_5$, а $v_5 = v_{от}$ (здесь $v_{от}$ – скорость отскока дробин).

Уравнение баланса энергии имеет вид:

$$E_y = E_{ПД} + E_{ТР} + E_{Ж} + E_B,$$

где $E_{ПД}$ – энергия, затрачиваемая на остаточное пластическое деформирование (образование лунки); $E_{ТР}$ – энергия, затрачиваемая на трение без смазочного материала и адгезионное сцепление; $E_{Ж}$ – энергия, связанная с введением СОЖ при ГДУ и затрачиваемая на преодоление жидкостной пленки при внедрении шара и молекулярного сцепления с жидкостью при отскоке шара; E_B – волновая энергия, распространяющаяся в глубь металла.

Вибрационная обработка в зависимости от характера применяемой рабочей среды представляет собой механический или химико-механический процесс удаления частиц материала и его окислов с поверхности заготовок, а также сглаживания микронеровностей путем их пластического деформирования частицами рабочей среды. Эти процессы вызываются микроударами частиц рабочей среды об обрабатываемую поверхность, обусловленными действием направленных вибраций, сообщаемых рабочей камере 1, в которой размещены обрабатываемые заготовки 3 и рабочая среда 2. Рабочая камера смонтирована на спиральных (4) и плоских (5) пружинах и может совершать колебательные движения с частотой от 15 до 50 Гц и амплитудой от 0,5 до 8 мм под действием сил инерции вращающегося несбалансированного ротора 6 (рис. 5.49 а). Под действием вибраций рабочая среда и заготовки совершают два вида движений: колебательное и циркуляционное (медленное вращение всей массы). В процессе обработки заготовки занимают раз-

личное положение в рабочей среде, что обеспечивает достаточно равномерную обработку всех поверхностей.

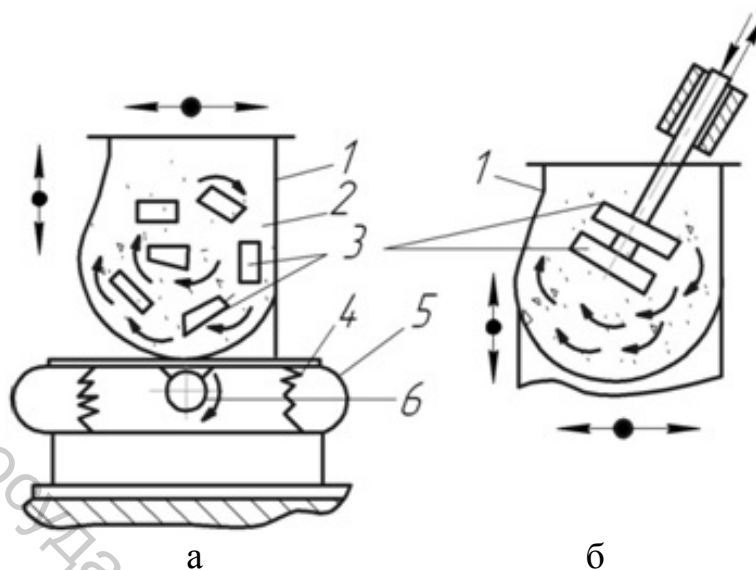


Рисунок 5.49 – Схемы виброабразивной обработки:
а – обычной, б – шпиндельной

Процесс обработки обычно протекает при непрерывной подаче СОЖ, которая обеспечивает удаление продуктов износа, смачивание заготовок и рабочей среды и равномерное распределение заготовок в рабочей среде. Интенсивность и качество обработки зависит от состава СОЖ и ее уровня в рабочей камере.

Вибрационная обработка позволяет выполнять следующие операции:

- очистные (очистка заготовок от окалины, накали и коррозии, удаление заусенцев, скругление острых кромок);
- шлифовально-отделочные (полирование поверхностей, поверхностный наклеп). В зависимости от целей обработки изменяются амплитуда и частота вибраций, а также состав рабочей среды и СОЖ.

В состав рабочей среды входят: абразивные компоненты (абразивная крошка, шлифзерно, галька, гранит, известняк), наполнители (металлические шарики или иголки, древесная крошка, резиновая крошка, кусочки кожи, пластмассы), водные растворы кальцинированной соды с моющими, разделяющими, травящими, пассивирующими или блескообразующими добавками. Кроме того, применяют мыльные растворы, а для отделки – водный раствор аммиака. Некоторые рекомендации по выбору рабочей среды приведены в таблице 5.16.

Скорость съема металла с заготовок существенно увеличивается с повышением частоты и амплитуды колебаний, особенно для бронзы. Аналогично влияют зернистость абразивной крошки и размер гранул. Наиболее интенсивно происходит удаление материала с острых кромок,

выступов и открытых поверхностей, причем среди последних более равномерно и интенсивно обрабатываются цилиндрические и сферические поверхности и сравнительно хуже – плоские. Обработка в глубоких карманах, отверстиях, пазах и углублениях происходит медленнее.

На интенсивность съема существенное влияние оказывают химически активные добавки, вводимые в раствор. Так, если съем при обработке стали с применением СОЖ в виде 1,5%-го раствора кальцинированной соды принять за 1, то добавка к нему 1 % олеиновой кислоты даст относительный съем, равный 1,89. А применение водного раствора серной кислоты и хромового ангидрида слабой концентрации дает относительный съем, равный 3,78. Применение 1 % стеариновой кислоты в керосине дает относительный съем, равный 5,68.

Указанные параметры условий виброабразивной обработки оказывают существенное влияние и на шероховатость обработанной поверхности. Для уменьшения параметра Ra необходимо уменьшить амплитуду вибраций, зернистость абразивной крошки, использовать крошку на бакелитовой или вулканитовой связке и с увеличенной твердостью. Применение поверхностно-активных добавок наряду с увеличением интенсивности съема может снизить Ra . С увеличением твердости заготовки в пределах от 50 до 300 единиц по Бринеллю показатель шероховатости Ra уменьшается в 2–2,5 раза. При дальнейшем увеличении твердости Ra практически не изменяется.

Повышение качества и производительности достигается применением шпиндельной виброабразивной обработки, схема которой показана на рисунке 5.49 б. Скорость вращения на поверхности заготовки достигает от 1 до 15 м/с.

Таблица 5.16 – Рекомендации по выбору рабочих сред

Абразивный компонент и наполнитель	СОЖ	Вид операции
Абразивная крошка зернистостью 16–125, твердостью Т–ЧТ	Содовый раствор	Удаление заусенцев и окалины, грубое шлифование
Абразивная крошка зернистостью 8–16, твердостью Т–ЧТ	Содовый раствор Раствор хромового ангидрида	Удаление небольших заусенцев, скругление кромок, чистовое шлифование черных сплавов и бронзы. То же для алюминиевых сплавов
Стеклоанная крошка или стеклянные шары	Мыльно-содовый раствор с олеиновой кислотой (1 %) Раствор хромпика	Полирование черных и цветных сплавов. Полирование алюминиевых сплавов
Древесная крошка, шлифпорошок или полировальные пасты	Всухую или при слабом увлажнении	Чистовое шлифование и полирование

5.3.2 Ионная имплантация и лазерная обработка

5.3.2.1 Ионная имплантация

В последние годы для повышения долговечности деталей машин все шире применяют ионную и лазерную обработку [7–8].

Ионная имплантация заключается во внедрении в поверхность ионизированных атомов легирующего вещества, ускоренных электрическим полем до нужной энергии. При этом наблюдаются нарушения исходной структуры поверхности – от образования в ней радиационных дефектов до распыления, а также взаимодействия внедряемой примеси с атомами исходной кристаллической решетки, в результате чего могут образоваться твердые растворы, химические соединения и выделены новые фазы.

Важнейшими параметрами ионной имплантации с прикладной точки зрения являются распределение легирующей примеси и радиационных дефектов по глубине, максимально достижимая доза легирования, ограниченная распылением поверхности, состав и структура модифицированного поверхностного слоя.

При легировании ионами средних масс с энергией в сотни килоэлектронвольт максимум концентрации легирующей примеси находится на глубине в десятые доли микрометра. Высокоэнергетическая имплантация с энергией ионов в несколько мегаэлектронвольт обеспечивает легирование на глубину, исчисляемую микрометрами. Но при этом токи пучков не достигают высокой интенсивности (до 10 мА/см^2), как при низкоэнергетической имплантации, что увеличивает время обработки.

Распыление поверхности изменяет гауссовый профиль распределения примеси по глубине на плитообразный с максимумом концентрации на поверхности. Распыление наиболее велико при имплантации низкоэнергетических ионов (около 10 кэВ ; $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{19} \text{ Дж}$) и при косом падении пучка ионов на поверхность (под углом $70\text{--}80^\circ$).

Ионную имплантацию можно использовать как способ изменения механических и химических свойств поверхности детали в нужном направлении. К ее преимуществам относится то, что имплантация приводит к образованию таких сплавов, которые невозможно получить в обычных условиях из-за ограниченной растворимости или диффузии компонентов. Состав получаемых сплавов управляем, причем объемные свойства материала не затрагиваются из-за малой глубины проникновения пучка ионов. Имплантация может быть финишной операцией технологической обработки, поскольку осуществляется в широком диапазоне температур (вплоть до отрицательных) и без заметного изменения размеров детали. Чтобы время обработки было не слишком большим (до 30 с/см^2), необходимо обеспечивать силу тока пучков ионов примерно 1

мА. Так как не существует явно выраженной границы раздела между получаемым поверхностным сплавом и основным материалом, то явление адгезии не играет большой роли.

Имплантацией можно обеспечить нужный профиль залегания примеси по глубине, причем процесс является высокопроизводительным. Этот метод вакуумночист и экологически безвреден. Основными недостатками ионной имплантации являются высокая стоимость оборудования и отсутствие мощных источников среднеэнергетических ионов. Малая глубина проникновения ионов сужает область применения имплантации, однако во многих случаях действие имплантированных ионов распространяется гораздо глубже, чем их первоначальное проникновение.

Влияние ионной имплантации на трение, изнашивание, твердость. Легкие атомы внедрения N, C, B обладают свойствами сегрегации к дислокациям, что блокирует движение последних и упрочняет поверхностный слой. Износостойкость при этом растет, а возникновение и развитие усталостных трещин ограничивается малой подвижностью дислокаций. Простое эквивалентное нарушение структуры, например, атомами Ag, не обладающими такими свойствами взаимодействия с дислокациями, как вышеуказанные атомы, не приводит к повышению износостойкости.

Влияние имплантации в условиях изнашивания при трении на слой, намного больший глубины проникновения ионов, объясняется увлечением их в глубь материала плотной сеткой дислокаций, постоянно возникающей под изнашиваемой поверхностью, а также диффузией вдоль линий леса дислокаций вследствие больших температурных градиентов, возникающих из-за локального разогрева микронеровностей. Коэффициент трения под действием ионной имплантации снижается также благодаря охрупченности мостиков сварки в контакте поверхностей из-за заторможенности движения дислокаций и более стойкой оксидной пленки, которая уменьшает адгезию.

Свойства азота способствовать переходу мартенсита в аустенит может привести к потере твердости аустенитных сталей при имплантации. Это было обнаружено при обработке заготовок из коррозионно-стойкой стали. Нестабильность образовавшихся при имплантации нитридов из-за высоких температур на режущих кромках делает неэффективной имплантацию азота для повышения износостойкости инструментальных сталей при обработке черных металлов.

Использование для повышения износостойкости малоуглеродистых сталей имплантации ионов *титана* оправдано при нагрузке P меньше предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, а твердых сталей при $P \leq 1,56\sigma_{сж}$. Легирование азотом повышает износостойкость малоуглеродистых или отпущенных высокоуглеродистых сталей при $P \leq 1,56\sigma_{сж}$.

Особенно эффективна ионная имплантация азота в стали с содержанием хрома более 12 %.

В таблице 5.17 приведены примеры повышения износостойкости деталей машин ионной имплантацией по данным проф. В. В. Ковалевского.

Имплантация азота **приводит** к заметному повышению долговечности низкоуглеродистой стали. Усталостная долговечность коррозионностойкой стали, титана и мартенситно-старееющей стали повышается после имплантации азотом в 8–10 раз.

Имплантация азота с энергией 150 кэВ в сталь с содержанием 0,18 % С при дозе $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ приводит к повышению предела усталостной долговечности. Наилучшие результаты получены при дополнительном старении образцов (рис. 5.50).

Ионная имплантация скорее воздействует на зарождение трещин, чем на процесс их развития. Содержащиеся в имплантированной азотом стали мелкие кристаллы $Fe_{16}N_2$ одновременно упрочняют ферритную фазу и облегчают движение дислокаций, соответственно и выход полос скольжения на поверхность более однороден. Усталостная долговечность повышается.

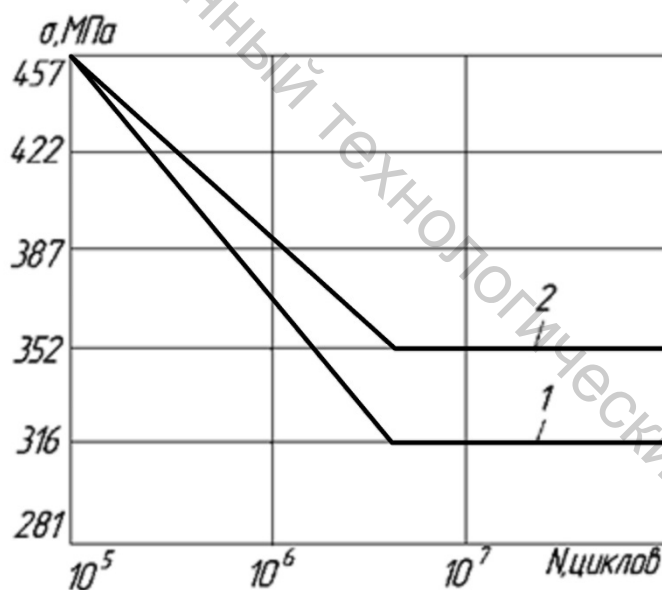


Рисунок 5.50 – Влияние имплантации на усталостную долговечность:

1 – без имплантации; 2 – после имплантации

Имплантация $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ионов азота и углерода в сплав на основе Ti с 6 % Al и 4 % V положительно влияет на его усталостную долговечность (рис. 5.51). Наибольшее количество трещин зарождается на расстоянии 25–150 мкм от поверхности. Подповерхностные трещины с позиций сопротивления усталости считаются менее опасными для данного материала в противоположность трещинам, зарождающимся на поверх-

ности. Поскольку ионная имплантация на глубине 1 мкм не способствует зарождению трещин, то естественно, что имплантация тормозит рост трещин к поверхности.

Таблица 5.17 – Эффективность обработки деталей ионной имплантацией

Материал заготовки	Имплантируемые ионы и параметры имплантации	Оказанное влияние
1	2	3
Цементированная сталь	Доза имплантации $10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$: Kr^+ Pb^+ Sn^+ $\text{Mo}^+ + 2\text{S}^+$	Испытание при трении с шариком из карбида вольфрама при давлении 10 МПа: не влияет на силу трения сила трения возрастает сила трения снижается в 2 раза сила трения снижается значительно, причем образование дисульфида молибдена MoS_2 (хорошего смазочного материала) не наблюдалось
Подшипниковая сталь	Большая доза имплантации Ti^+ или $\text{Ti}^+ + \text{C}^+$	Снижение коэффициента трения. Увеличение износостойкости. Имплантированный титан захватывается углеродом и образует аморфную фазу Ti-C-Fe в поверхностном слое. Износ уменьшается, так как износостойкость такого квазитугоплавкого карбида в 6–7 раз превышает износостойкость мартенситной стали. Имплантация существенно удлиняет инкубационный период изнашивания
	B^+ или N^+	Испытания по схеме палец (из той же стали) – диск показали, что положительного эффекта не обнаружено
	Hf^+	Предполагается положительное влияние из-за большей жаропрочности карбида гафния, чем жаропрочность карбида титана
	Ag^+ или Fe^+	Износостойкость возрастает
Среднеуглеродистая сталь с HV 230	N^+ при дозе имплантации 10^{18} см^{-2} и напряжении 35 кВ	Испытания по схеме палец – диск при смазывании уайт-спиритом. Снижение коэффициента износа по Арчарду от 5 до 10 раз при увеличении нагрузки на палец от 10 до 40 Н
	C^+ , N^+ или B^+ при дозе имплантации 10^{17} см^{-2}	Эффективное снижение изнашивания, причем повышенной износостойкостью обладают слои, толщина которых в 2–3 раза больше длины пробега иона
	Ne^+ или Ag^+	Создаются напряжения сжатия в поверхностном слое, хотя снижение изнашивания не происходит

Окончание таблицы 5.17

1	2	3
Коррозионно-стойкая сталь	Большая доза имплантации ионов N^+ , B^+ , C^+ , Ti^+ , Ti^{++} B^+ или Ti^{++} B^+ при напряжении 10–100 кВ	Трение со сталью того же класса в воде показало снижение износа в 10–100 раз. Микротвердость возрастает в 1,3–2 раза при имплантации B^+ , N^+
Сталь, содержащая 0,35 % C, 0,82 % Ni, 0,72 % Cr, 0,2 % Mo, 0,73 % Mn, 0,2 % Si	N^+ при напряжении 30 кВ и силе тока 80 мкА при дозе имплантации: менее 10^{17} см^{-2} $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$	Вибрационное трение без смазочного материала с цементированной сталью: износостойкость не изменилась износ снизился в 3 раза, обнаружено присутствие 20 % имплантированных атомов азота в подповерхностном слое после удаления изношенного слоя толщиной 5 мкм, что на несколько порядков больше глубины имплантации
Сталь Ст2	C^+ при напряжении 100 кВ	Износостойкость возрастает
Сталь 17–4PH	N^+ при напряжении 100 кВ	Возрастание износостойкости до двух порядков
Сплав WC–Co	N^+ при напряжении 40 кВ	Возрастание износостойкости, микротвердость увеличивается в 1,5 раза
Инструментальная сталь, содержащая 1 % C	При дозе имплантации $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ N^+	Возрастание абразивной износостойкости. Микротвердость увеличивается в 1,5 раза
Сталь 38ХМЮА	N^+	Микротвердость увеличивается в 1,8 раза
Сталь 40Х или сталь ХВГ	N^+	Микротвердость увеличивается в 2 раза
Сталь 30ХГСА	N^+ или C^+	Микротвердость увеличивается в 5 раз
Сталь Fe+ 18 % W+ + 4 % Cr+ 1 % V	B^+	Микротвердость увеличивается в 1,8 раза
Титан	N^+ или B^+	
Титановый сплав BT1–0	C^+ при напряжении 100 кВ	Износостойкость увеличивается в 5 раз
Быстрорежущая сталь	N^+ при дозе $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$	Увеличение долговечности сверл и метчиков при обработке пластиков в 5 раз
Сталь P18	N^+ при дозе $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$	Возрастание стойкости резцов в 3 раза
Высокоуглеродистая сталь с хромовым покрытием	N^+ при дозе $4,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$	Снижение интенсивности изнашивания пресс-формы для пластмасс в 4 раза. Улучшение качества продукции при штамповании ацетатной целлюлозы
Сплав T5K10	N^+ при дозе $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$	Возрастание стойкости резцов в 7,5 раза
Твердый сплав BK6	N^+ при дозе $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ C^+ или N^+ при дозе 510^{17} см^{-2}	Увеличение долговечности режущей кромки для искусственной резины в 2 раза. Повышение долговечности волоочильной фильеры для медных прутков в 5 раз

Это положение подтверждается исследованиями испытанных на усталость медных образцов, в которых отсутствие зон экструзии и интрузии свидетельствует о блокировании движения дислокаций через имплантированную поверхность и ограничении образования устойчивых полос скольжения. Увеличение долговечности было отмечено при имплантации ионов бора, хлора, гелия, никеля, азота и неона.

При фреттинг-усталости в отличие от усталости отмечено зарождение трещин в титановых сплавах с поверхности. Положительный результат дала имплантация ионов Ba^+ при дозе 10^{16} см^2 на нагартованный

сплав Ti+ 6 % Al + 4 % V, что обеспечило 55 % долговечности от ее уровня без фреттинга.

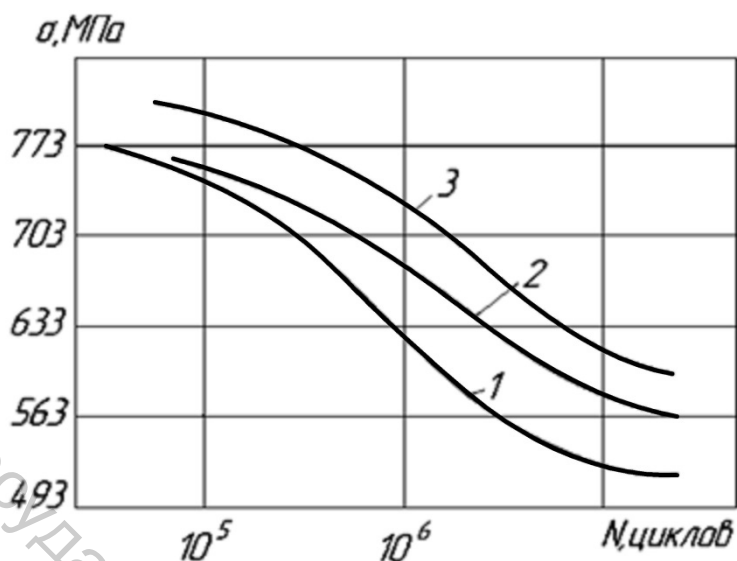


Рисунок 5.51 – Усталостные кривые для сплава на основе титана:

- 1 – без имплантации; 2 – после имплантации азота;
3 – после имплантации углерода

Причиной усталостного разрушения титановых сплавов в условиях высоких температур является охрупчивание поверхности из-за перехода (β -фазы в α -фазу под действием кислорода). Усталостные трещины зарождаются у дефектов хрупкого поверхностного слоя. Положительное влияние на стойкость к окислению и высокотемпературную усталость сплава Tiс 6 % Al, 2 % Sn, 4 % Zn и 2 % Mo оказала имплантация платины с дозой (1...2) 10^{16} см⁻² и энергией 150 кэВ, а также имплантация бария с дозой 2– 10^{16} см⁻² и энергией 125 кэВ.

При имплантации с целью повышения *коррозионной стойкости* следует уделять внимание снижению загрязнения поверхности углеродом, который может внедряться в подповерхностный слой сплава в результате вторичной имплантации после столкновения с ионным пучком. Загрязнение углеродом способствует образованию коррозионно-ингибирующего слоя на поверхности металла, что подавляет пассивацию и инициирует локальную коррозию с образованием инертных карбидных включений, которые проявляют тенденцию снижать стойкость поверхностных сплавов к питтингу.

Хотя при высоких дозах ионной имплантации возникает большое количество дефектов, предварительно установлено, что дефекты не оказывают существенного влияния на электрохимическое поведение поверхностных сплавов, образованных при имплантации. Значительно большую роль играют различия между другими характеристиками сплавов. Так как многофазные сплавы имеют тенденцию к проявлению оча-

говой гальванической коррозии между фазами с различной химической реакционной способностью, то желательным является получение однофазных сплавов с наибольшей химической однородностью. Использование имплантации для получения однофазных твердых растворов, далеких от равновесного состава, определяет перспективность имплантации как метода поверхностного легирования. Аморфные поверхностные сплавы представляют собой особый случай, в котором отсутствие межзеренных границ и других дефектов может оказать значительное воздействие на общее сопротивление коррозии поверхностного слоя.

При имплантации низкоэнергетических (20–25 кэВ) ионов хрома в железо с дозой $(1,25 \dots 2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ достигается общая пассивация, аналогичная характеристикам обычных двойных сплавов. Однако поведение поверхностных сплавов в отношении питтинга было сходным с их поведением в чистом железе. Среднеэнергетические (150 кэВ) ионы Cr^+ также дают наиболее инертные поверхностные сплавы на чистом железе по сравнению с ионами In^+ , Ag^+ , N^+ , Ni^+ , Cu^+ .

Для увеличения износостойкости в коррозионной среде особое значение приобретает возможность получать в поверхностном слое метастабильные соединения со специфическими свойствами и осуществлять экономное легирование дорогими элементами. Также является благоприятным создание аморфных поверхностных слоев металлов при ионном легировании. Так, при облучении ионами диспрозия происходит аморфизация монокристаллического никеля; при облучении ионами Ba^+ аморфный слой возникает на поверхности стали 40X13, а при легировании фосфором и бором – на поверхности коррозионно-стойкой стали. Легирование поликристаллического железа ионами Ni^+ с энергией 25 кэВ и дозой 10^{16} см^{-2} значительно повышает стойкость материала к окислению.

Имплантация ионов Ba^+ в сплав $\text{Ti} - 6 \% \text{Al} - 4 \% \text{V}$ с энергией 40 кэВ несколько повысила его коррозионную стойкость. Это объясняется возникновением преципитатов BaTiO_3 , образующих когерентную границу с TiO и эффективно препятствующих диффузии кислорода.

Ионная имплантация N^+ и B^+ , которую часто применяют для упрочнения поверхности, в целом снижает скорость коррозии в кислой и кислотнo-хлоридной среде. Имплантирование тантала при энергии 20 кэВ с дозой $(0,5 \dots 2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ способно благоприятно изменить пассивацию железа преимущественно за счет включения в пассивирующую пленку.

Существенное повышение, по данным Хирвонена и Клайтона, активационно-пассивационного состояния и стойкости к питтингу было достигнуто для сталей, относящихся к мартенситному классу, например для сплава М50 (0,8 % С, 0,1–0,35 % Мн, 0,1–0,25 % Si, 4,0–4,5 % Мо, 0,9–1,1 % V) и подшипниковой стали 52100 (0,9 % С, 0,36 % Мн, 1,36 % Cr), приведенным в таблице 5.18.

Таблица 5.18 – Рекомендуемые режимы имплантации

Материал	Ионы	Доза • 10 ¹⁷ , см ²	Напряжение, кэВ
М50	Cr ⁺	1,5	150
	Mo ⁺	0,5	100
Сталь 52100	Cr ⁺	2	150
	P ⁺	5	40
	Ta ⁺	1	150

Одним из вариантов сочетания ионной имплантации с традиционными методами упрочнения поверхности является легирование низкоэнергетическими ионами ($E \leq 1$ кэВ) при температурах, вызывающих эффективное перераспределение примеси диффузионным путем. Такое сочетание легирования и диффузионного отжига позволяет получить модифицированные слои толщиной в десятки микрометров, что значительно превосходит этот параметр при ионной имплантации. В отличие от традиционного азотирования обеспечиваются отсутствие примесных атомов загрязнения и варьирование структуры и свойств легированного слоя. Износостойкость повышается за счет радиационных дефектов структуры, образования твердых растворов и новых фаз при высоких дозах легирования, изменения кинетики зарождения и движения дислокаций, создания сжимающих напряжений.

При такой обработке быстрорежущих сталей Р6М5 с твердостью $HRC_3=64-65$, полученной закалкой и двукратным отпуском при 560 °С, повышены износостойкость в 3 раза, микротвердость в 1,8 раза (рис. 5.52). Процесс проходил при $U=500$ В, $t=350$ °С в течение 0,5–1,5 ч. Выделения новых фаз в поверхности не обнаружено. Возникающие в поверхностном слое остаточные сжимающие макронапряжения возрастают с увеличением легирования до предела текучести около 700 МПа.

Испытания на износостойкость проводили по схеме цилиндр – плоскость при максимальном контактном давлении 550 МПа. Ионная обработка не сказывается на начальном и установившемся коэффициентах трения, а существенно понижает его лишь в период приработки. Статистически значимых изменений топографии поверхности не обнаружено.

Весьма перспективным для получения тонкопленочных структур, защищающих от изнашивания и коррозии, является сочетание воздействия ионных пучков с традиционными методами нанесения покрытий. Использование метода осаждения с активацией ионным пучком обеспечивает регулирование состава и сцепления с подложкой без каких-либо ограничений на толщину пленки, имеющих при прямой ионной имплантации.

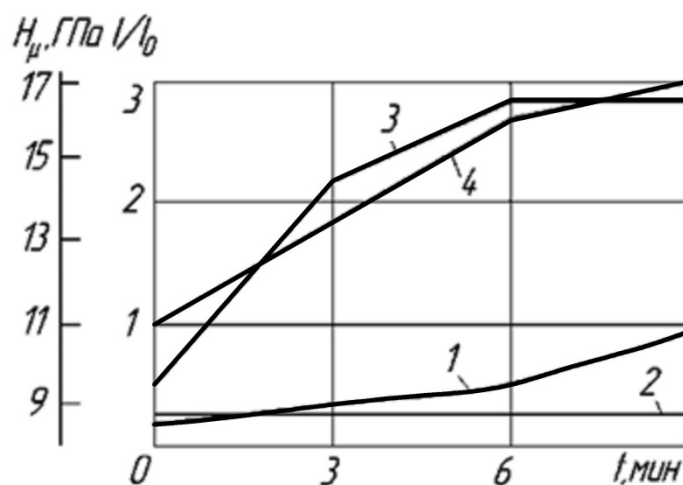


Рисунок 5.52 – Зависимость твердости $2_{\text{н}}$ и относительной износостойкости $3_{\text{н}}$ от времени облучения:

1 – твердость HV5; 2 – твердость HV20; 3 – твердость H_{μ} (0,2 Н);
1, 2, 4 – отношение износостойкости легированных и исходных образцов

Процесс *ионного азотирования* осуществляется в тлеющем разряде на поверхности детали (катод) в атмосфере аммиака, азота или смеси водорода и азота при разрежении 133–665 Па и рабочем напряжении 350–550 В. Процесс ионного азотирования можно рассматривать как двухстадийный: 1) очистка поверхности катодным распылением, обеспечивающая активацию поверхности и разрушение оксидных пленок; 2) нагрев поверхности до температуры диффузии с насыщением ее азотом. При этом энергия иона азота в 3000 раз превосходит энергию атома азота, получаемого в условиях печного азотирования. Под действием ионной бомбардировки нитридный слой образует низкие нитриды железа ($\text{FeN} \rightarrow \text{Fe}_3\text{N} \rightarrow \text{Fe}_4\text{N}$), азотистый α_{N} – твердый раствор железа ($\alpha_{\text{N}} \rightarrow \text{FeN}$), который, частично диссоциируя, диффундирует в более глубокие поверхностные слои, образуя зону внутреннего азотирования.

Азотированный слой на сплавах железа состоит из двух зон: поверхностной нитридной (карбонитридной), развитой сравнительно слабо, и диффузионного подслоя – зоны внутреннего азотирования.

Структура поверхностной нитридной зоны зависит от потенциала насыщающей среды при азотировании и состава азотируемого сплава. Для металлов, образующих один нитрид (молибден, ванадий), нитридная зона состоит из этого нитрида. Для металлов, образующих два и более нитридов, нитридное покрытие состоит из последовательно расположенных нитридных слоев.

При азотировании железа и его сплавов в среде с высоким азотным потенциалом нитридная зона состоит из последовательно расположенных нитридных слоев: Fe_2N (ξ -фаза) $\rightarrow \text{Fe}_{2-3}\text{N}$ (ϵ -фаза) $\rightarrow \text{Fe}_4\text{N}$ (γ -фаза) – и нередко содержит большое количество пор, что приводит к снижению твердости и контактного сопротивления усталости. Для

устранения пор в диффузионном слое нужно снизить концентрацию азота в ξ -фазе уменьшением активности насыщающей атмосферы.

Кроме того, покрытия высокоазотистого нитрида Fe_2N (ξ -фаза) имеют низкую пластичность по сравнению с высокой пластичностью малоазотистых нитридных фаз Fe_3N , Fe_4N .

В процессе азотирования в среде, содержащей источники кислорода, нитридная зона приобретает оксикарбонитридный характер. При азотировании железа и его сплавов в жидких средах или аммиаке с добавлением углеродсодержащих газов образуется нитрид $\text{Fe}_3(\text{N}, \text{C})$ или $\text{Fe}_3(\text{N}, \text{C}, \text{O})$, что ведет к повышению пластичности.

Зона внутреннего азотирования состоит из азотистого твердого раствора основного металла, его нитридов и нитридов легирующих элементов. По азотной активности легирующего элемента различают зоны внутреннего азотирования первого и второго рода. Для первого рода характерно выделение нитридов основного металла, а для второго рода – нитридов легирующих элементов.

Зона внутреннего азотирования повышает предел прочности и контактную выносливость. Однако зона внутреннего азотирования содержит и множество пор, что снижает сопротивляемость электрохимической коррозии. Фазовые и структурные различия поверхностных слоев достигаются за счет варьирования скорости катодного распыления, которая изменяется в зависимости от напряжения и давления газа, а также за счет состава фазовой среды.

Легирующие элементы уменьшают толщину азотированного слоя, резко повышают твердость поверхности по сечению диффузионного слоя. По степени повышения твердости при азотировании легирующие элементы можно расположить в ряд: Mo , Cr , Mn , Si , Ni .

При содержании титана более 0,6 %, ванадия более 1 % и хрома более 2 % образуются нитриды легирующих элементов. Легирование железа большинством нитрообразующих элементов (Ti , V , Cr , Mo , W , Nb , Zn) увеличивает растворимость азота в железе, при легировании Al и Si она снижается.

Сильно повышают растворимость азота в феррите хром и ванадий, растворимость азота при этом может достигнуть 2–3 %. Ниобий и цирконий задерживают развитие нитридной зоны, измельчают зерно, снижают хрупкость азотированного слоя и повышают твердость.

Азотированный слой можно рекомендовать для: упрочнения спеченных металлокерамических сплавов; деталей, работающих на изнашивание в коррозионной среде при малых контактных нагрузках; упрочнения углеродистых и легированных сталей, не содержащих алюминия (азотированный слой с нитридной зоной); деталей, работающих при знакопеременных нагрузках в условиях изнашивания при высоких давлениях (азотированный слой с развитой зоной внутреннего азотирования); режущего и штампового инструмента (азотированный слой без

нитридной зоны); сталей, содержащих алюминий (38Х2МЮА), работающих в режимах динамического изнашивания и при ударных нагрузках (азотированный слой без нитридной зоны).

Варьируя параметры технологического процесса ионного азотирования (давление, температуру, продолжительность, состав газовой смеси), можно решать вопросы структуры и свойств поверхностного слоя. Лучшей износостойкостью обладают нитридные поверхностные зоны с максимальной пластичностью. Образование в слое большого количества высокоазотистого малопластичного нитрида Fe_2N и перенасыщенность слоя азотом ухудшают износостойкость материала. Хорошей износостойкостью обладают материалы, азотированные в смеси 75 % N_2 + 25 % Ar . Чем выше температура азотирования, тем больше глубина азотированного слоя (рис. 5.53). Глубина азотированного слоя изменяется в зависимости от содержания аргона в смеси для различных сталей по-разному. Разбавление азота аргоном в насыщенной среде влияет на пластические характеристики (рис. 5.54).

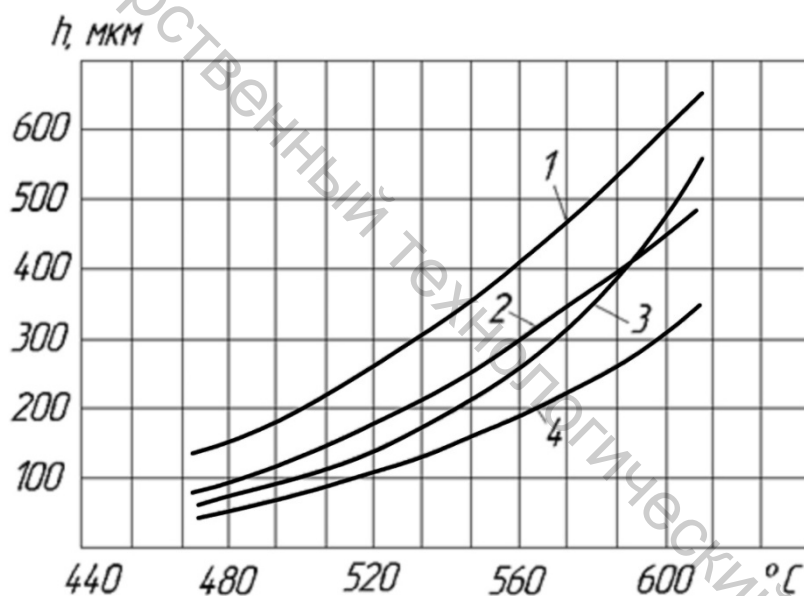


Рисунок 5.53 – Влияние температуры на глубину азотирования:

- 1 – сталь 20Х; 2 – сталь 40Х; 3 – сталь 38ХМЮА;
4 – сталь 45Х (среда 100 % N_2 , $p = 265$ Па, $t = 6$ ч)

Распределение азота по толщине диффузионного слоя показывает, что характер концентрационных кривых низколегированных сталей одинаков при всех способах азотирования. При высоком содержании азота на поверхности (6–7 %) имеет место его резкое уменьшение в тонком слое (0,02–0,03 мм), насыщенном нитридами. В зоне твердого раствора с меньшим содержанием нитридов концентрация азота практически не изменяется (рис. 5.55).

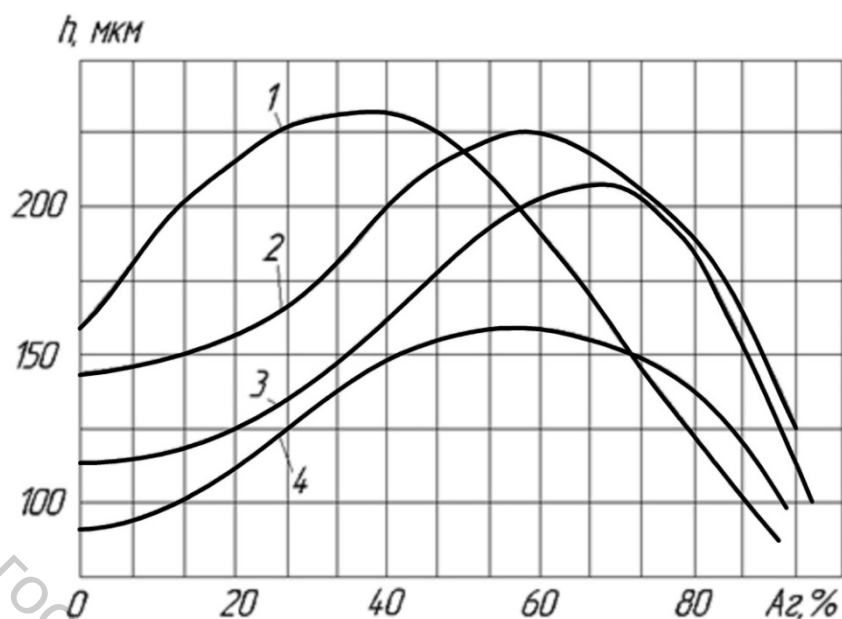


Рисунок 5.54 – Распределение аргона по толщине азотированного слоя:
 1 – сталь 20X; 2 – сталь 40X; 3 – сталь 38ХМЮА;
 4 – сталь 45X (среда 100 % N₂, $p = 265$ Па, $t = 6$ ч)

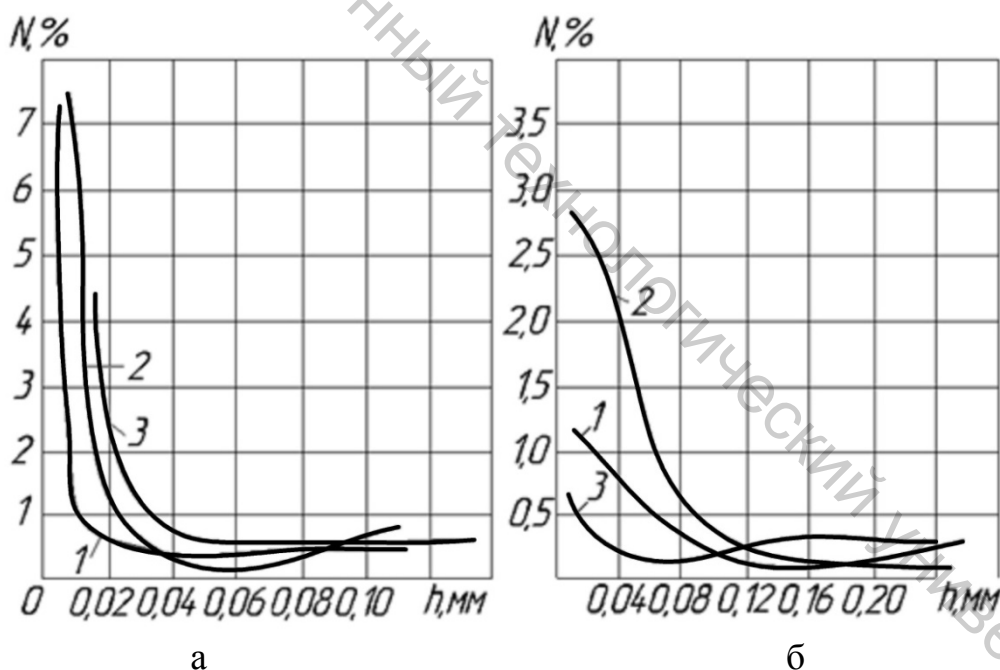


Рисунок 5.55 – Распределение азота по толщине диффузионного слоя в заготовке из сталей 38XC (а) и 13X11H2B2MF (б):
 h – расстояние от поверхности; 1 – вакуумное азотирование;
 2 – ионное азотирование; 3 – газовое азотирование

Для высокохромистой стали 13X11H2B2MF различие в насыщении азотом максимально при ионном азотировании, что коррелирует с

данными (табл. 5.19) и характером распределения твердости по толщине диффузионного слоя (рис. 5.56).

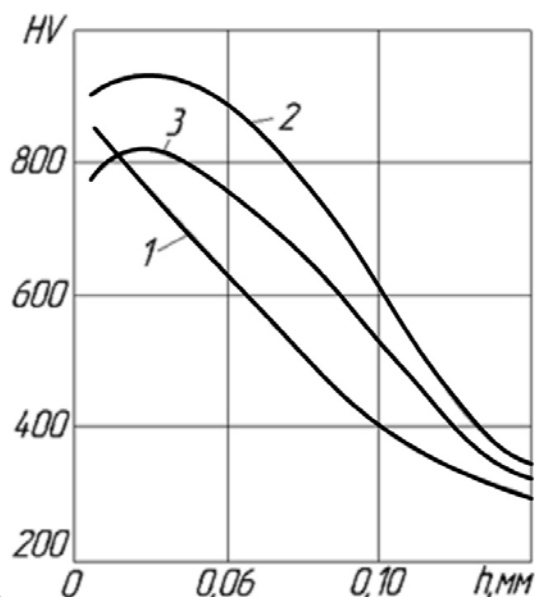


Рисунок 5.56 – Распределение твердости по толщине диффузионного слоя в заготовке из стали 13X11H2B2MФ:

1 – газовое азотирование; 2 – ионное азотирование;
3 – вакуумное азотирование

Зависимость глубины азотированного слоя от времени выдержки имеет параболический характер независимо от марки стали и параметров азотирования, они влияют только на абсолютное значение глубины азотированного слоя.

Таблица 5.19 – Рекомендуемые режимы имплантации

Материал заготовки	Температура азотирования, °С	Скорость насыщения, мм/ч, при азотировании		
		газовом	ионном	вакуумном
Сталь 38ХС	500–600	0,010	0,020 0,045	0,02–0,04
Сталь 13X11H2B2MФ	560–600	0,002	0,019	0,02
		0,008	0,025	0,01
Материал заготовки	Температура азотирования, °С	HV после азотирования		
		газового	ионного	вакуумного
Сталь 38ХС	500–600	600–800	600–800	520–890
Сталь 13X11H2B2MФ	560–600	800–950	560–1100	720–1100

С увеличением продолжительности азотирования твердость увеличивается незначительно. Наиболее интенсивное повышение твердости имеет место в первоначальный период (первые 1–3 ч), а после $\tau = 6$ ч процесса твердость практически не увеличивается. С повышением температуры азотирования твердость конструкционных сталей уменьшает-

ся. Распределение твердости по толщине диффузионного слоя в заготовке из стали 13X11H2B2MФ представлено на рисунке 5.57. При ионном азотировании кривая изменения твердости по глубине азотированного слоя падает менее круто, что свидетельствует о более равномерном распределении микротвердости по глубине слоя, а также неоднородности его фазового состава.

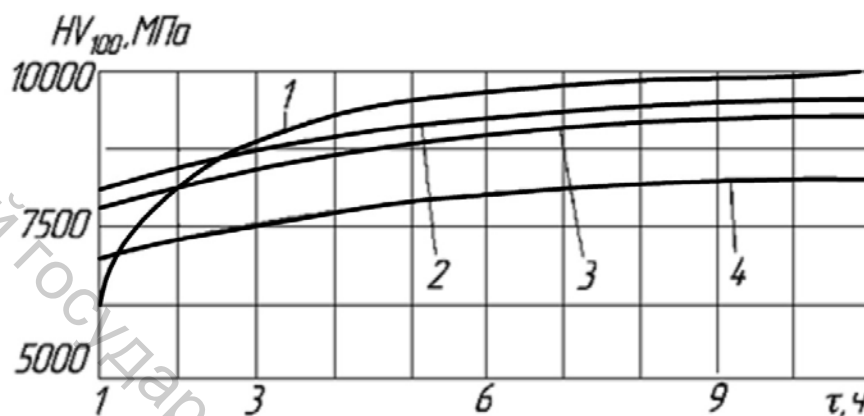


Рисунок 5.57 – Изменение твердости в зависимости от продолжительности процесса азотирования поверхности заготовки из стали 40X:

1 – $t = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $t = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $t = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – $t = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$
(среда 75 % N_2 + 25 % Ar , $p = 250\text{ Па}$)

Основным фактором, влияющим на твердость азотированного слоя сталей Р6М5, Р18, является состав твердого раствора, прежде всего содержание W, Mo, V. Высокая концентрация легирующих элементов и большое количество дисперсных карбидов в стали Р6М5 уменьшают глубину диффузионного слоя. Повышение температуры и продолжительности азотирования приводит к росту нитридной и диффузионной зон азотированного слоя. Нитриды, осаждающиеся в азотированном слое, обладают повышенной дисперсностью, твердостью и устойчивостью против коагуляции при нагреве. При более высоких температурах и выдержках на поверхности быстрорежущей стали образуется ϵ -фаза, обогащенная легирующими элементами и обладающая повышенной хрупкостью. Диффузионная зона имеет высокую твердость и вязкость и обеспечивает повышение сопротивления усталости. Диффузионная зона и зона соединений имеет также высокую теплостойкость (до 500–600 $^{\circ}\text{C}$).

Для повышения вязкости диффузионного слоя и износостойкости инструмента, работающего в условиях знакопеременных изгибающих нагрузок (сверла, развертки, зенкера), рекомендуется отпуск при 300 $^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч в камере азотирования.

5.3.2.2 Лазерная обработка

Лазерный луч – это мощный и концентрированный поток электромагнитного излучения, отличающийся от других энергетических методов воздействия на вещество особо упорядоченным состоянием [103]. Промышленные лазерные системы делят на три основные группы: твердотельные; газовые, среди которых наиболее распространен CO_2 -лазер; полупроводниковые. В настоящее время осваивают перестраиваемые лазеры на кристаллах, твердотельные лазеры на кристалле иттрий-литиевого флюорита, легированного эрбием, длина волны излучения которого 1,73 мкм.

Лазерный луч отличается высокой плотностью энергии. Поглощение металлами лазерного излучения приводит к мгновенному увеличению энергии свободных и связанных электронов. Возбужденные электроны сталкиваются с атомами решетки, время их релаксации равно 10^{-12} с. Энергия лазерного излучения трансформируется в движение атомов, и температура поверхностного слоя резко повышается. Этот тонкий поверхностный слой становится интенсивным источником теплоты.

Быстрый теплоотвод в глубь металла приводит к возникновению закалочных структур в поверхностном слое. Преимуществом лазерного термоупрочнения металлов является хорошая управляемость процессом. По сравнению с другими источниками теплоты геометрия лазерного луча легко изменяется оптическими приспособлениями, что позволяет достичь в труднодоступных местах деталей, включая внутренние поверхности полых валов и отверстий.

После лазерной обработки упрочняется тонкий поверхностный слой. При этом нет необходимости тратить энергию на прогрев всей основы, предотвращается коробление обрабатываемой заготовки. Искажение поверхности при лазерной обработке минимально. Варьируя параметрами лазерного излучения, можно легко управлять тепловыми полями поверхностной зоны, уменьшая температурные напряжения.

Режим лазерной обработки с оплавлением является средством внедрения сторонних элементов в материал заготовки и получения в ней наперед заданных свойств.

Лазерный луч используют для аморфизации поверхности, лазерной наплавки, отжига, шокового упрочнения. Применение лазерной обработки в комбинации с другими методами позволяет либо улучшить качество уже нанесенного покрытия либо получить новое покрытие (табл. 5.20) [7–8].

Лазерная обработка заготовок из сталей и чугунов значительно увеличивает износостойкость. В условиях трения скольжения стали 45 по твердому сплаву коэффициент трения после лазерной закалки непре-

рывным лазером уменьшается на 10 % по сравнению с коэффициентом трения при нормальном или улучшенном состоянии. Лазерную обработку нормализованных или отожженных сталей рекомендуется проводить при малых скоростях (менее 15 м/с) сканирования лазерным лучом. Такие же результаты получаются при лазерной обработке заготовок из сталей после их закалки и высокого отпуска.

Таблица 5.20 – Комбинированные методы улучшения качества поверхности с помощью лазерной обработки

Метод	Материал заготовки	Результат
1	2	3
Лазерное легирование легкими элементами и карбонитридами	Стали 40X, 45, 65Г	Под слоем карбонитридов (15–20 мкм) создается слой азотистого мартенсита толщиной 150–200 мкм, далее – зона углеродистого мартенсита до 2–3 мм
Легирование при лазерном нагреве с последующим азотированием	Стали 20 и 35	Микротвердость при легировании алюминия составляет 18 000–20 000 МПа. Износостойкость увеличивается в 15 раз по сравнению с износостойкостью при азотировании
Последовательные ионное и лазерное воздействия	Стали 95X18 и 45	Уменьшение размеров зерен и дробление блоков. Микротвердость возрастает на 15–20 % по сравнению с микротвердостью при отдельной имплантации азота или лазерной закалке
Термопластическая обработка при лазерном оплавлении	Углеродистые стали	Рост дисперсности структуры и сжимающих напряжений, что ведет к увеличению микротвердости
Цементация + лазерная обработка	Стали 20 и 20X43Л	Повышение временного сопротивления и износостойкости
Нанесение интерметаллидных покрытий + лазерное оплавление	Порошок системы Ni–Al	70%-ное насыщение материала подложки при толщине слоя 0,3–0,4 мм. Высота неровностей не превышает 160 мкм. Микротвердость 4500–5000 МПа. Гидроабразивная стойкость увеличивается в 1,6–2 раза
Лазерное облучение и последующая электродуговая ОУО	Стали 45 и 40X	Уменьшаются параметры шероховатости и волнистости
Борохроммирование + лазерная обработка	Сталь 40X	Микротвердость возрастает до 2340 МПа
Предварительная закалка в масле, отпуск при 625 °С и последующая лазерная обработка	Низколегированная сталь	Микротвердость увеличивается от 620 до 730 МПа
Никелирование и оплавление при лазерном облучении	Сплав Al с 5 % Si и 3 % Cu	Толщина покрытия 250 мкм. Структура – тонкодисперсные дендриты Al ₃ Ni и Al в междендритных участках, 500–600 НУ, зона термического влияния 10–30 мкм
Гальваническое покрытие Мl–В + лазерная обработка		Микротвердость 6400–7510 МПа

Окончание таблицы 5.20

1	2	3
Электроэрозионное покрытие электродом из ВК8 + лазерное оплавление	Среднеуглеродистая сталь	Формируется зона термического влияния большой толщины, уменьшаются параметры шероховатости, высота микронеровностей 20 мкм, низкая пористость и значительная микротвердость
Лазерное облучение и последующая электродуговая ОУО	Стали 45 и 40Х	Уменьшаются параметры шероховатости и волнистости
Предварительная закалка в масле, отпуск при 625 °С и последующая лазерная обработка	Низколегированная сталь	Микротвердость увеличивается от 620 до 730 МПа
Никелирование и оплавление при лазерном облучении	Сплав А1 с 5 % Si и 3 % Cu	Толщина покрытия 250 мкм. Структура – тонкодисперсные дендриты Al_3Ni А1 в междендритных участках, 500–600 НУ, зона термического влияния 10–30 мкм
Предварительная закалка в масле, отпуск при 625 °С и последующая лазерная обработка	Низколегированная сталь	Микротвердость увеличивается от 620 до 730 МПа
Гальваническое покрытие М1– В + лазерная обработка		Микротвердость 6400–7510 МПа
Электроэрозионное покрытие электродом из ВК8 + лазерное оплавление	Среднеуглеродистая сталь	Формируется зона термического влияния большой толщины, уменьшаются параметры шероховатости, высота микронеровностей 20 мкм, низкая пористость и значительная микротвердость
Лазерная обработка + электроискровое легирование	Стали Х12М и ХВГ	Лазерная закалка приводит к созданию твердой подложки, которая препятствует продавливанию предварительно нанесенного слоя. Стойкость штампов увеличивается в 2,5 раза
Лазерная обработка + ППД	Чугун	Изменяет значение и характер распределения остаточных напряжений с целью увеличения сопротивления усталости
Борирование + лазерное облучение	Инструментальные стали	Микротвердость увеличивается от 14 000 до 18 000 МПа. Устраняется скол боридного слоя с режущей кромки
Комплексное лазерное и криогенное упрочнение		Твердость увеличивается от 730–830 после закалки и отпуска до 1100 НВ
Комплексное лазерное и ультразвуковое упрочнение	Стали Х12, ХВГ, Р6М5	Уменьшение параметров шероховатости при исходной $Ra=0,63$ мкм после совместной обработки $Ra=0,25$ мкм. Твердость HV_{100} 1200–1600 при исходной HV_{100} 250

По данным проф. А. Г. Григорьянца, обработка непрерывным излучением заготовок из сталей 09Г2, 35, 45, 40Х, 75Г приводит к повышению предела выносливости до 520 МПа (в исходном состоянии 200–300 МПа). Повышение предела выносливости и контактной прочности обеспечивается за счет образования высокотвердой мартенситной структуры. Сравнительные испытания по упрочнению переходных по-

верхностей валов показали эффективность лазерного упрочнения (рис. 5.58 и 5.59 (1 – без упрочняющей обработки; 2 – упрочнение роликом; 3 – электромеханическое упрочнение; 4 – лазерное упрочнение)).

Для обеспечения глубины упрочнения до 300 мкм заготовки из чугуна СЧ18 оптимальная плотность энергии лазерного облучения должна быть $8 \cdot 10^4$ Вт/см². Структура поверхностного слоя состоит из ледебуритных участков, которые придают поверхности противозадирные и износостойкие свойства. Оптимальные режимы без оплавления поверхности чугуна достигаются при обработке заготовки с плотностью энергии $2 \cdot 10^4$ Вт/см². Получаемая твердость по Виккерсу HV 666 ... 677, до упрочнения HV 262.

В общей проблеме трения и изнашивания фреттинг занимает особое место в связи с широким комплексом физико-химических явлений. Лазерная обработка может эффективно повысить фреттингостойкость мест сопряжений деталей машины.

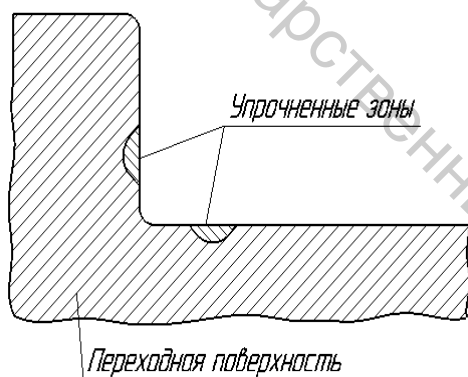


Рисунок 5.58 – Схема упрочнения галтелей валов

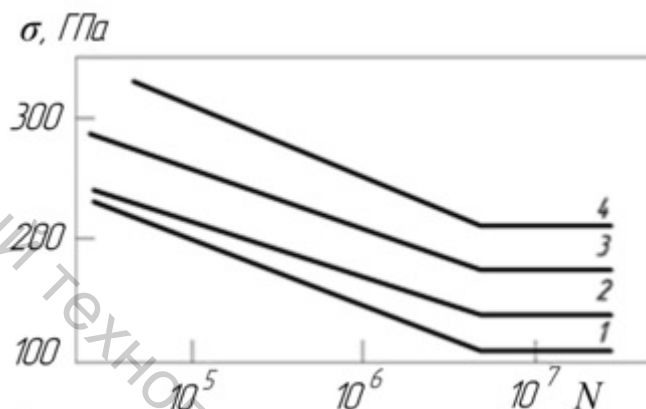


Рисунок 5.59 – Кривые усталости ступенчатых образцов из стали 45 в зависимости от вида упрочнения переходной поверхности вала

5.3.3 Нанесение покрытий

5.3.3.1 Гальваническое хромирование

В условиях жесткой конкуренции одним из направлений в повышении долговечности изделий машиностроения без их удорожания является использование различных покрытий [7–8, 104–113].

Для улучшения эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей машин, в основном износостойкости, коррозионной и эрозионной стойкости, применяют различные способы нанесения металличе-

ских и неметаллических покрытий. Основные способы нанесения *гальванических покрытий* (рис. 5.60) приведены в таблице 5.21.

Таблица 5.21 – Основные виды гальванических покрытий и области их применения

Способ нанесения покрытия	Толщина покрытия, мкм	Область применения
Хромирование	Многослойное: 15 в легких условиях, 30 в средних условиях, 45 в тяжелых условиях	Хромовое покрытие стойко против действия окружающей среды, азотной и щелочной кислот, большинства газов и органических кислот; горячая концентрированная серная кислота и галоидные кислоты растворяют хром; хромовое покрытие хорошо выдерживает равномерно распределенную динамическую нагрузку, но разрушается при сосредоточенном ударе
Цинкование	7–12 в легких условиях, 13–20 в средних условиях, 25–30 в тяжелых условиях	Для защиты от коррозии деталей, работающих во влажной окружающей среде, главным образом деталей из стали и чугуна; детали машин, стальные листы, детали ширпотреба, работающие на открытом воздухе, для повышения защитных свойств подвергают фосфатированию
Меднение	5–35	Медное покрытие не может служить защитой от коррозии для железа, поэтому применяют как подслоя при никелевом и хромовом покрытиях
Свинцевание	75–100 в средних условиях, 10–200 и даже 400 в тяжелых условиях	Защита от коррозии металлических конструкций, работающих в условиях контакта с серной кислотой, растворами солей серной кислоты и сернистыми газами. Свинцеванию подвергают детали из стали, чугуна, меди, медных сплавов, алюминия и его сплавов. Для надежности защиты не должно быть пор
Кадмирование	7–10 в легких условиях, 10–15 в средних условиях, 20–50 в тяжелых условиях, 35–45 в специальных условиях	Для защиты от коррозии конструкций, работающих в контакте с морской водой; защиты от коррозии пружин, резьбовых и крепежных деталей, работающих в легких условиях
Никелирование	Никель без подслоя: 12 в легких условиях, 24 в средних условиях, 36 в тяжелых условиях	Для защиты от коррозии и получения декоративной поверхности; как подслоя при хромировании никелем покрывают также детали приборов, аппаратов, автомобилей

Окончание таблицы 5.21

Лужение	3–5 консервная тара, 20–25 пищевые котлы и посуда, 1–2 контакты приборов	Лужению подвергают детали из железа, стали, чугуна, меди, латуни, широко применяют в пищевой промышленности для покрытия контактов приборов, для защиты медных кабелей от серы, находящейся в резине, для защиты деталей специальной аппаратуры. Защитные свойства покрытия на деталях из стали, железа, чугуна надежны только при отсутствии пор, беспористость достигается увеличением толщины покрытия
Латунирование	3–5	Латунные покрытия хорошо сцепляются с различными покрытиями, обладают хорошей сцепляемостью с каучуком, применяют как подслой при серебрении, никелировании, лужении и других покрытиях

Гальваническое хромирование может быть декоративным или служить средством повышения коррозионной стойкости и износостойкости деталей. Если хромирование применяют для защиты от коррозии, то стальные детали предварительно покрывают слоем меди толщиной 0,03–0,04 мм и слоем никеля толщиной 0,015–0,02 мм или только слоем никеля, после чего наносят слой хрома толщиной 0,01–0,2 мм. Подслои необходимы также, когда детали работают на износ в коррозионных средах.



Рисунок 5.60 – Гальваническая линия

Для повышения износостойкости деталей слой хрома толщиной до 0,1–0,2 мм наносят непосредственно на стальную поверхность. В этих случаях часто применяют электролитическое хромирование. Электролитический хром обладает высокой коррозионной стойкостью, низким коэффициентом трения, высокой твердостью ($HV\ 1000\text{--}1100$) и жаростойкостью. Хромовые покрытия снижают коэффициент трения сопряженных пар, что уменьшает тепловыделение при трении. Износостойкость

хромированных деталей возрастает в 5–15 раз. При тщательной подготовке поверхности прочность сцепления хрома со сталью, чугуном, никелем, медью и латунью при испытании на сдвиг достигает 300 МПа. Однако стали с высоким содержанием вольфрама и кобальта, а также высокоуглеродистые стали и высококремнистые чугуны хромировать нельзя. Трудно получить хорошее сцепление хрома с поверхностью деталей, испытывающих значительные внутренние напряжения (например, в результате неправильной закалки).

В качестве электролита для хромирования обычно применяют хромовый ангидрид с добавками серной кислоты (табл. 5.22). Нерастворимые аноды изготавливают из свинца или сплава с сурьмой. Электролиты с более низкой концентрацией хромового ангидрида позволяют получить повышенную твердость хромового слоя. Однако при работе с ними нужно чаще корректировать состав ванны и применять более высокое напряжение.

Таблица 5.22 – Состав хромовых электролитов

Концентрация хромового ангидрида	Содержание, г/л		Основное назначение
	CrO ₃	H ₂ SO ₄	
Низкая	150	1,5	Повышение износостойкости деталей
Высокая	300–400	3,0–4,0	Декоративные цели
Средняя	200–250	2,0–2,5	Повышение износостойкости и декоративные цели

Физико-механические свойства электролитических осадков хрома зависят от режима хромирования и толщины покрытия. Различают три основных типа хромовых покрытий: молочные, блестящие и матовые. Для декоративных целей применяют хромирование при плотности тока 10–50 А/дм² и температуре электролита 45–50 °С. При этом получают гладкие блестящие поверхности.

Молочные хромовые покрытия получают при температуре электролита 65–72 °С и плотности тока более 15 А/дм². Их применяют главным образом для защиты деталей от коррозии. Для повышения износостойкости деталей используют матово-блестящие, молочно-блестящие осадки хрома, имеющие высокую твердость.

Их получают при плотностях тока 30–100 А/дм² и температуре электролита 55–65 °С.

Для повышения износостойкости деталей применяют также пористое хромирование, отличающееся от твердого введением операций травления (анодной обработки) после наращивания блестящего, матово-блестящего или молочно-блестящего хрома, дающего сетку тончайших трещин. Травление ведут в той же ванне, что и хромирование, причем анодом служат обрабатываемые детали, а катодом – свинец. Глубина пор может быть 0,5–1,0 мм, а их площадь 20–50 %.

Оптимальная плотность тока для получения покрытий с тончайшими первичными трещинами 40–60 А/дм² при температуре электролита 50–75 °С. С повышением температуры пористость уменьшается, а ширина каналов (пор) увеличивается (сетка пор становится редкой).

В зависимости от режимов обработки пористость может быть канальчатой (с сечением каналов примерно 0,05 x 0,05 мм) или точечной. При плотности тока 40 А/дм² и температуре электролита 45–60 °С для получения канальчатого пористого покрытия анодную обработку ведут в течение 7–8 мин, для получения точечного покрытия 11–12 мин. В первом случае травят молочные и молочно-блестящие осадки, во втором – матовые и матово-блестящие с последующей притиркой. Точечная пористость обладает большей маслостойкостью, поэтому ее применяют для упрочнения деталей, работающих в особо тяжелых условиях, например для верхних компрессионных поршневых колец двигателей.

Точечная пористость характеризуется быстрой прирабатываемостью, но износостойкость покрытия с точечной пористостью несколько ниже износостойкости канальчатого покрытия. Канальчатое покрытие применяют для гильз цилиндров. Износ пористохромированных гильз и поршневых колец меньше нехромированных в 4–7 раз, причем износ сопряженных стальных деталей уменьшается в 3–5 раз.

Наряду с пористыми покрытиями для повышения износостойкости деталей применяют плотные покрытия, наносимые по накатке. Срок службы их в 1,5–2 раза больше пористых покрытий, а расход хрома меньше (30–50 % от расхода при канальчатом хромировании).

После хромирования детали часто подвергают шлифованию и доводке. При снятии большого слоя хрома для сохранения пористости после механической обработки шлифование иногда выполняют в два этапа: предварительное после хромирования и окончательное после анодной обработки. Шлифование хромированных деталей рекомендуется выполнять шлифовальными кругами СМ1–С2 зернистостью 36–46 или СМ1–С1 зернистостью 60–80 при скорости вращения круга 20–35 м/с, скорости вращения детали не менее 10 м/мин, глубине резания 0,005–0,015 мм/дв. ход, подаче 0,2–0,5 (в долях круга) и расходе охлаждающей жидкости 15 л/мин. При обработке, особенно анодной, у выхода из каналов появляются бугорки высотой до 0,8 мкм, поэтому отделочное шлифование, хонингование или доводку рекомендуется выполнять после анодной обработки.

Качество хромового покрытия контролируют дважды: после хромирования и после шлифования. При предварительном контроле наружным осмотром выявляют наросты, непокрытые места, отслаивание, чешуйчатость, раковины, следы шелушения и другие дефекты.

Упрочнение хромированием широко применяют в машиностроении и приборостроении для повышения износостойкости цилиндров и двигателей, поршневых колец, плунжерных пар топливных насосов ди-

зелей и других деталей, а также при изготовлении и ремонте режущего, измерительного инструмента и штампов.

При хромировании калибров, пробок, скоб, крепежных деталей, арматуры толщина слоя хрома 3–10 мкм; деталей, работающих при давлении выше 2,5 МПа с динамическими нагрузками и нагревом (пресс-форм для литья под давлением, пуансонов, матриц для алюминия, режущего инструмента (развертки, фрезы, прошивки, зенкеры)), 15 мкм; деталей, у которых хромированная поверхность соприкасается с металлом, парами и газами под давлением и покрытие подвергается нагреву (пресс-форм для пластмассы, формовочных штампов, сопел), 30–50 мкм; деталей, работающих при средних давлениях (0,5–2,5 МПа), например шеек роторов, шпинделей, пальцев и валиков в шарнирах, соединительных пальцев, поверхностей шеек и кулис, 50–60 мкм; деталей, работающих на изнашивание поверхности при давлении 0,5 МПа, например измерительных инструментов (калибров, пробок, скоб, направляющих валиков и втулок), до 80 мкм; деталей, работающих без динамических нагрузок и без перемещений хромированной поверхности (гнезд подшипников, деталей, требующих доводки), до 100 мкм; трущихся деталей станков, машин и механизмов (шеек валов и зубчатых колес, соединительных пальцев, валиков, щек кулис, шпинделей, шеек осей, реек, червяков) – 10–15 мкм; деталей, требующих восстановления размеров, прессовых и плотных соединений, гнезд шарикоподшипников – до 1000 мкм; цилиндров двигателей внутреннего сгорания – 20–50 мкм; вытяжных и обрубных штампов – 3–10 мкм; пресс-форм для пластмасс, резины и стекла – 40–60 мкм; пресс-форм для литья металла под давлением – 10–20 мкм.

Качество хромирования зависит от выбора подвешного устройства, расположения анодов по отношению к покрываемой поверхности и защиты мест, не подлежащих покрытию. Подвесные устройства нужно конструировать так, чтобы между анодом и катодом (покрываемой поверхностью) было одинаковое расстояние по всему объему ванны, а электролит был ограничен непроводящими ток поверхностями, предотвращающими отклонение силовых линий. Утечка устраняется полной изоляцией одного из электродов. Для выхода газов, образующихся между анодом и катодом, можно делать отверстия в аноде. Равномерности отложения хрома, особенно при размерном хромировании, способствует установка в ванне экранов. Нехромируемые места обычно изолируют листовым целлулоидом, целлулоидными лаками (цапонлак, эмалит), полихлорвиниловым пластиком.

Для покрытия небольших участков крупных деталей (например, шеек длиной до 200 мм трансмиссионных и других валов длиной 5–10 м) целесообразно применять местное хромирование, без погружения в ванну всей детали.

Большой интерес представляет хромирование деталей, работающих в условиях кавитационного разрушения. Стойкость молочного хромового осадка к кавитационному разрушению не зависит от основного материала детали. Кавитационное разрушение молочного хрома в 13 раз меньше износа стали 43; в этом отношении он не уступает высокохромистым сталям 9X13, X9C2, а также сталям У 8, ШХ15, ХВГ, обработанным на высокую твердость.

5.3.3.2 Твердое никелирование

Для повышения износостойкости трущихся поверхностей деталей и восстановления их размеров часто применяют твердое никелирование. Никелевые покрытия имеют меньшую твердость, чем хромовые, и обладают следующими преимуществами: они сравнительно легко обрабатываются, имеют большую вязкость при толщине слоя до 2 мм; коэффициент линейного расширения никеля близок к коэффициенту линейного расширения стали, в то время как у хрома он в несколько раз выше [7–8, 104–113].

При твердом никелировании требуется в 3–4 раза меньше мощности источников постоянного тока, чем при хромировании, а расход энергии примерно в 20 раз меньше.

Электролиты твердого никелирования имеют различные составы. На приборостроительных заводах рекомендуется использовать электролит следующего состава: 140 г/л сернокислого никеля и 300 г/л щавелевокислого аммония с кислотностью H 7,5–8 при плотности тока 10 А/дм² и температуре электролита 75–80 °С. Скорость осаждения никеля в таком электролите 50–60 мкм/ч; получаемые осадки имеют микротвердость 5500–6500 МПа.

Для повышения твердости и улучшения сцепляемости с основным металлом детали, покрытые твердым никелем, желательно в течение 1 ч подвергать термической обработке в муфельных печах при температуре 300–400 °С. Это на 2000–2500 МПа увеличивает микротвердость покрытия и повышает коррозионную стойкость деталей.

Технологический процесс твердого никелирования обычно включает следующие операции: механическую обработку для придания точности формы; устранение дефектов с поверхности, подлежащей покрытию, и получение необходимой чистоты; изоляцию мест, не подлежащих покрытию; обезжиривание деталей венской известью; промывку в холодной воде; электролитическое травление в сернофосфорном электролите; промывку в горячей воде; осаждение на рабочую поверхность сплава никель – фосфор; термическую обработку при температуре 400 °С в течение 1 ч (она увеличивает твердость слоя и прочность его сцеп-

ления с основанием на 20–30 %); механическую обработку и окончательный контроль.

Травление ведут в электролите, состоящем из одной части H_2SO_4 и четырех частей H_3PO_4 , при плотности тока 20 А/дм^2 в течение 2,0–2,5 мин. При выборе твердого никелирования как способа восстановления размеров и повышения износостойкости деталей следует учитывать, что в зависимости от состава электролита и режимов обработки физико-механические свойства осажденного сплава никель – фосфор резко изменяются. Так, с увеличением содержания фосфора в покрытии его твердость возрастает: при отсутствии фосфора она составляет HRC, 32, а при содержании 1,5 % фосфора HRC, 57. Количество фосфора в сплаве регулируют путем изменения концентрации гипофосфита в электролите; увеличение концентрации от 0,08 до 10 г/л повышает содержание фосфора в покрытии.

Коррозионная стойкость фосфористо-никелевых покрытий в условиях окружающей среды и в водопроводной воде выше хромовых и обычных никелевых покрытий. Прочность сцепления с мало- и среднеуглеродистыми сталями 120–140 МПа, с легированными 70–90 МПа. Коэффициент трения стали по чугуна на 30 % ниже коэффициента трения стали по хрому; коэффициент трения хрома по бронзе несколько выше. При трении без смазочного материала износостойкость покрытия в 2,5–3 раза выше, чем износостойкость закаленной стали 45, и на 10–20 % ниже, чем износостойкость хрома. Покрытия из фосфористого никеля меньше снижают усталостную прочность, чем хромовые и обычные никелевые.

Изнашиваемость сопряженных деталей из различных металлов при работе по фосфористо-никелевым покрытиям в 4–5 раз меньше, чем при работе по стали, и на 20–40 % меньше, чем при работе по хрому.

Упрочнять и восстанавливать твердым никелированием можно детали типа коленчатых валов, шпинделей металлорежущих станков, поршневых пальцев, гильз цилиндров, поршней гидравлических машин, направляющих втулок. Твердое никелирование можно применять также при ремонте неподвижных посадок и деталей приборов. При восстановлении таких деталей, как шпиндели металлорежущих станков, шейки коленчатых валов, гильзы цилиндров, осаждают слой твердого никеля толщиной 0,75–1,25 мм.

5.3.3.3 Борирование

Электролитическое борирование заключается в том, что в результате электролиза расплавленной буры $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ создается элементарный бор, который в момент выделения диффундирует в металл, образуя на

его поверхности бориды железа, а при наличии углерода – карбиды бора [7–8, 104–113]. При электролитическом борировании плотность тока 0,20–0,25 А/дм². Температуру электролита регулируют с помощью реле и контактного терморегулятора. Питается установка постоянным током.

Основные технологические факторы, влияющие на физико-механические и эксплуатационные свойства борированного слоя: температура электролита, время выдержки и химический состав материала обрабатываемых деталей.

Толщина борированного слоя на низколегированных сталях при температуре до 950 °С составляет около 0,3 мм. При дальнейшем повышении температуры она увеличивается мало, но значительно возрастает хрупкость слоя. С увеличением времени выдержки t толщина слоя возрастает по параболическому закону:

$$y^2 = 2Pt,$$

где $2P$ – параметр, характеризующий скорость роста слоя.

Среднее значение параметра $2P$ можно определить как тангенс угла наклона параболических кривых, построенных в координатах $y^2 = t$. При выдержке более 8 ч сильно увеличивается хрупкость слоя.

Твердость борированного слоя HV2000–2500. Наибольшую твердость имеет борированная поверхность деталей из сталей 55С2А и 30ХГСА, несколько меньшую – из сталей 12ХН2А и 12ХН3А, еще меньшую – из сталей 40Х и 35.

При любой температуре (прочие условия одинаковые) максимальная толщина борированного слоя получается на деталях из стали 30ХГСА и последовательно уменьшается на деталях, изготовленных из сталей 50С2А, 12ХН3А, 12ХН2А, 35 и 40Х. Рекомендуется детали из указанных сталей борировать при температуре 950 °С и выдержке 6 ч. При этих условиях получается слой наилучшего качества и достигается высокая износостойкость борированных деталей. Из сталей, подвергнутых сравнительным испытаниям, после борирования наиболее износостойкой оказалась сталь 12ХН2А, а затем стали 12ХН3А и 40Х.

Слой бора не изменяет своих свойств при нагреве до температуры 950 °С и обладает повышенными кислотостойкостью и жаростойкостью при температуре до 800 °С. Прочность его сцепления с основным металлом такая же, как и прочность цементованного слоя. Высокая твердость слоя бора сообщает поверхности деталей хорошую износостойкость. Вот почему борированием упрочняют детали машин, работающие в тяжелых условиях (при наличии абразивной среды и ударных нагрузок); к таким деталям можно отнести втулки буровых насосов. Как показал опыт, борирование рабочей поверхности втулок позволяет увеличить их износостойкость почти в 4 раза по сравнению с износостойкостью втулок, закаленных ТВЧ.

5.3.3.4 Оксидирование и фосфатирование

Все металлы на воздухе покрыты оксидной пленкой, которая защищает их от воздействия окружающей среды, но толщина пленки очень мала. Для получения оксидных пленок значительной толщины прибегают к специальной химической, термической или электрохимической обработке поверхности заготовки. Наиболее широкое применение получили глубокое оксидирование и эматалирование [7–8, 104–113].

Глубокое оксидирование – процесс получения оксидных пленок толщиной более 60 мкм с высокими микротвердостью (4000–4500 МПа), износостойкостью и хорошими электроизоляционными свойствами. Этот процесс применяют для повышения износостойкости зубчатых колес, деталей двигателей, текстильных машин и других деталей из алюминия и его сплавов с содержанием не более 4,5 % Cu и не более 7 % Si.

Износостойкость перечисленных деталей после оксидирования при работе со смазочным материалом повышается в 5–10 раз. Для глубокого оксидирования используют электролит, содержащий 180–200 г/л химически чистой или аккумуляторной серной кислоты, не более 30 г/л алюминия и 0,5 г/л меди. При упрочнении сплавов АМг, АМц, АЛ2 и АЛ4 анодная плотность тока поддерживается равной 2,5–5 А/дм², а температура электролита 0–5 °С. Начальное напряжение обычно составляет 20–24 В. При обработке вторичных сплавов температуру электролита рекомендуется снижать до – 10 °С. Образование толстых оксидных пленок связано с выделением большого количества теплоты в зоне оксида, разогревающего электролит у анода (покрываемой детали). Это приводит к разрыхлению пленки и травлению обрабатываемой поверхности. Для устранения местного разогрева поверхность детали непрерывно охлаждают или интенсивно перемешивают электролит. Применяют различные способы охлаждения. Можно охлаждать внутренние поверхности льдом или пропускать охлаждающие жидкости через отверстия или полости деталей с такой скоростью, чтобы разница температуры жидкости на входе и выходе не превышала 1 °С. Часто для охлаждения используют специальные приспособления.

Процесс глубокого оксидирования имеет некоторые технологические трудности, вызываемые нарушением режима охлаждения, отклонением состава электролита от нормы, недостаточной подготовкой поверхности, наличием на деталях острых углов и граней. Для повышения стойкости деталей против коррозии их после оксидирования и тщательной промывки в воде подвергают специальной обработке для уплотнения оксидной пленки, чтобы предотвратить влияние окружающей среды на металл через поры пленки. Это делают пропиткой деталей в расплавленном парафине или воске, покрытием их олифой, лаками, осаждением в парах нерастворимых солей, наполнением пор хроматами.

Эматалирование заключается в получении электролитическим путем непрозрачных эмалевидных пленок толщиной 10–12 мкм с твердостью 6000–7000 МПа, обладающих красивым декоративным видом, а при использовании щавелевокислых электролитов – хорошими износостойкостью и диэлектрическими свойствами. Пленки могут быть блестящими, матовыми, окрашенными. По внешнему виду они напоминают фарфор, пластмассу, мрамор, эмаль. Эматалевый слой стоек в органических растворителях, минеральных и животных маслах, мылах, пищевых продуктах, органических кислотах, не трескается при ударных и сжимающих нагрузках, выдерживает нагрев до 300 °С. Эти качества пленки используют для защиты от коррозии и отделки медицинских аппаратов, приборов, мебели, а также для повышения износостойкости деталей машин из алюминиевых сплавов, в которых содержание легирующих добавок не должно превышать 2 % Cu, 1 % Fe, 1 % Ni, 8 % Zn, 8 % Mg и 1 % Mn. Для уплотнения эматалевой пленки детали после обработки кипятят в дистиллированной воде.

В результате фосфатирования на поверхности деталей из углеродистых и низколегированных сталей, чугуна и некоторых цветных металлов (алюминий, магний, цинк, кадмий) получают пленки нерастворимых солей марганца, железа и цинка толщиной 2–15 мкм. Фосфатный слой устойчив в воздухе, керосине, толуоле, смазочных маслах и легко разрушается в щелочах и кислотах. Фосфатные пленки прочно удерживают масла, лаки, краски и обладают хорошей адгезионной способностью. Они имеют невысокую механическую прочность и плохо сопротивляются истиранию. Фосфатные пленки жаростойки при температуре 500–600 °С.

Фосфатирование применяют главным образом для защиты деталей от коррозии. Защитная способность пленок значительно повышается после пропитки их смазочными материалами или маслами.

5.3.3.5 Химические способы нанесения никелевых, хромовых, кобальтовых, никель-кобальтовых покрытий

В промышленности применяют различные химические способы нанесения никелевых, хромовых, кобальтовых, никель-кобальтовых и других упрочняющих покрытий. Процесс химического нанесения покрытий включает следующие операции: подготовку деталей к покрытию, нанесение покрытия на рабочие поверхности, термическую обработку, механическую обработку для придания деталям необходимых размеров и чистоты поверхности [7–8, 104–113].

Готовят детали к химическому покрытию так же, как и к гальваническому.

Примерный состав ванн и режимы нанесения покрытия химическим способом приведены в таблице 5.23.

Таблица 5.23 – Состав ванны и режимы нанесения химических покрытий

Состав ванны и режим обработки	Покрытие			
	никелевое	хромовое	кобальтовое	никель-кобальтовое
Состав ванны, г/л:				
хлористый никель	21–30	–	–	30
хлористый кобальт	–	–	30	30
гипофосфит натрия	10–30	8,5	20	20
соль Рошеля	–	–	–	200
оксиацетат натрия	15–20	–	–	–
хлористый алюминий	–	–	50	50
фтористый хром	–	–	50	50
хлористый хром	–	17	–	–
уксусная кислота (ледяная)	–	$11 \cdot 10^{-3}$	–	–
Скорость осаждения, мкм/ч	15–25	2,5–3	15	15
Оптимальная температура, °С	90–93	71–78	90–99	90–100
Количество щелочи для нейтрализации, г/л	4–6	10–11	9–10	8–10

После термической обработки покрытий при температуре 350–400 °С прочность их сцепления с основным металлом детали, твердость и износостойкость возрастают в 1,5 раза и более. Прочность сцепления покрытия с основным металлом высокая, например, со сталью 10 свыше 300 МПа. Слой, наносимый химическим путем, сцепляется с углеродистыми сталями прочнее, чем с легированными или быстрорежущими.

Скорость осаждения упрочняющего металла зависит в основном от температуры ванны: с повышением температуры никелевой ванны от 50 до 90 °С скорость осаждения никеля возрастает примерно в 7 раз.

Химическое хромирование возможно только по подслою никеля толщиной более 1 мкм. Для нормальной работы в ванну через каждый час добавляют до 3 г/л гипофосфита и до 3 мг/л уксусной кислоты и едкого натра. Катализаторами служат пластинки из железа, алюминия или других металлов, которые контактируют с обрабатываемыми деталями. Для придания слою хрома более высокой твердости детали нагревают до температуры 600–800 °С, а затем механически обрабатывают (обычно полируют).

Усталостная прочность деталей, покрытых никелем и прошедших отпуск при температуре 400 °С, снижается на 30–45 %, а износостойкость их повышается в 2–3 раза. Несмотря на значительно больший расход реактивов, чем при гальваническом способе, химическое упрочнение никелем применяют для деталей топливной аппаратуры, силуминовых корпусов гидравлических насосов, золотников и поршней гидрав-

лических агрегатов из дуралюмина Д1. Химическое никелирование рекомендуется использовать для защиты деталей, работающих в условиях среднего и повышенного коррозионного воздействия, вместо многослойных гальванических покрытий никель – хром и медь – никель – хром; это экономит цветные металлы. Химический способ успешно применяют при покрытии никелем керамики, пластмассы и других диэлектриков для создания металлически проводящей поверхности. Такое никелирование применяют также для деталей из алюминия и его сплавов, титана и керамики, чтобы получить возможность паять их мягкими припоями.

На некоторых предприятиях химическое никелирование позволило заменить дорогие высоколегированные стали, работающие при температуре до 600 °С, менее легированными. Термически обработанные никелевые покрытия вследствие их большой твердости, хорошей прирабатываемости, высокой износостойкости, возможности нанесения на различные детали сложного профиля должны найти широкое применение в машиностроении для повышения надежности и долговечности деталей машин.

Химическое хромирование применяют для упрочнения деталей машин и инструментов. Таким путем целесообразно упрочнять режущие инструменты, предназначенные для работы с малыми стружками и повышенными скоростями резания, а также измерительные инструменты сложного профиля. Последние перед хромированием обезжиривают и декапируют в 50%-ном растворе соляной кислоты. Хромированные химическим способом и затем нитроцементованные резцы не уступают по качеству алмазным расточным резцам. Химическое упрочнение особенно эффективно для деталей сложных форм, так как стоимость его не зависит от формы деталей.

5.3.3.6 Наплавка материала

В последнее время для повышения надежности и долговечности деталей машин все более широко применяют наплавку на рабочие поверхности деталей из металла с высокими эксплуатационными свойствами [104–113].

Газовой наплавкой упрочняют детали автомобилей, тракторов и других машин, изготовленные из сталей 35, 40 и 45 (стартерные шестерни маховика, распределительные валики). Рекомендуется также упрочнять и восстанавливать этим способом детали из низко- и среднелегированных сталей 20Х, 20Х3, 18ХГТ, 30Х, 35Х, 40Х (хромистых), 20ХН, 40ХН, 12ХН3 (хромоникелевых) и 15ХФ (хромованадиевой): зубчатые колеса, валы коробок передач и трансмиссий, детали рулевого

механизма. Детали из этих сталей в процессе изготовления, как правило, проходят полную термическую обработку и при ремонте теряют начальные свойства в результате нагрева при наплавке. Если повторная после наплавки термическая обработка невозможна или нежелательна, наплавку металла на такие детали проводят с охлаждением, опуская всю деталь, за исключением места, подвергаемого наплавке, в ванну с водой. При упрочнении наплавкой присадочный материал выбирают более износостойкий, чем основной, для повышения износостойкости деталей.

Наиболее широко применяют газовую наплавку на рабочие поверхности инструментов из твердого сплава сормайт, дающего возможность получать наплавленные слои толщиной 0,5 мм и более. Сормайт часто наплавляют с помощью ацетиленокислого пламени. В качестве основного металла для наплавки сормайта рекомендуются углеродистые стали, особенно У8А. Его можно наплавлять на легированные инструментальные (5ХНМ, 3ХВ8, 4ХВС) и низколегированные конструкционные (40ХН, 40Х) стали.

При наплавке деталей углеродистыми и низколегированными сталями допускается значительное проплавление основного металла детали, а при наплавке сормайтом допустимо расплавление лишь на глубину в несколько десятых долей миллиметра, иначе происходят смешение основного и наплавляемого металлов, изменение химического состава и ухудшение свойств наплавленного слоя.

Толщину наплавленного слоя устанавливают в зависимости от условий работы детали и глубины износа поверхности. По данным отдела сварки ЦНИИТМаша, для деталей, работающих на истирание, толщина слоя не должна превышать 2,5–4 мм; для режущих кромок инструмента 1,5–3 мм; для деталей инструмента, испытывающих небольшую ударную нагрузку, 2 мм. При ручной наплавке колебание толщины слоя может быть в пределах 0,25–0,5 мм.

Для уменьшения деформирования детали при наплавке применяют различные приспособления, в частности пластины из красной меди, подкладываемые под деталь для отвода тепла. Для получения наплавленной поверхности с ровной кромкой по бокам детали устанавливают угольные или графитовые пластины, а для предохранения отверстий от затекания сплава вставляют графитовые или угольные стержни. Чтобы сохранить основные размеры детали, часто приходится снимать с поверхности, подлежащей наплавке, по всей ее ширине фаски толщиной, равной толщине слоя наносимого сплава. При наплавке металла на режущие кромки нельзя делать выточку или снимать фаску под углом 45° , так как это приводит к непровару в прямых и острых углах, а также к вкрашиванию.

Повышение износостойкости деталей машин в значительной степени зависит от соответствия присадочного материала материалу детали, а также от точного выполнения технологии наплавки.

Повышение износостойкости наплавленных слоев достигается различными способами. Легирование металла, наплавленного под флюсом, можно производить легированной проволокой при обычном флюсе; специальной проволокой (с легирующим порошком внутри), специальным флюсом; покрытием поверхности пастой и порошком.

Электродные материалы и флюсы, наиболее часто применяемые при механизированной наплавке, указаны в таблице 5.24. Металл с высокой износостойкостью часто наплавляют, используя высоколегированную проволоку, изготовляемую из листовой стали 08, свернутую в трубку и заполненную порошковой шихтой, представляющей собой смесь ферросплавов и других материалов.

Таблица 5.24 – Электродные материалы и флюсы, применяемые при механизированной наплавке

Назначение наплавки	Материал электрода (марка стали)	Флюс
Защита от коррозии и эрозии деталей гидротехнических сооружений	12X18H9T	АН-26
Облицовка деталей (из закаливаемых сталей) перед наплавкой	08	АН-348
Восстановление изношенных деталей	65Г	АН-60
Восстановление изношенных поверхностей деталей из стали 40Х с твердостью <i>HB</i> 300–400 до твердости <i>HB</i> 320–377	30ХГСА	АН-348–А
Восстановление размеров изношенных валков прокатных станов перед износостойкой наплавкой	08, 08Г, 10Г2, 15, 15Г, 10ГС	АН-348–Ш, ОСЦ-45, АН-348–А, ОСЦ-45
Восстановление размеров изношенных валков перед наплавкой износостойкого слоя; наплавка поверхности буртов и менее нагруженных калибров без повышения износостойкости	18ГСА, 30ХГСА, 40Г, 45, 60, 60Г	АН-348–А, ОСЦ-45
Восстановление размеров, повышение износостойкости и коррозионной стойкости	20Х13, Х20	АН-20, АН-22
Покрытие деталей подпятников и подшипников крупных турбогенераторов перед заливкой баббитом	Медь 2	АН-20

Широко распространена полуавтоматическая и автоматическая наплавка с применением порошковой проволоки. Механизированной наплавкой упрочняют детали из мало-, среднеуглеродистых и низколегированных сталей, а также некоторые детали из серого чугуна. Наплавку под слоем флюса применяют для деталей, подвергающихся и не подвергающихся последующей термической обработке. Закаленные детали перед наплавкой не требуют термической обработки.

Износостойкость прокатных валков из стали 60ХГ, покрытых сталью 3Х2В8, в 2–4 раза выше износостойкости закаленных валков без наплавки. Износостойкость наплавленного под флюсом ЖС–320 металла валков из стали 55Х составляет 180–200 % износостойкости основного металла. Стойкость опорных катков, наплавленных проволокой 30ХГСА под флюсом АН–348–А, в 5 раз выше, чем стойкость катков, наплавленных электродом с меловой обмазкой. Поверхностная закалка позволяет увеличить стойкость еще в 2 раза.

Электрошлаковая наплавка основана на выделении теплоты в расплавленном флюсе под действием электрического тока. Процесс обычно сочетается с принудительным формированием поверхности металлической ванны кокилем, подкладкой или ползуном. Высоколегированный наплавленный слой получают главным образом за счет присадочного металла (проволоки, проката, отливок, порошковой и электродной проволоки). Электрошлаковая наплавка имеет следующие преимущества перед дуговой: уменьшается (с 30–40 до 10–15 %) доля основного металла в наплавленном слое; снижается расход флюса; лучше используется электроэнергия; увеличивается коэффициент наплавки (до 20–25 г/(А·ч)); не приходится удалять шлаковую корку, так как наплавку обычно ведут в один проход.

Принудительное формирование наплавленного слоя позволяет сокращать припуски на механическую обработку; уменьшается вероятность образования пор и шлаковых включений (легче удаляются газы и всплывают примеси). Меньшие скорости охлаждения и лучшие условия кристаллизации способствуют понижению склонности металла к образованию горячих трещин, так что иногда удается наплавлять высококачественные слои при содержании углерода в наплавленном металле до 1,5–2 %. В большинстве случаев отпадает необходимость в предварительном подогреве металла, так как в процессе наплавки он достаточно нагревается.

Этот способ наплавки целесообразен там, где необходимо наплавлять большое количество металла, и при больших партиях деталей. Поверхности деталей могут быть плоские и цилиндрические.

5.3.3.7 Напыление материала

Металлизация напылением заключается в том, что на заранее подготовленную поверхность любой формы наносят металлическое покрытие. Процессы напыления металлов выполняют несколькими способами [104–113]:

– вакуумная обработка – материал при сильном нагревании в вакуумной среде преобразуется в пар, который в процессе конденсации осаживается на обрабатываемой поверхности;

– плазменное или газоплазменное напыление металла – в основу метода обработки положено использование электродуги, образующейся между парой электродов с нагнетанием инертного газа и ионизацией;

– газодинамический способ обработки – защитное покрытие образуется при контакте и взаимодействии микрочастиц холодного металла, скорость которых увеличена ультразвуковой струей газа, с подложкой (рис. 5.61 и 5.62);

– напыление лазерным лучом – генерация процесса происходит с использованием оптико-квантового оборудования; локальное лазерное излучение позволяет проводить обработку сложных деталей (рис. 5.61 и 5.62);

– магнетронное напыление – выполняется при воздействии катодного распыления в плазменной среде для нанесения на поверхность тонких пленок; в технологии магнетронных способов обработки используются магнетроны (рис. 5.61 и 5.62);

– ионно-плазменный способ – основан на распылении материалов в вакуумной среде с образованием конденсата и осаждением его на обрабатываемой основе; вакуумный метод не дает металлам нагреваться и деформироваться.

Подробно оборудование, технологические процессы и применение металлизации напылением для повышения долговечности и надежности машин и режущих инструментов описаны во многих работах. При назначении способа металлизации следует учитывать его достоинства и недостатки.

К достоинствам металлизации относят возможность наращивать на шейки валов машин, станины станков и другие детали слои стали толщиной 1,5 мм и более с требуемыми физико-механическими свойствами. Нанося слои металлов со специальными свойствами, можно повысить не только износостойкость деталей и инструментов, но и другие эксплуатационные свойства, например жаро- и коррозионную стойкость. Первоначальные свойства основного металла вследствие незначительного нагрева в процессе напыления не изменяются. К достоинствам металлизации следует также отнести сравнительную простоту и малую стоимость этого способа упрочнения.

Основные недостатки металлизации: хрупкость нанесенного слоя; не всегда достаточная прочность сцепления с основным металлом; снижение механической и особенно усталостной прочности деталей из-за уменьшения размеров и нарушения целостности их рабочей поверхности при подготовке к металлизации и трудность последующей механической обработки.

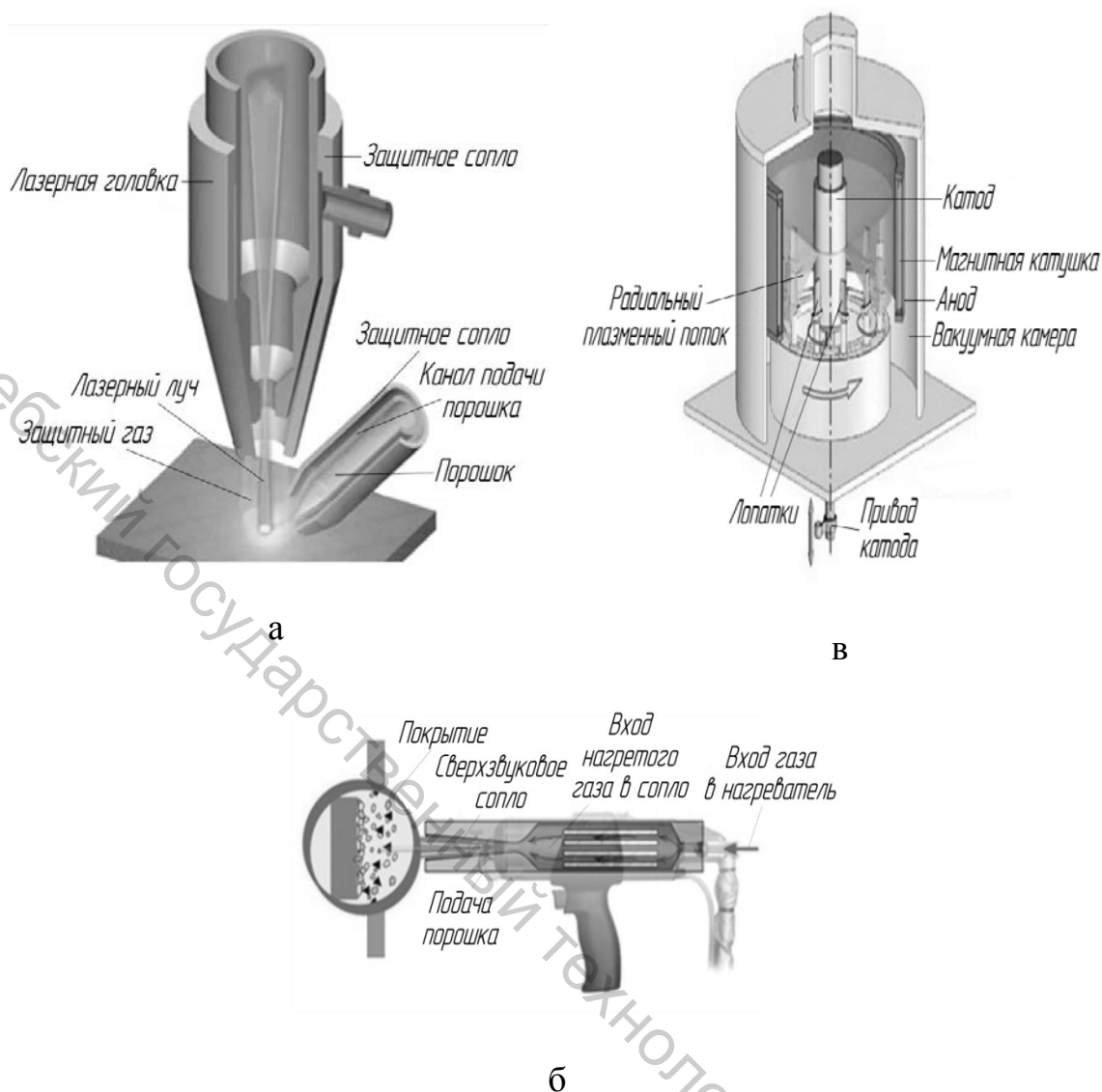


Рисунок 5.61 – Схемы напыления:
а – лазерного, б – газодинамического, в – магнетронного

5.3.3.8 Покрытие деталей пластмассами

Пластмассовые покрытия применяют для защиты от коррозии химической аппаратуры и других изделий, а также для выравнивания неровностей их поверхностей. По химической стойкости к действию самых агрессивных сред, таких как концентрированные кислоты и окислители, многие пластмассы превосходят даже благородные металлы (золото и платину). Пленки пластмассы наносят на поверхности деталей машин вихревым или газопламенным напылением или облицовкой листовыми материалами. Для покрытия деталей газопламенным и вихревым методами пригодны только термопластичные материалы в виде

мелкодисперсного порошка, который при нагреве переходит в вязкотекучее состояние без существенного разложения, а необходимые физико-механические и химические свойства приобретает после охлаждения.

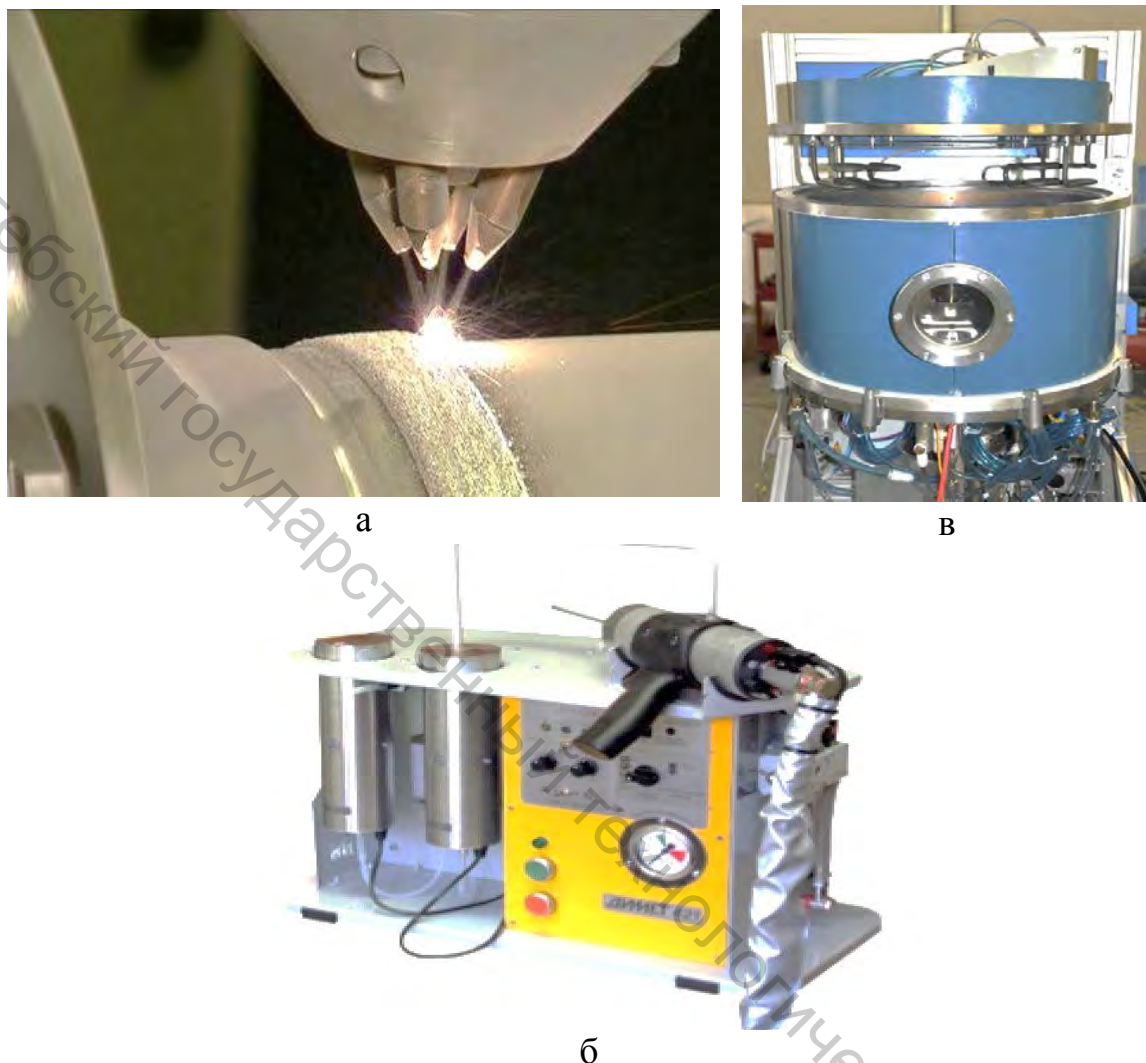


Рисунок 5.62 – Установки напыления:
а – лазерного, б – газодинамического, в – магнетронного

Ниже указаны материалы, применяемые для покрытия деталей, и температура, °С, заготовки перед напылением: полиэтилен (высокого давления 180–200; низкого давления 200–220); полипропилен (220–240); фторопласт (260–300).

Процесс нанесения напылением пластмасс аналогичен процессу металлизации напылением, отличаясь от него лишь нагревом заготовок до указанной температуры.

Защитные покрытия обычно делают многослойными. Толщина покрытия зависит от назначения детали и напыляемого материала. При использовании полиэтилена хорошую защиту от коррозии дает покрытие толщиной 0,25–0,35 мм, при использовании фторопласта – покрытие

толщиной 0,18–0,25 мм. Чтобы придать поверхности шероховатость, необходимую для лучшего сцепления с покрытием, и очистить ее от окалины, поверхность подвергают дробеструйной обработке, после чего очищают от пыли, масляных пятен и других загрязнений, а затем фосфатируют. Поверхности заготовки, не подлежащие покрытию, защищают металлической фольгой, жестью и другими материалами, а отверстия закрывают пробками. Перед напылением заготовки нагревают (до температуры на 30–50 °С выше температуры плавления пластмассы) в шкафу, обогреваемом газом или электричеством, до температуры 400 °С. Сильный перегрев заготовки приводит к разрушению пластмасс.

Влажность порошка для напыления должна быть не более 0,3 %, размер зерна не более 0,2 мм. Для окраски порошком полиэтилена в него добавляют 1–1,5 % пигмента и 1,5–4,0 % диоксида и титана и перемешивают в шаровой мельнице до получения однородного цвета (в течение 40–60 мин). Методом вихревого напыления можно наносить и многослойные покрытия. Для этого рядом с нагревательным шкафом располагают две установки для напыления, содержащие соответствующие порошки, и напыляют слой сначала одного, а затем другого порошка. Оплавление и охлаждение обычные.

Вихревым и эжекционным напылением можно покрывать детали из различных металлов и их сплавов (сталь, чугун, алюминий), из керамики и других материалов, выдерживающих нагрев до температуры 300–500 °С (табл. 5.25).

5.3.3.9 Лакокрасочные покрытия

Применяют разнообразные лакокрасочные материалы, различающиеся по химическому составу, назначению и свойствам. Надежная и длительная защита металла от коррозии и дерева от гниения достигается в том случае, если покрытие сплошное, газо- и водонепроницаемое, обладает хорошей сцепляемостью с покрываемой поверхностью, достаточной сопротивляемостью к механическим деформациям и химическим воздействиям, сопротивляемостью истиранию, действию тепла, холода, солнечного света; часто к лакокрасочным покрытиям предъявляются требования повышенной стойкости против действия кислот, масла, бензина [7–8].

Для удовлетворения всех этих требований в машиностроении применяют многослойные покрытия, каждый слой которых имеет свое назначение. Непосредственно на поверхность заготовки наносят слой грунта толщиной 15–25 мкм. Он хорошо сцепляется с поверхностью и защищает ее от коррозии. На грунт наносят до четырех слоев шпаклевки, которая выравнивает дефекты поверхности (поры, царапины, углуб-

ления). Шпаклевка должна быть твердой, хорошо сцепляться с грунтом и поддаваться механической обработке (обычно шлифованию). На шпаклевку наносят краску или слой эмали, которые улучшают внешний вид изделий, а также повышают его твердость и сопротивляемость различным воздействиям. При отсутствии дефектов поверхности краску или эмаль можно наносить непосредственно на грунт. Число слоев краски или эмали от двух до шести, толщина слоя 30–80 мкм.

Таблица 5.25 – Пластмассы для покрытия деталей вихревым и эжекционным способами

Пластмасса	Температура, °С		Область применения
	плавления	растекания	
Полиэтилен низкого давления	120	160–170	Антикоррозионное покрытие, пригодное для контакта с пищевыми продуктами и химически активными средами
Полиамид	220	250	Антикоррозионное покрытие для деталей, работающих на трение
Поликапролактан	215	250	Антикоррозионное декоративное покрытие
Поливинил-бутираль (бутвар)	160–167	260–270	
Ацетобутират-целлюлоза	120–125	–	
Полиуретан	180	190	Антифрикционное покрытие
Полипропилен	140–150	160–170	Антикоррозионное покрытие

Технологический процесс окраски включает операции подготовки поверхности, нанесения грунта, шпаклевки, краски или эмали, сушки и обработки покрытия.

Все операции, связанные с подготовкой к окраске и окраской детали, механизированы или автоматизированы. Трудоемкий и длительный процесс естественной или конвекционной сушки заменяют терморadiационной сушкой. Окраску кистью, окунанием или механическим распылением заменяют окраской распылением в электростатическом поле. Все это позволяет получать прочные слои краски, хорошо защищающие рабочие поверхности деталей от внешних воздействий, повышает срок службы деталей, особенно из тонколистовых материалов. Испытания показывают, что при окраске в электрическом поле и сушке в терморadiационной камере детали и узлы более коррозионностойки, чем при обычных окраске и сушке.

Решение проблемы повышения долговечности каждого конкретного изделия экономически выгодно решать комплексно – от проектирования и получения заготовки до ее финишной обработки и эксплуатации. А так как практически все разрушения начинаются с поверхности, то это привело к появлению нового учения об *инженерии поверхности*. Сущность этого учения заключается в разработке теории научно обоснованного определения формы рабочих поверхностей, их геометриче-

ских параметров (макроотклонения, волнистости, шероховатости и физико-химических свойств), обеспечивающих экономически целесообразную долговечность и безотказность деталей машин и их соединений, а также технологического создания таких поверхностей, их контроля, наследования и изменения при работе.

5.4 Вопросы для самоконтроля

1. По какой формуле может рассчитываться пластическая деформация выступов шероховатости при нормальном нагружении?
2. Изобразите схему переформирования шероховатости при ее пластическом деформировании.
3. Как рассчитать дополнительное уменьшение исходной шероховатости при приложении вибрационной нагрузки к контактирующим поверхностям?
4. Как влияет период приработки на шероховатость поверхности трения?
5. Как оценить «равновесную шероховатость»?
6. Изобразите график изменения шероховатости поверхности трения при изнашивании.
7. Как рассчитать среднее арифметическое значение профиля равновесной шероховатости на поверхности трения после приработки?
8. Изобразите график взаимосвязи долговечности поверхности трения с ее исходной шероховатостью.
9. Запишите уравнение для расчета комплексного параметра «равновесного состояния поверхности трения».
10. К решению каких задач сводится решение проблемы обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин и соединений?
11. Какие параметры входят в состав эмпирических уравнений взаимосвязи контактной жесткости деталей с режимами обработки.
12. Проведите анализ экспериментальных данных о взаимосвязи износостойкости образцов с различными методами обработки.
13. Проведите анализ экспериментальных данных коррозионной стойкости образцов при различных методах их механической обработки.
14. Опишите характер влияния метода окончательной обработки поверхности на предел выносливости стали различной прочности.
15. Перечислите основные технологические факторы, оказывающие влияние на все эксплуатационные свойства.
16. Приведите классификацию методов обработки заготовок пластическим деформированием.
17. Охарактеризуйте классы методов обработки заготовок пластическим деформированием.

18. Приведите классификацию одноуровневых РМР.
19. Приведите классификацию двухуровневых РМР.
20. Опишите опыт образования регулярного микрорельефа в различных странах мира.
21. Перечислите преимущества способов вибрационного ППД для нанесения РМР.
22. Какова зависимость эксплуатационных свойств деталей от параметров микрогеометрии рабочих поверхностей?
23. Изобразите схему отделочно-упрочняющей обработки фасонных литых корпусов на токарно-винторезном ППД по копиру.
24. Приведенные примеры использования деталей с регулярной микрогеометрией поверхностей и упрочненным ППД подповерхностным слоем.
25. Какой эффект дает отделочно-упрочняющая обработка чаш азимутальных шаровых гироскопов виброраскатыванием и вибровыглаживанием.
26. Какие Вам известны приемы обработки ППД?
27. Дайте определение понятию «дорнование».
28. На какие виды по источнику возникновения колебаний делится вибрационная обработка ППД?
29. Приведите схемы вибрационной обработки ППД и запишите параметры наносимых следов.
30. Изобразите схемы деформирующих инструментов, работающих в условиях трения качения.
31. Опишите особенности обработки ППД инструментами, работающими в условиях трения качения.
32. Изобразите развертки следов обработки, наносимых профильными роликами.
33. Изложите технологию изготовления профильных роликов механической и слесарной обработкой.
34. Изобразите схемы деформирующих инструментов, работающих в условиях трения скольжения.
35. Опишите технологию изготовления твердосплавных монолитных дорнов.
36. Какие приспособления применяются для ППД?
37. Опишите универсально-переналаживаемое приспособление для вибронакатывания шаром.
38. Изобразите конструкцию приспособления для вибронакатывания наружных цилиндрических и фасонных поверхностей профильными роликами.
39. Опишите принцип работы переналаживаемого приспособления для обработки отверстий малого диаметра алмазным наконечником и шаром.

40. Каков принцип работы однорوليкового приспособления для обработки плоских поверхностей на строгальных станках?

41. Изобразите схему четырехроликового приспособления для вибронакатывания плоских поверхностей на вертикально-фрезерных станках.

42. Какая обработка должна предшествовать ППД?

43. Изобразите графики влияния силы поджима и размера инструмента на поверхностную твердость при накатывании.

44. В чем суть комбинированной обработки при ППД?

45. Изобразите приспособления для совмещенной обработки обтачиванием и алмазным выглаживанием.

46. Изобразите приспособление для совмещенной обработки алмазным выглаживанием одновременно двумя наконечниками.

47. Перечислите параметры режима накатывания шарами и гладкими роликами.

48. Как определяется сила при накатывании и алмазном выглаживании в режиме создания ПРМР инструментом сферической формы?

49. От чего зависит сила при обработке профильными роликами?

50. От чего зависит сила при вибронакатывании с обеспечением ЧРМР?

51. Как определяется сила при накатывании и вибронакатывании роликами в режиме создания ПРМР?

52. Изобразите схемы формообразующего накатывания резьб, шлицев, зубчатых венцов.

53. Назовите область применения и раскройте принцип действия двухроликовой тангенциальной головки.

54. Опишите суть и особенности дробеструйной обработки.

55. Опишите суть и особенности виброударной обработки.

56. Для чего применяется виброабразивная обработка?

57. В чем суть ионной имплантации?

58. Как ионная имплантация влияет на трение, изнашивание и твердость?

59. Какова эффективность обработки деталей ионной имплантацией?

60. Опишите процесс и область применения ионного азотирования.

61. Как температура влияет на глубину азотирования?

62. Изобразите график изменения твердости в зависимости от продолжительности процесса азотирования поверхности заготовки из стали.

63. В чем суть процесса лазерной обработки?

64. Назовите известные Вам комбинированные методы улучшения качества поверхности с помощью лазерной обработки и их результаты.

65. Перечислите основные виды гальванических покрытий и охарактеризуйте области их применения.
66. Опишите технологию и область применения хромирования.
67. Опишите технологию и область применения твердого никелирования.
68. Опишите технологию и область применения борирования.
69. Опишите технологию и область применения оксидирования и фосфатирования.
70. Опишите технологию и область применения никелевых, хромовых, кобальтовых и никель-кобальтовых покрытий.
71. Для чего применяется наплавка материала?
72. Какими способами производится напыление металлов?
73. В чем суть вакуумного и плазменного напыления металла?
74. В чем суть ионно-плазменного и магнетронного напыления?
75. Изобразите схемы установок газодинамического и магнетронного напыления.
76. Опишите технологию и область применения покрытия деталей пластмассами.
77. Какие требования применяются к лакокрасочным покрытиям?

6 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ В МАШИНОСТРОЕНИИ

6.1 Технологическая наследственность как база обеспечения качества машиностроительных изделий

Проблемы обеспечения и повышения качества изделий основываются на рассмотрении физических причин их отказов в работе и связаны с развитием исследовательского аппарата, способного описать всю сложную эволюцию условий и следствий, приводящих к отказам. Любой объект производства, находясь в многообразных связях и взаимодействиях с окружающими его объектами, участвуя одновременно в нескольких формах движения, представляет собой концентрат условий, в которых он (объект производства) формировался во времени. По утверждениям гениального математика В. Вольтерра, состояние объекта определяется не только теми силами, которые действуют на него в данный момент времени, но и историей воздействия сил, имевших место в прошлом. Так был сформулирован «эффект последствия» [7, 115, 116].

Чаще всего проявление этого эффекта связывается с релаксацией напряжений материала заготовок. Л. Больцманом была предложена зависимость деформаций от ε напряжений σ

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t K(t - \tau) \sigma(\tau) d\tau,$$

где K – функция релаксации; t – время; τ – независимая переменная.

Согласно указанной зависимости состояние тела (сплошной среды, заготовки и т.д.) в любой момент времени отличается от состояния в другой момент времени. Началом рассмотрения процесса релаксации может быть любой момент времени в прошлом вне зависимости от того, как далеко он отстоит от времени t . Зависимость, предложенная Л. Больцманом, была экспериментально подтверждена Д. Максвеллом. Для функции релаксации Ф. Кольрауш предложил зависимость

$$K = e^{-\frac{t-\tau}{\lambda}},$$

где $\lambda = \text{const} > 0$.

Такое выражение хорошо подтверждается практикой.

Идеи, высказанные В. Вольтерром, охватывают всю неживую природу.

В машиностроительном производстве изготовление деталей машин осуществляется, как правило, на основе технологических процессов обработки резанием, в ходе которых заготовки превращаются в детали машин. Таким образом, совокупность свойств, показателей и погрешностей, представляющих качество деталей в общем виде, появляется в ходе изготовления детали. Замечено, что отдельные погрешности, возникающие в ходе изготовления детали, оказываются очень устойчивыми. Они могут появиться на начальных технологических операциях и сохраняться вплоть до этапа эксплуатации изделия, например, наличие внутренней трещины или другого дефекта в материале заготовки. Пороки исходных заготовок и их материалов возникают еще в металлургическом производстве и связаны с особенностями заготовительного производства и свойствами материалов.

Основные виды пороков представлены на рисунках 6.1–6.3. Вредные примеси могут располагаться по всему объему материала заготовки. Раковины на поверхности и внутри характерны для литых заготовок (рис. 6.1).

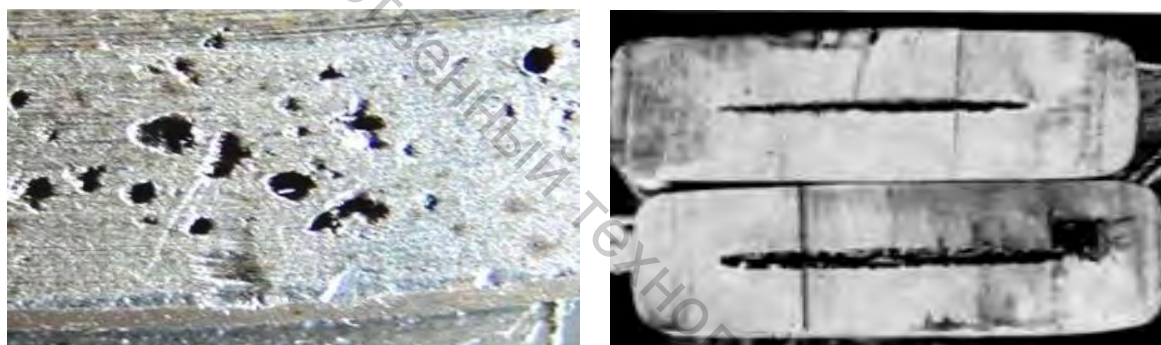


Рисунок 6.1 – Раковины в литых заготовках

Трещины на поверхности и в материале заготовки могут возникнуть после литья, сварки и отдельных видов обработки резанием (рис. 6.2). При прокатке возникают закаты, которые на поверхности представляются в виде волосовин (рис. 6.3). Если эти и аналогичные пороки не удаляются со стружкой в ходе механической обработки резанием, то они остаются в готовом изделии, иногда с видоизменениями. К сожалению, обнаружение некоторых видов пороков происходит только на финишных операциях, когда уже поздно что-либо предпринимать.

На металлургических заводах дефекты на поверхности заготовок иногда удаляют, нагревая их газовым пламенем перед прокаткой. Для этих же целей иногда проводят строгание заготовок. Наружные поверхности круглого проката и внутренние поверхности труб большого диаметра в ответственных случаях обрабатывают крупнозернистыми абразивами, абразивными лентами или обдувают абразивным порошком.

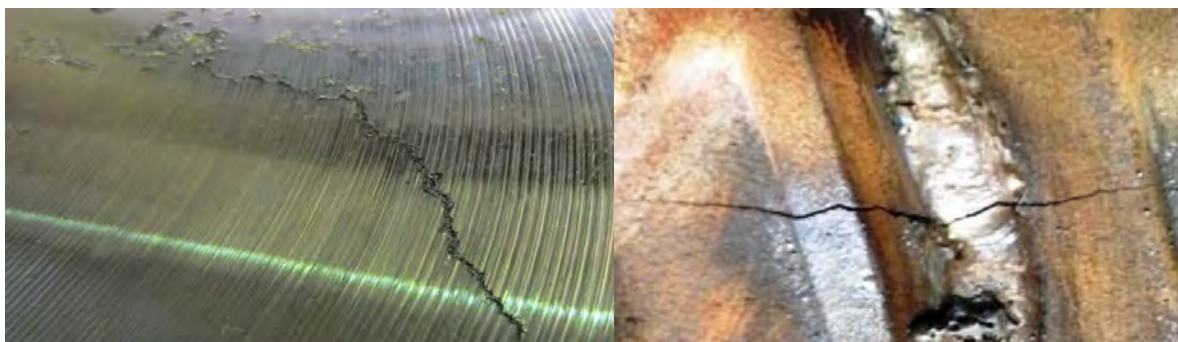


Рисунок 6.2 – Трещины заготовок

В зависимости от воздействия на материал технологической среды в разных участках заготовки при ее получении возникают различные по величине, а иногда и по знаку напряжения. Такие напряжения также имеют наследственную природу. Установлено, что, если материал заготовки деформирован на какой-либо предшествующей технологической операции хотя бы с малой, но конечной скоростью, в нем возникают неравновесные состояния, приводящие к ползучести. Последняя может проявляться и в готовом изделии, что особенно ощутимо для прецизионных деталей.

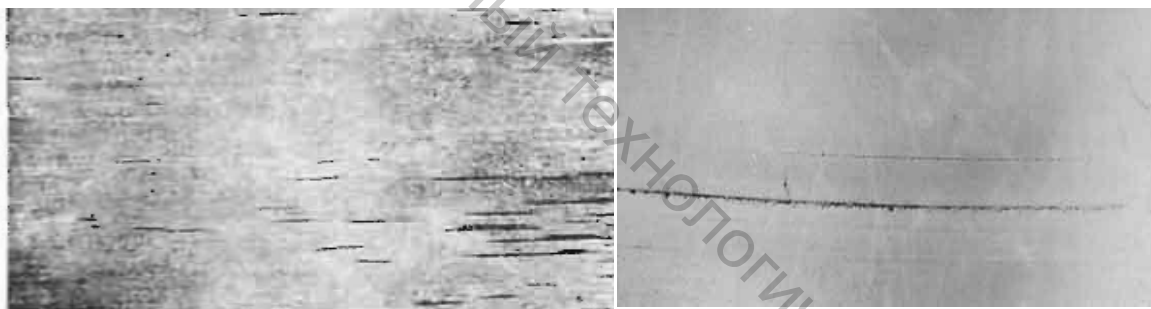


Рисунок 6.3 – Волосовины на поверхности проката

Современное металлургическое производство представляет собой замкнутый цикл таких стадий технологического процесса, как выплавка чугуна из руды, переплавка чугуна в сталь, переработка стальных слитков в прокатную продукцию. Соединение доменного, сталеплавильного и прокатного производств в единый комплекс позволяет добиться очень высокой производительности по выпуску марок чугуна и стали и особенно различных видов проката. Однако высокая производительность не является самоцелью металлургического производства. Большая часть металлургических изделий предназначена для изготовления деталей и конструкций ответственного назначения, и поэтому главная задача металлургов состоит в обеспечении высокого качества металла.

Легирующие элементы существенно влияют на механические свойства сталей, изменяют параметр кристаллической решетки. В таб-

лице 6.1 приведены данные о параметре решетки и механических свойствах феррита при содержании различных легирующих элементов в растворе, равном 3 %.

В свою очередь, применяя те или иные технологические приемы, можно существенно воздействовать на свойства изделия, изменяя структуру металла. Таким образом, совокупность первородных свойств исходной шихты и имеющийся набор технологических воздействий представляют собой основу для целенаправленного формирования требуемых свойств в машиностроительных изделиях.

Таблица 6.1 – Влияние легирующих элементов на свойства сталей

Параметр	Химический элемент				
	W	Cr	Mn	Si	Ni
Параметр решетки, A	2,872	2,862	2,861	2,858	2,853
Предел прочности, кг/мм ²	42	37	59	62	50
Предел текучести, кг/мм ²	25	24	50	42	30
Твердость, HV	105	85	170	170	145
Ударная вязкость, кг/см ²	5	27	7	1	32

Трудновыполнимой задачей является достижение требуемого качества металла в производственных условиях. Прежде всего это относится к обеспечению однородного химического состава в слитках большого объема, так как отсутствие надлежащих элементов в правильных соотношениях может оказать чрезвычайно вредное влияние на свойства стали. Наличие однородности в строении зерен металла, отсутствие аномальной сегрегации, заданная величина зерна – все это необходимые признаки высокого качества стали. Чрезвычайно важной является степень физических дефектов в слитке, обозначаемая в производстве термином «здоровая сталь», который указывает на отсутствие в металле усадочной раковины, пористости, газовых пузырей, неметаллических включений и т.д.

Регулирование процесса плавки заключается в удалении из металла продуктов окисления отдельных элементов металлической шихты, предотвращении чрезмерного образования продуктов раскисления и удалении их для получения здоровых отливок.

Раскисление является наиболее ответственной операцией, так как на качество металла одинаково вредные воздействия оказывает как «перевосстановление», так и недостаточное восстановление. Начинают восстановление обычно в печи, раскисляя металл ферромарганцем и силикомарганцем, а затем проводят дополнительное раскисление в ковше алюминием, цирконием, силикокальцием, ферротитаном. Требуемый состав стали обеспечивается введением добавок из сплавов и чистых металлов. При этом очень важны такие параметры, как температура и жидкотекучесть стали, которые обеспечивают тот или иной тип отливок.

Для получения легированных прецизионных марок сталей традиционные способы введения в жидкий металл необходимых элементов в виде кусков неприемлемы. В этом случае невозможно добиться полноты протекания металлургических процессов и, как следствие, равномерности химсостава в объеме слитка. По этой причине получили развитие технологии вдувания порошкообразных реагентов в жидкий металл на стадии доводки в ковше. Однако, несмотря на высокую эффективность этого способа, технические возможности установок для вдувания порошков ограничены нижним пределом: они не способны обеспечить точную дозировку элементов в небольших количествах. А это чрезвычайно важно именно на последнем этапе приготовления стали, так как ничтожные количества нужных элементов могут или существенно изменить свойства стали в требуемом направлении, или безнадежно испортить всю плавку. Поэтому получили развитие технологии, позволяющие осуществлять тонкое дозирование порошкообразных реагентов при доводке стали в ковше. Быстрая доставка порошка на дно ковша с металлом способствует полному усвоению реагентов по всему объему за счет хорошего перемешивания. Для предотвращения немедленного реагирования порошков с жидкой сталью они защищены тонкостенной металлической оболочкой.

Современное машиностроение характеризуется обилием методов получения заготовок, форма которых близка к форме готовых деталей. Эти методы отличаются высокой производительностью, возможностью направленного формирования заданных физико-химических свойств поверхностных слоев. Вместе с тем такие заготовки в своей массе не могут играть роль деталей машин, так как не обладают необходимой геометрической точностью, их поверхности не могут образовывать качественные сопряжения двух объектов, а качество поверхностных слоев не обеспечивает заданные эксплуатационные требования.

Таким образом, качество детали, выраженное через определенные показатели, представляет собой совокупный результат условий как формирования заготовок, так и обработки их резанием.

Генная инженерия в технике, рассматривая изменения и превращения, происходящие с заготовкой в процессе изготовления детали, во многом заимствует и использует понятийный аппарат и подходы биологической генетики. В частности, понятие «ген» трактуется как «химико-структурированная единица (элемент структуры), несущая набор (комплекс) наследственной информации – от шихтового материала через жидкую фазу к литому изделию и далее через все переделы, вплоть до эксплуатации деталей в машине и их рециклирования».

Современные исследования показывают, что жидкий сплав – это не однородная смесь атомов, он имеет микронеоднородное кластерное строение. Кластерами называют зоны с повышенной концентрацией примесного компонента, образующего скопление атомов в решетке мат-

рицы твердого раствора; группа растворенных атомов удерживается рядом друг с другом силами атомного взаимодействия. Между структурами жидких и твердых сплавов существует наследственная связь: расплавы способны существовать десятки часов в неравновесном состоянии, генетически сохраняя элементы структуры, близкие к исходной твердой фазе шихтовых материалов. Свойства сплава определяются свойствами входящих в его состав химических элементов (генов) и зависят от температурных, временных и физических параметров обработки.

Используя терминологию в области живой природы, можно считать, что в технологии машиностроительного производства многие показатели имеют наследственную природу. Поэтому использование понятия «технологическая наследственность в машиностроительном производстве» вполне оправдано.

Рассмотрение производственных процессов изготовления изделий во времени, начиная с выбора материала для заготовки, обработки заготовок, сборки деталей, позволяет установить причины явлений и условий регулирования параметров технологических процессов, в ходе которых формируются свойства изделий. При этом и появляются понятия о технологическом наследовании, технологической наследственности и наследственной информации в машиностроительном производстве.

Технологическим наследованием называется явление переноса свойств объектов от предшествующих технологических операций к последующим. Эти свойства могут быть как полезные, так и вредные. Сохранение же этих свойств у объектов называют *технологической наследственностью*. Такие термины являются достаточно емкими. С их помощью и по соответствующим методикам можно проследить за состоянием объекта производства в любой момент времени с учетом всех предшествующих технологических воздействий, имевших место в прошлом. В процессе передачи свойств важную роль играет так называемая *наследственная информация*. Она заключается в материале деталей и поверхностных слоях этих деталей. Информация представляет собой большой перечень показателей качества.

Очень существенными являются установление общих закономерностей технологического наследования, определение количественной стороны технологического наследования таких параметров, как конструктивные формы заготовок и деталей, погрешности технологических баз, погрешности формы и пространственные отклонения заготовки, их волнистость, физико-механические свойства поверхностных слоев и др. Исключительно большое значение имеют наследственные погрешности при сборке.

Носителями наследственной информации является собственно материал изготавливаемой детали, а также ее поверхности с многообразием параметров, описывающих состояние этих поверхностей. Носители информации активно участвуют в технологическом процессе, проходя,

по выражению П. И. Ящерицына, через различные «барьеры» либо задерживаясь на них частично или полностью. Самым существенным барьером являются термические операции. Отклонения фактической формы заготовок от идеальных вполне определенным образом передаются от одной операции к другой. В частном случае это явление может быть названо копированием. В ходе процесса различные пороки поверхностей деталей, в частности микротрещины, могут развиваться или «залечиваться» и т.д. Во всех этих и аналогичных случаях возникновение, изменение, ликвидация параметров детали характеризуются наследственной информацией.

Наследование свойств в ходе технологического процесса характерно как для детерминированных, так и для вероятностных систем. В первом случае не возникает никакой неопределенности в передаче свойств. Если известны предыдущее состояние системы и способ обработки информации, то можно предсказать ее последующее состояние, как, например, для случаев технологического наследования конструктивных форм заготовок. Для вероятностной системы нельзя точно, детально что-то предсказать. Можно лишь с большой степенью вероятности определить, каковы будут наследственные свойства системы. Однако признание того, что данная система является детерминированной или вероятностной, не может оказать решающего влияния на понимание сущности технологической наследственности. Рассматриваемое явление непременно связано с состоянием системы и ее изменениями во времени.

Из сказанного следует, что процессом технологического наследования можно управлять с тем, чтобы свойства, положительно влияющие на качество детали, сохранять в течение всего технологического процесса, а свойства, влияющие отрицательно, ликвидировать в его начале. Следовательно, в общем виде нельзя однозначно ответить на вопрос о том, служит технологическая наследственность положительным или отрицательным явлением. На такой вопрос можно дать четкий ответ лишь применительно к конкретному технологическому процессу.

Перед технологией машиностроения как наукой стоит весьма трудная задача детального и комплексного анализа условий производства и установления количественной стороны технологического наследования. На практике это означает, что свойства машиностроительных изделий, снижающие их качество, должны быть ликвидированы в первую очередь на заготовительных или начальных операциях механической обработки, а свойства, обеспечивающие повышение качества, – сохранены и развиты до конечной стадии производства – сборки.

Применительно же к машиностроению на основе сказанного термин «технологическая наследственность» позволил сформулировать учение о наследственных связях с целью повышения качества изделий. В наше время состояние сплошной среды может быть описано в виде:

$$D(f) + J[t] = 0,$$

где $f(x, y, z, t)$ – вектор-функция состояния среды; D – дифференциальный оператор; $J[t]$ – интегральный оператор, описывающий предысторию системы за период от $-\infty$ до t .

Однако на пути аналитического описания явления наследования стоят большие трудности, поскольку еще в должной мере не накоплен научный материал, описывающий изменения объектов во времени при действии на них технологических сред. Для описания процессов наследования наибольшее распространение получил метод графов.

Своеобразным мерилom полезности учения о технологической наследственности является степень использования научных результатов на практике, непосредственно на производстве. Для такого использования возможно применение появляющихся аналитических зависимостей, графических представлений, производственного опыта.

Определенные трудности решения проблемы технологического наследования связаны с необходимостью рассмотрения явлений с позиций системного анализа. За элемент системы принимается технологическая операция, а объектом, претерпевающим различные изменения в ходе технологического процесса, являются определенные свойства изделия.

Вполне естественно, что представление процесса наследования, особенно в первый период исследований, воспринимается как процесс детерминированный. Это означает, что при одном и том же комплексе исходных параметров при каждом последующем повторении операций будет получаться один и тот же результат. Если известны предыдущие состояния и способ обработки информации, то можно установить конкретное состояние объекта обработки на любой технологической операции, включая заключительную.

Вместе с тем становится очевидным, что детерминированный подход к явлению несколько обедняет его представление. Более полным должен быть учет случайного фактора. Действительно, любой технологический процесс характеризуется целым рядом параметров, которые имеют случайный характер (свойством материала и заготовок, режимом обработки, износом инструментов и пр.). Все эти параметры случайным образом суммируются в ходе технологического процесса. Поэтому и результат процесса представляется случайной величиной.

Для уже разработанных и реализованных технологических процессов явления технологического наследования можно описать на основе теории планирования эксперимента, т.е. необходимо сначала разработать технологический процесс, а затем совершенствовать его. Однако для широкого использования на производстве такой подход не оправдан. Поэтому важным этапом должно стать высокодостоверное прогнозирование качества изделий с учетом технологического наследования

еще на стадии разработки технологического процесса. При таком подходе к делу необходимость учета случайных факторов еще более очевидна.

6.2 Закономерности технологического наследования

Элементы системы и связи между этими элементами достаточно полно могут быть описаны с помощью теории графов. Особенность таких графов заключается в том, что они должны быть ориентированными и ациклическими. Вершины графов представляют собой свойства объектов, а ребра характеризуют передачу – наследование свойств [7, 115, 116]. На рисунке 6.4 вершина графа представляет собой совокупность свойств заготовки, а вершина A_1 – те свойства, которые создаются на определенной операции обработки заготовки. Ориентированные ребра A_1C и A_2C показывают передачу (наследование) свойства в процессе обработки. Таким образом, возникает объект C со свойствами, характерными для A_1 и A_2 . Если процесс обработки на этом не заканчивается, применяют еще ряд операций, каждая из которых создает на обрабатываемом объекте дополнительные свойства. Такой технологический процесс представлен графом на рисунке 6.5 а.

Действительно, свойства объекта C , а также те свойства, которые создает операция A_3 , передаются объекту D и т.д. Объект G является готовой деталью, которая сочетает в себе свойства A_1, C, D, E, F . Ребра A_3C, A_3D, A_4E и т.д. являются непременно ориентированными, т.е. показывающими изменение свойств. Это объясняется тем, что операции A_2C, A_3D и другие оказывают воздействие на объекты, после которого изменение свойств обязательно. Ребра же A_1C, CD, DE и т.д. могут быть и не ориентированными, т.е. нельзя утверждать, что свойства A_1, C, D и пр. будут непременно перенесены в дальнейшем ходе технологического процесса.

Операции технологического процесса могут ликвидировать некоторые свойства объектов и создать новые. В этом случае наследование определенных свойств представляется смешанным графом (рис. 6.5 б), у которого некоторые ребра не являются ориентированными. Свойства $C, D, ..., G$, создаваемые в ходе технологических операций, формируются в соответствии с особенностями проведения этих операций. Например, лезвийным инструментом можно вести обработку, применяя ту или иную охлаждающую жидкость, специальный подогрев или охлаждение заготовки и пр. Аналогично процесс шлифования может сопровождаться специально осуществляемыми колебаниями инструмента или заготовки, особыми условиями ее закрепления и др.

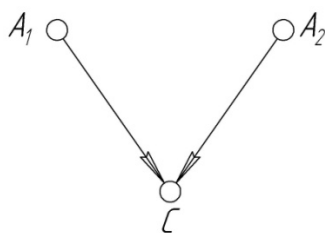


Рисунок 6.4 – Граф формирования объекта

В соответствии с этим технологическое наследование представляется графом по рисунку 6.6. Здесь под индексами $A_{3(1)}, A_{3(2)}$ следует понимать те свойства объекта D , которые создаются за счет особенностей проведения технологических операций, что может обеспечивать синергетический эффект.

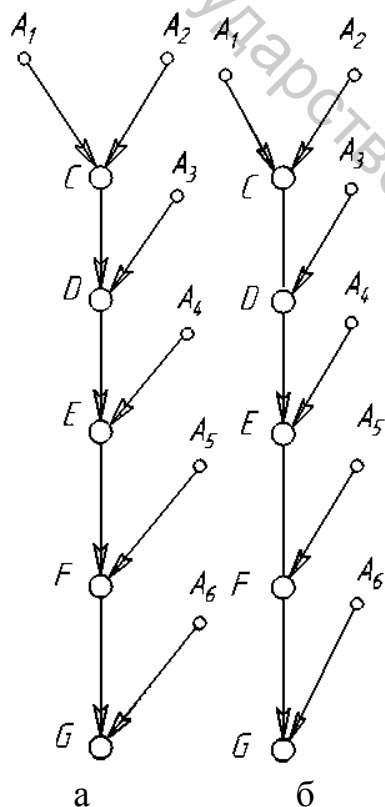


Рисунок 6.5 – Граф технологического наследования: а – ориентированный; б – содержащий неориентированные ребра

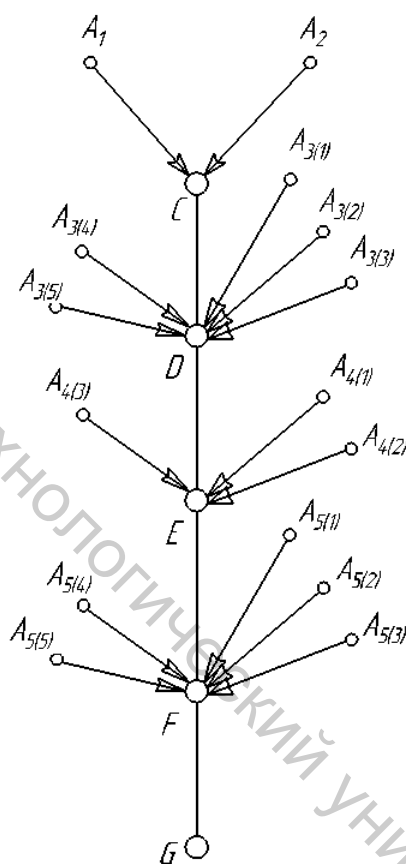


Рисунок 6.6 – Граф технологического наследования, показывающий влияние технологических операций

Графы на рисунках 6.5 и 6.6 представляют собой изображение процесса технологического наследования в самом общем виде. Например, D на рисунке 6.6 характеризует все и всякие свойства объекта на данном этапе технологического процесса. Однако и такое смешение

свойств иногда затрудняет представление о технологическом наследовании.

С точки зрения технологического обеспечения качества наибольший интерес представляют такие параметры заготовок деталей, как точность размеров, форма сечений, напряжения поверхностных слоев и др. Поэтому целесообразно механизм технологического наследования представлять графами в более полном виде (рис. 6.7). Здесь комплекс свойств A_1 заготовки представляется ее конкретными свойствами $B, C, D, \dots, N$, каждое из которых претерпевает изменения в ходе технологического процесса. Пусть C – отклонение формы заготовки. За счет свойств $C_{1(1)}$ и других особенностей $C_{1(2)}, \dots, C_{1(p)}$ операции чернового точения эта погрешность превращается в C_1 и т.д. В конце технологического процесса наследственное отклонение формы составит C_4 . Это отклонение явится одним из параметров, определяющих качество F готовой детали.

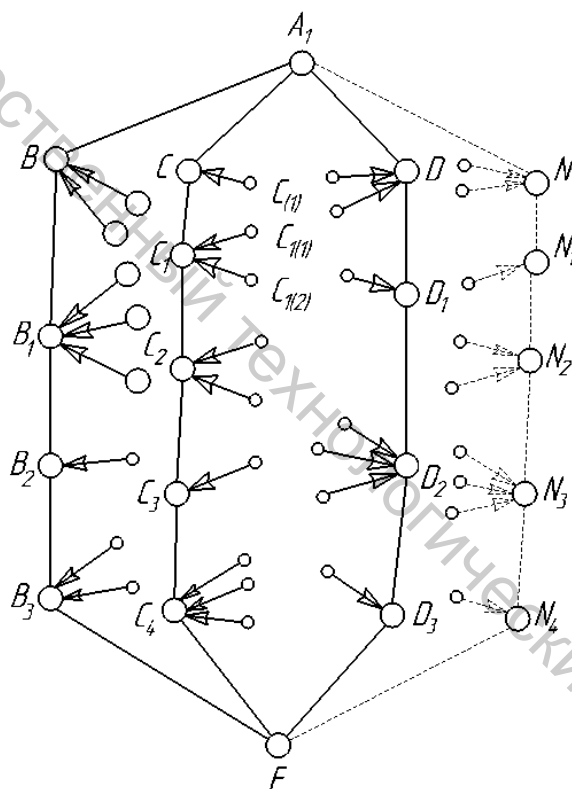


Рисунок 6.7 – Развернутый граф технологического наследования

Естественно, что должны учитываться только те наследственные свойства, которые решающим образом влияют на функционирование изделия. Так как рассматриваемые графы являются ориентированными, общее число наследуемых свойств определится одной из сумм:

$$M = \rho(A_1) + \rho(A_2) + \dots + \rho(A_n) + \rho^*(A_1) + \rho^*(A_2) + \dots + \rho^*(A_n),$$

где $\rho(A_1), \dots, \rho(A_n)$ – число ребер, выходящих из вершин $A_1, \dots, A_n$ графа; $\rho^*(A_1), \dots, \rho^*(A_n)$ – число ребер, входящих в эти вершины; n – число вершин графа.

Например, для рисунка 6.5 а

$$\rho(A_1)=\rho(A_2)=\rho(C)=\rho(A_3)=\rho(D)=\rho(A_4)=\rho(E)=\rho(A_5)=\rho(F)=\rho(A_6)=1;$$

$$\rho^*(A_1)=\rho^*(A_2)=\rho^*(A_3)=\rho^*(A_4)=\rho^*(A_5)=\rho^*(A_6)=0;$$

$$\rho^*(C)=\rho^*(D)=\rho^*(E)=\rho^*(F)=\rho^*(G)=2.$$

В обоих случаях сумма равна 10. Следовательно, свойства готовой детали G представляют собой совокупность десяти свойств, полученных в ходе технологического процесса. Однако, естественно, удельное значение их в формировании конечных свойств детали будет различным.

Графы, характеризующие технологическую наследственность, по своей сущности сходны с графами, именуемыми генеалогическими. Последние же показывают влияние наследственной информации, передаваемой от двух объектов к третьему, свойства которого формируются в зависимости от свойств этих двух объектов. В отличие от генеалогических графов, которые не могут быть замкнутыми, циклическими, графы, отражающие процесс технологического наследования, в отдельных случаях могут представляться циклами. Это возможно, в частности, в прецизионном станкостроении, когда речь идет о ремонте дорогостоящих частей станка. Соответствующий граф представлен на рисунке 6.8. Граф, рассматриваемый от A до F в направлении стрелок, представляет собой процесс изготовления детали, свойства которой характеризуются значением F . Однако, когда эта деталь нуждается в ремонте, она может быть использована в качестве заготовки для изготовления новой детали, но, естественно, иных размеров. Ребро FA указывает на перенос отдельных свойств готовой детали на заготовку. Так, в частности, иногда поступают при ремонте шпинделей, работающих на подшипниках скольжения. Создание нового шпинделя из указанной заготовки будет иллюстрироваться дополнительным графом, который явится ответвлением от цикла.

Из рисунка 6.7 видно, что графы, характеризующие технологическую наследственность, состоят из отдельных цепочек, внутри которых стрелки направлены в одну сторону. Это единство направлений символизирует течение технологического процесса и перенос свойств обрабатываемого объекта от операции к операции. Сложность технологического наследования вместе с тем состоит в том, что не всегда удастся рассмотреть цепочки графа обособленно.

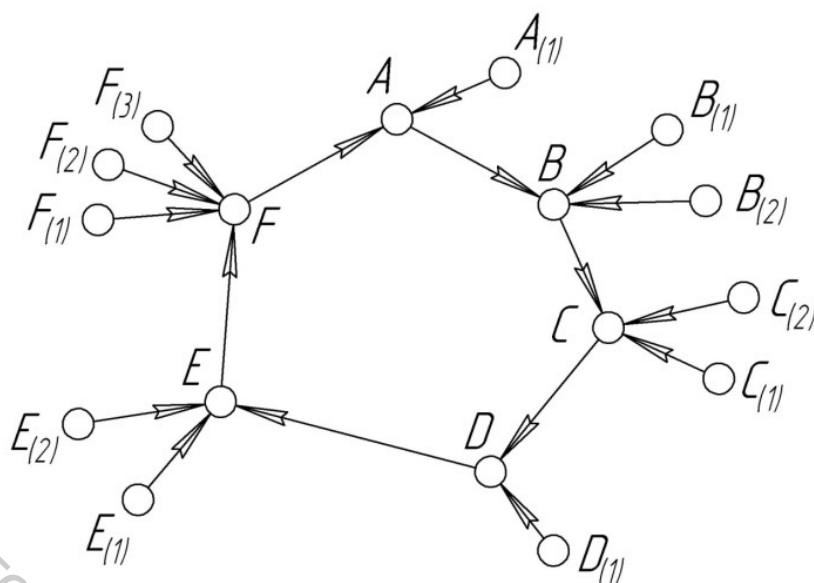


Рисунок 6.8 – Циклический граф технологического наследования

На рисунке 6.9 представлен более сложный случай наследования, когда изменение одного качества обрабатываемого объекта вызывает изменение другого. Если цепочка свойств $C-C_1-C_2-C_3$ характеризует, например, изменение погрешностей формы детали в процессе обработки, а цепочка $D-D_1-D_2-D_3$ – изменение напряжений, то перешеек графа указывает на взаимное влияние этих свойств. Истинную картину технологического наследования описывают аналогичные графы с большим числом перешейков. Однако такие графы являются весьма сложными и не позволяют отделить главные связи от второстепенных. Поэтому для практических целей удобнее пользоваться графами, построенными на основе упрощающих допущений.

Вместе с тем нельзя не заметить, что именно графы по рисунку 6.9 показывают важнейшее свойство кибернетических систем – наличие обратной связи. Всякая система, рассматриваемая с позиций технологического наследования, содержит в себе большое число регуляторов с обратной связью. Эти регуляторы присущи системе, их работа не всегда четко может быть осознана исследователями, детально описана и тем более использована для управления свойствами обрабатываемых объектов. В основе графа, показывающего технологическое наследование, лежит ориентированное ребро, условно снабженное стрелкой. Именно оно указывает на передачу свойств. Отсутствие хотя бы одного ориентированного ребра снимает вопрос о технологическом наследовании, так как вся предыстория изготовления данного объекта оказывается не связанной с дальнейшей обработкой.

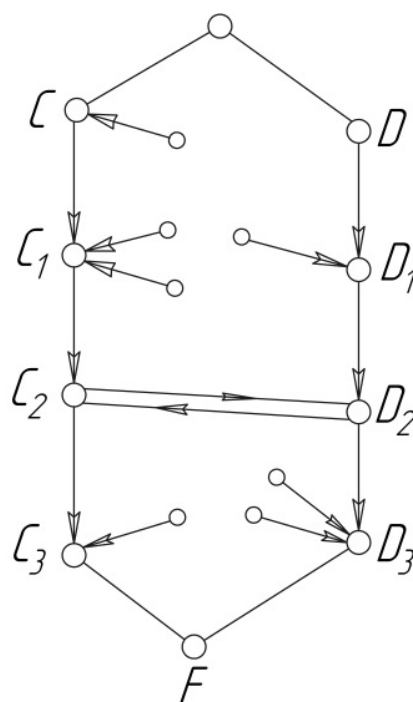


Рисунок 6.9 – Граф, имеющий перешеек

Наряду с методом графов для иллюстрации явлений технологической наследственности может быть использован корреляционный анализ. Получаемая с помощью расчетов автокорреляционная функция показывает степень наследования двух случайных величин. Например, при алмазном выглаживании можно определить влияние исходного профиля на шероховатость выглаженной поверхности. Такая задача решается на основе экспериментальных данных с использованием нормированной взаимно корреляционной функции связи:

$$K_{R_{\text{ш}}R_{\text{в}}}(\Delta l) = \frac{M[\dot{y}_{\text{ш}}(l_i)\dot{y}_{\text{в}}(l_{i+m})]}{\sigma_{\text{ш}}(l_i)\sigma_{\text{в}}(l_i)},$$

где $K_{R_{\text{ш}}R_{\text{в}}}(\Delta l)$ – взаимная корреляционная функция связи шлифованного и выглаженного профилей; $M[\dot{y}_{\text{ш}}(l_i)\dot{y}_{\text{в}}(l_{i+m})]$ – математическое ожидание произведения центрированных профилей; $\dot{y}_{\text{ш}}(l_i)$ – текущее центрированное значение координаты точки профиля шлифованной поверхности на участке l_i ; $\dot{y}_{\text{в}}(l_{i+m})$ – текущее центрированное значение координаты точки профиля выглаженной поверхности на участке l_{i+m} ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$); $\sigma_{\text{ш}}(l_i)$ – среднее квадратическое отклонение координат шлифованного профиля для любого участка поверхности l_i ; $\sigma_{\text{в}}(l_i)$ – среднее квадратическое отклонение координат выглаженного профиля для любого участка поверхности l_i .

Анализ экспериментальных данных показывает, что профиль выглаженной поверхности имеет наследственную связь с профилем исход-

ной (шлифованной) поверхности. С помощью анализа, в частности, удалось установить, что для определенных условий шлифования и последующего выглаживания образца в 54 случаях из 100 на месте вершины микропрофиля шлифованной поверхности будет вершина микропрофиля выглаженной поверхности. Более того, представляется возможным установить влияние неровности на образование соседних неровностей. Корреляционный анализ удобен для описания количественной стороны технологического наследования таких, например, высокоточных деталей, как ходовые винты прецизионных металлорежущих станков. Он позволяет выделить в ошибке шага винта наследственную часть, оценить ее и сделать необходимые выводы о правильности построения предыдущих операций. Использование метода корреляционного анализа требует большого количества наблюдений (замеров), что иногда представляет существенные трудности, особенно для оценки высокоточных деталей. Кроме приведенных возможны и другие методы описания явления. Однако во всех случаях нужно при выборе метода отдавать предпочтение тем, которые позволяют дать количественную оценку.

Анализируя графы различных видов, можно заметить, что они дают в основном общее представление о процессе наследования и не отвечают на вопрос о количественной стороне дела. В отдельных случаях графы оказываются громоздкими и малоупотребимыми в производственных условиях. На рисунке 6.10 представлен граф технологического наследования отклонений формы роликовой дорожки наружного кольца подшипника 32417М. Всего анализу подвергали 12 технологических операций. Отклонения формы обозначены y . Так, y_0 представляет собой отклонение формы заготовки, а y_{12} – отклонение формы готового изделия, т.е. кольца, подаваемого на сборку. Через Δ обозначены различные факторы, влияющие на каждой операции на отклонение формы и, следовательно, формирующие процесс технологического наследования. К таким факторам относятся параметры закрепления объектов обработки, температура (в том числе в ходе термической обработки), режимные условия, характеристики обрабатываемого материала, состояние инструмента и т.д. Эти параметры обозначены соответствующими индексами при Δ (расшифровку индексов не приводим). Несмотря на явную громоздкость таких графов, они дают возможность описывать механизм технологического наследования – моделировать процесс на ЭВМ.

На практике возникают и более сложные случаи технологического наследования, когда изменение одного свойства обрабатываемого объекта вызывает изменение другого свойства такого же объекта. Так, например, как было указано выше, изменение формы объекта приводит к изменениям его напряженного состояния, и наоборот. Тогда на графах изображают соответствующие перешейки (ребра), связывающие свойства друг с другом.

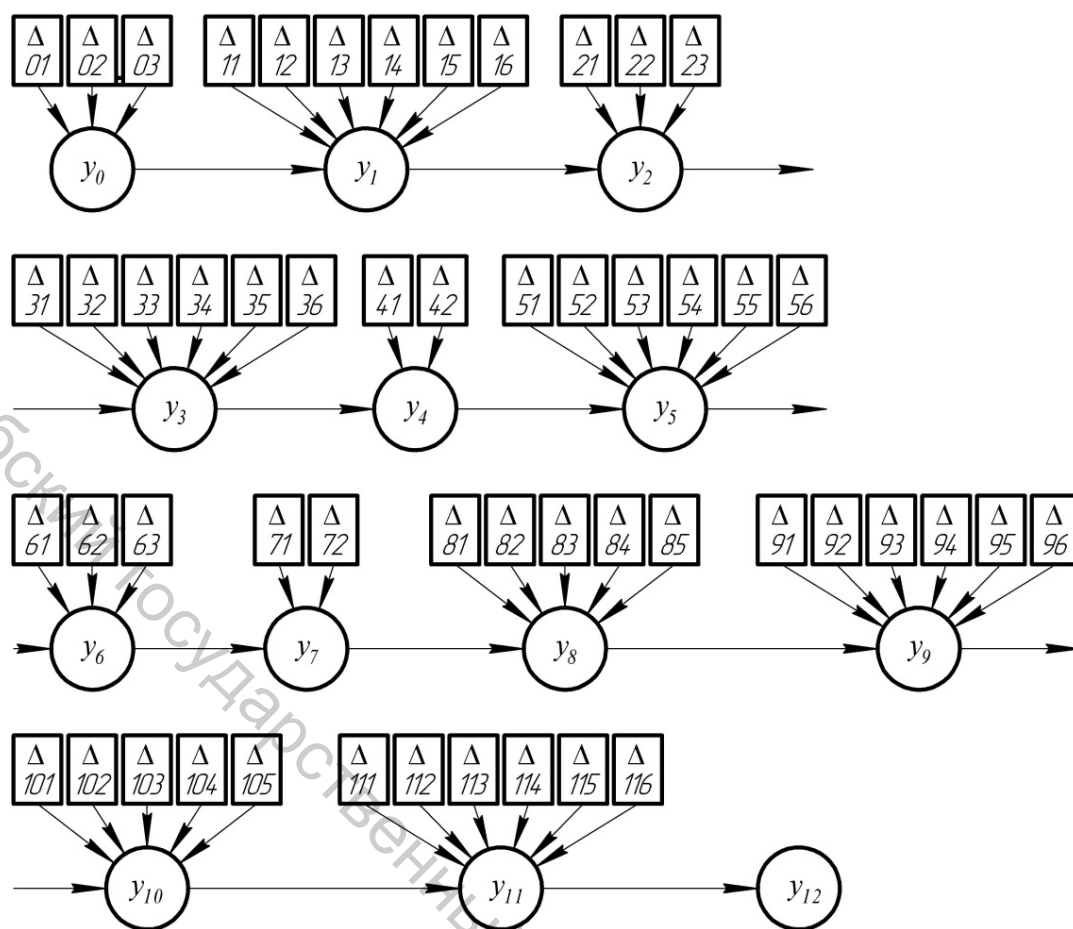


Рисунок 6.10 – Граф технологического наследования отклонений формы роликовой дорожки

Научный интерес представляет еще один вид графов – каскадный. В этом случае сравнительно просто и наглядно установить связи между отдельными и необязательно смежными операциями. Общий вид таких графов имеет дополнительные ребра. Не только свойства изделия передаются от операции к операции, но и выделяются непосредственные связи, например, второй и пятой операций, третьей и восьмой, первой и девятой и т.д. Именно такие графы позволяют наилучшим образом представить механизм технологического наследования в виде системы уравнений [7, 115, 116].

Наибольшей наглядностью отличаются графы, описывающие изменение свойства изделий в ходе технологического процесса. Такой ход целесообразно представлять в виде последовательности операций. Соответствующий граф приведен на рисунке 6.11. Он показывает не только влияние отдельных параметров детали на качество сборки, но и изменение этих параметров в процессе эксплуатации собранного изделия. Для удобства пользования графами введена соответствующая система кодирования. Свойства заготовки (например, точность размеров, откло-

нения формы сечения, шероховатость и пр.) занумерованы так же, как и операции технологического процесса.

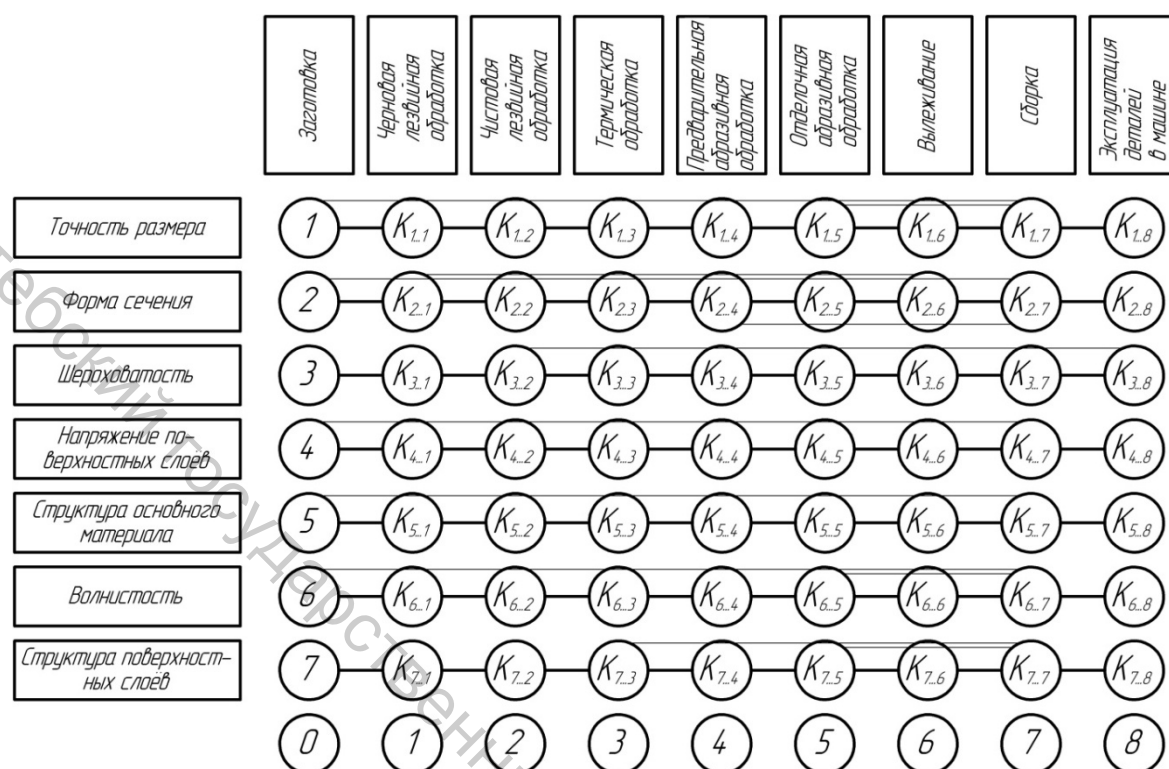


Рисунок 6.11 – Граф, связывающий показатели свойств прецизионных изделий с процессом их изготовления

Представленный граф показывает, что, например, точность размеров заготовки вследствие явлений наследственности определенным образом сказывается на детали, поступающей на сборку. Естественно, операции технологического процесса существенным образом влияют на точность размеров, последовательно увеличивая ее, однако рассеяние размеров готовых деталей оказывается связанным с рассеянием размеров заготовки. Аналогично отклонения формы заготовок могут наследоваться и проявляться на сборке.

Технологическая последовательность изготовления деталей может быть дополнена этапом «эксплуатация деталей в машине». Тогда становится возможным оценить наследственную связь параметров, характеризующих надежность эксплуатируемой детали с аналогичными параметрами на любой операции технологического процесса. Более того, последний этап может быть разбит на определенные периоды времени.

Для количественной оценки явлений технологического наследования следует ввести дополнительные обозначения.

Важно установить не только качественные, но и количественные связи технологического наследования. Именно количественные связи позволяют определить, насколько велико влияние технологического

наследования данного свойства на надежность работы детали в собранной машине. Каждое ребро графа, а прежде всего ориентированное, характеризуется передачей ребра k . Свойство x_0 , выраженное любой вершиной графа, изменяется в ходе технологического процесса и характеризуется величиной x_1 . Таким образом, $x_1 = \frac{1}{k} x_0$. Отсюда следует, что передача представляет собой коэффициент, показывающий количественное изменение свойства.

Для рассматриваемого графа (см. рис. 6.11) имеем:

$k_1 = \frac{\delta_i}{\delta_{i+n}} x_0$ – коэффициент изменения точности размеров (δ – допуск на размер; i – номер текущей операции или перехода; n – число операций или переходов сверх i , после проведения которых количественно определяется величина данного свойства);

$k_2 = \frac{\Delta_i}{\Delta_{i+n}}$ – коэффициент изменения формы сечения заготовки или детали (Δ – отклонение формы);

$k_3 = \frac{Ra_i}{Ra_{i+n}}$ – коэффициент изменения шероховатости (Ra – среднее арифметическое отклонение профиля);

$k_4 = \frac{\sigma_i}{\sigma_{i+n}}$ – коэффициент изменения напряжений поверхностных слоев (σ – напряжения в поверхностных слоях);

$k_5 = \frac{(HB)_i}{(HB)_{i+n}}$ – коэффициент изменения твердости материала;

$k_6 = \frac{Wz_i}{Wz_{i+n}}$ – коэффициент изменения волнистости (Wz – средняя высота волн);

$k_7 = \frac{HW_i}{HW_{i+n}}$ – коэффициент изменения структуры поверхностных слоев.

Таким образом, приведенные коэффициенты являются простыми дробями, у которых числитель указывает на количественное выражение величины, отражающей данное свойство до проведения соответствующей операции, а знаменатель – то же, но после ее проведения. Индекс каждой передачи представляет собой трехзначную цифру. Поскольку все свойства заготовки или детали занумерованы, равно как и операции технологического маршрута, индексы расшифровываются следующим образом: первая цифра – характеристика определенного свойства заготовки или детали (например, точность, волнистость и пр.); вторая цифра – наименование (номер) предыдущей операции, включая заготовительную; третья цифра – наименование (номер) последующей операции, на которой проявляется наследование свойств. Следовательно, выражение передачи $k_{107} = \frac{500}{10}$ означает, что точность «1» заготовки «0» наследуется на детали, поступающей на сборку «7». Точность заготовки характеризовалась допуском 500 мкм, а погрешность детали, пришедшей на сборку, – 10 мкм. Естественно, что установление коэффициентов пере-

дачи может иметь смысл только в том случае, если выявлена наследственная природа явления. Иными словами, отклонение размера детали в 10 мкм возникло именно из-за отклонения размеров заготовки в 500 мкм. Для более сложных случаев технологического наследования индексы передач могут состоять из четырех цифр. Так, передача K_{2014} означает, что форма «2» сечения заготовки «0» на операции «1» определяется напряжениями поверхностных слоев «4».

Свойства, получаемые в ходе технологического процесса, обозначены через x . Двухзначные индексы расшифровываются следующим образом: первая цифра – характеристика определенного свойства заготовки или детали; вторая цифра – наименование (номер) операции, на которой или после которой определяется данное свойство. Например, x_{26} – форма (2) после вылеживания (6); x_{37} – шероховатость (3) детали на сборке (7); x_{63} – волнистость (6) после термической обработки (3) и т.д.

Поскольку на надежность работы детали решающее влияние оказывают не все, а отдельные ее свойства для выявления картины технологического наследования этих свойств целесообразно строить обособленные, каскадные графы. На основании рисунка 6.11 можно построить граф для установления наследственных связей по любому параметру детали. На рисунке 6.12 а представлен каскадный граф, показывающий в общем виде наследование отклонений формы поперечного сечения одной из деталей. В соответствии с изображением этого графа технологическое наследование отклонений формы представляется следующей системой уравнений [7, 115, 116]:

$$\left. \begin{aligned} x_{20} &= \frac{1}{k_{201}} x_{20} + \left[\frac{1}{k_{2014}} x_{40} \right]; & x_{22} &= \frac{1}{k_{212}} x_{21}; \\ x_{23} &= \frac{1}{k_{223}} x_{22} + \left[\frac{1}{k_{2234}} x_{42} \right]; & x_{24} &= \frac{1}{k_{234}} x_{23}; \\ x_{25} &= \frac{1}{k_{245}} x_{24} + \frac{1}{k_{215}} x_{21}; & x_{26} &= \frac{1}{K_{256}} x_{25}; \\ x_{27} &= \frac{1}{k_{267}} x_{26} + \frac{1}{k_{237}} x_{23} + \frac{1}{k_{207}} x_{20} + \left[\frac{1}{k_{2574}} x_{45} \right]; \\ x_{28} &= \frac{1}{k_{278}} x_{27} + \left[\frac{1}{k_{2784}} x_{47} \right] \end{aligned} \right\}$$

Естественно, что вид графа, а следовательно, и соответствующая система уравнений целиком определяются принятым технологическим процессом со всеми его особенностями. Решение таких уравнений не представляет труда, необходимо сделать только ряд подстановок. Значительно большие трудности возникают с получением соответствующей информации, т.е. с определением значений коэффициентов наследования.

В общем виде отношения и взаимная зависимость свойств изделий на различных, в том числе и смежных, технологических операциях выражается уравнением $x_i = ax^h(i-1)$. При этом характер наследования выражается через показатель степени h , а основные условия обработки определяются коэффициентом a . Последнее уравнение можно привести к линейному виду $\ln x_1 = \ln a + \ln x(i-1)$. Величина $\ln x_i$ характеризует значение наследуемого свойства после обработки, $h \ln x(i-1)$ – до обработки, тогда логарифм показывает влияние метода обработки. Поэтому такое уравнение достаточно полно раскрывает механизм технологического наследования.

Коэффициент a как коэффициент регрессии может быть разложен в ряд Тейлора. Тогда в целом параметр наследуемого свойства после обработки раскладывается в следующий ряд:

$$\ln y_1 = h \ln y_{i-1} + \ln k_0 + k_1 \ln \Delta_1 + k_2 \ln \Delta_2 + k_3 \ln \Delta_3 + \dots + k_j \ln \Delta_j.$$

Он представляет собой некоторую поверхность в $(j+2)$ – мерном логарифмическом факторном пространстве. Коэффициенты регрессии в данном полиноме есть коэффициенты $h, \ln k_0, k_1, k_2, \dots, k_j$.

Таким образом, дискретную наследственную связь можно описать уравнением $y_1 = y_0^h k_0 \Delta_2^{k_2} \Delta_3^{k_3} \dots + \Delta_j^{k_j}$, где y_0 и y_1 – величины наследуемого свойства на входе и выходе наследственной связи; $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_j$ – некоторые технологические факторы, присущие данной наследственной связи.

Каждую наследственную связь необходимо представить уравнениями указанного вида, а затем эти уравнения связать в систему. Тогда весь процесс технологического наследования некоторого свойства y опишем следующей системой:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= y_0^h k_0 \Delta_{11}^{k_1} \Delta_{21}^{k_2} \Delta_{31}^{k_3} \dots \Delta_{j1}^{k_j}; \\ y_2 &= y_1^h k_0 \Delta_{12}^{k_1} \Delta_{22}^{k_2} \Delta_{32}^{k_3} \dots \Delta_{j2}^{k_j}; \\ y_3 &= y_2^h k_0 \Delta_{13}^{k_1} \Delta_{23}^{k_2} \Delta_{33}^{k_3} \dots \Delta_{j3}^{k_j}; \\ &\vdots \\ y_i &= y_{i-1}^h k_0 \Delta_{1i}^{k_1} \Delta_{2i}^{k_2} \Delta_{3i}^{k_3} \dots \Delta_{ji}^{k_j}; \end{aligned} \right\}$$

Далее необходимо решить задачу формирования массива технологических факторов таким образом, чтобы число разноименных технологических факторов, вносимых в систему, обеспечивало следующее равенство:

$$j = i - 2,$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$ – число наследственных связей, соответствующее числу уравнений в системе; $j = 1, 2, 3, \dots$ – число анализируемых разноименных технологических факторов.

Становится очевидным, что рассматривать все технологические факторы в большинстве случаев не имеет смысла. Необходимо сосредоточить свое внимание на главных, определяющих факторах. Однако следует учитывать, что при исключении из анализа факторов, кажущихся второстепенными, четкость наследственных связей может нарушиться.

Наиболее целесообразно внести в массив все технологические факторы, полученные из производственного опыта, литературных источников, мнения специалистов-экспертов. Далее все факторы расставляют в порядке значимости и им присваивают необходимые номера. Соответствующая обработка массива позволяет облегчить решение ряда технологических задач, к которым относятся выбор оптимальных значений технологических факторов в соответствии с заданным изменением величины наследуемого свойства; прогнозирование параметров наследуемого свойства готовой детали по его значениям у заготовки; выбор заготовки, обеспечивающей заданное качество изделия.

Более простой случай технологического наследования погрешностей формы представлен на рисунке 6.12 б. Приведенному графу соответствует система уравнений, в которой отсутствуют слагаемые, заключенные в квадратные скобки. Определенный интерес представляет нахождение значений x_{i+n} в функции от x_i . Для этого воспользуемся первыми $(i + n)$ уравнениями. Простой граф, называемый приведенным, дающий x_{i+n} в функции от x_i , показан на рисунке 6.12 в. Искомая передача k_{207} определяется методом подстановки:

$$x_{27} = x_0 \left\{ \frac{1}{k_{212}} \frac{1}{k_{201}} \left[\frac{1}{k_{256}} \left(\frac{1}{k_{223}} \frac{1}{k_{224}} \frac{1}{k_{225}} \right) + \frac{1}{k_{237}} \frac{1}{k_{223}} \right] \right\} + \frac{1}{k_{207}},$$

откуда передача приведенного графа

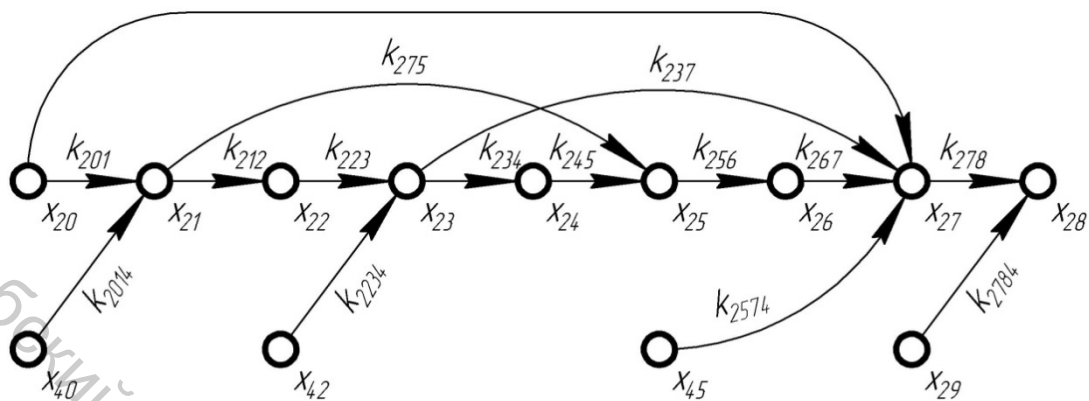
$$k'_{207} = k_{212} k_{201} [k_{256} (k_{223} k_{234} k_{245}) + k_{237} k_{223}] + k_{207}.$$

Очевидно, что при заданных значениях x_i и x_{i+n} можно найти передачу любой технологической операции, если известны передачи остальных операций.

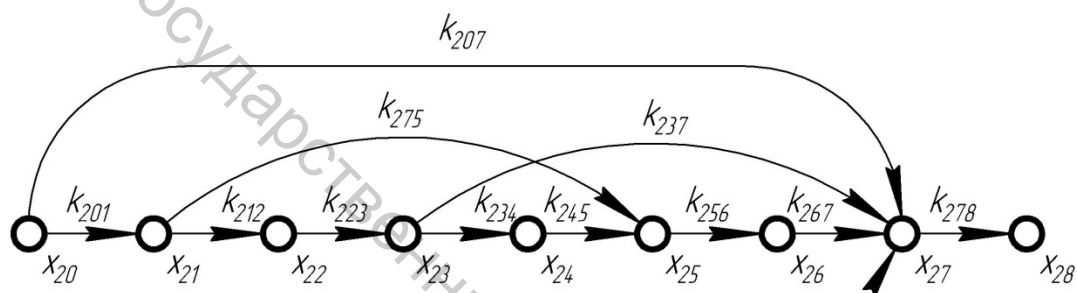
В системе, имеющей обратную связь (рис. 6.13), передачу можно найти на основе следующих рассуждений:

$$x_2 = \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_3}{k_3},$$

$$\text{НО } x_3 = \frac{x_2}{k_2},$$



а



б

Рисунок 6.12 – Каскадные графы

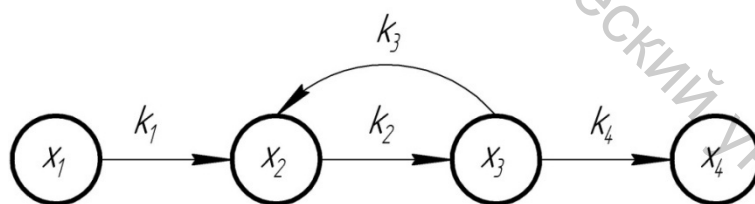


Рисунок 6.13 – Граф системы с обратной связью

поэтому

$$X_2 = \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2 k_3},$$

и передача оказывается равной

$$\frac{x_1}{x_2} = k_1 \left(1 - \frac{1}{k_2 k_3} \right).$$

Величина $\left(1 - \frac{1}{k_2 k_3} \right)$ представляет собой коэффициент обратной связи, т.е. коэффициент, на который нужно умножить передачу, чтобы выявить полное влияние технологического процесса на формирование свойства. Выражение процесса технологического наследования с помощью системы уравнений облегчает задачу количественного определения свойств (значения x для многих случаев в литературе пока представлены слабо).

В сложном явлении наследования в ходе технологического процесса важнейшую роль играет передача и ее количественное значение. В одном случае, на смежных операциях процесса, значение передачи может быть таково, что свойство детали переносится полностью либо даже становится более четко выраженным. Для другой пары смежных операций того же процесса передача оказывается едва заметной или отсутствует вовсе. В последнем случае очень важно установить ту точность, которой характеризуется наследственный перенос данного свойства. Например, часто принимают, что отдельные термические операции способны полностью устранить те напряжения, которые были получены ранее. Во многих случаях такое утверждение вполне допустимо. В действительности же после указанной термической обработки напряжения в материале объекта производства могут остаться, хотя и имеют весьма невысокий уровень. Поэтому ответить на вопрос о том, произошел или не произошел наследственный перенос напряжений, можно в зависимости от того, насколько существенно влияние оставшихся напряжений на выходной параметр детали.

Аналогичный подход следует применить и для оценки передаваемых отклонений формы деталей. Эти отклонения могут быть такими, что их по малости не принимают в расчет в одном случае, но считают большими – в другом. Однако, очевидно, малость таких отклонений не может явиться объяснением того, что процесс технологического наследования отсутствует. Аналогично использование относительно грубых измерительных средств не дает основания утверждать, что определенный процесс или явление не имеет места, так как не регистрируется этими средствами.

В противовес детерминированным системам вероятностная модель содержит характеристики случайного изменения свойств обрабатываемой заготовки и характеристики рассеяния погрешностей ее обработки как внутри одной партии, так и в совокупности нескольких партий. Погрешности обработки на отдельно взятом переходе могут быть представлены в виде последовательности случайных величин

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$, заданных функций распределения $f(\alpha) = P(\alpha < \delta)$, где δ – некоторое предельное значение α .

Во многих случаях представление механизма технологического наследования становится более удобным с помощью системы уравнений. Это тем более оправдано, что можно использовать компьютеры, полагая, что число параметров, участвующих в процессе технологического наследования, оказывается во многих случаях очень большим.

6.3 Технологическая наследственность при изготовлении деталей машин

Технологическое наследование проявляется всегда как объективная реальность функционирования технологических систем. Если анализировать процесс наследования именно по всем показателям, то такой анализ не только потребует огромного времени, но и окажется во многих случаях лишенным практической целесообразности. На практике ограничиваются, как правило, несколькими основными показателями качества, которые определяют служебное назначение изделия. В тех же случаях, когда это необходимо, анализируют особые наследственные связи [7, 115, 116].

В большинстве случаев обращают первостепенное внимание на материал деталей с рассмотрением эволюции его свойств, наследование конструктивных форм деталей в основном материале и в поверхностных слоях, шероховатость поверхности и др. Однако во всех случаях методический подход к определению наследственных связей оказывается единым.

Развитие науки о природе материалов и методах изготовления из них заготовок и деталей машин позволяет изготавливать машиностроительные изделия высокого качества. Вместе с тем в этой работе необходим учет разнообразных наследственных технологических связей и прежде всего связей свойств материалов. Если не предпринимать необходимые меры для ликвидации передачи вредных наследственных свойств от предшествующих технологических операций к последующим, качество изделий неизменно снижается. Пороки исходных заготовок и их материалов возникают еще в металлургическом производстве, имеют наследственный характер и, если не ликвидируются там же, проявляются и в ходе механической обработки, и в готовом изделии. Такие пороки связаны с особенностями заготовительного производства и свойствами материалов.

В науке о технологической наследственности особый интерес представляет учение о старении материалов, т.е. изменении свойств материалов во времени. Старение чаще всего происходит из-за изменения

напряжений $\varepsilon(t)$ как в основной массе материала, так и в поверхностных слоях заготовок (рис. 6.14).

Материал может деформироваться не только при изготовлении заготовок, но и в ходе механической обработки резанием, сборки и даже при испытании изделия. Деформирование заготовок возникает не только от действия соответствующего инструмента, но также от действия сил закрепления, сил инерции, а также под действием собственной массы. Появление неравновесных состояний может быть объяснено с позиций дислокационной теории строения материалов. Неравномерное распределение свойств материала объектов производства, характерное для всего объема заготовки, дополняется неравномерностью распределения свойств и по поверхности детали (рис. 6.15). Такая неравномерность также имеет наследственную природу, так как возникла из-за влияния технологических факторов, имевших воздействие на материал в прошлом (на предшествующих технологических операциях). На поверхностях деталей имеется бесчисленное множество микродефектов (см. рис. 6.15).

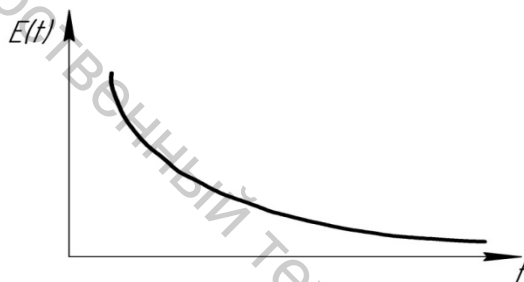


Рисунок 6.14 – График изменения напряжений материала во времени

Кроме того, поверхность гетерогенна, т.е. неоднородна не только в геометрическом, но и в химическом отношении, что непосредственно сказывается на характере контактирования заготовки с технологической средой. На поверхности возникают различные химические соединения. В большинстве они представляют собой оксиды [7, 8, 115, 116].

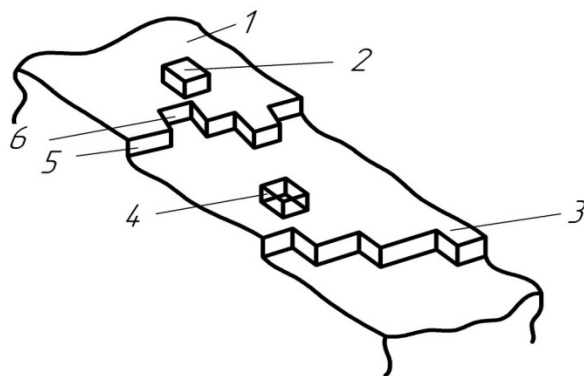


Рисунок 6.15 – Микромодель строения поверхностного слоя:
1 – терраса; 2 – адсорбированный атом; 3 – то же на ступеньке;
4 – вакансии на террасе; 5 – одноатомная ступенька; 6 – петля

Если вредные примеси не ликвидировать на предшествующих операциях тем или иным способом в металлургическом производстве, то они остаются в механосборочном производстве. Но здесь очень важно классифицировать дальнейшее действие вредных примесей. Так, вредная обычно сера в автоматной стали приводит к увеличению точности обработки. Детали, полученные из прутков автоматной стали с содержанием серы 0,16 %, имеют поле рассеяния в 5–6 раз большее, чем детали из прутков с содержанием серы 0,2 %. Соответственно и шероховатость поверхности снизилась в среднем с $Ra = 2,5$ мкм до $Ra = 0,63$ мкм. В то же время включение наследственных примесей часто приводит к более интенсивному изменению механических свойств материалов во времени. Среднеуглеродистая сталь, например, имеющая в структуре неравномерно распределенные включения избыточного графита, отличается низким пределом упругости и склонностью к повышенному изменению формы детали с течением времени.

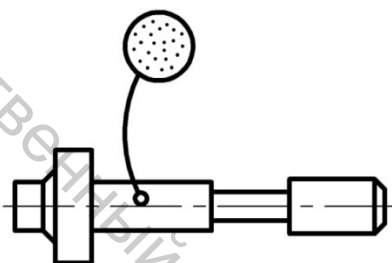


Рисунок 6.16 – Следы инородных включений на поверхности прецизионных деталей

Проблема передачи наследственных свойств некоторых материалов внимательно изучается при получении на деталях ответственных поверхностей с весьма малой шероховатостью (для прецизионных кинематических пар). Например, на шейках валов, играющих роль шпинделей и изготовленных из стали 38ХМЮА, иногда появляются дефекты в виде сыпи (рис. 6.16). Поскольку дефекты обнаруживают после финишной обработки (суперфиниш), то и объяснение этого явления связывают с особенностями протекания финишной обработки. Лишь весьма детальное рассмотрение условий проведения суперфиниша приводит к выводу о наследственной причине появления дефектов на поверхности. Такой причиной явилось возникновение нитридов по границам зерен в ходе химико-термической обработки еще задолго до финишной обработки. Нитриды, будучи чрезвычайно хрупкими, выкрашиваются при приложении силы в ходе механической обработки, оставляя характерные углубления (сыпь). Такие выкрашивания происходят на всех операциях механической обработки, но не замечаются наблюдателем. Они видны отчетливо только на фоне зеркальной поверхности, возникающей после суперфиниша. Рентгенографический анализ подтвердил выска-

занную выше гипотезу. Дефекты на поверхности появляются по двум причинам. Во-первых, выкрашивание неметаллических включений в азотированном слое возникает вследствие усиленной диффузии азота и хрупкости металла в этих местах, во-вторых, из-за некачественной предварительной термической обработки заготовок валов до азотирования, а также грубозернистой структуры металла. Вследствие этого при азотировании происходит усиленная диффузия атомарного азота по границам зерен, где образуются прослойки нитридов, ослабляющие связи между зернами металла.

Некоторые замеченные недостатки микроструктуры, связанные с технологической наследственностью, можно устранять нагревом токами высокой частоты рабочих поверхностей валов с охлаждением на воздухе. Но неметаллические включения все равно остаются (сернистый марганец). Поэтому необходима организация входного контроля качества материала.

Важен и другой аспект рассмотрения технологической наследственности металлов в связи с работой прецизионных кинематических пар. Например, пары могут заклиниваться из-за изотермического распада аустенита материала заготовок. В результате такого распада зазоры кинематической пары (прецизионного соединения) гасятся. Таким образом, свойства, полученные при термической обработке сталей определенного класса, не исправляются на последующих операциях механической обработки. Лишь обработка этих заготовок холодом дает удовлетворительные результаты, и вредные свойства материала ликвидируются на начальных операциях технологического процесса. Аналогичные процессы, происходящие в материале заготовок, приводят к изменению длины таких прецизионных инструментов, как концевые меры (измерительные плитки). Меры длиной 100 мм, изготовленные из хромистой стали с содержанием аустенита менее 1 %, прошедшие закалку в масле при 860 °С и последующий отпуск при 125 °С, через 24 месяца эксплуатации увеличиваются в размере в среднем на 0,25 мкм. Меры же, имевшие 7,4–7,8 % аустенита, уже через 3 месяца увеличиваются в размере на 1,3–1,8 мкм. Такие изменения размеров особенно ощутимы для деталей с большим соотношением длины заготовки к диаметру (толщине), т.е. более 5–10.

Фазовые превращения, происходящие при термической обработке, должны учитываться в дальнейшем ходе технологического процесса, в частности, при шлифовании. Если, например, прецизионные ходовые винты нарезают предварительно на токарновинторезных станках, то шаг винта должен быть скорректирован в связи с тем, что при термической обработке винт увеличит свою длину и, следовательно, на операцию последующего шлифования будут даны винты с изменившимися шагами. В практике замечены и такие случаи, когда изменения длины происходят неравномерно по всему винту. Это, по-видимому, можно объяснить

особенностями строения материала данной заготовки, в частности, некоторым рассеянием физико-механических свойств по всему объему. Такая точка зрения нашла свое экспериментальное подтверждение. При анализе механических свойств материала роторов некоторых машин было обнаружено, что в различных зонах заготовок материал имеет различный удельный вес. Указанная наследственная погрешность заготовок приводит к неуравновешенности роторов даже при их идеальных геометрических параметрах.

Термическая обработка заготовок является наиболее мощным средством, позволяющим весьма успешно управлять наследственными явлениями.

Так, например, задавая различные режимы нормализации сталей, можно получить при одинаковых скоростях резания различную шероховатость поверхности. При этом существенно изменяется не только определенный параметр шероховатости поверхности, но и его рассеяние.

Технологический процесс изготовления деталей во многих случаях должен учитывать волокнистую структуру материала. Так, износостойкость деталей и характер собственно износа зависят от расположения волокон в заготовке. На рисунке 6.17 показано сечение цапфы зубчатого колеса, полученной методом выдавливания. Можно себе представить, как в этом случае будут располагаться волокна. На шлифе можно увидеть, что они как бы «следят» за наружной поверхностью цапфы. Сами условия создания волокнистой структуры этого элемента детали уже предполагают формирование различных свойств материала по поверхности. Характерно расположение твердости по Роквеллу (шкала В) по предполагаемой поверхности трения. Твердость измерена на осевом сечении цапфы на расстоянии 0,15 мм от поверхности. Каждому номеру измерения по рисунку 6.17 а соответствует определенная твердость на графике рисунка 6.17 б. Величина твердости и характер ее распределения определяются методом получения заготовки и свойствами материала. Расположение волокон и особенности изменения твердости сформированы еще на заготовительном этапе производства. Другой метод изготовления цапф создает другую, но также наследственную картину расположения физико-механических показателей заготовки. Именно эти показатели будут формировать в готовом изделии картину износа цапфы и сопрягаемой с ней втулки (подшипника) и прежде всего по форме образующей контактирующих поверхностей.

Различный износ чугуновых деталей при одинаковом химическом составе может быть объяснен на основе явлений технологической наследственности. Установлено, что износ чугуновых образцов (3,3 % С; 2,24 % Si; 0,61 % Mn; 0,1 % P; 0,09 % S) зависит от расстояний между графитовыми включениями. Таким образом, на деталях с одинаковым химическим составом и при одном и том же содержании графита может быть получена гамма структур графитовых включений, различающихся

размерами и формой. Влияние графитовых включений на относительный износ показано на рисунке 6.18, где ΔV_1 – изношенный объем испытуемого образца; ΔV_2 – изношенный объем эталонного образца. Графики указывают на существование определенных связей технологии изготовления деталей и служебных характеристик, проявляющихся в процессе эксплуатации.

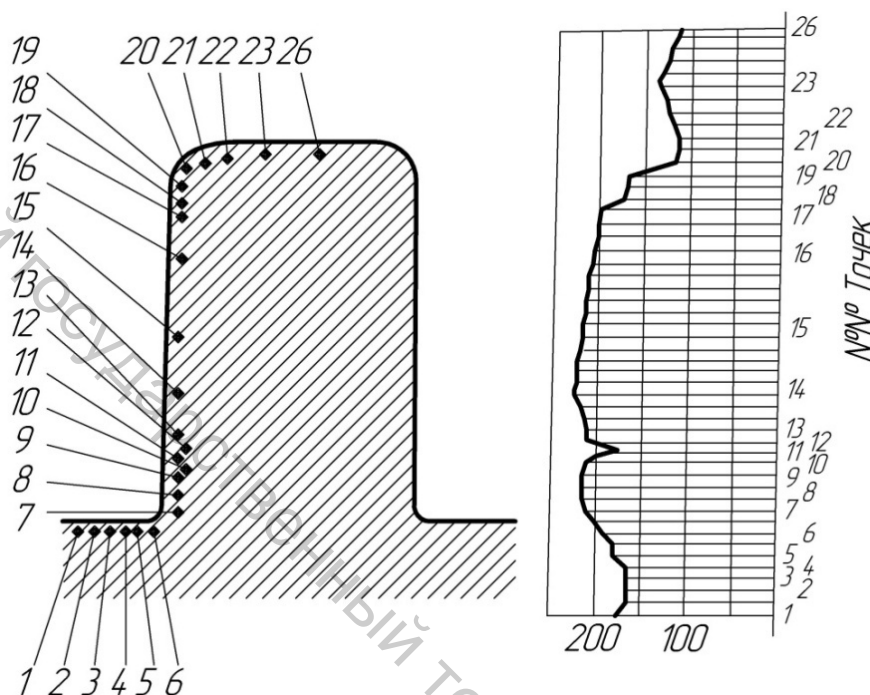


Рисунок 6.17 – Сечение цапфы зубчатого колеса:

а – расположение точек измерения твердости, б – график распределения твердости

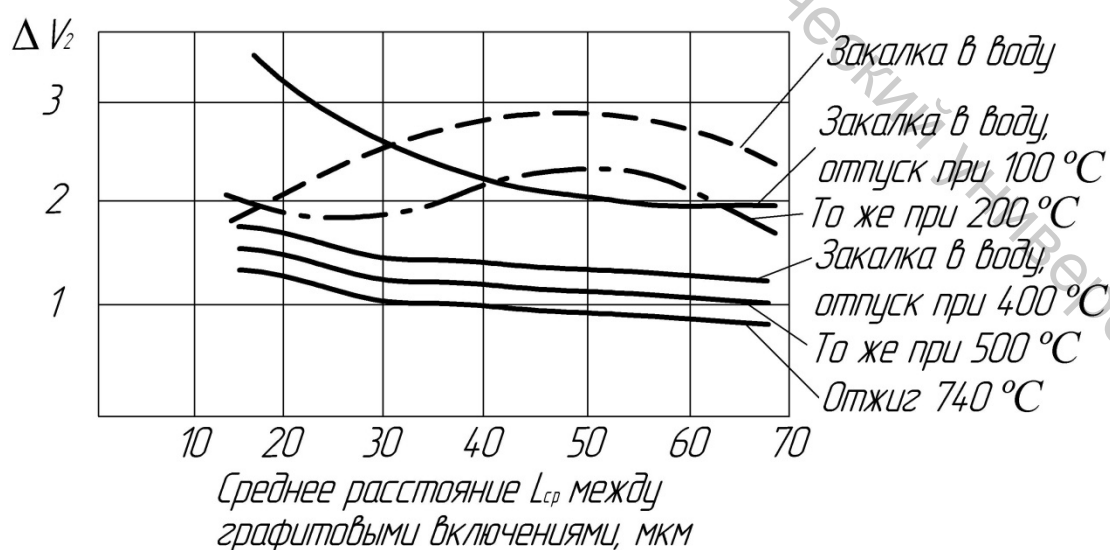


Рисунок 6.18 – Зависимость относительного износа от расстояния между графитовыми включениями чугуна

Свойства обрабатываемого материала, особенно в тех случаях, когда он не подвергается в ходе технологического процесса дополнительной термической обработке, существенно влияют на шероховатость поверхности при механической обработке [7, 115, 116].

Содержание углерода в сталях является важным фактором изменения шероховатости. С ростом количества углерода от 0,1 до 0,7 % шероховатость обрабатываемых поверхностей уменьшается, причем этот эффект становится более ощутимым при больших путях резания. Так, при пути резания 1000 м средняя величина шероховатости по параметру Ra для сталей с 0,1 и 0,6 % С, обрабатываемых твердосплавным инструментом со скоростью резания 300 м/мин, составляет соответственно 5 и 3 мкм. Если же такое сравнение провести для пути резания 16 000 м и оставить все остальные условия прежними, то значение Ra составляет 11 и 7 мкм, т.е. разница увеличивается вдвое. Аналогичные результаты получаются и при обработке другими инструментами. Во всех рассматриваемых случаях материал имел структуру феррит + перлит. Для сталей с содержанием углерода 0,8–1,4 %, обрабатываемых теми же инструментами, но после проведения отжига, характер указанных зависимостей сохраняется, хотя значение Ra увеличивается по сравнению со значением Ra в первом интервале, что можно объяснить появлением другой структуры сталей (перлит + вторичный цементит). Одновременно с изменением шероховатости в рассмотренных случаях изменяются и механические свойства поверхностных слоев заготовок в связи с фазовыми превращениями в ходе резания. Таким образом, наследуемое свойство существенно влияет не на один, а на несколько параметров обрабатываемого объекта одновременно.

Наследование свойств материалов и их влияние на шероховатость поверхностей проявляются не только при обработке заготовок на металлорежущих станках, но и в других случаях механической обработки, в частности при листовой штамповке. Влияние свойств на шероховатость весьма ощутимо и в этом случае. Для того чтобы повлиять на свойства листовых заготовок, приходится проводить соответствующие термические и химические операции. На рисунке 6.19 приведена диаграмма, из которой видно, что шероховатость поверхностей существенно увеличивается в случаях перегрева в процессе термической обработки, а также проведения ее с необезжиренным материалом. Одновременно диаграмма показывает резервы уменьшения шероховатости на основе явлений технологической наследственности.

Термическая обработка является наиболее мощным средством изменения наследственных свойств материала. Однако не следует считать, что она всегда позволяет полностью ликвидировать определенный показатель свойств материала. Например, утверждение о том, что отжигом можно полностью ликвидировать остаточные напряжения, лишено основания. Наличие хотя бы малых по величине, но всегда имеющих

после отжига остаточных напряжений, может решающим образом сказаться на работе прецизионных деталей. Поэтому судить о наследственной природе материалов и роли термической обработки в формировании наследственных свойств нужно на основе количественной оценки показателей различных технологических операций исходя из служебного назначения детали. В связи с этим большое значение приобретает такая операция, как холодное пластическое деформирование заготовок по поверхности. Так, на свойства сталей влияние холодного пластического деформирования настолько велико, что оно проявляется и после такой термической обработки, которая предусматривает фазовую перекристаллизацию. Для некоторых деталей (40ХН и 40Х) предварительный наклеп после улучшения и последующее проведение двойной фазовой перекристаллизации приводит к тому, что пределы прочности и текучести существенно увеличиваются.

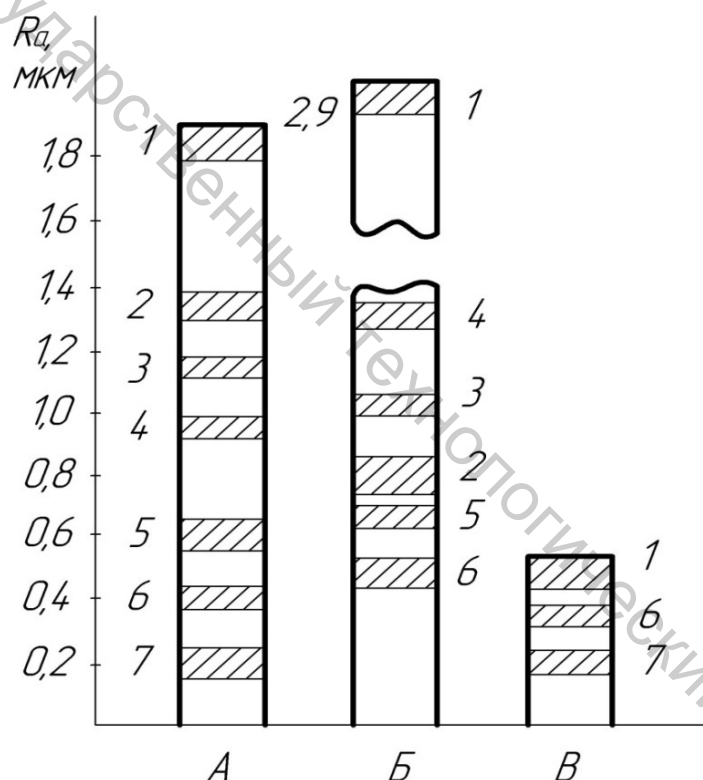


Рисунок 6.19 – Диаграмма влияния состояния материала на показатель шероховатости поверхности при листовой штамповке стальных деталей:

А – с содержанием 18 % Cr, 10 % Ni и не менее 0,07 % C; Б – с содержанием 17 % Cr, 5,5 % Ni, 8,5 % Mn и не менее 0,1 % C; 1 – материал перегрет; 2 – нагрет, не будучи обезжиренным; 3 – нагрет до температуры ниже установленной; 4 – нагрет с увеличенной выдержкой в печи; 5 – нагрет в окислительной атмосфере; 6 – холоднокатаный, протравленный; 7 – после прокатки на отделочном стане

Холодное пластическое деформирование не позволяет упрочнить весь объем материала заготовки, а производится по поверхности. Глубины же упрочненного слоя по сравнению с размерами сечений деталей могут быть достаточно малыми.

Приведенные выше и другие данные говорят о том, что свойства материалов заготовок и особенности технологических процессов получения заготовок наследуются и должны быть разумно использованы для повышения качества деталей машин.

Сейчас уже недостаточно рассматривать качество заготовок только с точки зрения их массы, твердости и пр. Необходимы глубокие исследования всех основных параметров материалов заготовок в плане технологической наследственности. Такую работу должны проводить металловеды, специалисты в области обработки давлением и литейного производства. Это позволит строить оптимальный технологический процесс, способный связать воедино заготовки, их механическую обработку и эксплуатационные показатели деталей, полученных из этих заготовок.

Явления технологической наследственности необходимо использовать для повышения любого параметра качества изделий. Рассмотрим это положение на примерах.

Предположим, что несколько партий валов изготовлено из стали ШХ15. В изделии они, вращаясь, контактируют с роликами по цилиндрической поверхности. Через некоторое время у первой партии валов возникает осповидный износ. У второй партии валов, имеющих ту же начальную шероховатость и размеры, что и первая партия, очагов износа значительно меньше. Третья же партия, работавшая в тех же условиях после того же времени эксплуатации, следов износа не имеет. Так, три партии деталей с одинаковыми исходными данными имеют совершенно разные эксплуатационные характеристики. Отыскание причины этого явления представляет научный и практический интерес.

Обычно причины возникновения погрешностей связывают с финишными, последними операциями. Но в данном случае – с валами – все три партии были закалены в одинаковых условиях, а затем прошлифованы на финишной операции с одинаковыми режимами резания. Используя принцип технологической наследственности, можно утверждать, что свойства изделий формируются не только на последней операции, но и на протяжении всего технологического процесса. Причину отказа (износа) можно найти, рассмотрев всю технологическую цепочку.

С этих позиций рассмотрим процесс взаимодействия заготовки (валов) с абразивным инструментом (рис. 6.20). Шлифовальный круг первоначально находится в положении I–I и срезает в первую очередь микровыступы поверхности заготовки. При этом возникает много очагов теплового воздействия на поверхностный слой заготовки. Своеоб-

разные тепловые удары создают в поверхностном слое зоны, в которых происходят фазовые превращения, приводящие к местному изменению физико-механических свойств материала вала. Шлифовальный круг продолжает перемещаться и занимает положение II–II.

Микровыступы сравнительно большой величины образовались не на финишной операции – шлифования, а на начальной токарной операции, которая была проведена для первой партии валов ($Ra = 20,0$ мкм). Образовавшиеся из-за микровыступов местные износы с выкрашиванием поверхности детали имеют наследственную природу, так как условия образования очагов износа появились еще в начале «рождения» заготовки.

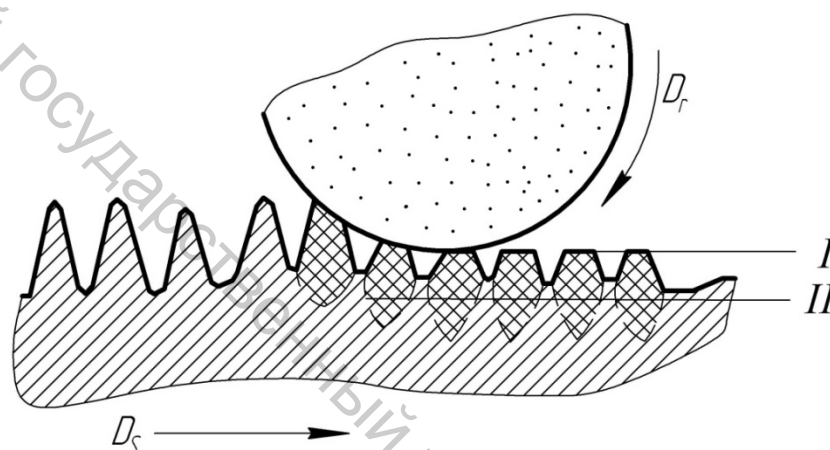


Рисунок 6.20 – Схема образования тепловых ударов при шлифовании

Вторая партия валов предварительно была обточена так, что микровыступы были меньшей ($Ra=5,0$ мкм), чем у первой партии, величины. Поэтому очагов износа было значительно меньше. Третья же партия валов была предварительно прошлифована ($Ra=0,32$ мкм) вместо обтачивания. Микровыступы в этом случае были минимальными и не повлияли на механизм образования очагов с фазовыми превращениями. Из рассмотрения рисунка 6.20 следует, что свойства изделий формируются исходя из наследственной сущности явлений. Поэтому представляется возможным повлиять на структуру технологического процесса, исключив условия образования погрешностей различного вида.

В ходе технологических процессов наследуются практически все свойства материала и поверхностных слоев заготовок и деталей [7, 115, 116].

Большое значение имеет технологическое наследование конструктивных форм деталей. Оно проявляется всегда, но иногда наследственные погрешности оказываются малыми и их влияние на служебные характеристики малоощутимы.

Наследования конструктивных форм деталей рассмотрим на примере рисунка 6.21. При изготовлении детали по рисунку 6.21 а последняя проходит через ряд технологических операций (точение, сверление, дорнование отверстия). Однако обнаруживается, что у всех отверстий партии деталей образующие отверстия имеют отклонение от прямолинейности (пунктирная линия). Традиционный вопрос о том, почему это происходит, не находит быстрого ответа. Чаще всего ответ ищут на финишных операциях. Если же проанализировать всю технологическую цепочку, можно установить, что на операции дорнования отверстия силой Q (рис. 6.21 б) упругие радиальные перемещения заготовки от действия инструмента в различных ее сечениях оказываются различными. Жесткость в сечении 1–1 оказывается больше, чем в сечении 2–2. Когда инструмент – дорн – выйдет из контакта с заготовкой, последняя, деформируясь в зоне упругости, уже не сможет иметь отверстия с прямолинейными образующими. Форма отверстия оказывается наследственно связанной с конструктивными элементами детали.

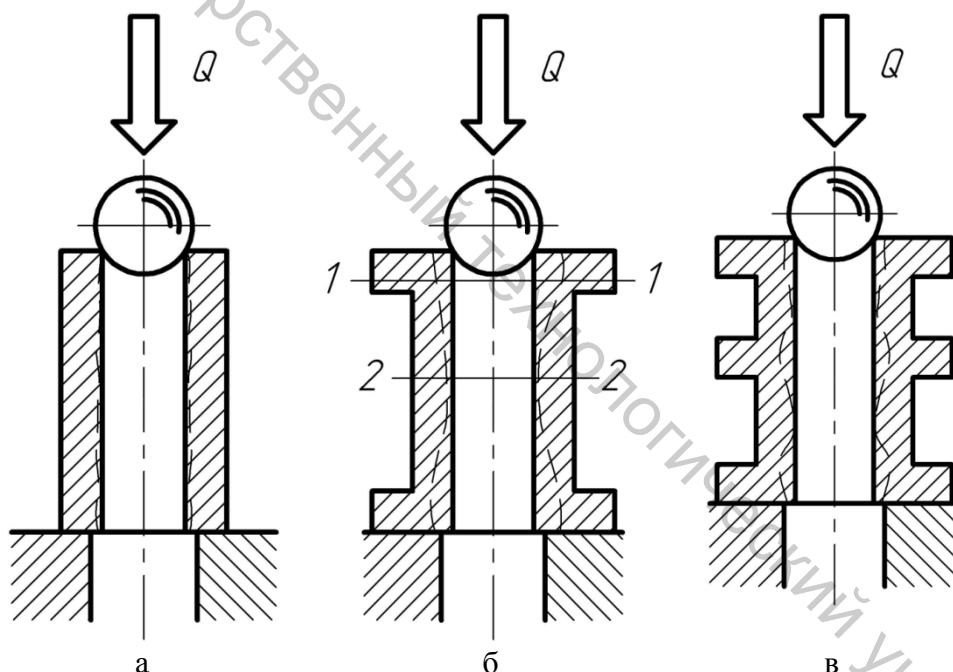


Рисунок 6.21 – Схема технологического наследования конструктивных форм

В подавляющем большинстве случаев технологическое наследование конструктивных форм следует рассматривать как вредное явление. Борьба с ним необходима с помощью конструктивных мероприятий, для чего важно определять отклонение формы количественно. Расчетный метод нахождения погрешностей позволяет для ряда деталей оценивать упругие перемещения под действием сил резания и закрепления с весьма высокой точностью. Для крупногабаритных прецизионных

деталей использование расчетного метода особенно желательно, так как такие детали не могут быть установлены на измерительные приборы, например кругломеры.

Наиболее типичен случай возникновения отклонений формы в силу переменной жесткости заготовок, обрабатываемых на станках токарной и шлифовальной групп. В общем случае заготовки не имеют симметричных поперечных сечений. Для расчетов их следует схематизировать и заменять балками, состоящими из ряда участков, каждый из которых имеет свою жесткость.

Переменная жесткость заготовок может стать причиной возникновения колебаний технологической системы. Если на заготовке для изготовления вала имеется участок прямоугольного сечения, длина которого составляет существенную часть длины вала, то при вращении вала и постоянной силе резания возникнут колебания, поскольку жесткость заготовки будет изменяться по углу поворота. В этом случае отклонения формы обрабатываемого цилиндрического участка могут описываться весьма сложным законом, а собственно отклонения следует определять экспериментальным путем.

Возникновение погрешностей формы при изменении температуры обрабатываемых заготовок оказывается весьма сложным даже для деталей относительно простых конфигураций. Поэтому можно рекомендовать экспериментальный метод оценки наследования конструктивных элементов. Например, экспериментами установлено, что при шлифовании наружных поверхностей деталей, имеющих во внутренних полостях различные приливы, ребра жесткости и другие конструктивные элементы, на обрабатываемой поверхности каждый раз возникают специфические отклонения формы, вполне определенным образом связанные с этими конструктивными элементами. В этом также заключается технологическое наследование конструктивных форм, но его природа в данном случае связана с тепловыми явлениями.

При изготовлении деталей, анализируя тепловые явления, пытаются главным образом определить температурные погрешности размеров. Так, например, при наружном шлифовании цилиндрических заготовок методом врезания принимают, что величина температурных деформаций пропорциональна средней температуре по сечению, а теплоотвод от торцов пренебрегают. Такое допущение нельзя принимать для прецизионных деталей, а для деталей нормальной точности удовлетворительные результаты расчета дает лишь шлифование шеек, удаленных от торцов вала.

Неправомерность допущения о равномерности нагрева заготовок показана на рисунке 6.22. Методом шлифования обрабатываются стальные заготовки диаметром 30 мм и длиной 60 мм со скоростью резания 28 м/с и подачей 0,8 мм/мин. Условия нагрева заготовок в разных поперечных сечениях оказались различными. Теплоотвод у торцов заготовок

оказался значительно больше, чем в середине. В результате этого температурные деформации в середине были больше (см. рис. 6.22 а), чем у торцов. Это проявляется на остывшей детали в виде прогиба образующей величиной h . Этот эффект, естественно, зависит от расхода Q охлаждающей жидкости (см. рис. 6.22 б). Верхняя кривая показывает общее отклонение формы $\zeta_{общ}$, которое учитывает все прочие особенности проведения процесса. При изоляции торцов заготовки тонкой пластмассовой пленкой теплоотвод по сравнению с первым вариантом шлифования был нарушен. Деталь не имела «корсетной» формы. Таким образом, отклонение формы готовой детали есть функция ее длины, диаметра, конструктивного оформления торцов и других особенностей конфигурации, а также свойств материала.

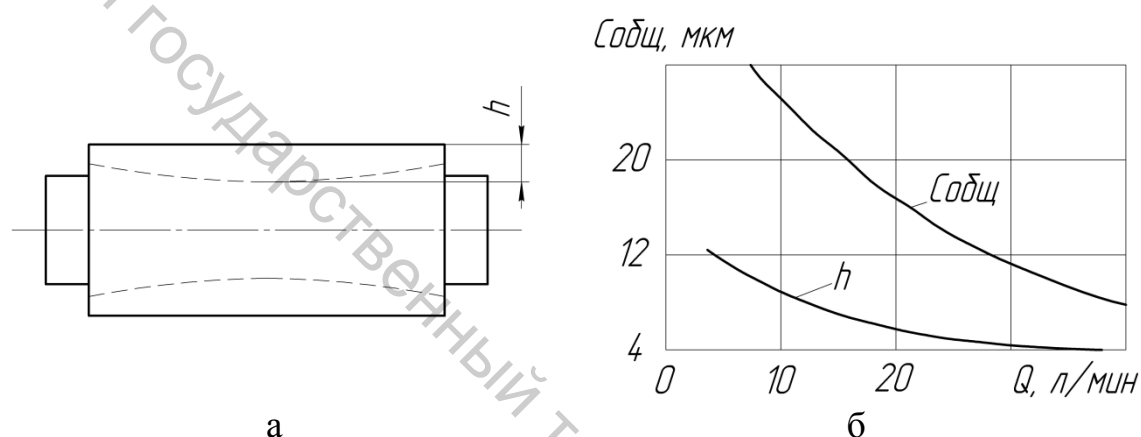


Рисунок 6.22 – Влияние нагрева заготовок на отклонения их формы

Ряд решений по определению температурных деформаций имеется для деталей типа пластин. Расчеты проводят приближенными методами для шарнирного опирания, заделки или свободного края.

Наследственные связи не могут быть реализованы вне контактов заготовок как твердых тел с элементами технологических систем. В первую очередь такими элементами являются технологические базы. В условиях, когда используется принцип постоянства технологических баз, что приводит к повышению точностных характеристик, проявление взаимодействия баз с заготовками сказываются особенно заметно. Базовые поверхности сами имеют погрешности. Контактное взаимодействие заготовок с такими базами непременно влияет на характер наследования.

Технологические базы заготовок всегда имеют отклонения размера, формы и расположения поверхностей контакта с приспособлением или оборудованием. Эти отклонения наследуются обрабатываемыми поверхностями. Так, погрешность, возникшая, например, в начале технологического процесса, может устойчиво сохраняться вплоть до стадии эксплуатации детали. Особенно трудно бороться с малыми по величине отклонениями (погрешностями). Рассмотрим типовой пример по рисунку

ку 6.23. Центровое отверстие – «гнездо» на деталях, например, типа валов (рис. 6.23 а) имеет номинально коническую форму и контактирует с конической формой центра, который играет роль приспособления. Однако детальное рассмотрение формы технологической базы – центрального отверстия – позволяет убедиться в том, что на его конической поверхности имеются характерные выступы (волны). Если посмотреть на центровое отверстие (рис. 6.23 б), то наличие волн на уже контактировавшем с центром вала можно обнаружить по характерным блестящим полоскам. Чаще всего на центральных отверстиях наблюдают 2, 3 или 5 волн. Наиболее отчетливо эти волны можно зафиксировать с помощью кругломера.

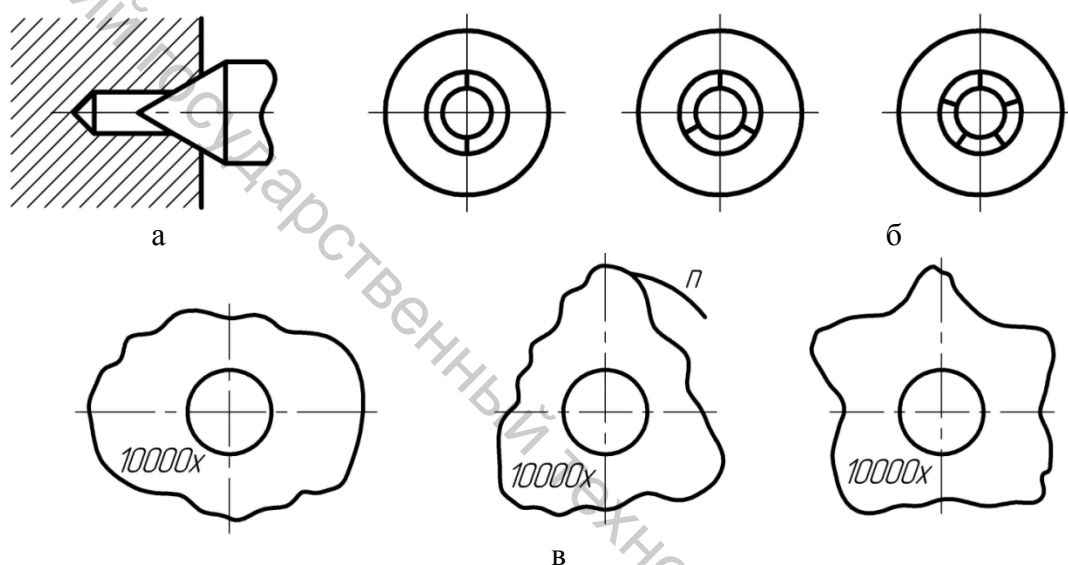


Рисунок 6.23 – Влияние нагрева заготовок на отклонения их формы

Когда происходит обработка наружной поверхности вала методом шлифования и на заготовку действует сила постоянного направления, то условия контакта выступов центрального отверстия и центра постоянно изменяются. Изменяется по углу поворота заготовки и жесткость сопряжения центр – отверстие. В результате этого на наружной обрабатываемой поверхности возникает соответствующая волнистая поверхность. В этом можно убедиться по рисунку 6.23 в. Если на центральном отверстии были две волны, то и наружная поверхность детали также будет иметь две волны. При контакте центра станка с тремя выступами отверстия на обрабатываемой поверхности возникнет также три волны и т.д. Высота волн может быть малой и фиксируется при соответствующем увеличении на кругломере. Так, на финишной операции возникают погрешности, причина которых возникла еще на начальной операции центrovания заготовок. Наследственная погрешность устойчиво сохранилась на протяжении всего технологического процесса.

Трудно себе представить элемент технологического процесса или технологическую операцию, где не проявлялось бы технологическое наследование. Закономерности наследования объективны. Практическое же их проявление отчетливо видно на стадии эксплуатации изделия. Это положение покажем на примере рисунка 6.24 [7, 115, 116].

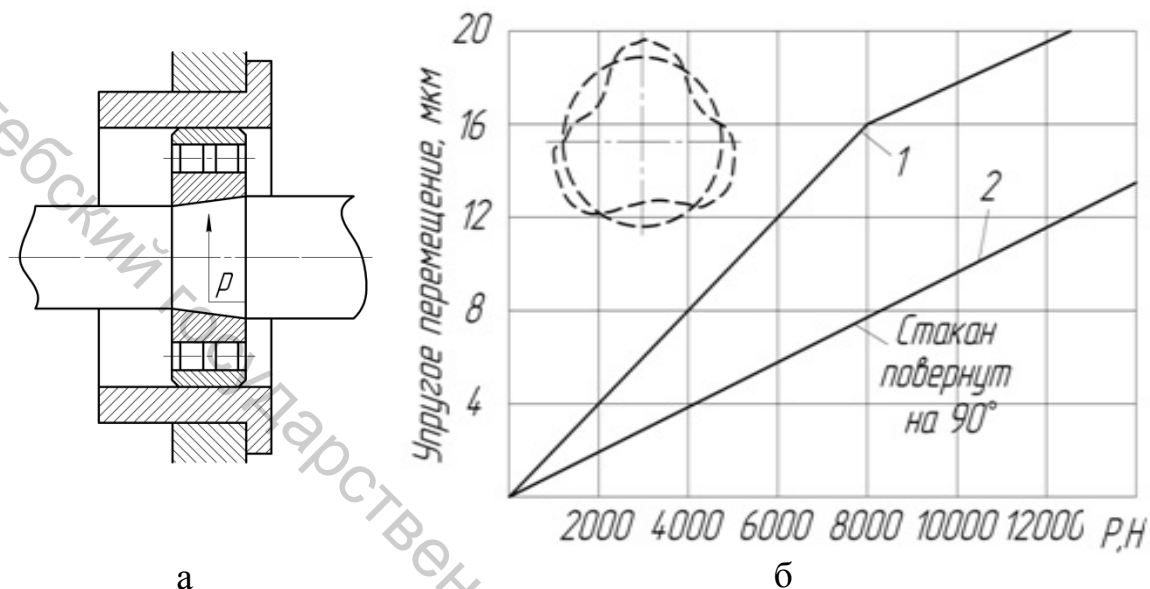


Рисунок 6.24 – Проявление технологической наследственности в ходе эксплуатации изделий

В корпусную деталь изделия поставлен стакан, в котором установлен подшипник качения (рис. 6.24 а). Сила P , действующая на вал и подшипник, вызывает упругое перемещение всего соединения. Такое перемещение зависит от величины приложенной силы. Картина нагружения показана на графике 1 (рис. 6.24 б).

Упругое перемещение элементов конструкции растет по мере возрастания силы P . При силе $P = 8000$ Н характер упругих перемещений изменяется и на графике наблюдается излом. В этом элементарном эксперименте ничего особенного, казалось бы, нет. Однако, если повернуть стакан на 90° и собрать снова всю конструкцию с новым положением стакана, величины упругих перемещений могут существенно измениться (рис. 6.24 б, график 2). Теперь при той же силе нагружения упругие перемещения стали значительно меньше. Кроме этого, нет и излома на графике 2. Это обстоятельство должно найти соответствующее объяснение, поскольку решающим образом влияет на показатели качества всего изделия. При этом речь идет не о данном, конкретном изделии, а о всей партии изделий. Объяснение может и не быть найдено, если не использовать закономерности технологического наследования. Необходимо детально проанализировать всю технологическую цепочку изготовления

деталей и их сборки. Кроме этого, анализу должна быть подвергнута и производственная среда.

При анализе можно установить, что во время токарной или шлифовальной обработки стаканов последние закреплялись в трехкулачковых патронах. Такое закрепление вызывает, естественно, деформирование заготовок стаканов. Следовательно, поверхности сопряжений стаканов с другими деталями будут иметь столько крупных волн, сколько кулачков было у патронов. Эта погрешность формы является наследственной. Она зародилась еще на стадии токарной обработки одной из деталей – стакана – всей конструкции. Форма контактной поверхности стаканов условно показана на графике пунктирной линией.

Если причина анализируемого явления установлена, то необходимо принимать соответствующие меры к устранению ее соответствующей технологической операции процесса. Если же обнаруженная причина положительно сказывается на качественных показателях детали или изделия, соответствующие условия обработки необходимо сохранять и способствовать их развитию.

К настоящему времени уже разработаны необходимые для практики методические положения, позволяющие облегчить анализ наследственных связей и установить количественные соотношения. Из того факта, что наследственные связи объективно существуют, не следует, что во всех случаях их необходимо учитывать. Если, например, речь идет об изготовлении машиностроительных изделий нормальной точности, наследственная доля погрешности может оказаться сравнительно малой. Основными могут стать традиционные погрешности, характерные для большинства технологических процессов изготовления машин. В тех же случаях, когда допустимые погрешности должны быть малыми по своей величине и их устранение оказывается весьма сложной технологической задачей, наследственная доля допуска может не только быть соизмеримой с самим допуском, но и превосходить его. Следовательно, закономерности технологического наследования необходимо использовать прежде всего в прецизионном машиностроении.

Конкретные производственные условия решающим образом влияют на конечный результат в ходе наследования. Из элементарного графа (см. рис. 6.4) следует, что производственная обстановка в виде A_2 влияет на свойства изделия C в равной степени со свойствами L_1 объекта производства, передаваемыми от предшествующих операций.

В передаче свойств в равной степени важен как производственный, так и технологический процесс. В большинстве случаев производственный процесс играет наиболее важную роль потому, что охватывает многие технологические переделы – от металлургии или других способов получения материалов до сборки готовых изделий. Технологический же процесс рассматривается чаще в случаях проявления сравнительно коротких технологических цепочек. Но как в первом, так и во

втором случае необходимо рассмотрение производственной среды и ее объектов.

Производственный процесс, представляющий собой совокупность действий, в результате которых материалы и полуфабрикаты превращаются в готовую продукцию, соответствующую своему служебному назначению, обеспечивает свойства изделий, определяющие их эксплуатационные качества.

Свойства изделий формируются в ходе выполнения всей совокупности технологических процессов, на каждом этапе которых взаимодействуют различные технологические объекты, в результате чего происходит определение или изменение состояния предмета производства. Все это осуществляется в определенной среде – производственной. Среда – это носитель механизма изменения и сохранения свойств изделий в процессе их изготовления, она не принадлежит определенному объекту, но связана с ним.

Множество взаимодействующих технологических процессов объединяются в технологические системы. Функционирование любой технологической системы можно представить как взаимодействие одного ее элемента со средой, которую образуют технологические процессы, принадлежащие данной или иным технологическим системам.

Технологическая среда – это совокупность технологических процессов, взаимодействующих с объектом на отдельном этапе изготовления изделия. В зависимости от уровня рассмотрения объектами могут быть, например, заготовка, деталь, сборочная единица, отдельная технологическая операция или даже технологический процесс.

Таким образом, среда объединяет все технологические объекты, как внутрисистемные, так и внешние, тем или иным образом взаимодействующие с ней и формирующие ее технологическую предысторию и, соответственно, свойства.

В результате развития теории технологического наследования стало возможным осуществить общий подход к решению задач по обеспечению показателей качества.

Пользуясь графом технологического процесса (см. рис. 6.11), можно проследить, например, что точность размеров заготовки за счет явлений наследственности определенным образом сказывается на детали, поступающей на сборку. Операции технологического процесса существенным образом влияют на точность размеров, последовательно увеличивая ее, однако рассеяние размеров готовых деталей оказывается связанным с рассеянием размеров заготовки. Аналогично отклонения формы заготовок могут наследоваться и проявляться на сборке. Указанные параметры (они отражены графом на рисунке 6.11), наследуемые в ходе технологических процессов, чаще всего используются для оценки надежности. Но нельзя считать, что из всех указанных параметров всегда лишь один основной. Как правило, таковыми являются несколько

параметров, их сочетание на базе системного подхода к оценке явлений. Сказанное имеет общий характер и распространяется на изготовление деталей различного назначения.

Предположим, что при обработке высокоточной детали проведен технологический процесс *I* (рис. 6.25), обеспечивающий фактический размер $T_{\phi 1}$. Последний является частью допустимого значения T_k размера, по достижении которого эксплуатация изделия становится невозможной. Заштрихованное поле показывает рассеяние размеров. Указанный процесс обеспечивает срок эксплуатации детали, равный τ_1 годам. Технологический процесс *II* обеспечивает не только тот же размер $T_{\phi 1}$, но и такое качество поверхностного слоя или иные показатели, что деталь работает τ_2 лет. Принципиально новый технологический процесс *III* изготовления $T_{\phi 3}$ и сборки деталей дает τ_3 лет и т.д. Процессы *II* и *III* представляют собой комплексы технологических мероприятий, которые оцениваются несколькими основными параметрами и могут привести к существенному увеличению сроков службы (месяцы, годы) машиностроительных изделий за счет повышения качества технологического процесса, использовавшего закономерности наследования [7, 115, 116].

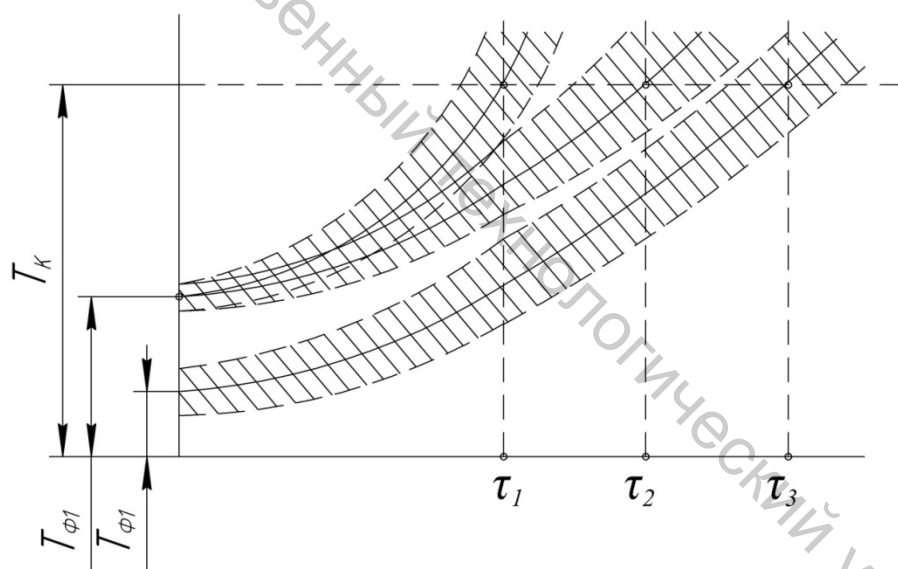


Рисунок 6.25 – Влияние различных технологических процессов на срок службы изделия

Например, на заводе, выпускающем подшипники качения, большая партия их помещена на склад для хранения до момента использования. Внутренние подшипниковые кольца после шлифования (последней операции технологического процесса механической обработки) измерены и признаны, безусловно, годными. Отверстия внутренних колец подшипников имели отклонения, соответствующие допуску на размер, в который входит и отклонение формы отверстий, характеризующееся овальностью, что утрированно показано на рисунке 6.26. Отклонение

формы в виде овальности замечено и по наружной поверхности колец (D_{max} и D_{min}). Однако и эти отклонения находятся в поле допуска на размер. Овальность отверстий колец не является случайной величиной, она характерна для всех партий изделий, поступивших на склад готовой продукции. В этом нет ничего необычного.

Однако при повторном измерении отверстий колец примерно через год хранения изделий на складе было отмечено, что отклонения формы в виде овальности практически у всех колец превзошли допуск. Так, при хранении изделий (без приложения нагрузки) они оказались бракованными. Причину возникновения погрешностей разного вида стараются отыскивать на финишных операциях, в данном случае – шлифовании. В большинстве же случаев изготовления прецизионных деталей погрешности зарождаются и устойчиво сохраняются, начиная с более ранних технологических операций.

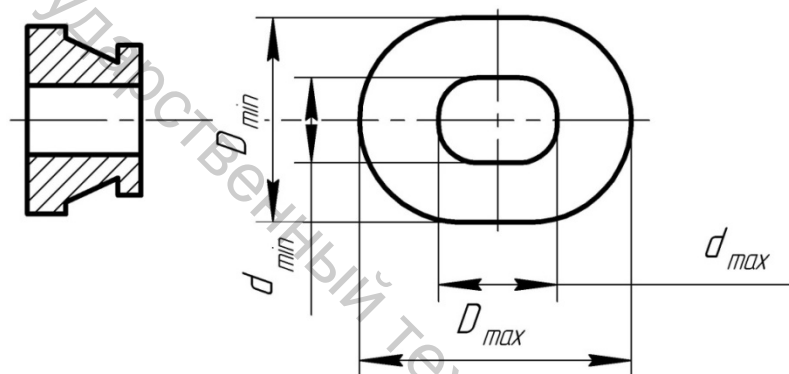


Рисунок 6.26 – Кольцо подшипника с овализованным отверстием

Для того чтобы отыскать истинную причину, необходимо использовать аппарат технологического наследования, детально рассмотреть эволюцию определенной погрешности. Проследим за изменением разности $K = d_{max} - d_{min}$ по всем операциям технологического процесса, начиная с первой. Эта разность изменяется в ходе технологического процесса. При прошивании отверстий колец из нагретого металла половинки штампа упруго раздвигаются, поскольку их привод не обладает бесконечной жесткостью [7, 115, 116].

Наружная поверхность становится овальной ($D_{max} - D_{min}$). В этом же направлении деформируется и поверхность отверстия, оно также становится овальным, но в меньшей степени, чем наружная поверхность. Результат такого анализа для конкретных колец представлен на рисунке 6.27. Одновременно установлено, что на протяжении всего процесса обработки расположение большой и малой осей овала остается постоянным.

Овальность отверстий возникает еще на заготовительной операции (I). На токарной операции (II) овальность отверстия сохраняется на

прежнем уровне. При термической обработке (III) она несколько снижается, что является вполне закономерным. В ожидании операции шлифования в среднем за 7 дней рассматриваемая погрешность (IV) увеличивается без приложения нагрузки. Это говорит о том, что в материале заготовок напряжения, созданные ранее, приводят к деформациям колец. Термическая операция не может полностью исключить напряжения. При шлифовании (V) овальность, естественно, существенно уменьшается, а затем при хранении в течение 15 дней (VI) и в течение года (VII) ее отклонения образуются самопроизвольно.

Анализ показал, что причина данного явления – в особенности проведения заготовительной операции, а погрешность отверстий в виде овальности имеет наследственную природу. Такой анализ позволяет принять соответствующие технологические меры, которые в данном случае могут в первую очередь быть сведены к измерению условий формообразования на заготовительной операции. В рассматриваемом технологическом процессе заготовка формируется в двух половинах штампа, которые упруго раздвигаются в то время, когда жесткий пуансон формирует отверстие, при этом создается овальность всех поверхностей колец. Важным технологическим решением является также применение на токарной операции нового зажимного патрона, что позволяет уменьшить наследственную погрешность и повысить качество изделий.

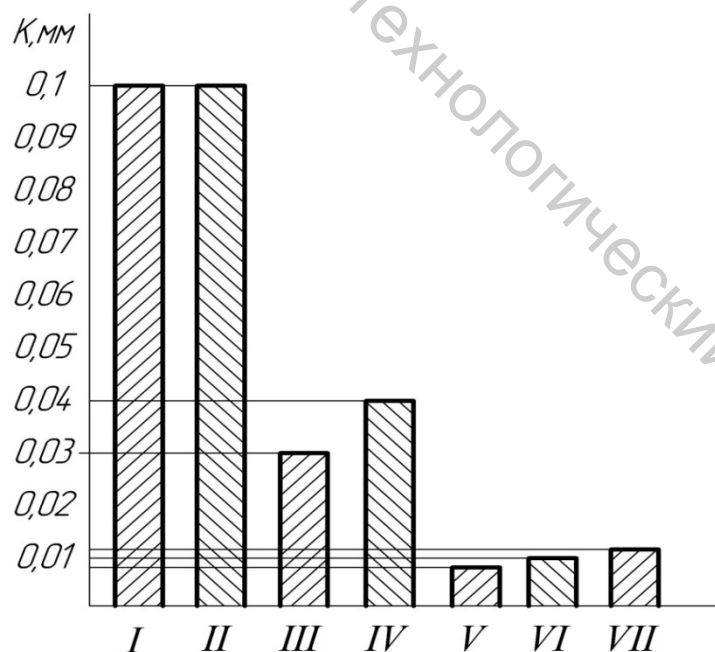


Рисунок 6.27 – Диаграмма изменения показателя точности отверстия по этапам технологического процесса

Развитие положений технологической наследственности позволяет более широко представить истинное положение дел, а не ограничи-

ваться только строением материала и описанием его во времени. Полезным оказывается введение термина «память среды». Совокупность различных зависимостей, описывающих как состояние заготовки, так и технологическую среду, может быть представлена функционалом $F[f]$. Он описывает память среды и называется откликом. В этом же свете оправданным являются и другие термины: f – история; $\{f\}$ – множество функций, от которых зависит f , называемое пространством истории. При производстве особенно прецизионных изделий одновременно проявляются функция формы, функция размера, функция напряжений, функция шероховатости и многие другие, которые, в свою очередь, определяются другими функциями производственной (технологической) среды. Все эти функции должны быть учтены в задачах, связанных с технологической подготовкой производства.

Реальная технологическая среда должна формироваться направленно, а технологическая подготовка производства должна это формирование учитывать.

6.4 Теоретическое определение технологического наследования параметров качества

Анализ теоретических уравнений позволяет установить функциональную взаимосвязь формируемых параметров качества поверхностного слоя с предшествующими при различных методах обработки (рис. 6.28) [7, 115, 116].

Количественно минимальная и максимальная степени влияния технологического наследования на формируемые параметры качества поверхностного слоя могут быть определены по уравнениям

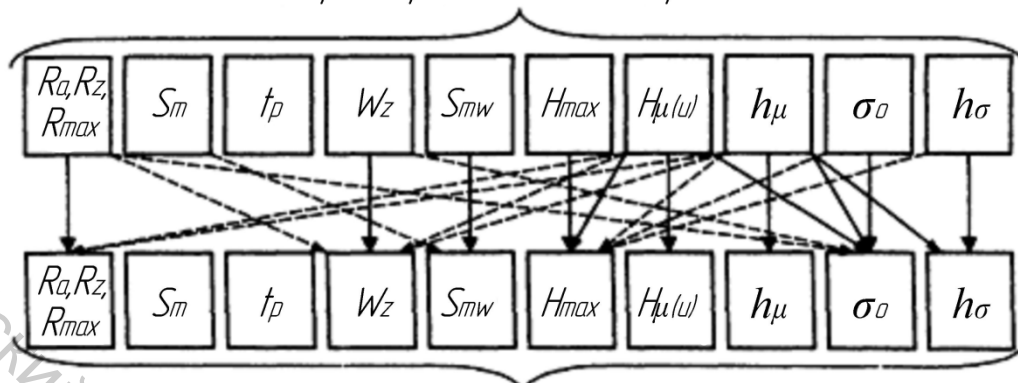
$$H_{y_{i \min}} f(x_1) = \frac{y_{i \min} f(x_{i \max}) - y_{i \min} f(x_{i \min})}{y_{i \max} - y_{i \min}} \cdot 100\%;$$

$$H_{y_{i \max}} f(x_1) = \frac{y_{i \max} f(x_{i \max}) - y_{i \max} f(x_{i \min})}{y_{i \max} - y_{i \min}} \cdot 100\%;$$

где $y_{i \min} f(x_{i \max})$ и $y_{i \min} f(x_{i \min})$ – значения данного параметра при условиях обработки, обеспечивающих его минимальную величину (чистовая обработка), и соответствующем максимальном ($x_{i \max}$) и минимальном ($x_{i \min}$) значениях исходного параметра качества поверхностного слоя; $y_{i \max} f(x_{i \max})$ и $y_{i \max} f(x_{i \min})$ – значения данного параметра при условиях обработки, обеспечивающих его при максимальном и

минимальном значениях исходного параметра качества поверхностного слоя.

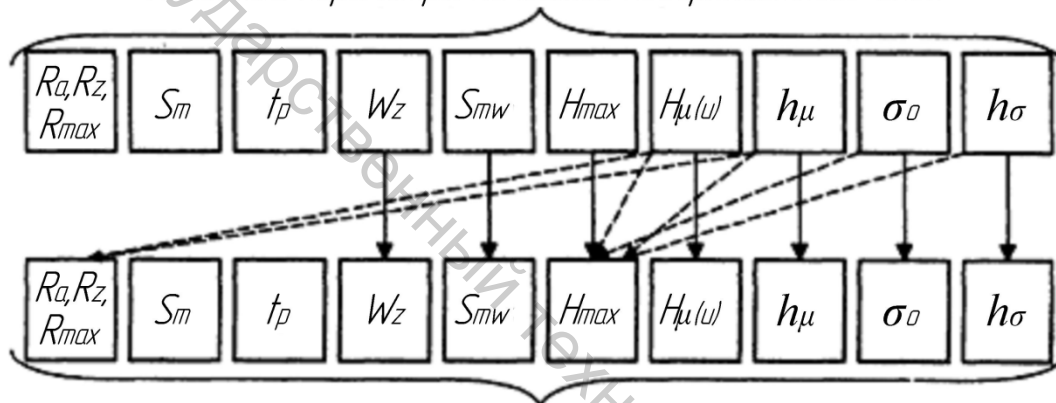
Исходные параметры качества поверхностного слоя



Полученные параметры качества поверхностного слоя

а

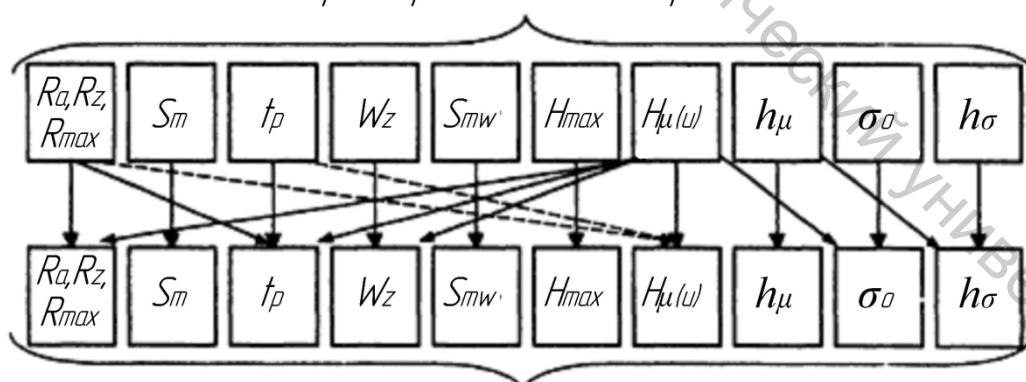
Исходные параметры качества поверхностного слоя



Полученные параметры качества поверхностного слоя

б

Исходные параметры качества поверхностного слоя



Полученные параметры качества поверхностного слоя

в

Рисунок 6.28 – Технологическое наследование основных параметров качества поверхностного слоя деталей:

а – лезвийная обработка, б – алмазно-абразивная обработка, в – ОУО ППД; — прямая взаимосвязь; ---- опосредованная взаимосвязь

Расчеты по вышеприведенным формулам теоретического определения степени влияния технологического наследования по параметрам качества поверхностного слоя деталей машин проведены для лезвийной и ОУО ППД при достаточно широком диапазоне режимов.

1. Лезвийная обработка

φ_1 – вспомогательный угол в плане (10–30°);
 s – подача (0,05–0,3 мм/об);
 r – радиус при вершине резца (0,5–2,0 мм);
 C_y, Y_{py}, X_{py}, n – коэффициенты (соответственно 12; 0,6; 0,9; 0; 1,0);
 t – глубина резания (0,1–1,0 мм);
 v – скорость резания (80–180 м/мин);
 ρ – радиус скругления режущей кромки (30–100 мкм);
 $\tau_{сдв}$ – предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг (200 МПа);
 σ_T – предел прочности обрабатываемого материала (500 МПа);
 $j_{т.с}$ – жесткость технологической системы (1500–3000);
 $R_{Zн}$ – средняя высота неровностей профиля шероховатости вершины резца (4 мкм);
 h_3 – износ по задней поверхности инструмента (0,05–2,0 мм);
 α – задний угол резца (2–10°);
 φ – главный угол в плане (30–90°);
 μ и E – коэффициент Пуассона и модуль упругости обрабатываемого материала соответственно 0,3 и $2 \cdot 10^4$;
 $R_{Zисх}$ – исходная средняя высота неровностей профиля шероховатости (20–100 мкм);
 $HB_{max\text{ исх}}$ и $HB_{min\text{ исх}}$ – исходные значения максимальной и минимальной твердости обрабатываемой поверхности (200–180);
 $W_{Zисх}$ – исходная высота волн (20–100 мкм).

2. ОУО ППД

s – подача (0,05–0,5 мм/об);
 r – профильный радиус ролика (2–10 мм);
 D – диаметр ролика (40–60 мм);
 P – рабочее усилие накатывания (100–500 Н);
 $R_{Zн}$ – средняя высота неровностей профиля шероховатости рабочей поверхности ролика (3–10 мкм);
 f – коэффициент трения между роликом и обрабатываемой поверхностью (0,05–0,2);
 Δp – биение рабочей поверхности ролика (3–10 мкм);
 $R_{Zисх} = 5 \dots 50$ мкм;
 $HB_{исх} = 150 \dots 300$;
 $W_{Zисх} = 10 \dots 50$ мкм.

Результаты расчетов для наглядности представлены на рисунках 6.29 и 6.30.

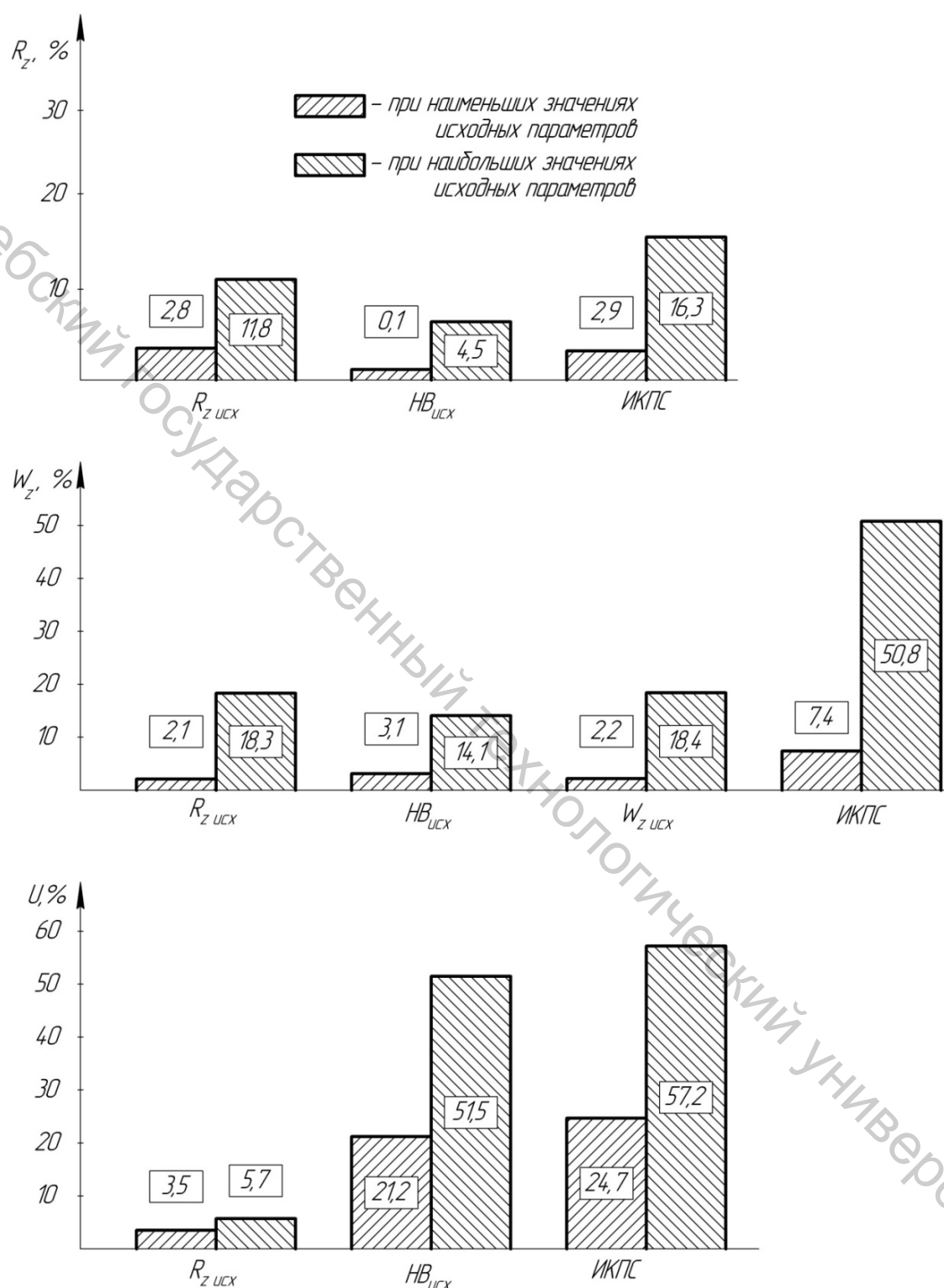


Рисунок 6.29 – Степень влияния исходного качества поверхностного слоя (ИКПС) и отдельных его параметров на формируемые параметры качества поверхностного слоя деталей при лезвийной обработке

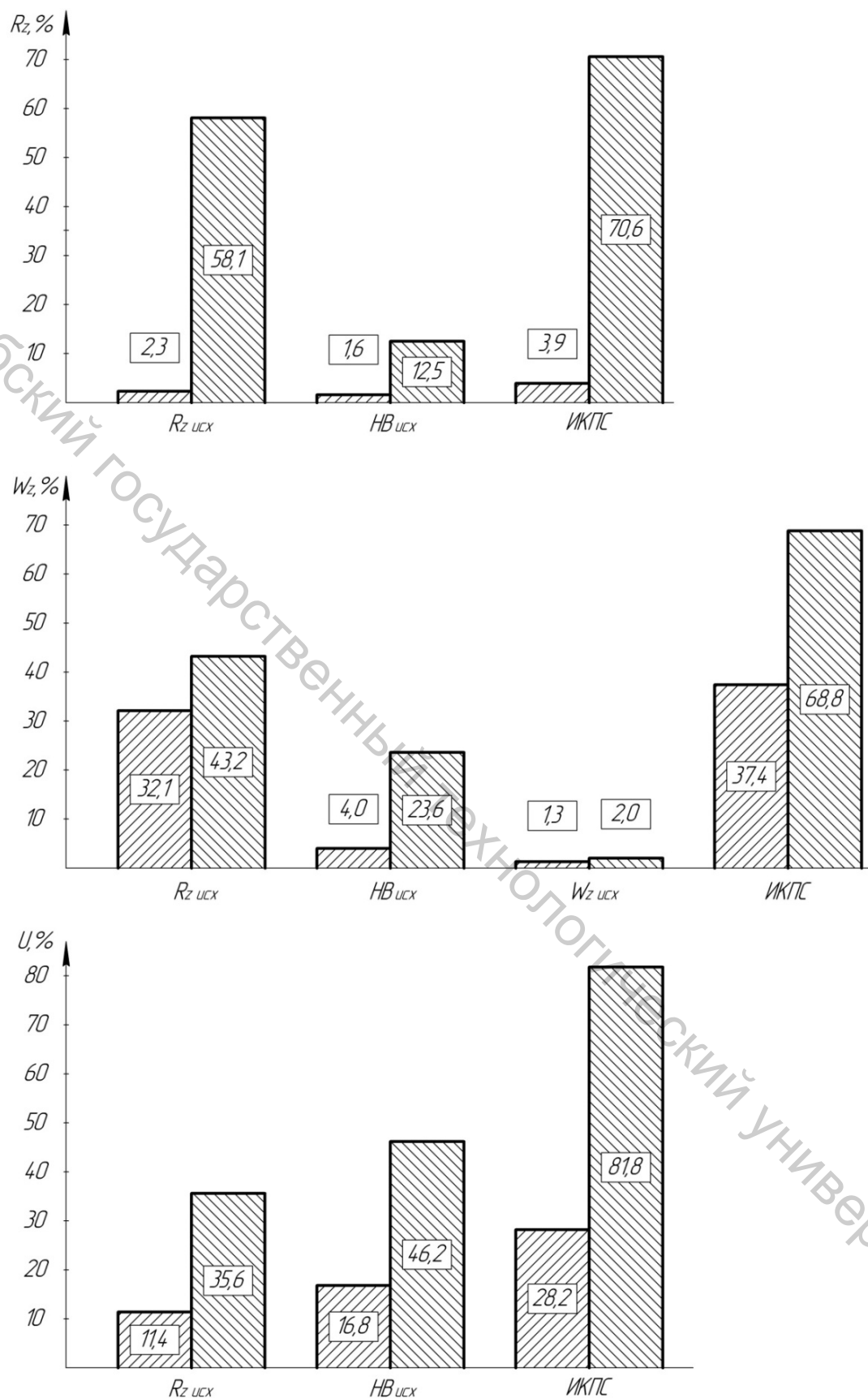


Рисунок 6.30 – Степень влияния ИКПС и его отдельных параметров на формируемые параметры качества поверхностного слоя деталей при ОУО ППД

Анализ диаграмм показывает, что технологическое наследование по качеству поверхностного слоя деталей машин в значительной мере проявляется при наибольших значениях исходных параметров и особенно при обработке ППД на 58,1 % зависит от ее исходной величины и на 12,5 % от поверхностной твердости при максимальных их значениях, в то время как при лезвийной обработке соответственно на 11,8 и 4,5 %.

Формирование волнистости в основном определяется исходной шероховатостью: при лезвийной обработке от 2,2 до 18,4 %, при обработке ППД от 35,1 до 43,2 %. Степень упрочнения в значительной мере зависит от исходной твердости: от 16,8 до 46,2 % при лезвийной обработке и от 21,2 до 51,5 % при обработке ППД деталей, имеющих невысокую исходную твердость.

Таким образом, теоретические исследования позволяют установить степень влияния, она является изменчивой: суммарно от 2,9 % при лезвийной обработке до 81,8 % при обработке ППД. Это убедительно говорит о сложности явлений в технологическом наследовании, которые необходимо учитывать при технологическом обеспечении качества поверхностного слоя деталей машин.

6.5 Технологическая наследственность при сборке изделий

Детали, подаваемые на сборку, могут быть изготовлены с высокой степенью точности, однако они всегда имеют наследственную информацию в виде различных отклонений от номинального значения параметров [7, 115, 116]. В процессе сборки обязателен контакт собираемых деталей. При этом погрешности могут комбинироваться в самых разнообразных вариантах и одни и те же соединения будут отличаться показателями качества. Кроме этого, на сборке непременно действуют силовые факторы, т.е. силы (сосредоточенные и распределенные), а также моменты сил. Силовая картина нагружения определяется технологической средой. Силовые факторы вызывают деформации собранных деталей (соединений). Поскольку речь идет о нагружении на сборке деталей в виде упругих тел, деформации, т.е. погрешности возникают непременно. Их нельзя игнорировать, но можно учесть. Таким образом, на сборке наиболее отчетливо сочетаются свойства соединяемых деталей и особенности проведения этой технологической операции. Собираемые детали как бы теряют свои характеристики и выступают в собранном изделии в новом качестве. Так, шпиндель одного из прецизионных зуборезных станков до сборки имел биение порядка 2 мкм, биение этого же шпинделя после сборки составило 10 мкм. Аналогично обнаруживается искривление образующих на отверстиях в результате сборки втулок с корпусами. На рисунке 6.24 показано, как изменяется качество собран-

ной конструкции по параметру жесткости в связи с наличием наследственной погрешности стакана. Такая погрешность проявляется только после сборки.

Искривление осей валов возникает на сборке в связи с компоновкой наследственных погрешностей, полученных ранее, на стадии изготовления деталей, форма оси вала на рисунке 6.31 (показана утрированно штрихпунктиром) зависит от силы затягивания гайки и погрешностей A , которые, в свою очередь, определяются положением собираемых деталей по углу поворота, который на сборке оказывается случайным. Искривление оси снижает качество работы всей конструкции, приводит, в частности, к искривлению дорожек качения подшипников, нарушению динамических характеристик движения. Такой случай сборки является типовым, потому что указанные погрешности всегда присутствуют в виде непараллельности торцов или неперпендикулярности торца гайки к оси резьбы. Последнее в балансе погрешностей играет, как правило, решающую роль. Если, например, измерить биение вала, установленного на центровые отверстия, а затем произвести сборку (без установки в корпус), то повторный замер покажет существенное увеличение биения. Это объясняется искривлением или поворотом концов вала под действием изгибающего момента.

Особенности наследования на операциях сборки проявляются и тогда, когда собираются «идеальные» детали. Так, внутреннее кольцо подшипника (рис. 6.32) качения при напрессовке на шпиндель вызывает появление погрешности, для ликвидации которой необходима дополнительная механическая обработка. К сожалению, такая обработка часто связана с трудоемкими операциями доводки. С другой стороны, аналогичные погрешности возникают на самом кольце, дорожку качения которого также необходимо доводить.

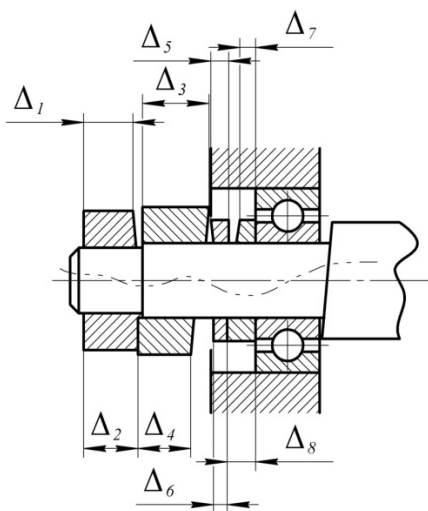


Рисунок 6.31 – Схема искривления вала

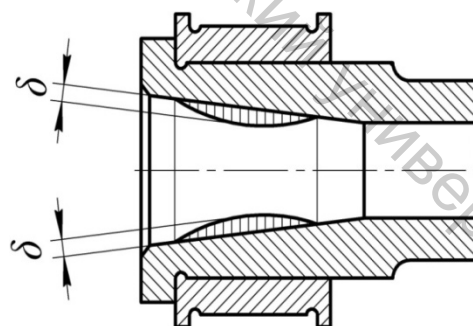


Рисунок 6.32 – Погрешность, возникающая при сборке валов и колец подшипников

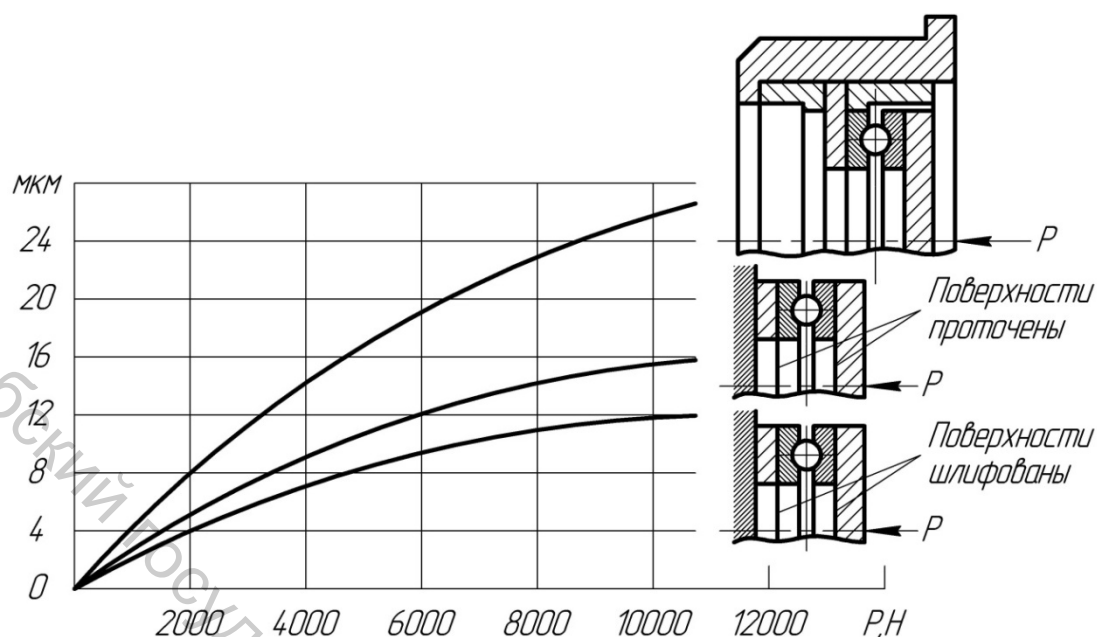


Рисунок 6.33 – Влияние конструктивных и технологических мероприятий на упругие характеристики соединений

Управление наследственными погрешностями на сборке возможно несколькими путями. При этом конструктивные и технологические мероприятия следует использовать в равной степени. Эта мысль иллюстрируется графиками (рис. 6.33) упругих перемещений сборочной единицы упорного шарикового подшипника под действием осевой силы P . На жесткость сборочной единицы решающее влияние оказывают качество поверхностных слоев и компоновка деталей. Величина отжатий определяется состоянием опорных поверхностей у среднего и нижнего объектов одинаковой конструкции, но вместе с тем упругое отжатие верхнего объекта с прошлифованными опорными поверхностями оказывается наибольшим из-за большего количества сопряжений.

Один из действенных методов уменьшения погрешностей – создание новых конструкций деталей и их элементов.

Отметим положительную роль некоторых наследственных деформаций при сборке. Они получили название преднамеренных искажений. Задача состоит в том, чтобы получить на операциях механической обработки такие отклонения от правильной геометрической формы и размера, которые при действии сил на сборке, как и при эксплуатации, ликвидируются или существенно уменьшаются.

Некоторые станкостроительные зарубежные фирмы и отечественные предприятия выполняют на станках направляющие непрямолинейной формы или обрабатывают их в заранее искривленном состоянии, создаваемом распорками. Вертикальные направляющие стоек координатно-расточных станков специально устанавливают с отклонением от вер-

тикали. Во всех случаях сборочные единицы после сборки занимают тем не менее правильное положение под действием собственной массы, массы заготовок или от нагревания в процессе работы. Однако приведенные данные о положительных наследственных погрешностях охватывают пока сравнительно небольшое число примеров. Исследования же в области преднамеренных искажений являются исключительно перспективными. Они тесно увязываются с технологическим наследованием на операциях сборки.

Основное внимание на операциях сборки обращают на величину суммарной деформации, возникшей от влияния шероховатости и отклонений формы, т.е. наследственных погрешностей. Однако определить такую деформацию расчетным путем весьма затруднительно. Последнее объясняется сложностью поставленной задачи. На рисунке 6.34 а приведена компоновка одних и тех же подшипников для выполнения одной и той же функции машины – поддержания массы. Несмотря на кажущуюся одинаковость конструкции, податливость ее оказывается существенно различной (рис. 6.34 б). Наилучшей оказывается вторая компоновка деталей. Ее податливость принята за 100 %.

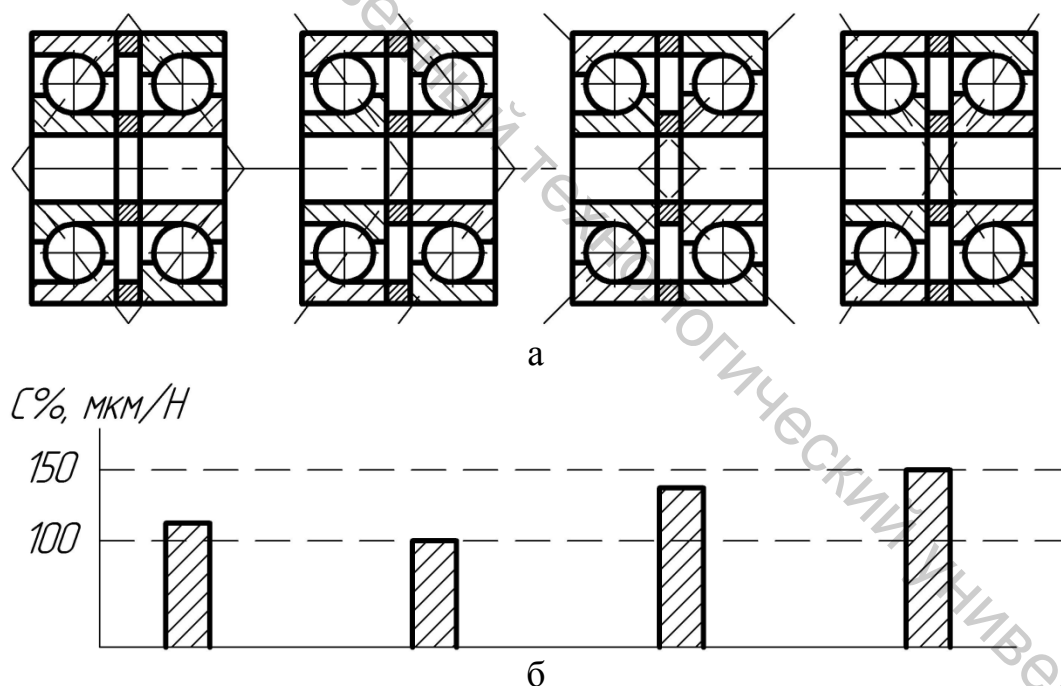


Рисунок 6.34 – Изменение податливости подшипниковых опор

Наиболее привлекателен расчетный метод определения суммарных погрешностей при сборке. Данные расчета, проведенного на основе наследственной информации и особенностей функционирования технологической среды, должны четко указать на условия проведения операции сборки. Эти условия должны быть внесены в технологическую документацию для реализации на практике. Вместе с этим нельзя с уве-

ренностью сказать о том, когда предложенная схема может быть реализована.

Для определения сборочных погрешностей расчетным методом выбирают, как правило, детали сравнительно простых форм. Такие детали схематизируют, высказав ряд допущений, и определяют деформации, т.е. погрешности на основе теории упругости. Все сборочные погрешности имеют наследственную природу и характерны для готового изделия. В ходе эксплуатации изделия либо его хранения погрешности трансформируются, влияя на показатели качества.

В обозримом будущем в плане использования наследственной информации важную роль будет играть экспериментальный метод оценки погрешностей. Однако этот метод может потребовать существенных затрат средств и времени. Он применим для уникальных деталей при выполнении единичных технологических процессов, а также в тех случаях, когда изготавливают большие партии деталей. Известно, что экспериментальные данные часто составляют технологические секреты многих фирм [7, 115, 116].

Расчетное или экспериментальное определение погрешностей на сборке необходимо также для прогнозирования многих показателей надежности изделий. Так, например, долговечность некоторых пар трения, имеющих определенные наследственные погрешности, может быть оговорена заранее. Это же относится и к деталям, у которых релаксация напряжений приводит к деформациям ответственных поверхностей и снижению качества изделия.

Проводя расчетные или экспериментальные исследования, нужно их связывать не со всеми, а прежде всего с ответственными поверхностями, которые в первую очередь определяют служебное назначение детали или изделия. Результаты по проведенным исследованиям должны пополнять банк данных для более четкого формирования направленной технологической среды.

Чтобы определить возникающие на сборке погрешности еще до проведения сборочных операций, для прогнозирования выходных параметров собранных изделий, сравнения погрешностей с допустимыми, регламентирования сил и моментов в ходе операций сборки проводят соответствующие расчеты. Расчеты помогают также указать пути ликвидации вредных наследственных явлений.

В тех случаях, когда расчетное решение задачи не представляется возможным, используют эксперимент. Это особенно целесообразно делать, когда количество допущений оказывается большим или правомерность допущений сомнительна. Возможны комбинации расчетных и экспериментальных методов исследований.

Одним из основных методов влияния в ходе сборки на величины возникающих деформаций, т.е. погрешностей, является определение величины допустимой силы или силовых факторов вообще. Величины си-

ловых параметров на сборке, определенные расчетом, регламентируются с помощью нагрузочных устройств (как ручных, так и механизированных). В очень многих случаях возникающие упругие деформации не могут быть определены приборами непосредственно на сборочных стендах, так как деформируемые детали располагаются внутри других деталей (например, закрытых корпусов) и вообще в недоступных местах. Использование в этих случаях расчетных методов определения погрешностей становится особенно целесообразным.

6.6 Технологические регламенты

Управление наследственными характеристиками должно быть представлено соответствующей системой организационных мероприятий, которые документально оформляются в виде *технологических регламентов*.

Под *технологическим регламентом* понимается директивный документ, определяющий основные элементы технологического процесса, технологические требования и требования к технологической среде. Все такие требования являются обязательными для выполнения на определенной группе предприятий. Регламенты разрабатывают ряд научно-исследовательских учреждений. Качество отдельных деталей обеспечивается за счет включения в регламенты следующих данных:

- перечня и порядка основных технологических операций;
- изложения технологических операций с такими технологическими указаниями, невыполнение которых не допускается;
- указаний о технологическом оборудовании с такой технической характеристикой, которая требуется для выполнения технологических операций, обеспечивающих оптимальные эксплуатационные свойства изделий;
- характеристик технологической оснастки, применение которых обеспечивает высокие эксплуатационные свойства изделий;
- методов и характеристик средств контроля, используемых в процессе изготовления деталей и сборки изделий, а также контроля, испытания и приемки готовых деталей и изделий;
- указания основных производственных условий (помещений, температуры, освещенности, виброизоляции и т.д.);
- методов и средств транспортировки, хранения и консервации полуфабрикатов, упаковки и транспортировки изделий, а также их длительного хранения.

Технологические регламенты являются весьма ценными документами, которые особенно необходимы для разработки технологических процессов изготовления прецизионных изделий. Вместе с тем на базе

дальнейшего совершенствования технологии возможно и необходимо уточнение технологических регламентов. Этому способствуют производственные наблюдения и проведение научно-исследовательских работ.

В практике отечественного машиностроения технологические процессы механической обработки разработаны достаточно подробно. Однако наряду с этим в технологических регламентах должны предусматриваться сведения о параметрах деталей, определяющих их надежность. В большинстве случаев таковыми являются точность формы, точность взаимного расположения поверхностей, а также закономерности изменения параметров во времени.

Общая методика и последовательность разработки процессов должна предусматривать их многовариантность. Предпочтение должно отдаваться тем технологическим вариантам, которые предполагают наряду с эффективностью и рентабельностью пресечение на первых операциях вредных свойств объектов производства и развитие полезных. Такая работа целесообразна прежде всего для типовых деталей прецизионных изделий, что и предусматривается технологическими регламентами.

Технологический контроль рабочих чертежей и технических условий целесообразно проводить на базе данных об общих закономерностях технологического наследования. Уже на первых стадиях разработки технологического процесса возможны ориентировочные расчеты упругих перемещений заготовок при механической обработке, общая оценка возникающих погрешностей и сравнение их с допусками. Эти же расчеты должны быть использованы для установления режимов обработки исходя из регламентирования сил резания и закрепления. Особое внимание обращается на конструктивное оформление элементов деталей, которое может отрицательно проявиться особенно на операциях сборки.

Служебное назначение детали должно учитываться при выборе заготовок. Разрабатываемый технологический процесс предусматривает не только габаритные размеры и формы заготовок, но и величину зерна, чистоту материалов, определенное расположение волокон, величину напряжений и пр. В связи с переносом свойств заготовок на финишные операции во многих случаях становится целесообразной их дополнительная обработка, предусматривающая получение рациональных геометрических и физико-механических свойств до передачи на обработку на металлорежущие станки.

Важным элементом технологических регламентов является правильный выбор установочных баз и учета явления технологического наследования их погрешностей. Для достижения более высокой точности необходимо предусматривать тщательную и многократную обработку баз. Процесс должен учитывать, что искусственные базы в виде

бобышек, центровых гнезд, поясков и пр. имеют существенные по величине геометрические погрешности, последствия которых проявляются даже после проведения финишных операций.

В машиностроении принята последовательность обработки поверхностей, обратная степени их точности. Это правило остается справедливым и для прецизионного машиностроения, однако окончательной обработке наиболее ответственных поверхностей в соответствии с регламентами предшествует их многократная предварительная обработка в соответствии с прохождением заготовки через стадии черновой, чистовой и отделочной обработок.

Расчет припусков на механическую обработку прецизионных деталей проводится по общепринятой методике с учетом явлений технологического наследования. Вместе с тем необходимо внести дополнительное требование о равномерности снимаемого слоя с азотированных, цементованных заготовок для ликвидации последующих поводок деталей.

При разработке технологических процессов сборки необходимо учитывать неизбежное возникновение упругих перемещений под действием сил, возникающих при взаимном закреплении деталей. Наилучшие результаты способен дать метод отработки маршрута сборки с помощью осциллографирования соответствующих переходов. При этом в регламентах должны предусматриваться условия возникновения наименьших по величине сборочных погрешностей и регламентирование сил.

Технологические процессы механической обработки и сборки, созданные с учетом явлений технологической наследственности, позволяют создать соответствующую технологическую оснастку, помогающую управлять ходом изменения свойств обрабатываемых деталей, а также наметить те операции, по окончании которых особенно необходим технологический контроль.

Технологические регламенты являются такими документами, которые концентрируют все требования к среде. Они содержат в компактном виде качественные и количественные показатели технологических процессов, выполняемых в определенной технологической среде.

Практически каждой прецизионной детали посвящен свой технологический регламент или несколько технологических регламентов, которые в отдельности предусматривают заготовительные операции, термическую обработку. На сборку наиболее ответственных изделий также предусмотрены регламенты.

6.7 Вопросы для самоконтроля

1. Как вы понимаете понятие «эффект последействия»?
2. Какие Вам известны пороки исходных заготовок и их материалов?
3. Запишите зависимость деформаций от напряжений, предложенную Л. Больцманом.
4. Как влияют легирующие элементы на свойства сталей?
5. Опишите особенности получения легированных прецизионных марок сталей.
6. Какова роль генной инженерии в технологии машиностроения?
7. Дайте определение понятию «технологическая наследственность».
8. Перечислите носителей наследственной информации в машиностроении.
9. Что представляет трудность в решении проблемы технологического наследования?
10. Какие Вам известны закономерности технологического наследования?
11. Что собой представляет граф формирования объекта в теории наследования?
12. Изобразите ориентированный граф технологического наследования.
13. Изобразите развернутый граф технологического наследования.
14. Изобразите циклический граф технологического наследования.
15. Что показывает граф технологического наследования, имеющий перешеек?
16. Что наряду с графами может использоваться для иллюстрации явлений технологической наследственности?
17. Приведите пример графа технологического наследования отклонений формы роликовой дорожки наружного кольца подшипника.
18. Приведите пример графа, описывающего изменение свойства изделий в ходе технологического процесса.
19. Для чего ориентированное ребро графа технологического наследования характеризуется передачей ребра?
20. Какова область применения и достоинства каскадных графов?
21. Приведите пример каскадного графа.
22. В чем суть учения о старении материалов?
23. Каковы причины появления в заготовках неравновесных состояний?
24. Как наследственные примеси влияют на механические свойства материалов?

25. Какова причина появления «сыпи» на шейках шпинделей из стали 38ХМЮА после суперфиниширования?

26. Приведите пример влияния на качество детали фазовых превращений, происходящих при термической обработке.

27. Приведите примеры влияния волокнистой структуры материала на качество деталей.

28. Как содержание углерода в сталях влияет на изменение шероховатости поверхности?

29. Изобразите диаграмму влияния состояния материала на показатель шероховатости поверхности при листовой штамповке стальных деталей.

30. Приведите пример использования теории технологической наследственности для повышения параметра качества изделий.

31. Приведите пример использования теории технологической наследственности для учета влияния конструктивных форм.

32. Приведите пример использования теории технологической наследственности для учета влияния изменения температуры обрабатываемых заготовок.

33. Приведите пример использования теории технологической наследственности для учета погрешностей баз.

34. Приведите пример проявления технологической наследственности в ходе эксплуатации изделий.

35. В чем суть общего подхода к решению задач по обеспечению показателей качества на основе теории технологического наследования.

36. Изобразите график влияния различных технологических процессов на срок службы изделия.

37. Приведите пример влияния различных технологических процессов на срок службы изделия.

38. Как количественно оценить минимальную и максимальную степени влияния технологического наследования на формируемые параметры качества поверхностного слоя?

39. Какова функциональная взаимосвязь формируемых параметров качества поверхностного слоя с предшествующими при лезвийной обработке?

40. Какова функциональная взаимосвязь формируемых параметров качества поверхностного слоя с предшествующими при алмазно-абразивной обработке?

41. Какова функциональная взаимосвязь формируемых параметров качества поверхностного слоя с предшествующими при обработке ППД?

42. Изобразите графики влияния исходного качества поверхностного слоя и отдельных его параметров на формируемые параметры качества поверхностного слоя деталей при лезвийной обработке.

43. Изобразите графики влияния исходного качества поверхностного слоя и отдельных его параметров на формируемые параметры качества поверхностного слоя деталей при обработке ППД.

44. Каковы особенности процесса наследования погрешности при сборке?

45. Приведите пример наследования погрешности при сборке, проявляющейся в виде искривления осей.

46. Какими путями возможно управление наследственными погрешностями на сборке?

47. Могут ли наследственные деформации при сборке играть положительную роль?

48. Какие задачи решаются с помощью расчетных и экспериментальных методов определения сборочных погрешностей?

49. Дайте определение понятию «технологический регламент».

50. Какие данные включаются в технологический регламент?

51. Назовите особенности разработки технологических регламентов изготовления деталей.

52. Назовите особенности разработки технологических регламентов сборки.

7 САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

7.1 Явления самоорганизующихся систем

Проблема самоорганизации технологических систем рассматривается в связи с необходимостью возведения барьеров на технологическом наследовании вредных свойств изделий и ликвидации таких барьеров при передаче свойств положительных.

Функционирование любой технологической системы можно рассматривать как взаимодействие одного (выделенного) ее элемента со средой. Выделенными объектами могут быть заготовка (предмет производства), отдельная технологическая операция, технологический процесс и т.д.

Для процесса сохранения и изменения свойств изделия может быть определено желаемое направление, наиболее благоприятное с точки зрения окончательного состава и значений показателей качества, но очевидно, что для каждого этапа технологического процесса изготовления изделия может быть сформирована оптимальная технологическая среда, которая, в свою очередь, будет формировать оптимальные фактические свойства.

Существуют специфические области состояния технологических сред. В этих областях передача наследственной информации либо отсутствует, либо не поддается прогнозированию. Для производства это означает, что управление наследственными погрешностями затрудняется, а эффект пресечения передачи вредных наследственных свойств или развития свойств положительных не используется в должной мере. В первом приближении можно установить месторасположение указанных областей. В то время, когда на технологическую систему действует определенная сила (чаще всего сила резания), поведение системы оказывается определенным, а сама система также в первом приближении может считаться линейной. Но по мере уменьшения припуска силовая картина изменяется существенным образом. На конечном этапе обработки, когда достигается микрометрическая и долемикрометрическая точность, сила резания уменьшается настолько, что можно ожидать появления новой, уже нелинейной технологической системы, поскольку организующий эффект силы резания уже утрачен. Аналогичное состояние систем возникает в начале и на протяжении всего периода выхода. Новое состояние системы пока еще изучено слабо. Однако именно это состояние определяет качественные показатели машиностроительного изделия или детали. Сюда прежде всего относятся геометрическая точность размера – формы и взаимного расположения поверхно-

стей. Наиболее полно для изучения поведения указанных систем могут быть использованы принципы синергетики.

Синергетика – наука о самоорганизующихся системах. Такие системы возникают при определенных условиях. Самоорганизация не всегда объективна, и суть ее связана с фактором случайности.

Как только перестает действовать организующая причина (или сила), так наблюдается, согласно принципу Бора, саморазвитие, или самоорганизация, этой системы. Часто саму причину мы не знаем. На первый план выступает фактор случайности. В основе случайности лежат законы физики и химии, но явление не ограничивается действием только этих законов.

Технологические системы относятся к категории динамических, т.е. развивающихся во времени. Поведение таких систем исследовал Анри Пуанкаре. Из трудов Пуанкаре следует рассмотрение поведения самоорганизующихся систем во времени. Но особенно интересным является вывод Л. Эйлера относительно тех же систем. В переводе на технологический язык и применительно к технологическим системам это означает, что, например, всякие изнашивающийся инструмент, сопряжение машины, расконтривающееся соединение и др. в определенный момент времени эксплуатации (за период жизненного цикла) испытывают такую нагрузку (причину), при которой развитие технологической системы прекращается. Этот момент прекращения развития системы называется точкой бифуркации, или бифуркацией, т.е. катастрофой.

Из сказанного следуют два важных положения. Во-первых, бифуркация возникает необязательно при прекращении действия силы (причины). Эта катастрофа может возникать и при наличии силы. Во-вторых, развитие технологической системы во времени происходит в определенном аттракторе, т.е. канале эволюции. Так, например, износ инструмента проявляется в своем, определенном аттракторе. По окончании периода стойкости инструмента возникает бифуркация (даже не в переносном, общенаучном смысле слова, а непосредственно: искрение, оплавление – вплоть до выхода технологической системы из строя). В то время как наблюдается накопление условий для катастрофы по поводу инструмента, в других аттракторах ничего подобного не происходит и не возникают условия для бифуркаций.

Аналогично идет раскрутка (запуск) собранного высокооборотного и высокоточного изделия – шпинделя или турбодетандера. При нарастании частоты вращения динамическая система начинает колебаться, и по достижении определенной частоты (раскрутка – аттрактор) возникает гармоническая неуравновешенность, приводящая к бифуркации даже в прямом смысле. Когда изделие пройдет данный момент времени, наступит другой аттрактор, в котором возникнет при изменении частоты еще одна бифуркация, и т.д. Значит, при том же выхаживании

бифуркация наступит не обязательно при достижении нулевого значения силы в другие моменты времени.

Как показал Л. Эйлер, в момент бифуркации технологическая система «лишается памяти», т.е. отсекает всю предысторию, всю наследственность. Следовательно, бифуркация есть барьер, способный отсечь негативное, т.е. наличие вредных свойств. Это принципиально важно, поскольку появляется барьер наряду с термообработкой. Важно еще одно утверждение: в момент бифуркации и постбифуркационный период поведение системы принципиально непредсказуемо и определяется совершенно новыми условиями среды, теми условиями, которые до бифуркации не играли никакой роли.

Л. Эйлер рассмотрел (для частного случая) ситуацию, когда бифуркация происходит мгновенно. Эффект мгновенности в технических системах может означать относительную кратковременность действия, поскольку каждая причина для своей реализации на практике (через силу, температуру и др.) требует некоторого времени. Такие ситуации особенно интересны для технологических систем.

После возникновения бифуркации трудно сказать что-либо определенное о постбифуркационном периоде, поскольку нельзя прогнозировать поведение технологической системы, но можно говорить о тенденциях эволюции системы. Последние принципиально важны для технологии машиностроения, так как технологов интересует не только возведение барьеров для передачи вредных для качества свойств, но и оценка системы по ее важнейшим показателям.

Технологические системы, в свою очередь, являются элементами других систем. Эти элементы также являются развивающимися системами, и каждая система (элемент) развивается в своем аттракторе. У каждого аттрактора могут быть свои «цели развития». Совместное развитие называют коэволюцией. Развитие одной из систем не препятствует развитию всей системы. Так, можно выделить систему «шлифовальный круг – заготовка» и увидеть, что при определенных скоростях или подачах возникает бифуркация и заготовка получает ожоги. Но это обстоятельство может никак не влиять, например, на износ направляющих станка – это другая система (или подсистема). В целом же коэволюция системы нарушается. Тогда возникает системный кризис. Можно утверждать, что и, наоборот, – системный кризис приводит к бифуркации, перестройке и смене аттрактора.

Анализ понятий и терминологии синергетики показывает, что бифуркацию нельзя рассматривать как мгновение. Когда используется термин «точка бифуркации», то из этого не следует, что бифуркация происходит мгновенно. Собственно бифуркация требует времени. Такое утверждение должно в полной мере использоваться в технологии машиностроения. Понятие теплового удара, например, может рассматриваться, с одной стороны, как мгновение, но с другой стороны, – как процесс

нарастания теплоты в зоне удара абразивного зерна о заготовку. И этот процесс требует времени (см. ниже).

Постбифуркационное состояние системы принципиально непредсказуемо. Но мы можем установить определенные запреты на функционирование технологической системы, однако так, чтобы коэволюционное состояние не было нарушено. Поэтому целесообразно ввести понятие «технологический императив», то есть запрет на нежелательные условия функционирования системы в постбифуркационном периоде. Запреты (ограничения) должны быть оговорены в технологических регламентах. Так, технологическим императивом может быть ограничение температуры, давления, влажности, скорости и пр. При шлифовании технологическим императивом может быть скорость резания (вполне конкретная), при которой не произойдет ни возникновения ожогов заготовки, ни осыпания шлифовального круга. Какой именно императив установить, решает технолог. Но для этого необходимо отчетливо осознать всю совокупность элементов системы, взаимодействующих друг с другом. Очевидно, что может быть использована целая серия запретов (императивов), налагаемых на функционирование технологических систем. Более того, эти запреты, налагаемые на постбифуркационное состояние системы, могут иметь самую различную природу. Так, в случае использования прецизионной технологической системы могут быть одновременно ограничены температура, силы, химические компоненты, их концентрация (например, СОЖ) и пр.

Вполне естественным является желание специалистов в области синергетики сформулировать сказанное выше с помощью компьютеров. Однако это желание реализовано в настоящее время применительно лишь к биосфере в некоторых ее проявлениях.

Сказанное выше позволяет заключить, что учение о функционировании и возникновении самоорганизующихся технологических систем позволяет сделать очень важные выводы для практики в области машиностроения. Главный вывод состоит в том, что имеется способ для возведения барьеров в ходе технологического наследования. Суть этого способа состоит в создании самоорганизующихся систем, которые «теряют память». После установления барьера или даже барьеров в постбифуркационном периоде можно управлять поведением технологической системы, совершенствуя с помощью технологических императивов показатели качества создаваемого объекта.

7.2 Самоорганизация на этапе изготовления материала

Машиностроительное изделие представляет собой совокупность деталей, изготовленных из различных материалов. В свою очередь, и из-

готовление материалов (например, на этапе металлургии) подчиняется законам синергетики. Последнее должно активно использоваться для создания изделий с высокими показателями качества. Проблема изготовления материала деталей затрагивается также как элемент жизненного цикла изделия.

Рассмотрим случай *затвердевания при охлаждении из жидкого состояния* алюминиевых сплавов. Однозначно установлено, что при затвердевании сплавов неизменно образуется дендритная структура материала. Долгое время считалось, что именно такая структура материала присуща ему органически. Наличие дендритов решающим образом влияет на механические свойства металла. Однако в плане исследования самоорганизующихся технологических систем возникает вопрос об умышленном создании бифуркаций для изменения механических свойств сплава, т.е. возведении барьера против дендритной структуры (если она не устраивает изготовителя).

Оказывается, что если производить очень быстрое охлаждение жидкого сплава, то при переходе через линию ликвидус, а также при интенсивном перемешивании сплава в твердожидком состоянии создается совершенно новая структура, лишенная дендритов. В результате возникает новый сплав с такими высокими механическими свойствами, что можно ставить вопрос о замене стальных деталей автомобилестроения на алюминиевые детали из нового сплава.

Здесь бифуркация – быстрое охлаждение и перемешивание; аттрактор – структура; технологический императив – количественные характеристики охлаждения и перемешивания. Правильно считают, что изготовленный таким образом материал может использоваться как исходный для литья и обработки давлением.

Рассмотрим далее другой случай изготовления материала в условиях металлургического производства. Из такого материала (ШХ15) в последующем изготовят валы для быстровращающихся прецизионных изделий. Особенностью изготовления материала является возникновение зон в его объеме. Каждая зона имеет объемную массу, отличную от массы в другой зоне. Эта особенность изготовления материала не играет никакой роли для изготовления деталей. Более того, о такой неоднородности материала большинство конструкторов даже не осведомлено. При раскрутке (запуске) высокооборотных изделий (рабочая частота вращения 400 000 об/мин) валы, достигая частоты вращения примерно 60 000 об/мин (наши опыты на заводе скоростных приводов), начинают сильно вибрировать (первая гармоника) из-за неуравновешенности, которая наследственно связана с неоднородностью материала по объему. Колебания вала могут быть столь велики, что гасится зазор между валом и подшипником скольжения. Это – авария. Если первая гармоника колебаний благополучно преодолевается, наступает вторая гармоника (примерно 80 000 об/мин). Здесь повторяется та же картина. И если вал про-

должает вращаться, не касаясь стенок подшипника, изделие достигает заданной частоты вращения.

Здесь наследственная погрешность в виде неоднородности массы в различных объемах материала приводит к бифуркации собранного изделия в аттракторе вибраций. Технологическим императивом – барьером на пути наследования свойств является требование к однородности материала по объему в разных зонах. Такое требование должно быть оговорено количественно.

Теперь проанализируем особенности создания композиционных материалов. Этот случай особенно характерен тем, что сложные структуры существуют одновременно в сложной технологической среде материалов. Все структуры неустойчивы (что в свое время показал Л. Эйлер). Чтобы они были устойчивыми, необходимо правильно задать начальные условия. В композитах наблюдается несколько уровней организации составляющих элементов.

Если возникла бифуркация (по указанию технологов либо произвольно), то возникает новая структура. В волокнистых композитах некоторое повреждение волокон и межволоконного пространства приводит к созданию такого композита, который лишен возможностей неупругого деформирования ни в докритической, ни в послекритической областях нагружения.

Здесь бифуркация – превращение волокон и межволоконного пространства. Она наблюдается в аттракторе упругости. Императивом может быть как создание условий процесса, исключающего повреждение, так и наоборот. Так можно влиять на наследственные свойства композитов. Естественно, что для каждого из рассмотренных случаев (и для других случаев также) может быть привлечена соответствующая математическая теория или более глубокий анализ. Однако эта работа может найти свое стройное продолжение. В настоящее время главным является накопление знаний (наличие фактов) в проблеме самоорганизации сложных технологических сред.

7.3 Самоорганизация на этапе изготовления заготовок

При изготовлении заготовок *методами литья* особенно четко проявляются наследственные связи в технологической цепочке «шихта – заготовка». Такое наследование представляется вполне естественным. При этом режимы заливки, т.е. заполнение соответствующей формы, также наследственно связаны со свойствами литой заготовки. К таковым относятся скорость заливки, температура, скорость охлаждения. Если, например, изменить скорость заливки при формировании заготовки литьем под давлением, то появление новой (большой) скорости следует

рассматривать как бифуркацию, которая приводит к новой самоорганизации частиц заготовки. Это не только появление новых механических свойств, но и наличие во многих случаях своеобразных пузырей на поверхности отливки. Следовательно, в аттракторе прочности (если преследуется создание именно этого свойства) указанная бифуркация сыграла положительную роль. В аттракторе шероховатости поверхностных слоев бифуркация сыграла отрицательную роль. В зависимости от конструктивных требований должен назначаться технологический императив, суть которого должна, безусловно, связываться с действием физических и химических законов.

Введение ультразвуковых колебаний (18 кГц) в заливаемый металл является новой бифуркацией, вызывающей повышение прочностных характеристик (аттрактор прочности) не только у формируемой заготовки, но и у других заготовок до четвертого поколения, изготавливаемых из самоорганизованного материала от первой заготовки. Заливаемый металл при изготовлении первой заготовки самоорганизуется под действием ультразвуковых колебаний.

В качестве бифуркации следует также рассматривать воздействие на заливаемый материал магнитного поля. Наследственные свойства шихты играют, безусловно, решающую роль, но для параметра (свойства) электропроводности отлитого материала, используемого для дальнейшего изготовления фольги, возникшая (введенная) бифуркация играет решающую роль. Следовательно, появилось новое благоприятное свойство в аттракторе электропроводности. Отметим, как и ранее, что в других аттракторах может происходить снижение показателей качества. Сравнительно часты случаи, когда бифуркация, вызывая «потерю памяти», приводит к одновременному появлению целого ряда положительных свойств. Так, в случае изготовления фольги увеличивается не только электропроводность, но и коррозионная стойкость.

Самоорганизацию в структуре отливки не следует рассматривать в отрыве от наследственных свойств жидкого металла. Вместе с тем установлено, что лишь 25 % свойств шихты передается заготовке, а 75 % свойств формируются в ходе заливки и затвердевания отливки.

Анализ эффекта самоорганизации характерен и для изготовления заготовок *методами давления*. Рассмотрим процесс объемной штамповки в аттракторе структуры материала заготовки. Размер зерна штампуемой заготовки зависит от температуры рекристаллизации, степени деформации и скорости деформирования. При критической скорости деформирования размеры зерен резко увеличиваются, а прочность материала заготовки падает. Если, например, возникает бифуркация, связанная с нарушением условия соблюдения критической скорости деформирования, то новая самоорганизация должна быть оценена отрицательно. Технологическим императивом должен считаться уход от критической

скорости деформирования. Это, в свою очередь, означает, что последний удар молота не должен вызывать 5–1 % степени деформации.

При изготовлении заготовок *методами давления из порошков* различных металлов наследственные свойства отдельных частиц и границ между ними проявляются вполне четко. Прутковые заготовки из порошков получают как исходный материал для последующего создания заготовок, изготавливают прессованием и спеканием. Однако создание заготовок из пруткового порошкового материала не является рациональным, поскольку возникают огромные силы трения между порошковой массой и элементами оснастки – пуансонами и матрицами. В большинстве случаев штамповая оснастка выходит из строя, а механические свойства совокупности частиц порошка остаются практически без изменения. Если же ввести новый способ деформирования порошковой массы, то последняя будет самоорганизовываться так, что не только получается качественная заготовка, но и улучшаются все параметры штампования. Своеобразной бифуркацией является ситуация, когда пуансон перемещается вниз, а матрица – одновременно вверх, но так, что снимаются в значительной степени силы трения между порошковой массой и оснасткой. Еще одной бифуркацией может являться введение в порошковую массу своеобразных смазывающих веществ в виде поваренной соли, едкого натра, извести. Самоорганизация отдельных частиц порошка здесь идет по закономерностям, существенно отличным от закономерностей прессования без смазки. Во всех указанных случаях необходимо определять аттрактор и соответствующий технологический императив.

7.4 Самоорганизация технологических систем при механической обработке и сборке

При механической обработке заготовок резанием основная масса материала заготовки изменений не претерпевает. Такие изменения уже произошли на этапе изготовления собственно материалов и заготовки. При механической обработке заготовок основные процессы самоорганизации касаются размеров, формы и взаимного расположения поверхностей, а также поверхностного слоя заготовок и деталей с рассмотрением его геометрических и физико-механических характеристик. Применительно именно к этим показателям в разделе рассмотрены эффекты самоорганизации сред [117–119].

Технология машиностроения охватывает знания, связанные с изготовлением машин. В принятой постановке вопроса не удастся расчленить понятия «изготовление деталей» и «сборка». Эти понятия рассматриваются с проникновением одного в другое.

Основным барьером на пути передачи наследственных свойств в машиностроении считаются термические операции. Материал заготовок и деталей представляет собой сплошную среду, в отдельных участках которой характерны свои геометрическая форма, напряжения и определенная структура. Своеобразная перестройка в таких участках оказывается столь существенной, что способна при проведении термических операций как бы ликвидировать, «забыть» всю предысторию создания изделия. Говоря языком синергетики, возникает бифуркация, т.е. катастрофа, которая приводит к созданию новой самоорганизующейся структуры. При этом многие свойства изделия отсекаются и создаются новые. Нахождение различных барьеров в технологическом наследовании – важная задача технологии машиностроения.

Те технологические системы, которые можно рассматривать как диссипативные, способны переходить при определенных условиях от упорядоченного движения к движению, называемому хаотическим. Согласно принципу Бора, такой переход происходит, когда перестает действовать причина, организующая упорядоченное движение, в качестве которой могут, например, выступать сила и момент силы, действующие на технологическую систему. Аналогичный эффект может вызвать не исчезновение причины, а изменение условий нагружения, скорости и т.д.

На рисунке 7.1 представлена технологическая система, предназначенная для изготовления изделия 1, совершающего движение D_r . Режущий инструмент перемещается (подача D_s) вместе с суппортом 2. Движение суппорта создается двигателем 5 через механизмы 3 и 6, а управляющие сигналы задаются программным устройством 4. Чем ближе к заданной величине объекта подходит инструмент, тем меньше становятся его перемещения, обеспечивающие качество (точность размера) изделия. При этом сила резания, обеспечивающая движение суппорта, становится малой. В этих условиях суппорт перестает отрабатывать команды программного устройства и в соответствии с положениями синергетики начинает совершать хаотические движения. Технологическая система становится самоорганизующейся, и в общем случае предсказать ее поведение принципиально невозможно [7].

В описанной ситуации перемещения суппорта уменьшаются (рис. 7.2), а в момент времени t_0 возникает бифуркация и начинает функционировать новая система хаотического движения. Так, хаос порождает новое свойство. С технологических позиций необходимо далее ограничить значение Δ , в рамках которого может совершаться движение суппорта. Это связано с достижением параметров качества изделия. При прецизионной обработке геометрическая точность изготовленного изделия может оцениваться микрометрами и их долями. В рассматриваемом случае различные наследственные свойства уже перестают играть решающую роль, поскольку основным становится движение суппорта в

новых условиях. Поэтому можно считать, что возник своеобразный барьер на пути передачи наследственных свойств изделия.

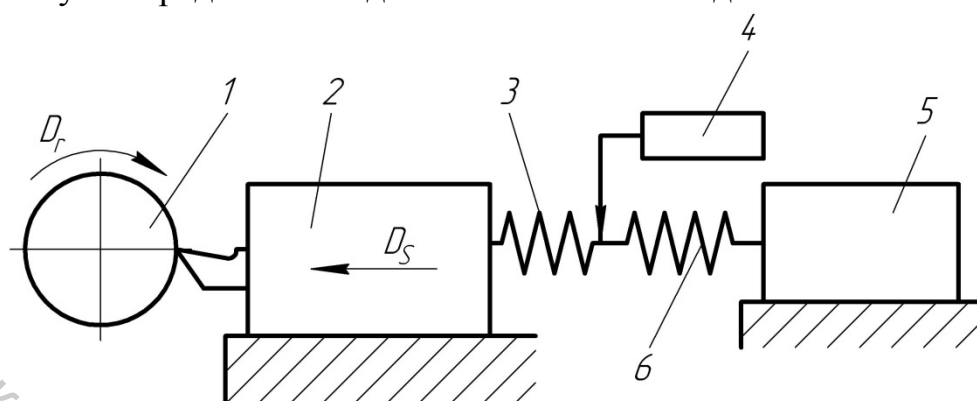


Рисунок 7.1 – Схема технологической системы на основе металлорежущего станка

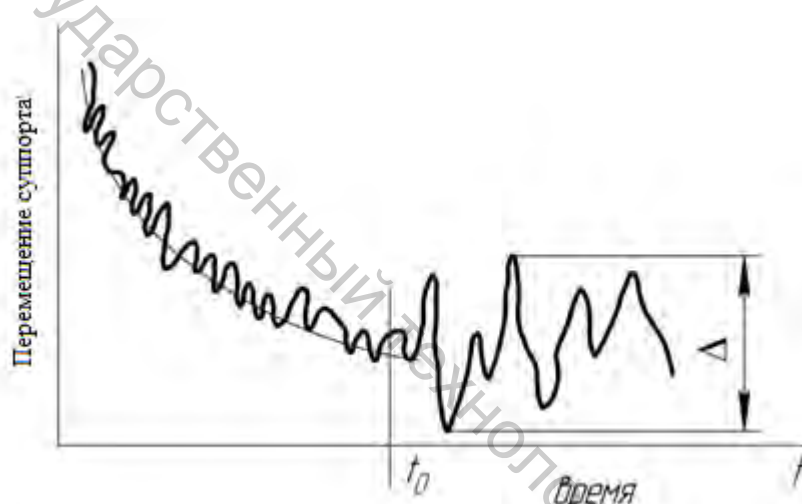


Рисунок 7.2 – График упругого перемещения суппорта в ходе развития технологической системы

Многие параметры технологических систем *развиваются* (изменяются) также в соответствии с принципами синергетики. Развитие каждого параметра или группы параметров происходит в своем обособленном канале эволюции, называемом аттрактором. Если в одном аттракторе развивается свойство, определяющее соответствующий показатель качества изготавливаемого изделия, то в другом аттракторе развивается (или не развивается) другое свойство. Так, жесткость технологического оборудования (опоры шпинделя) j (рис. 7.3), представляющая собой отношение силы P к соответствующему упругому перемещению элемента оборудования, например шпинделя станка, зависит от количества n подшипников в опоре. С увеличением количества подшипников жесткость шпиндельного узла увеличивается, но затем система перестает реагировать на увеличение числа подшипников и жесткость узла уже

не изменяется. Здесь возникла бифуркация, система перестала зависеть от управляющей силы и стала самоорганизующейся. Заранее определить значение жесткости j_0 не представляется возможным. Это можно сделать для каждого конкретного случая экспериментальным путем [7, 117–119].

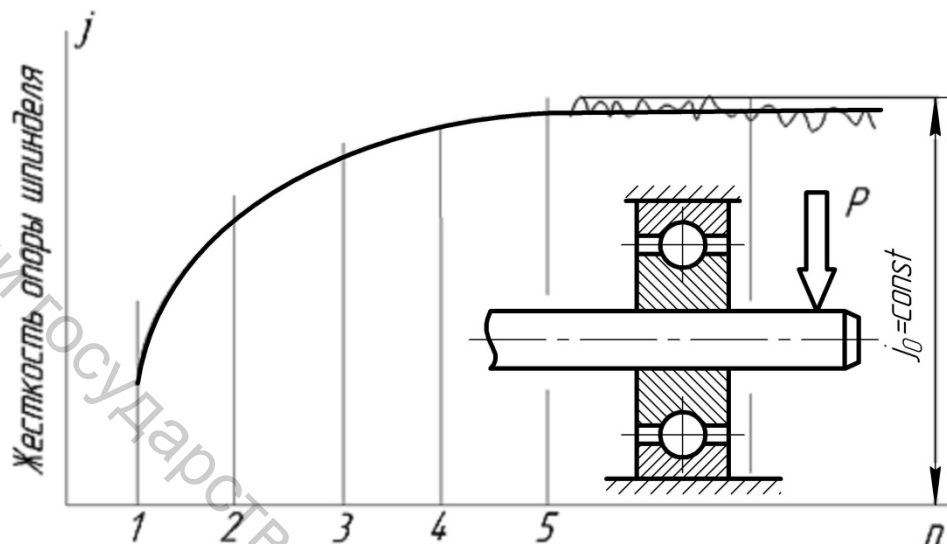


Рисунок 7.3 – График изменения жесткости шпиндельного узла с изменением количества подшипников в опоре

Термин «самоорганизующаяся система» не означает, что параметры ее функционирования стали более благоприятными для обеспечения качества изделия. Он означает отсутствие зависимости от организующей причины. Например, качественные параметры подшипников нивелируются, их наследственные свойства утрачиваются, а отдельные всплески в изменениях параметров флуктуации – сглаживаются.

Говоря о геометрической точности обрабатываемых заготовок, следует иметь в виду, что размер изделия формирует конечное положение режущего инструмента и траекторию его перемещения. В ряде случаев необходимо учитывать и другие параметры системы. Последнее в весьма сильной степени определяется силами трения подвижных частей в направляющих, жесткостью привода и пр. При изготовлении каждой единичной детали возникает своя, определенная картина трения, а при изготовлении другой детали – новая картина трения. Процесс достижения точности происходит при реализации наследственных связей.

Принципы синергетики могут позволить *постановку барьера* на пути возникновения неопределенности с колебанием сил трения. Если на суппорте металлорежущего станка установить элементарный вибратор в виде малого электродвигателя с неуравновешенным грузом и сравнить упругие отжатия до и во время работы вибратора, то упругое отжатие в последнем случае возрастет примерно на 25 %.

Бифуркация в виде налагаемых колебаний создает новую технологическую систему. В отношении сил трения такая система является самоорганизующейся и непредсказуемой, так как нельзя заранее сказать, как в данном случае скомпонуются контактирующие микровыступы подвижной и неподвижной частей системы и соединений передаточного механизма. Эту ситуацию в аттракторе жесткости (точности) следует рассматривать как барьер или мероприятие для повышения точности. Более точно: барьер ставится на пути колебаний жесткости за счет переменной силы трения.

Фактор случайности в проблеме функционирования самоорганизующихся технологических систем играет исключительно важную роль. Их диссипативность уже предполагает случайность, которая выступает как общая характеристика функционирования сложной технологической системы, хотя в каждый момент времени поведение системы определяется действием законов физики и химии.

Проявление случайности отчетливо видно на примере исследования траекторий перемещения центра шпинделя, вращающегося в газовых опорах (подшипниках скольжения). Центр шпинделя (частота вращения более 150 000 об/мин) описывает траектории, указанные на рисунке 7.4, так, что они не повторяются. Траектория, соответствующая каждому обороту, случайна. Шпиндель работает как самоорганизующаяся система. Совокупность траекторий характеризуется средним размером D и полем «размытости» a , оцениваемыми микрометрами и их долями. Для такого хаотического движения, безусловно, имелась организующая причина – катастрофа (бифуркация), но в явном виде она не известна. В рассматриваемом случае не представляется возможным установить форму траекторий и, следовательно, форму изделия, удерживаемого шпинделем. Отклонения формы шеек шпинделя и отклонения формы отверстий газовых подшипников уже не наследуются изделием.

При работе металлорежущего оборудования с жесткими кинематическими связями, т.е. с механизмами, перемещающимися от кулачковых приводов, используют жесткие упоры. Так, например, суппорт перемещается в поперечном по отношению к оси заготовки направлении и производит фасонирование (работу фасонным режущим инструментом). Траектория перемещения суппорта и конечное положение инструмента определяются особенностями (состоянием) всех соединений передаточного механизма. Последние представляют собой сочетание рычагов, зубчатых механизмов и пр. Именно состояние всех соединений, а также режущего инструмента определяет геометрическую точность обработки.

При работе с жесткими упорами целевой механизм (например, суппорт, револьверная головка) в конце хода встречает упор. Происходит жесткое замыкание. Контакт суппорта и упора является бифуркацией. Все соединения передаточного механизма самоорганизуются поновому. Имеются зоны контактов сопрягаемых поверхностей, положе-

ния частей передаточных механизмов, напряжения в элементах конструкции. При неподвижном конечном положении суппорта передаточный механизм продолжает еще несколько деформироваться, естественно, без поломки. Положение суппорта стабилизируется. Контакт с жестким упором является бифуркацией, положение суппорта стабилизируется в аттракторе геометрической точности, а технологическим императивом является ограничение перемещения с помощью упоров [117–119].

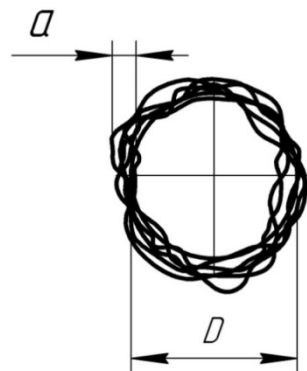


Рисунок 7.4 – Совокупность траекторий центра вала, вращающегося в газовых опорах

Из сказанного ясно, что введением жестких упоров может создаваться барьер против передачи наследственных свойств в виде погрешностей. Свои прежние траектории суппорты как бы «забывают». Однако фактор случайности при этом не исключается.

Рассмотрение технологической системы как самоорганизующейся достаточно полно иллюстрируется процессом выхаживания на шлифовальных станках. Его механизм состоит в том, что в конце периода шлифования, когда уже почти достигнуты заданный размер и форма изделия, рабочая подача инструмента выключается, но абразивный инструмент продолжает вращаться с прежней частотой. При этом шлифовальный станок продолжает работать, а процесс резания затухает. Здесь технологическую систему образно можно представить как постепенно распрямляющуюся пружину, с которой постепенно снимается нагрузка. В практике шлифования этот прием распространен достаточно широко. Ряд фирм выхаживают прецизионные детали в течение нескольких часов. Рассматриваемая система схематично показана на рисунке 7.5. Шлифовальный круг 2 (рис. 7.5 а) вместе со шпинделем 1, вращающимся в подшипниках скольжения, совершает хаотические движения по схеме рисунка 7.4, поскольку организующая причина в виде силы резания отсутствует. Возможные перемещения условно показаны змейками. Любое перемещение может представляться либо как изменение положения шпинделя в зазоре, либо в виде упругой деформации, либо как их сочетание. Опоры шпинделя установлены на салазках 3 (рис. 7.5 б), ко-

торые, в свою очередь, также перемещаются хаотично (поперечная подача отсутствует). Возможные перемещения также показаны змейками.

Контакты шлифовального круга с изделием 4, вращающимся с круговой подачей $D_{скр}$ (рис. 7.5 в), также имеют хаотический характер, поскольку в каждый момент времени ситуация меняется. Само изделие 4 в своих опорах (центр – центровое отверстие) не совершает равномерного вращательного движения. Опоры изделия закреплены на столе 5 (рис. 7.5 г), производящем без нагрузки возвратно-поступательные движения с продольной подачей $D_{стп}$. Кроме этих движений стол 5 дополнительно совершает хаотические движения. Величины хаотических перемещений весьма малы, а законы движения непредсказуемы [7, 117–119].

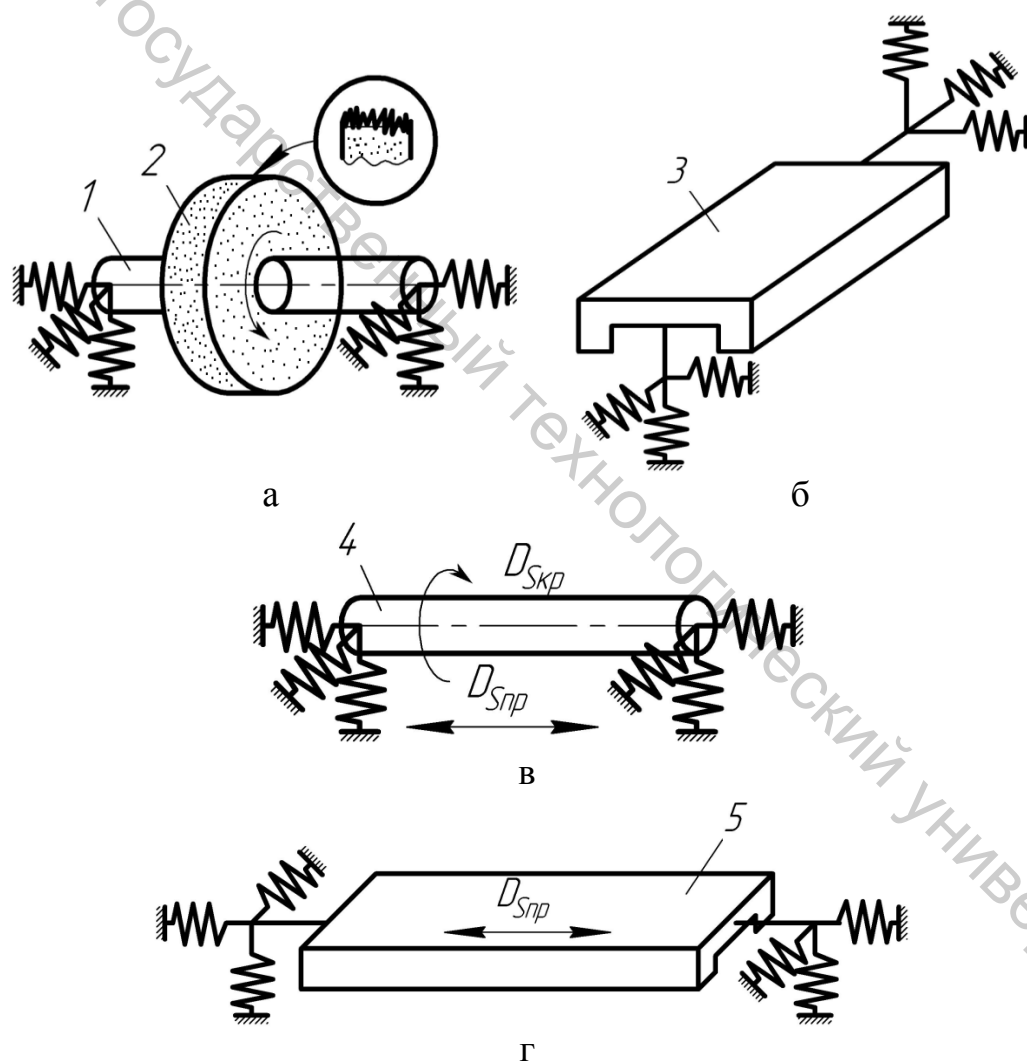


Рисунок 7.5 – Схема поведения элементов технологической системы в различных аттракторах

Описанную картину дополняет взаимодействие круга и изделия. В любой момент времени меняется количество абразивных зерен, находя-

щихся в контакте с деталью. Часть затупившихся зерен автоматически удаляется возросшими силами взаимодействия, и в следующий момент времени в контакт вступают новые зерна (см. рис. 7.5 а). Такое взаимодействие усугубляет общую картину хаотического движения всех элементов сложной технологической системы. Каждый элемент, показанный на рисунке 7.5, развивается в своем аттракторе вне зависимости от того, как развивается и функционирует другой элемент системы.

Рассмотренная технологическая система в виде круглошлифовального станка при отсутствии причины, организующей движение, т.е. при отсутствии силы резания, представляет собой самоорганизующуюся или самонастраивающуюся систему, поведение которой предсказать в целом невозможно. Однако если данная система является самоорганизующейся, она согласно принципам синергетики не наследует свое прошлое, т.е. предысторию изготовления изделия. Этот вывод является принципиальным, поскольку создание самоорганизующихся систем представляет собой барьер для передачи свойств изделий от одной технологической операции к другой. Поэтому можно утверждать, что на практике представляется возможным ставить препятствия на пути передачи не всех, а вредных свойств, снижающих качество изделия.

Результаты функционирования самоорганизующейся системы даны на рисунке 7.6. В процессе шлифования должен постоянно улучшаться параметр качества изготавливаемого изделия, например, отклонение C от цилиндричности. Значение этого параметра в конце периода шлифования стабилизируется и достигает значения $C_{шт}$. Уменьшение этого значения не представляется возможным, так как система уже не отрабатывает управляющие команды. Аналогично снижается и показатель шероховатости Ra , достигая значения $R_{a_{шт}}$. В процессе выхаживания отклонение от цилиндричности еще более снижается, доходя до значения C_6 . Однако величину C_6 можно установить лишь экспериментальным путем – это результат функционирования самоорганизующейся системы (данного станка, инструмента, заготовки). Шероховатость в процессе выхаживания может также снижаться, доходя до значения R_{a_6} [7, 117–119].

Особый научный интерес представляет поведение технологических самоорганизующихся систем в *постбифуркационный период*. Эти системы необходимо рассматривать как динамические, т.е. развивающиеся во времени. Бифуркация не является катастрофой, возникающей мгновенно. Она, как показал Л. Эйлер, развивается во времени, которое может оказаться достаточно большим. Катастрофический износ лезвийного режущего инструмента может быть уподоблен катастрофе в прямом смысле слова. Износ же сопряжений технологической системы происходит за неизмеримо большее время. И этот износ, и его последствия также рассматриваются как бифуркация. Бифуркации проявляются в своих, определенных аттракторах.

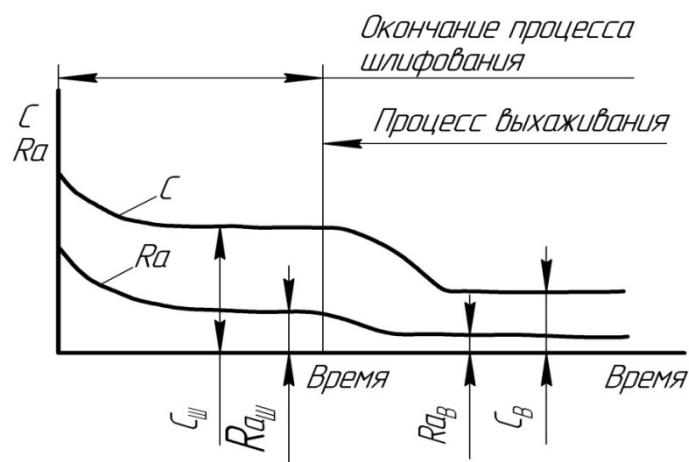


Рисунок 7.6 – Графики изменения отклонений от круглости и изменений шероховатости поверхности вала в процессе шлифования и выхаживания

Важна и относительность понятия *времени бифуркации*. Многое зависит от условий решения технологических задач. На рисунке 7.7 представлена осциллограмма изменения температуры микрзоны обрабатываемого материала в результате воздействия на него единичного абразивного зерна. Температура θ нарастает во времени. Возможность использования при этом термина «тепловой удар» и суждение о малости времени воздействия зерна (всего 0,02 с) определяются конкретными условиями решения проблемы. Более того, вопрос о том, является ли бифуркацией воздействие зерна на материал, также зависит от постановки задачи.

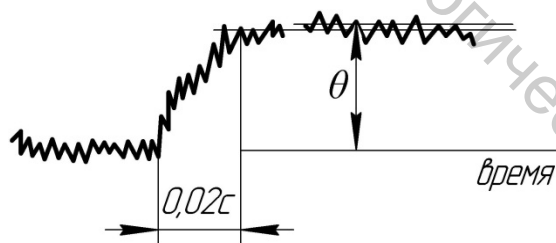


Рисунок 7.7 – Осциллограмма изменения температуры среды при тепловом ударе абразивного зерна

Бифуркация возникает не только при исчезновении организующей причины, например силы, но также при *изменении этой причины*, изменении значения силы. Это обстоятельство особенно важно при построении технологических процессов изготовления качественных изделий. Возводя барьеры на пути передачи неблагоприятных для качества изделия свойств, необходимо управлять средой, которая в положительном смысле слова приведет к бифуркации.

В связи с рассмотрением поведения самоорганизующихся систем в постбифуркационный период возникает *вопрос об их устойчивости*. Всякая система может находиться в квазиустойчивом состоянии вне зависимости от того, какая – внешняя или внутренняя – нагрузка на нее действует. Забыв свою предысторию, технологическая система как динамическая может перейти из одного состояния в другое с помощью очередной бифуркации. При этом скорее всего технологическая система окажется в определенных границах неустойчивой. Эту ситуацию специалисты синергетики описывают образно, утверждая, что никто не видел карандаша, стоящего на острие. Прогнозируя появление барьеров технологического наследования, необходимо предполагать, что самоорганизующаяся технологическая система может переходить из одного состояния в другое, и в то время, когда развитие в одном аттракторе не будет устойчивым, в другом будет наблюдаться устойчивое развитие.

Анализируя состояние устойчивости в технологических системах, необходимо заметить, что устойчивость (упорядоченность) движения проявляется в крупных масштабах, а случайность – в малых масштабах, на уровне флуктуаций. Если перемещается суппорт металлорежущего станка, то, образно говоря, он имеет «цель развития», т.е. наблюдается его упорядоченное движение, но в каждый момент времени можно констатировать и случайные контакты микровыступов суппорта и направляющих, контакты определенных зон, связанных с отклонениями формы направляющих и пр. Так проявляется антагонистическое взаимодействие упорядоченности (устойчивости) и случайности.

7.5 Нелинейность при самоорганизации технологических систем

Возникает потребность в математическом описании поведения самоорганизующихся систем. В этой проблеме синергетика опирается на понятие нелинейности. Коэффициенты уравнений, зависящие от свойств среды (в нашем случае в первую очередь наследственных), оказываются превосходящими единицу. Такой подход опирается на то, что нелинейные уравнения могут иметь множество решений, что соответствует множеству путей развития самоорганизующейся системы. Собственно нелинейность может быть положена в основу понимания явлений, происходящих в сложных технологических системах (средах). Действительно, нелинейная технологическая система не реагирует на внешнее воздействие, как это наблюдается в линейных системах. Реакция технологической системы может быть неадекватной воздействиям на нее. Она может превосходить или не превосходить ожидаемый эффект. Именно

это является весьма ценным для технологии машиностроения [7, 117–119].

Линейность (рис. 7.8 а) широко используется при разработке технологических процессов и часто лежит в основе нормативной базы для решения проблем точности размеров и формы изделий. Упругое перемещение y линейно зависит от времени t из-за изменения силы, где C – константа, т.е. скорость изменения перемещения y постоянна.

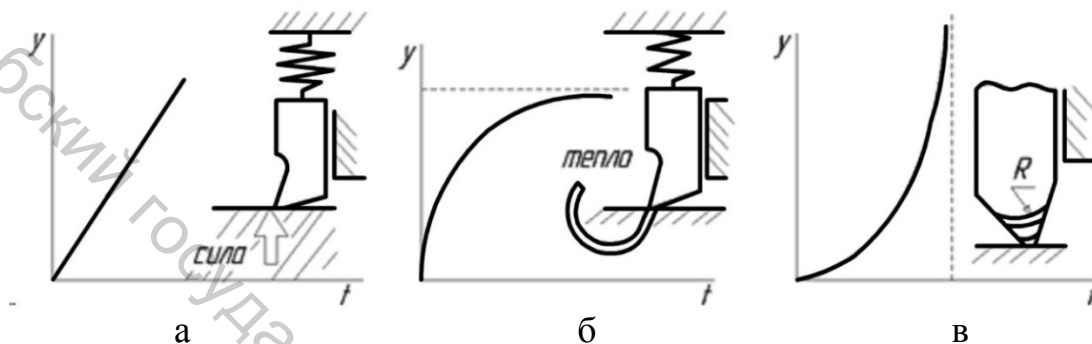


Рисунок 7.8 – Графики законов развития технологических систем

Экспоненциальный закон (рис. 7.8 б) очень четко отражает нелинейность. Упругое перемещение инструмента y сначала растет интенсивно, а затем этот рост замедляется, поскольку наступает тепловое равновесие. Возникает самоорганизующаяся система, и прогнозировать расположение асимптоты не представляется возможным. Тогда

$$\frac{dy}{dt} = ky,$$

где k – некоторый коэффициент.

Скорость изменения функции y в каждый момент времени пропорциональна значению функции. В этом случае говорят, что скорость имеет линейную зависимость.

Для системы, описываемой гиперболическим законом (рис. 7.8 в), также нельзя представить прогноз развития. При определенных условиях процесс имеет взрывной характер. Примерами могут служить затупление режущего инструмента и нарастание значений радиуса R режущей кромки. Такой износ в конце периода стойкости инструмента называют катастрофическим. Аналогичный эффект наблюдается при развитии трещин на нагруженных деталях. В этом случае

$$\frac{dy}{dt} = \frac{y^2}{M},$$

где M – значение параметра системы.

Приведенные на рисунке 7.8 графики служат лишь иллюстрацией саморазвивающихся систем, а математический аппарат для технологических систем, которые, безусловно, являются весьма сложными (станок – изделие – инструмент – приспособление), еще только начинает разрабатываться.

Синергетика позволяет разрабатывать правила, по которым функционируют самоорганизующиеся системы, и, несмотря на указанную выше непредсказуемость поведения систем, можно определить тип поведения системы и тенденции ее развития. В целом же использование синергетических эффектов в технологии машиностроения, безусловно, обеспечивает повышение показателей качества машиностроительной продукции.

7.6 Вопросы для самоконтроля

1. Что такое синергетика?
2. Сформулируйте вывод Л.Эйлера о динамических системах применительно к технологическим системам.
3. Дайте определение понятию «бифуркация».
4. Дайте определение понятию «аттрактор».
5. Приведите примеры бифуркаций в технологических системах.
6. Как ведут себя технологические системы в постбифуркационный период?
7. Дайте определение понятию «технологический императив».
8. Назовите технологические императивы прецизионной технологической системы.
9. Сформулируйте основной вывод из учения о функционировании и возникновении самоорганизующихся технологических систем.
10. Приведите примеры самоорганизации на этапе изготовления материала.
11. Что может являться бифуркацией, аттрактором и императивом при затвердевании при охлаждении из жидкого состояния алюминиевых сплавов?
12. Опишите бифуркацию, аттрактор и императив при создании композиционных материалов.
13. Приведите примеры самоорганизации при изготовлении заготовок методами литья.
14. Что может являться бифуркацией, аттрактором и императивом при изготовлении заготовок методами литья?
15. Приведите примеры самоорганизации при изготовлении заготовок методом давления.

16. Что может являться бифуркацией, аттрактором и императивом при изготовлении заготовок методом давления?

17. Приведите примеры самоорганизации при изготовлении заготовок из порошков.

18. В чем заключается особенность самоорганизации технологических систем при механической обработке и сборке?

19. Приведите примеры самоорганизации в технологической системе металлорежущего станка.

20. Приведите пример развития параметров технологических систем.

21. Какую роль в проблеме функционирования самоорганизующихся технологических систем играет фактор случайности?

22. Что может являться бифуркацией, аттрактором и императивом при работе целевого механизма (суппорт, револьверная головка) с жесткими упорами?

23. Изобразите график упругого перемещения суппорта в ходе развития технологической системы.

24. Приведите пример проявления случайности при исследовании траекторий перемещения центра шпинделя.

25. Как принципы синергетики могут позволить постановку барьера на пути возникновения неопределенности с колебанием сил трения?

26. Рассмотрите процесс выхаживания на шлифовальных станках через призму самоорганизующихся систем.

27. В чем заключается относительность понятия времени бифуркации?

28. Приведите пример относительности времени бифуркации.

29. Как проявляется устойчивость и случайность движения в технологических системах?

30. Изобразите графики законов развития технологических систем.

8 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

8.1 Основные понятия

Для сравнения вариантов технологического процесса (или его элементов) между собой по степени предпочтительности следует использовать понятие *эффективность* – нормированный к затратам ресурсов результат деятельности технической системы на определенном интервале времени. Результат деятельности в данном случае заключается в изготовлении конкретных машин (их деталей) в заданном количестве, в соответствии с требуемым уровнем качества и с определенными затратами ресурсов [1–5, 98–101].

Различают два класса показателей (критериев) эффективности: *технические и экономические*, которые могут быть *абсолютными и относительными*. В курсе «Технология машиностроения» будем рассматривать только технические критерии, оценивающие производительность, и экономические, оценивающие сумму приведенных затрат.

Производительность характеризует объем производства, выполненный за единицу времени. Она относится либо к переходу (элементарному инструментальному или блочному), либо к операции. Определяющее влияние на производительность перехода $Q_{прх}$ оказывает производительность формообразования или, другими словами, *технологическая производительность* Q_T , которая характеризует скорость генерирования (образования) обрабатываемой поверхности:

$$Q_T = F / t_o \text{ (см}^2 \text{ / мин),}$$

где F – площадь (или проекция площади на плоскость или цилиндр) обработанной на данном переходе поверхности.

На выполнение перехода затрачивается основное время t_o , время на вспомогательные перемещения $t_{в.н}$, время на манипуляции, связанные с переходом $t_{прх}$ и иногда время на индивидуальную размерную настройку $t_{п.н}$. Тогда

$$Q_{прх} = 1 / (t_o + t_{в.н} + t_{прх} + t_{п.н}) \text{ (мин}^{-1}\text{)}.$$

Если обозначить время потерь на переходе $t_{н.н} = t_{в.н} + t_{прх} + t_{п.н}$, то:

$$Q_{\text{нрх}} = Q_T / (F + Q_T \cdot t_{\text{н.н}}). \quad (8.1)$$

Производительность однопереходной операции определяется формулой:

$$Q_{\text{одн}} = 1 / (t_o + t_{\text{с1}} + t_{\text{с2}}),$$

где $t_{\text{с1}}$ – вспомогательное время, зависящее от режима резания; $t_{\text{с2}}$ – вспомогательное время, не зависящее от режима резания.

Если учесть значение количества заготовок $N_{\text{нс}}$, обработанных за период стойкости T $N_{\text{нс}} = T / t_o$, то получим:

$$Q_{\text{одн}} = Q_T / (F \cdot (1 + (t_{\text{с.и}} + t_{\text{р.н}}) / T) + Q \cdot t_{\text{с2}}), \quad (8.2)$$

где $t_{\text{с.и}}$ – время смены инструмента, $t_{\text{р.н}}$ – время размерной настройки.

При увеличении интенсивности формообразования согласно (8.1) производительность перехода возрастает, но не может стать большей, чем $t_{\text{н.н}}^{-1}$. Если подставить в (8.2) зависимость стойкости от Q_T :

$$T = (C / Q_T)^\mu,$$

где C и μ – параметры эмпирической модели, то анализ выражения (8.2) показывает, что зависимость $Q_{\text{одн}}$ от Q_T имеет максимум (рис. 8.1) при оптимальной технологической производительности $Q_{T.\text{опт}}$:

$$Q_{T.\text{опт}} = C / ((\mu - 1) \cdot (t_{\text{с.и}} + t_{\text{р.н}}))^m,$$

где $m = 1 / \mu$.

Относительным техническим критерием будет *индекс производительности* $I_{\text{нр}}$, который представляет собой отношение производительности Q_a альтернативного процесса формообразования (перехода или операции) к производительности Q_b базового, т.е.:

$$I_{\text{нр}} = Q_a / Q_b.$$

Технологическая производительность метода формообразования зависит от режимов резания. Так, при однопроходном точении и растачивании цилиндрической поверхности, при сверлении, зенкеровании и развертывании:

$$Q_T = 1000 \cdot V \cdot S \cdot L / L_{p.x} \text{ мм}^2/\text{мин},$$

где V – скорость резания; S – подача; L – длина обработанной поверхности; $L_{p.x}$ – длина рабочего хода.

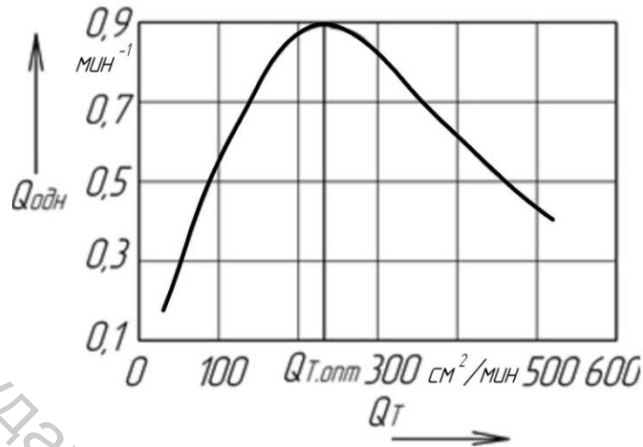


Рисунок 8.1 – Зависимость производительности операции $Q_{оп}$ от технологической производительности Q_T

А при однопроходном фрезеровании плоскости:

$$Q_T = 1000 \cdot L \cdot B \cdot v \cdot S_z / (t' \cdot L_{p.x});$$

где B – ширина заготовки, t' – шаг зубьев фрезы, S_z – подача на один зуб фрезы. Длина рабочего хода больше длины обработанной поверхности на величину врезания $L_{вр}$ и перебега $L_{пб}$ (рис. 8.2).

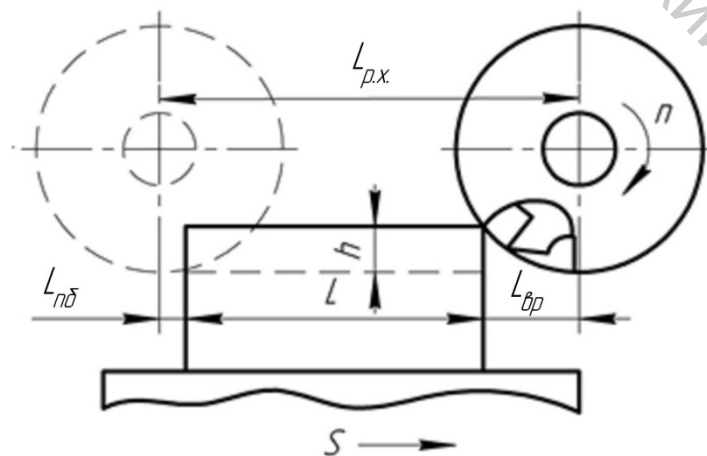


Рисунок 8.2 – Соотношение длин обработки L и рабочего хода $L_{p.x}$ при фрезеровании паз глубиной h

В условиях серийного производства удобно пользоваться в качестве экономического критерия эффективности *приведенными затратами ПЗ* на выполнение операции (или перехода).

$$ПЗ = E \cdot t_{\text{ук}} + Z_u / N_{n.c} \text{ (р/шт.)}, \quad (8.3)$$

где E – затраты на одну минуту эксплуатации рабочего места; Z_u – затраты на эксплуатацию инструмента (группы инструментов) за период его стойкости; $N_{n.c}$ – количество заготовок, обработанных за период стойкости.

Относительным экономическим критерием будет *индекс эффективности*, который представляет собой отношение затрат на реализацию базового (Z_b) и альтернативного (Z_a) переходов (или операций).

$$И_{\text{эф}} = Z_b / Z_a$$

На этапе проектирования *эффективность технологического процесса обеспечивается его оптимизацией*, под которой понимается комплекс решений, обеспечивающих минимальное значение экономического критерия и вместе с тем соблюдение системы ограничений. Система ограничений отражает требования к качеству продукции, технологическим возможностям оборудования, приспособления и инструмента, организационно-техническим возможностям данного производства и производительности, диктуемой планом.

Задача оптимизации может быть разделена на два уровня:

- *параметрическая оптимизация* – выбор (расчет) оптимальных технологических параметров для конкретного варианта технологического процесса обработки заготовки, обеспечивающих минимум (или максимум) критерия оптимальности (эффективности) и одновременно удовлетворяющих всем ограничениям;

- *вариантная оптимизация* – выбор оптимального варианта технологического процесса обработки детали. Варианты технологических процессов отличаются маршрутом, временной структурой операций, набором переходов, оборудованием, оснасткой и т.д.

Параметрическая оптимизация является основой вариантной, так как последняя позволяет выявить оптимальный вариант технологического процесса только в том случае, когда для каждого из сравниваемых вариантов предварительно определены оптимальные технологические параметры. Любой технологический процесс можно характеризовать тремя группами параметров:

- *искомые параметры X* , которые обеспечивают наибольшую эффективность процесса по выбранному критерию в рамках конкретного

варианта (элементы режима резания, межпереходные припуски и допуски, точность размерной настройки и т.д.);

– *фазовые параметры* Y , которые являются функцией искомым (например, сила резания, мощность, интенсивность изнашивания инструмента, параметр шероховатости поверхности и др.);

– *исходные параметры* C , неизменные при данном варианте технологического процесса (жесткость технологической системы, свойства обрабатываемого материала заготовки, свойства материала инструмента, форма и размеры обрабатываемой детали и т.д.).

Зависимость критерия оптимальности K_{opt} от исходных, искомым и фазовых параметров называется *функцией цели*:

$$K_{opt} = f_y(Z, X, Y).$$

Чтобы использовать это уравнение для оптимизации, необходимо знать зависимость Y от C и X , то есть математические модели процесса $Y = f(Z, X)$.

Все ограничения необходимо представить в виде неравенств, каждое из которых определяет допускаемые пределы варьирования соответствующего фазового или искомого параметра, который в общем случае зависит от других фазовых параметров, а также от искомым и исходных.

8.2 Функции, цели и модели ограничений параметрической оптимизации

При параметрической оптимизации решается обычно одна из следующих технико-экономических задач выбора параметров режима резания, обеспечивающих [1–5, 98–101]:

- минимум затрат (денег), связанных с процессом обработки;
- максимум производительности;
- минимум затрат при заданной производительности.

Первая, наиболее общая задача, характерна для условий обработки на универсальных станках в серийном производстве; вторая – для лимитирующих позиций станочных систем; третья – для условий обработки на станках и автоматических линиях массового производства.

В основе решения всех описанных оптимизационных задач лежит модель процесса резания, которая отражает зависимость стойкости режущего инструмента T от параметров режима обработки. Наиболее часто применяемой является эмпирическая модель со следующей структурой:

$$T^m = 318 \cdot C_v \cdot K_v \cdot D^{q-1} / (n \cdot a^x \cdot S^y \cdot z^u \cdot B^r), \quad (8.4)$$

где C_v – эмпирический параметр, постоянный для группы обрабатываемых материалов; K_v – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и инструмента, а также других условий резания; D – диаметр (инструмента или заготовки); n – частота вращения (инструмента или заготовки); a – глубина резания; S – подача (на один зуб инструмента; либо на один оборот); z – число зубьев инструмента; B – ширина заготовки; m, x, y, u, r , и q – эмпирические параметры (показатели степени), зависящие от вида обработки, свойств инструмента и условий резания.

Значения, которые приобретают параметры a, q, x, y, u, r при различных методах обработки, приведены в таблице 8.1. Следовательно, для переходов точения модель (8.4) принимает вид:

$$T^m = C_v \cdot K_v \cdot l(V \cdot a^x \cdot s^y), \quad (8.5)$$

где V – скорость резания.

Таблица 8.1 – Изменение параметров модели стойкости

Способ обработки	a	x	y	q	u	r
Фрезерование	a	x	y	q	u	r
Поперечное точение	1	0	y	0	0	0
Продольное точение	a	x	y	0	0	0
Сверление	1	0	y	q	0	0
Рассверливание, зенкерование и развертывание	a	x	y	q	0	0
Строгание	a	x	y	0	0	0

В логарифмической системе координат модель (8.5) линейна. Однако, как показали многочисленные эксперименты, при расширении диапазона значений скорости резания наблюдаются существенные отклонения от линейности (рис. 8.3). В таких случаях предлагается модель вида:

$$T = A / (V^\mu + A / T_{пред}), \quad (8.6)$$

где $A = (C_v \cdot K_v / (a^x \cdot S^y))^\mu$; $\mu = 1/m$; $T_{пред}$ – предельная стойкость инструмента (при очень малых скоростях резания); m – эмпирический параметр.

Как следует из графиков, показанных на рисунках 8.3 и 8.4, модель (8.6) в области относительно небольших скоростей резания (25...75 м/мин) лучше отражает результаты эксперимента, чем модель (8.5).

При необходимости обеспечить минимум затрат в качестве функции цели принимается выражение (8.3). Из функции цели можно исключить $t_{пз}, t_{об}, t_{от}, t_{с2}$, так как эти составляющие $t_{шк}$ не зависят от параметров режима резания. Зависимость t_o от параметров режима резания определяется временной структурой операции.

Модели ограничений, связанных с требованиями к качеству обработанной лезвийным инструментом поверхности, имеют вид:

$$Ra \geq K_R \cdot S^{k1} / v^{k2},$$

где Ra – заданное значение показателя шероховатости; $K_R, k1$ и $k2$ – экспериментальные параметры модели, зависящие от вида обработки и обрабатываемого материала. Их значения, согласно справочникам, изменяются в широком диапазоне. Знак параметра $k2$ зависит от области скоростей резания, которая используется данным методом обработки.

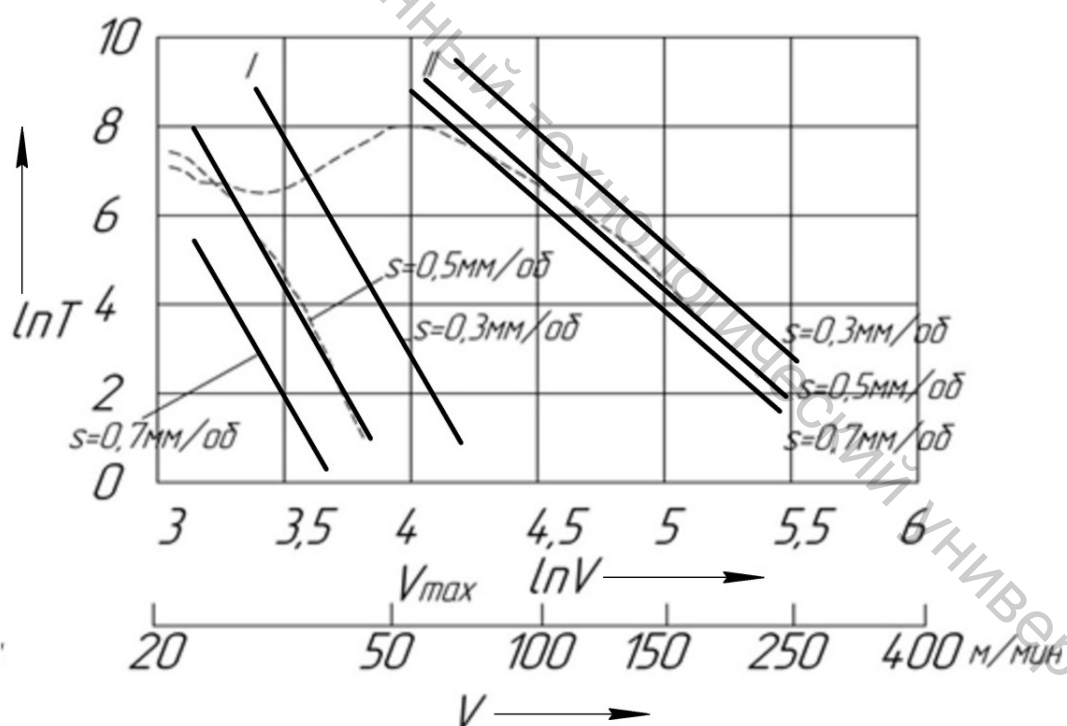


Рисунок 8.3 – Зависимость стойкости T инструмента от скорости резания V и подачи s при точении (--- согласно экспериментам, ----- согласно модели (8.5); резцами из быстрорежущей стали (I); твердого сплава (II))

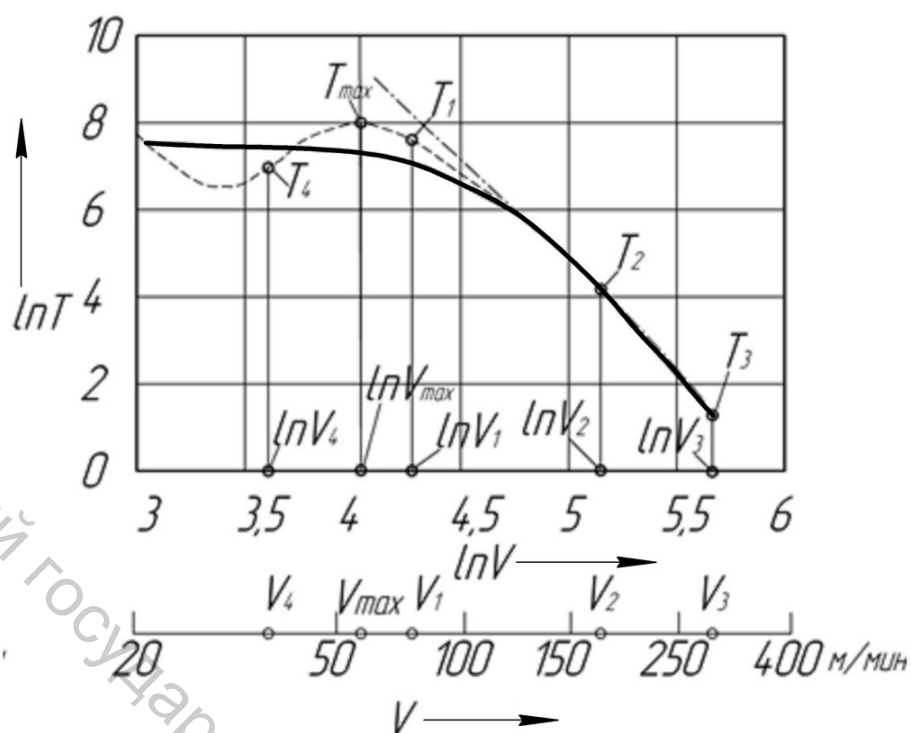


Рисунок 8.4 – Зависимость стойкости инструмента от скорости резания при точении (- - - согласно экспериментам; ----- согласно модели (8.6); - . - . – согласно модели (8.5))

При шлифовании с продольной подачей S_{np} в качестве модели ограничения по Ra можно пользоваться выражением:

$$Ra \geq K_R \cdot S_{prod}^{k3} \cdot S_{rad}^{k4} \cdot N_z^{k5} / (V_3^{k6} \cdot i^{k7}), \quad (8.7)$$

где S_{prod} измеряется в долях ширины круга; S_{rad} – радиальная подача на двойной ход; N_z – параметр зернистости круга; V_3 – скорость шлифуемой заготовки; i – число проходов выхаживания; $k3...k7$ – эмпирически определенные параметры модели. Значения параметров модели (8.7) приведены в справочной литературе в зависимости от вида шлифования (круглое, внутреннее, плоское).

Ограничениями режимов резания по требуемой точности являются упругие деформации элементов технологической системы под действием сил резания. Они становятся особенно значимыми при относительно малой жесткости элементов технологической системы (заготовки, инструмента), при существенной зависимости жесткости от координат точки обработки, при переменности силы резания, присущей данному методу формообразования или обусловленной переменностью припуска. В общем случае модель ограничения по упругой деформации имеет вид:

$$\Delta_{don} \geq P_y / j,$$

где Δ_{don} – допустимая упругая деформация по оси y ; P_y – составляющая силы резания, направленная по оси y ; j – жесткость технологической системы.

Составляющая силы резания P_y определяется известной из теории резания математической моделью (для точения и растачивания):

$$P_y = C_{P_y} \cdot a^{x_2} S^{y_2} V^{w_2}.$$

Технологические возможности оборудования ограничивают нижний и верхний уровни значений подачи s и частоты вращения n . Кроме того, на большинстве станков n и s могут принимать только определенный набор дискретных значений.

При предварительной обработке режимы резания могут ограничиваться эффективной мощностью привода, прочностью механизмов станка, прочностью инструмента (пластины твердого сплава), а также надежностью закрепления заготовки в приспособлении. Соответствующие модели приведены в справочной литературе. При обработке относительно крупных поверхностей необходимо, чтобы период стойкости инструмента T был больше основного времени t_o .

Каждое из технических ограничений выделяет на плоскости координат $V(n) - S(S_z)$ область допустимых значений параметров режима резания (рис. 8.5).

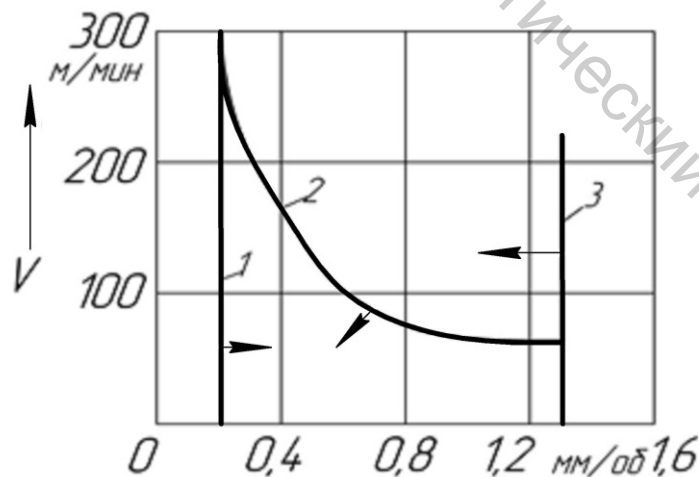


Рисунок 8.5 – Области допустимых значений V и S при точении, ограниченных характеристиками станка:

1, 3 – по коробке подач; 2 – по мощности привода главного движения

Совокупность технических ограничений образует на плоскости $V(n) - S(S_z)$ замкнутую область, любая точка внутри которой характеризует допустимое сочетание скорости и подачи. В логарифмической системе координат все ограничения принимают форму отрезков прямых (рис. 8.6).

На этом рисунке: 1 и 8 – ограничения по минимальным значениям s и n ; линии 2 и 5 – по максимальным; линия 3 – ограничение по жесткости заготовки; линия 4 – ограничение по мощности; линии 6 и 7 – ограничения по прочности и жесткости режущего инструмента. В данном случае ограничения линиями 1, 2, 4, 7 и 8 являются «активными», а линии 3, 5 и 6 – можно назвать «пассивными», так как они не оказывают влияния на допустимые значения подачи и скорости резания.

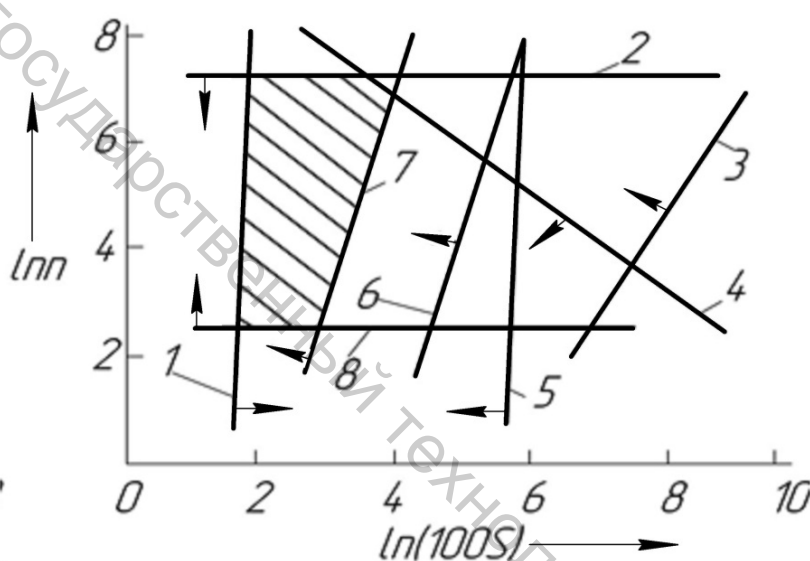


Рисунок 8.6 – Область допустимых при точении значений n и s (заштрихована) в логарифмической системе координат

Форма области допустимых техническими ограничениями значений оптимизируемых параметров режима резания зависит от вида и конкретных условий обработки.

8.3 Оптимизация показателей режимов резания для элементарного и инструментального перехода

В качестве критерия оптимизации приняты приведенные затраты на выполнение перехода (модель 8.3). Подставляя в функцию цели (модель 8.3) значения ее элементов и учитывая известную зависимость $N_{nc} = T / t_o$, получим:

$$ПЗ = E \cdot (t_o + t_o \cdot t_u / T), \quad (8.8)$$

$$\text{где } t_u = t_{c.u} + t_{p.n} + 3_u / E. \quad (8.9)$$

Значения основного времени t_o определяются по известным формулам

$$t_o = A / V, \quad (8.10)$$

где для продольного точения, сверления, рассверливания и зенкерования

$$A = \pi \cdot d \cdot L_{p.x} / (1000 \cdot S), \quad (8.11)$$

где d – диаметр заготовки при точении или диаметр инструмента в других случаях; а для фрезерования

$$A = \pi \cdot D \cdot L_{p.x} / (1000 \cdot S_z \cdot z), \quad (8.12)$$

где D – диаметр фрезы, S_z – подача на зуб, z – число зубьев фрезы.

Значение стойкости инструмента T определяется по известным эмпирическим формулам.

$$T = B^\mu / V^\mu, \quad \mu = 1/m, \quad (8.13)$$

где формулы для определения значения B имеют вид:

$$\text{для точения } B = C_V / (a^x \cdot S^y), \quad (8.14)$$

$$\text{для сверления } B = C_V \cdot d^q / (a^x \cdot S^y), \quad (8.15)$$

$$\text{для рассверливания и зенкерования } B = C_V \cdot d^{q-1} / (a^x \cdot S^y), \quad (8.16)$$

$$\text{для фрезерования } B = C_V \cdot D^{q-1} / (a^x \cdot S_z^y \cdot z^p \cdot B_{3z}^u). \quad (8.17)$$

Значения параметров моделей (8.13...8.17) для конкретных видов обработки определяются из справочников.

Подставив в модель (8.8) значение t_o из (8.10) и значение T из (8.13), получим

$$ПЗ = E \cdot A \cdot (1/V + V^{\mu-1} / B^\mu), \quad (8.18)$$

где $E = E_{on} + E_{cm}$; E_{on} – минутная зарплата рабочего; E_{cm} – минутные затраты, компенсирующие амортизацию станка, и капитальные затраты.

Оптимальное по экономическому критерию значение скорости резания $V_{эк}$ можно найти, приравняв нулю производную от $ПЗ$ по V . Тогда, согласно (8.18), получаем:

$$\frac{dПЗ}{dV} = E \cdot A \cdot \left(-\frac{1}{V^2} + t_u \cdot (\mu - 1) \cdot \frac{V^{\mu-2}}{B^\mu} \right) = 0. \quad (8.19)$$

Откуда

$$V_{эк} = B / [(\mu - 1) \cdot t_u]^m. \quad (8.20)$$

Выражение в квадратных скобках имеет размерность времени. Поэтому можно считать, что оно представляет собой оптимальную экономическую стойкость $T_{эк}$. То есть с учетом (8.9):

$$(\mu - 1) \cdot (t_{c.u} + t_{p.n} + Z_u / E) = T_{эк}. \quad (8.21)$$

Следовательно:

$$V_{эк} = B / T_{эк}^m. \quad (8.22)$$

Где значение B , которое зависит от вида обработки и показателей режима резания, определяется из моделей (8.14 ... 8.17).

Если физическая стойкость T зависит от показателей режима резания, то экономическая стойкость $T_{эк}$ назначается в зависимости от технических и экономических показателей условий обработки.

Если пренебречь затратами Z_u на эксплуатацию режущего инструмента за период его стойкости, то выражение (8.21) дает значение стойкости, оптимальной по критерию максимальной производительности (T_{np}). То есть

$$T_{np} = (\mu - 1) \cdot (t_{c.u} + t_{p.n})$$

и

$$V_{np} = B / T_{np}^m. \quad (8.23)$$

Так как $V_{эк}$ и V_{np} зависят от значений показателей режима резания (глубины резания a и подачи S), то возникает задача их оптимиза-

ции. При предварительной обработке эффективность перехода обусловлена объемной производительностью формообразования, т.е. скоростью Q удаления припуска. При точении $Q = a \cdot S \cdot V$. Если подставить значение $V = V_{\text{эк}}$, согласно (8.20), B , согласно (8.14), то получим:

$$Q = (C_v \cdot / T_g^m) \cdot a^{1-x} \cdot S^{1-y} \quad (8.24)$$

При любых видах точения с продольной подачей и прямым срезом ($a > S$) а ($x < y < 1$). Следовательно, согласно (8.24), увеличение глубины резания a и подачи s за счет соответствующего (8.20) уменьшения скорости резания повышает эффективность обработки. Поскольку $x < y$, то увеличение глубины резания за счет пропорционального уменьшения s тоже повышает эффективность. Следовательно, при определении оптимальных параметров режима точения необходимо сначала из технических ограничений определить глубину резания, затем из соответствующих ограничений (не зависящих от скорости резания) – подачу. И, наконец, из (8.14) и (8.23) определить оптимальную скорость резания.

Ограничением для глубины резания является припуск, который желательно удалить за один проход. При предварительной обработке ограничением для подачи является сила резания, допустимая либо прочностью режущей пластины, либо прочностью механизмов станка, либо упругой деформацией технологической системы. Но сила резания зависит от скорости резания, которая на этом этапе еще неизвестна. В таких случаях из выражения (8.14) подача исключается за счет подстановки из соответствующих моделей ограничения.

Но обычно значение черновой подачи при точении определяется из соответствующих таблиц в зависимости от диаметра заготовки и принятой глубины резания.

При чистовом точении ограничениями для подачи является заданное значение показателя шероховатости Ra и радиус скругления вершины резца. Значение чистовой подачи также выбирается из соответствующих таблиц.

Аналогично при сверлении сначала в зависимости от диаметра сверла и жесткости технологической системы, глубины сверления и инструментального материала выбирается подача, а затем согласно моделям (8.15) и (8.23) вычисляется оптимальная скорость резания.

При рассверливании и зенкерования глубина резания выбирается равной припуску, подача – по соответствующим таблицам, а оптимальная скорость резания – по моделям (8.16) и (8.23).

При фрезеровании глубина резания выбирается равной припуску, подача S_z – по соответствующим таблицам в зависимости от вида фрезы, материала заготовки и инструмента, диаметра фрезы и глубины резания, а оптимальная скорость резания – по моделям (8.17) и (8.23).

8.4 Оптимизация показателей режима точения с переменной скоростью

Такая обработка довольно распространена и имеет место при подрезании торца и точении или конуса или ступенчатой поверхности [1–5, 98–101].

Процесс изнашивания резца при постоянной скорости резания V отражается известной моделью

$$h = C \cdot V^\beta \cdot t^\lambda, \quad (8.25)$$

где h – накопленный за время t износ по задней грани, C, β и λ – эмпирические параметры модели.

В случае торцового точения с постоянной подачей S и глубиной a при постоянной частоте вращения n скорость резания V изменяется согласно следующим моделям (в зависимости от направления подачи)

$$V = \frac{\pi \cdot d_2 \cdot n}{1000} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot S \cdot n}{d_2} \cdot t \right) \text{ или } V = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n}{1000} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot S \cdot n}{d_1} \cdot t \right), \quad (8.26)$$

где $d_1 = d_{\min}$, $d_2 = d_{\max}$, t – время.

За бесконечно малый промежуток времени dt этим изменением можно пренебречь. Тогда для произвольной скорости резания V , дифференцируя модель (8.25), получим мгновенную скорость изнашивания

$$\frac{dh}{dt} = \lambda \cdot C \cdot V^\beta \cdot t^{\lambda-1} \quad (8.27)$$

Подставив в эту модель значение t согласно модели (8.25) и значение V согласно моделям (8.26), получим (для точения к центру)

$$h^{\gamma-1} \cdot dh = \lambda \cdot W_1 \cdot (1 - B_1 \cdot t)^{\beta \cdot \gamma} \cdot dt, \quad (8.28)$$

$$\text{где } \gamma = 1/\lambda, \quad W_1 = C^\gamma \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_2 \cdot n}{1000} \right)^{\beta \cdot \gamma}, \quad B_1 = \frac{2 \cdot S \cdot n}{d_2}.$$

Проинтегрировав уравнения (8.28), получим

$$h^\gamma = \frac{W_1}{B_1 \cdot (\beta \cdot \gamma + 1)} \cdot \left[1 - (1 - B_1 \cdot t)^{(\beta \cdot \gamma + 1)} \right]. \quad (8.29)$$

Подставив значение t , равное основному времени обработки одной детали, $t_o = (d_2 - d_1) / (2 \cdot S \cdot n)$, получим накопленный за время обработки одной детали износ:

$$h_1^\gamma = \frac{\lambda \cdot C^\gamma}{\beta + \lambda} \cdot \frac{d_2}{2 \cdot S} \left(\frac{\pi \cdot d_2}{1000} \right)^{\beta \cdot \gamma} \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^{(\beta \cdot \gamma + 1)} \right] \cdot n^{(\beta \cdot \gamma - 1)} = K_1 \cdot n^{(\beta \cdot \gamma - 1)}. \quad (8.30)$$

Интегрируя уравнения (8.27) для i -й обработанной детали, получим

$$h_i^\gamma - h_{(i-1)}^\gamma = K_1 \cdot n^{(\beta \cdot \gamma - 1)}. \quad (8.31)$$

Предположим, что после обработки M деталей накопленный износ достигнет предельно допустимого значения h_{don} . Тогда, складывая для значений i от 0 до M правые и левые части уравнений (8.31), получим

$$h_{don}^\gamma = M \cdot K_1 \cdot n^{(\beta \cdot \gamma - 1)}. \quad (8.32)$$

Стойкость резца $T = M \cdot t_o$. Откуда $M = T / t_o$. Подставив это значение M в модель (8.32), получим

$$\frac{t_o}{T} = \frac{K_1}{h_{don}^\gamma} \cdot n^{(\beta \cdot \gamma - 1)}. \quad (8.33)$$

Информация о значениях параметров C и β очень ограничена. Чтобы можно было пользоваться традиционной справочной информацией, сравним модели для определения стойкости при постоянной скорости резания.

$$T = \left(\frac{h_{don}}{C} \right)^\gamma \cdot \frac{1}{V^{\beta \cdot \gamma}} \quad \text{и} \quad T = \left(\frac{C_v}{a^x \cdot S^y} \right)^\mu \cdot \frac{1}{V^\mu}.$$

Откуда следует, что

$$\left(\frac{h_{\text{дон}}}{C}\right)^{\gamma} = \left(\frac{C_V}{a^x \cdot S^y}\right)^{\mu}, \quad \text{и} \quad \beta \cdot \gamma = \mu. \quad (8.34)$$

Значения C_V, x, y и $\mu = 1/m$ есть в справочнике.

Критерием оптимизации обычно принимают приведенные затраты $ПЗ$ на изготовление одной детали.

Подставив в функцию цели значения t_o и t_o/T , получим

$$ПЗ = E \cdot \left[\frac{d_2 - d_1}{2 \cdot S \cdot n} + \left(t_{cu} + \frac{3_u}{E} \right) \cdot \frac{K_1}{h_{\text{дон}}^{\gamma}} \cdot n^{(\mu-1)} \right]. \quad (8.35)$$

Для определения экономической частоты вращения приравняем нулю производную от $ПЗ$ по n и подставим значения K_1 из модели (8.29). Тогда

$$n_{\circ} = \frac{1000}{\pi \cdot d_2} \cdot \frac{C_V}{T_{\circ}^m \cdot a^x \cdot S^y} \cdot \left[(\mu + 1) \cdot \frac{1 - d_1/d_2}{1 - (d_1/d_2)^{(\mu+1)}} \right]^m, \quad (8.36)$$

где
$$T_{\circ} = (\mu - 1) \cdot (t_{cu} + 3_u / E).$$

Если определять экономическую частоту вращения $n_{\text{эн}}$, как это принято для максимального диаметра, и не учитывать переменность скорости резания, то

$$n_{\text{эн}} = \frac{1000}{\pi \cdot d_2} \cdot \frac{C_V}{T_{\circ}^m \cdot a^x \cdot S^y}.$$

Зависимость отношения $n_{\circ}/n_{\text{эн}}$ от (d_1/d_2) при $m = 0,2$ показана на рисунке 8.7 и может быть аппроксимирована следующей моделью

$$n_{\circ}/n_{\text{эн}} = 1,45 - 0,45 \cdot (d_1/d_2). \quad (8.37)$$

Аналитически доказано, что в случае точения торца от центра и конусной поверхности экономическую частоту вращения также можно определять согласно моделям (8.36) и (8.37).

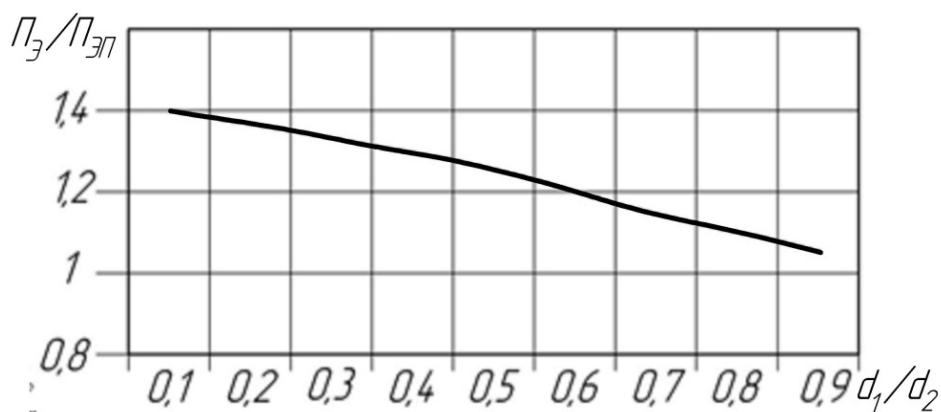


Рисунок 8.7 – Зависимость выигрыша в производительности при подрезании торца в зависимости от отношения диаметров

В случае точения ступенчатой поверхности при постоянной частоте вращения n с постоянной подачей S и глубиной a скорость резания изменяется ступенчато от $V_{\min}$ до $V_{\max}$. Тогда при обработке i -й ступени накопленный износ можно определить (в соответствии с выражением 8.25) из следующей модели

$$h_i^\gamma - h_{(i-1)}^\gamma = C^\gamma \cdot V_i^{\beta \cdot \gamma} \cdot t_i. \quad (8.38)$$

Тогда при обработке одной детали с k ступенями накопленный износ определяется из выражения (8.39), которое получено последовательным сложением правой и левой частей модели (8.38) для всех ступеней.

$$h_{\text{до}}^\gamma = C^\gamma \cdot \left(\frac{\pi}{1000} \right)^{\beta \cdot \gamma} \cdot n^{(\beta \cdot \gamma - 1)} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{d_i^{\beta \cdot \gamma} \cdot L_i}{S}. \quad (8.39)$$

При обработке за период стойкости N деталей накопленный (допустимый) износ определяется моделью

$$h_{\text{дон}}^\gamma = N \cdot C^\gamma \cdot \left(\frac{\pi}{1000} \right)^{\beta \cdot \gamma} \cdot n^{(\beta \cdot \gamma - 1)} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{d_i^{\beta \cdot \gamma} \cdot L_i}{S}, \quad (8.40)$$

где $N = T / t_o$.

Тогда, обозначив

$$K_3 = \left(\frac{\pi}{1000} \right)^{\beta \cdot \gamma} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{d_i^{\beta \cdot \gamma} \cdot L_i}{S} = \left(\frac{\pi}{1000} \right)^\mu \cdot \sum_{i=1}^k \frac{d_i^\mu \cdot L_i}{S},$$

где d_i и L_i – диаметр и длина i -й ступени.

С учетом модели (8.34) можем записать

$$\frac{t_o}{T} = \left(\frac{a^x \cdot S^y}{C_V} \right)^\mu \cdot K_3 \cdot n^{(\mu-1)}. \quad (8.41)$$

Подставив в модель (8.38) значение t_o и t_o/T из модели (8.41), получим

$$ПЗ = E \cdot \left[\frac{L}{S \cdot n} + \left(t_{cu} + \frac{3_u}{E} \right) \cdot \frac{K_3}{B^\mu} \cdot n^{(\mu-1)} \right], \quad (8.42)$$

где $B = C_V / (a^x \cdot S^y)$, $K_3 = \left(\frac{\pi}{1000} \right)^\mu \cdot \sum_{i=1}^k \frac{d_i^\mu \cdot L_i}{S}$, L – длина обрабатываемой части детали.

Приравняв производную от приведенных затрат по n нулю и обозначив $d_i / d_{\max} = \eta_i$, $L_i / L = \lambda_i$, получим выражение для определения эффективной частоты вращения n_η

$$n_\eta = \frac{1000}{\pi \cdot d_{\max}} \cdot \frac{C_V}{T_\eta^m \cdot a^x \cdot S^y} \cdot \left(\sum_{i=1}^k \eta_i^\mu \cdot \lambda_i \right)^m. \quad (8.43)$$

Обозначив $n_{\eta n}$ оптимальную частоту вращения, которая определена традиционным методом (по $d_{\max}$ без учета ступенчатости), получим выражение для оценки эффективности по основному времени δ %

$$\delta = 100 \cdot \left(\frac{n_\eta}{n_{\eta n}} - 1 \right) = 100 \cdot \left[1 / \left(\sum_{i=1}^k \eta_i^\mu \cdot \lambda_i \right)^m - 1 \right]. \quad (8.44)$$

Расчеты показали, что при обработке ступенчатого вала с указанными в таблице 8.2 характеристиками выигрыш в производительности по сравнению с традиционным методом оптимизации составляет 29,8 %, что довольно существенно.

Таблица 8.2 – Характеристики модели

i	1	2	3	4
λ	0,1	0,25	0,35	0,3
η	1	0,8	0,75	0,6

8.5 Оптимизация показателей режима резания с учетом затрат на электроэнергию

Обычно при оптимизации показателей режима резания применяется критерий приведенных затрат, который учитывает затраты денег, зависящие от режима резания. Однако затраты электроэнергии также зависят от режима резания. Поскольку экономия электроэнергии является актуальной задачей, то предлагается в качестве критерия оптимизации принимать комплексный показатель, учитывающий также затраты на электроэнергию. Тогда функция цели (затрат $ПЗ$) будет иметь вид

$$ПЗ = E \cdot \left[t_o + \left(t_{cu} + \frac{3_u}{E} \right) \cdot t_o / T \right] + E_1 \cdot N_p \cdot t_o, \quad (8.45)$$

где E_1 – стоимость киловатт минуты, руб./кВт мин; N_p – мощность резания, кВт, которая по разному (для разных материалов) зависит от скорости.

В общем случае обработки сталей зависимость силы P_z от скорости резания V имеет вид, показанный на рисунке 8.8. В диапазоне больших скоростей (больших 80...100 м/мин) с увеличением скорости сила резания уменьшается, а в диапазоне скоростей, в котором работают инструменты из быстрорежущей стали, наоборот – увеличивается. Исключением является обработка титановых и медных сплавов.

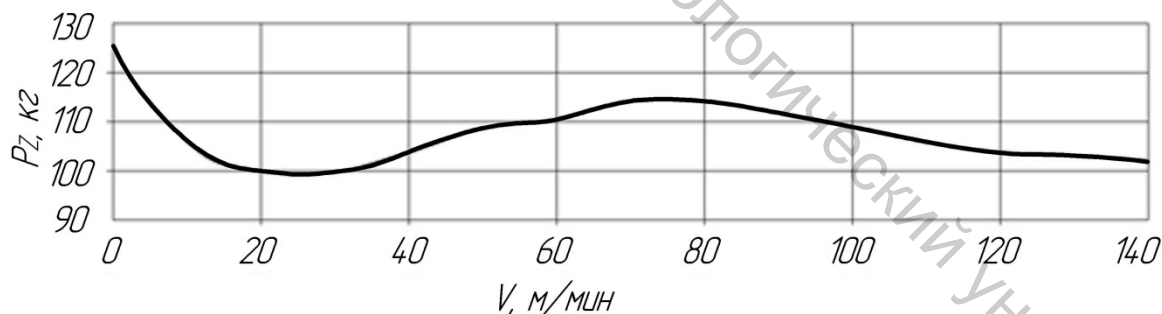


Рисунок 8.8 – Зависимость силы резания от скорости

На рисунке 8.9 показана зависимость силы P_z от V для сплава ВТ15. Эмпирическая модель зависимости силы P_z при точении стальных заготовок инструментом из твердого сплава (т.е. при больших скоростях) имеет вид $P_z = 10 \cdot C_p \cdot a^{x_1} \cdot S^{y_1} \cdot V^{-n_1}$. Тогда зависимость мощности от показателей режима резания будет иметь вид

$$N_p = B_1 \cdot V^{1-n_1},$$

$$\text{где } B_1 = \frac{C_p \cdot a^{x_1} \cdot S^{y_1}}{6120}.$$

Подставив в модель (8.45) выражение для мощности и зависимость t_o от скорости резания $t_o = A/V$, где при точении $A = L/s$, L – длина рабочего хода, S – подача, известная зависимость стойкости от показателей режима резания $T = B^\mu / V^\mu$, где $B = C_v / (a^x \cdot S^y)$, получим окончательное выражение для функции цели (при точении стали твердосплавным резцом)

$$ПЗ = E \cdot \left[\frac{A}{V} + \left(t_{cu} + \frac{3_u}{E} \right) \frac{A}{B^\mu} V^{\mu-1} \right] + A \cdot E_1 \cdot B_1 \cdot V^{-n_1}. \quad (8.46)$$

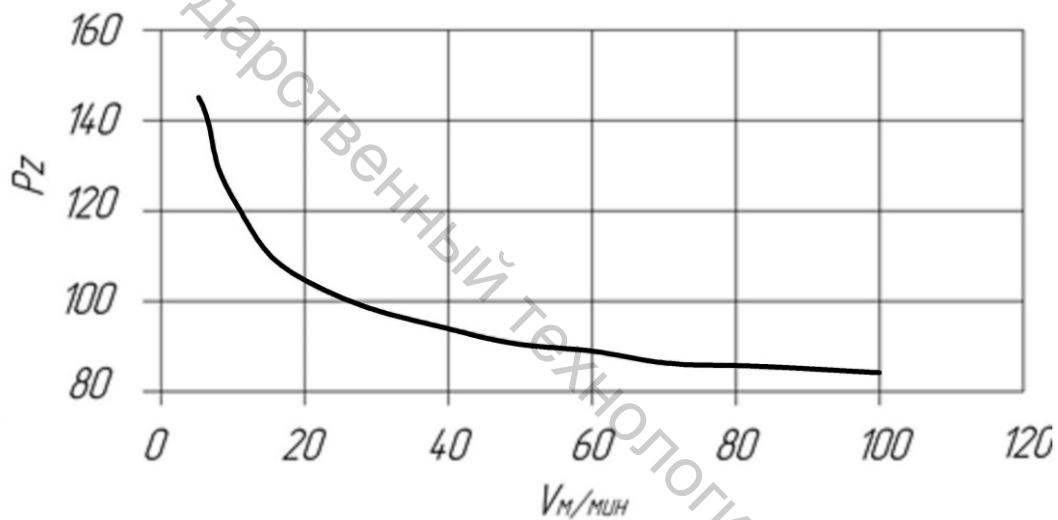


Рисунок 8.9 – Зависимость силы резания от скорости

Чтобы определить оптимальную скорость резания при точении, необходимо производную от ПЗ по V приравнять к 0.

$$\frac{dПЗ}{dV} = E \cdot \left[-\frac{A}{V^2} + \left(t_{cu} + \frac{3_u}{E} \right) \frac{A}{B^\mu} \cdot (\mu - 1) \cdot V^{\mu-2} \right] - n_1 \cdot E_1 \cdot B_1 \cdot A \cdot V^{-n_1-1} = 0$$

Если полученное выражение умножим на V^2 , поделим на E и A и подставим B и B_1 , то получим

$$V_{opt} = \frac{C_v}{T_g^m \cdot a^x \cdot S^y} \cdot \left[1 + \frac{n_1 \cdot E_1 \cdot C_p \cdot a^{x_1} \cdot S^{y_1}}{6120 \cdot E} \cdot V_{opt}^{1-n_1} \right]^m. \quad (8.47)$$

Аналогично получена математическая модель для определения оптимальной скорости фрезерования.

$$V_{onm} = \frac{C_V \cdot D^q}{T_9^m \cdot a^x \cdot z^p \cdot S_z^y \cdot B^u} \cdot \left(1 + \frac{E_1}{E} \cdot \frac{w \cdot \pi^w \cdot C_p \cdot a^{x_1} \cdot z \cdot S_z^{y_1} \cdot B^{n_1}}{6120 \cdot D^{q_1-w}} \cdot V_{onm}^{1-w} \right)^m. \quad (8.48)$$

Данные уравнения легко можно решить методом итераций. Расчеты показали, что в зависимости от отношения удельных затрат на электроэнергию и эксплуатацию рабочего места (E_1 / E) скорость резания, рассчитанная по новой модели, получается на 5...15 % больше, чем скорость резания, рассчитанная без учета затрат на электроэнергию. То есть оптимизация скорости резания по-новому не только обеспечивает некоторую экономию энергоресурсов, но и обеспечивает, пусть небольшое, повышение производительности.

8.6 Оптимизация режима обработки однородным блоком

Варианты блочных переходов показаны на рисунке 8.10. В таких случаях инструменты блока либо одновременно начинают, либо одновременно заканчивают обработку. Один из инструментов с максимальной длиной рабочего хода будем называть *лимитирующим* по основному времени. Если инструменты блока принадлежат к одному типу и в них использован один и тот же инструментальный материал, то такой блок будем называть однородным (рис. 8.10 а, в). В неоднородном блоке (рис. 8.10 б) работают два резца и одно сверло [1–5, 98–101].

Характерной особенностью работы блока инструментов является наличие общих параметров режима резания. Это может быть частота вращения n и подача S (рис. 8.10 а, б) или общая минутная подача $S_{мин}$ для всех инструментов многошпиндельной головки (рис. 8.10 в, г), каждый из которых имеет свою частоту вращения n_i и подачу S_i .

При обработке многоинструментными наладками, в частности блоками, возможны следующие схемы замены затупившихся инструментов:

- раздельная, когда каждый инструмент блока заменяется по мере исчерпания ресурса его стойкости;
- параллельная, когда заменяется весь блок инструментов по мере исчерпания ресурса стойкости любого из инструментов блока;
- параллельно-групповая, когда блок инструментов разбит на группы, в каждую из которых входят инструменты с приблизительно одинаковой стойкостью.

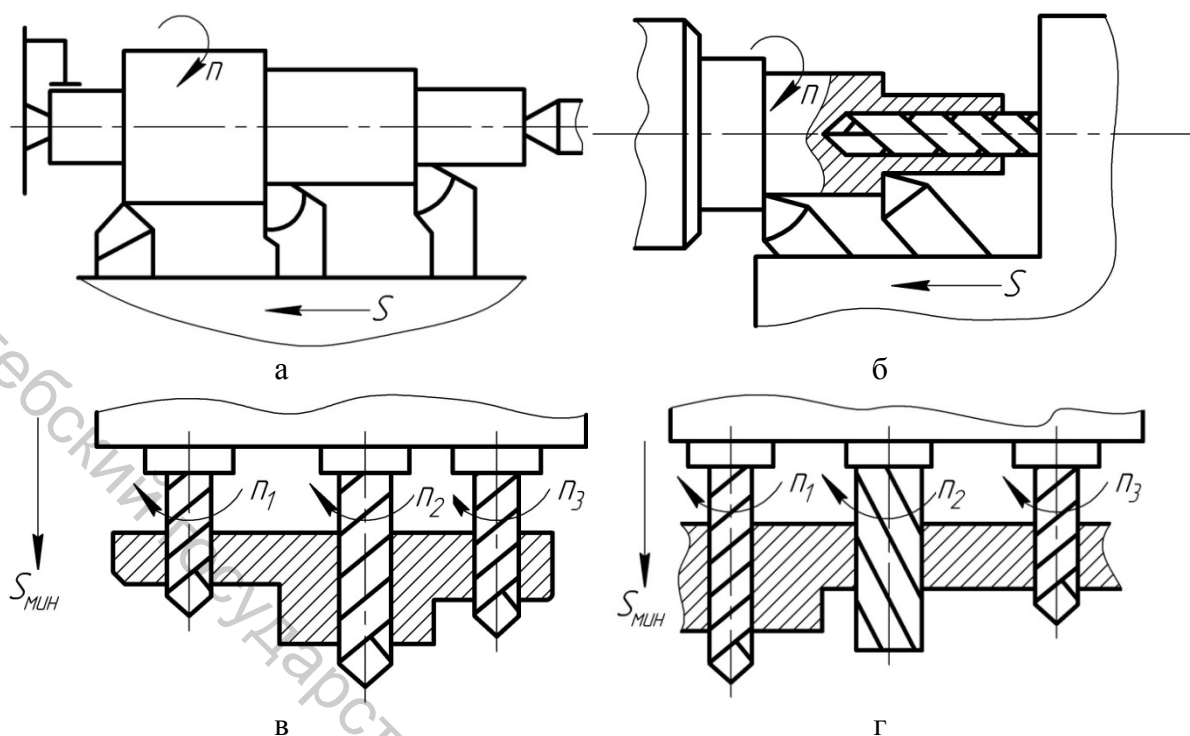


Рисунок 8.10 – Варианты блочных переходов

Любая из этих схем замены может проводиться принудительно, через заранее рассчитанные периоды времени, то есть в «профилактическом» режиме, или по мере наступления допустимого износа. Каждая из схем замены инструмента имеет свои достоинства и недостатки, а также предпочтительные условия выполнения.

Функция цели для случая обработки *однородным блоком* с общими для всех инструментов значениями n и S формируется так же, как и при обработке одним инструментом. При раздельной схеме замены инструментов затраты:

$$ПЗ = E \cdot [t_{o.лим} + \sum_{i=1}^k (t_{ui} \cdot t_{oi} / T_i)], \quad (8.49)$$

где $t_{o.лим}$ – основное время работы лимитирующего инструмента; k – число инструментов в блоке; $t_{ui} = t_{ci} + t_{p.n} + Z_u / E$.

После несложных преобразований получим

$$ПЗ = E \cdot (A_{лим} / n + G \cdot n^{\mu-1}), \quad (8.50)$$

где $A_{лим} = L_{p.x.лим} / S$; $G = \sum_{i=1}^k (t_{ui} \cdot A_i \cdot (F_i / B_i)^{\mu})$; $A_i = L_i / S$.

$$F_i = \pi \cdot d_i / 1000; \quad B_i = C_V / (a_i^x \cdot S^y).$$

Если приравнять нулю производную от $ПЗ$ по n , то получим оптимальную по экономическому критерию частоту вращения n_9 :

$$n_9 = 1000 \cdot C_V / (\pi \cdot d_{\text{лим}} \cdot a_{\text{лим}}^x \cdot S^y \cdot T_{y.9}); \quad (8.51)$$

$$\text{где } T_{y.9} = \sum_{i=1}^k (T_{9i} \cdot \lambda_i \cdot (\eta_i \cdot \alpha_i^x)^\mu); \quad T_{9i} = (\mu - 1) \cdot t_{ui}; \quad \lambda_i = L_i / L_{\text{лим}}.$$

$$\eta_i = d_i / d_{\text{лим}}; \quad \alpha_i = a_i / a_{\text{лим}},$$

где L_i и $L_{\text{лим}}$ – длины i -й и лимитирующей ступеней; d_i и $d_{\text{лим}}$ – диаметры i -й и лимитирующей ступеней; a_i и $a_{\text{лим}}$ – глубина резания на i -й и лимитирующей ступеней; $T_{y.9}$ – можно считать условно-оптимальной стойкостью блока.

При групповой схеме замены инструментов блока ограничением по стойкости блока будет тот инструмент, для которого произведение $d_i \cdot a_i^x \cdot L_i^m$ будет максимальным. Этот инструмент будет лимитирующим по стойкости. В данном случае функция цели имеет вид:

$$ПЗ = E \cdot (t_{o.лим} + M_1 t_{o.лим.T} / T_{лим.T}), \quad (8.52)$$

где $t_{o.лим}$ – основное время инструмента, лимитирующего производительность блока; $t_{o.лим.T}$ и $T_{лим.T}$ – соответственно основное время и стойкость инструмента, лимитирующего стойкость блока.

$$M_1 = t_{сб} + \sum_{i=1}^k (3_{ui} / E), \quad (8.53)$$

где $t_{сб}$ – время замены и размерной настройки инструментов блока.

Подставив в (8.52) значения $t_{o.лим}$, $t_{o.лим.T}$ и $T_{лим.T}$, получим

$$ПЗ = E \cdot \left[\frac{A_{\text{лим}}}{n} + M \cdot \frac{A_{\text{лим.T}}}{B_{\text{лим.T}}^\mu} \cdot n^{(\mu-1)} \right], \quad (8.54)$$

где $A_{\text{лим}} = L_{\text{лим}} / S$, $A_{\text{лим.Т}} = L_{\text{лим.Т}} / S$,
 $B_{\text{лим.Т}} = 1000 \cdot C_v / (\pi \cdot d_{\text{лим.Т}} \cdot a_{\text{лим.Т}}^x \cdot S^y)$.

Приравняв производную модели (8.54) по n нулю, получим

$$n_{\text{э}} = 1000 \cdot C_v / (\pi \cdot d_{\text{лимТ}} \cdot a_{\text{лимТ}}^x \cdot S^y \cdot T_{\text{лимТ}}^m), \quad (8.55)$$

где $T_{\text{лимТ}}$ – можно считать условно-оптимальной стойкостью блока, равной стойкости лимитирующего по стойкости инструмента ($T_{\text{у.э}} = T_{\text{лимТ}}$), и определять по следующему выражению:

$$T_{\text{у.э}} = T_{\text{лимТ}} = (\mu - 1) \cdot L_{\text{лимТ}} \cdot M_1 / L_{\text{лим}}. \quad (8.56)$$

Поскольку затраты на эксплуатацию блока инструментов существенно больше, чем на один инструмент, то оптимальная частота вращения заготовки смещается в сторону меньших значений, где линейная зависимость между $\ln T$ и $\ln V$ нарушается. Чтобы избежать значительной ошибки при определении $n_{\text{э}}$ по формуле (8.55), необходимо использовать модель стойкости (8.6), и тогда получим следующее выражение:

$$n_{\text{э}} = 1000 \cdot C_v \cdot M_2^m / (\pi \cdot d_{\text{лим}} \cdot a_{\text{лим}}^x \cdot S^y \cdot T_{\text{у.э}}^m), \quad (8.57)$$

где $M_2 = 1 + w / (\mu - 1)$; $w = \sum_{i=1}^k (T_{\text{э}i} / T_{\text{пред}i})$; $T_{\text{э}i}, T_{\text{пред}i}$ – соответственно оптимальная по экономическому критерию и предельная (при скорости резания, приближающейся к нулю) стойкости i -го инструмента блока.

При обработке однородным блоком с общей минутной подачей (рис. 8.10 в) в функцию цели (8.49) следует подставить:

$$t_{oi} = L_i / S_{\text{мин}}; \quad T_i = (B_i / S_{\text{мин}})^{\mu},$$

где $S_{\text{мин}} = S_i \cdot n_i$; $B_i = 1000 \cdot C_v \cdot S_i^{1-y} / (\pi \cdot d_i^{(1-q)} \cdot a_i^x)$.

Тогда получим:

$$S_{\text{мин.э}} = 1000 \cdot C_V \cdot S_{\text{лим}}^{1-y} / (d_{\text{лим}}^{(1-q)} \cdot a_{\text{лим}}^x \cdot T_{y.э}^m), \quad (8.58)$$

где $T_{y.э} = \sum_{i=1}^k (\mu - 1) \cdot M_i \cdot H_i^\mu$, $M_i = \lambda_i \cdot (t_{c.u} + 3_u / E)_i$,

$$H_i = \delta_i^{(1-q)} \cdot \alpha_i^x / \sigma_i^{(1-y)}, \quad \delta_i = d_i / d_{\text{лим}},$$

$$\lambda_i = L_i / L_{\text{лим}}, \quad \alpha_i = a_i / a_{\text{лим}}, \quad \sigma_i = S_i / S_{\text{лим}},$$

а индекс «лим» соответствует лимитирующему инструменту.

Оптимизация режима обработки в данном случае проводится в следующем порядке. Сначала назначается глубина a_i резания для всех инструментов. При сверлении $a_i = d_i / 2$, но $x = 0$. Исходя из силовых ограничений, определяются значения S_i . Затем по формуле (8.58) определяем оптимальное по экономическому критерию значение минутной подачи ($S_{\text{мин.э}}$). Частота вращения для каждого шпинделя определяется из выражения

$$n_{эi} = S_{\text{мин.э}} / S_i.$$

8.7 Оптимизация режима обработки неоднородным блоком с общей частотой вращения и подачей

При оптимизации режима обработки неоднородным блоком с общими частотой вращения и подачей (рис. 8.10 б) вместо выражения (8.50) для вычисления затрат можно использовать приведенную ниже формулу:

$$ПЗ = E \cdot (A_{\text{лим}} / n + \sum_{i=1}^k (A_i \cdot M_i \cdot F_i^{\mu_i} \cdot n^{\mu_i - 1})), \quad (8.59)$$

где $A_i = L_i / S$; $M_i = (t_{c.u} + 3_u / E)_i$; $F_i = \delta_i / B_i$; $\delta_i = \pi \cdot d_i / 1000$;
 $B_i = C_{Vi} / (a_i^x \cdot S^y)$.

Параметр μ_i для каждого инструмента имеет свое значение в пределах 2,5...12 и редко бывает целым числом.

Поэтому, если приравнять нулю производную от $ПЗ$ по n , то получим многочлен

$$\sum_{i=1}^k ((\mu_i - 1) \cdot A_i \cdot M_i \cdot (F_i \cdot n)^{\mu_i}) = A_{\text{лим}},$$

из которого искомое значение n можно определить только одним из известных численных методов. В таких случаях лучше применять один из методов однофакторного поиска оптимума непосредственно по функции цели (8.59).

Если частота вращения на станке может принимать только ряд дискретных значений $n_1, n_2, \dots, n_p$, то быстрее всего приводит к цели метод поиска по дискретам с помощью чисел Фибоначчи, которые образуют ряд, где каждое последующее число F_j равно сумме двух предыдущих (F_{j-1} и F_{j-2}).

Часть этого ряда имеет вид:

j	...	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
F_j	...	1	2	3	5	8	13	21	34	55	89	144	233

Алгоритм поиска станет ясен из следующего примера. Например, на данном станке коробка скоростей обеспечивает 18 ступеней частот вращения. Выбираем ближайшее большее число Фибоначчи из приведенного ряда. Это будет $F_j = 21$, где $j = 7$. В данном случае для определения n_9 необходимо не более $(j-1)$ вычислений значений $ПЗ = C$ из функции цели (8.59) по схеме, показанной на рисунке 8.11, где индекс n частоты вращения n_p , при которой вычисляется значение $ПЗ_p = C$, определяется из ряда чисел Фибоначчи.

Начальный интервал неопределенности охватывает все 18 ступеней (ступени 19...21 считаются условными и прибавляются к действительным). Значения индекса частоты вращения для первых двух вычислений (рис. 8.11 а) определяются следующим образом. Выбирается число Фибоначчи, предшествующее F_j , которое в данном случае равно 13, и откладывается от границ интервала неопределенности. Получаем, что вычисления следует проводить при частотах вращения n_8 и n_{13} . Поскольку функция цели унимодальна (имеет один минимум), то, сравни-

вая полученные значения C_1 и C_2 , можем выделить новый (уточненный) интервал неопределенности. В данном случае, поскольку $C_1 > C_2$, то новый интервал неопределенности охватывает ступени частот вращения от 8-й до 18-й.

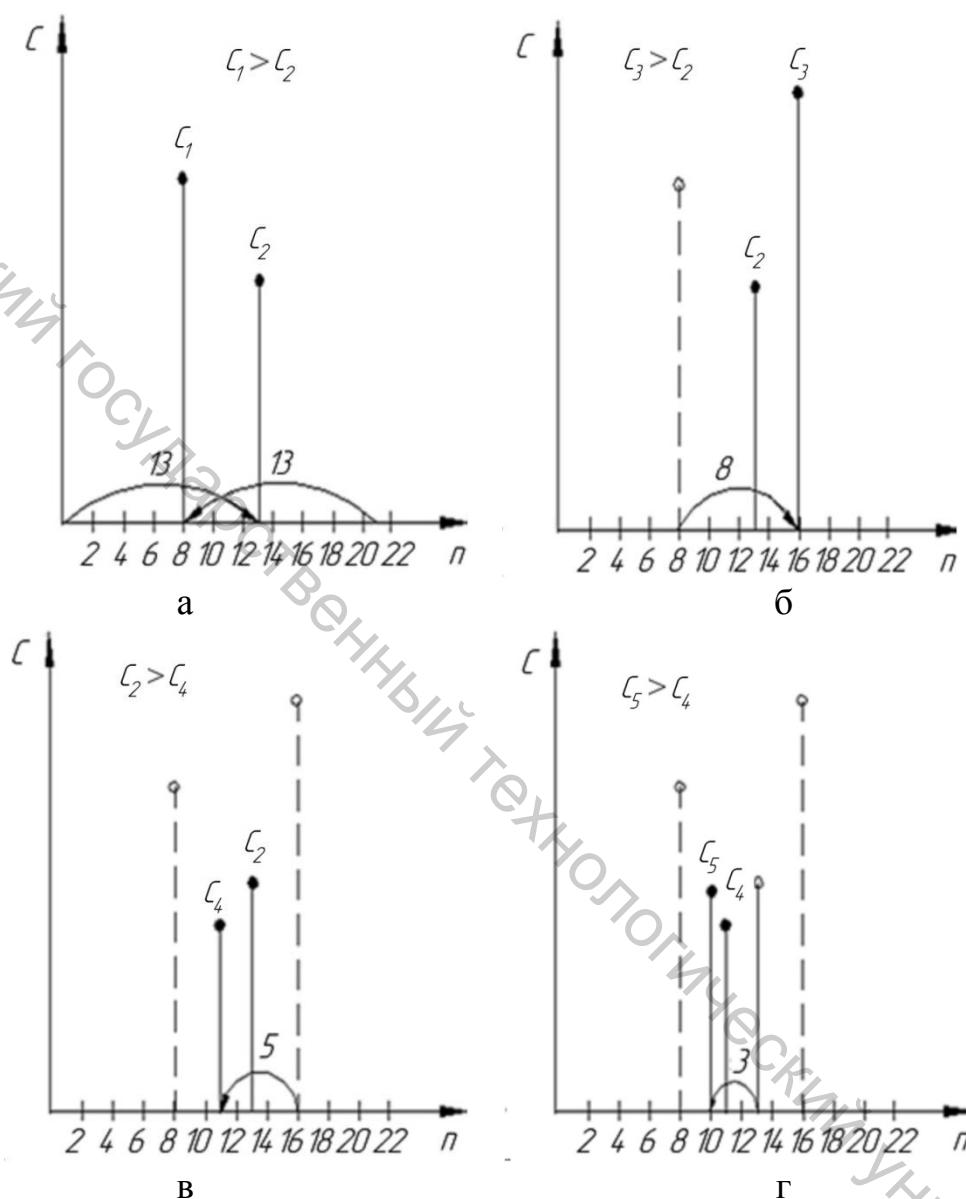


Рисунок 8.11 – Схемы поиска по дискретам с помощью чисел Фибоначчи

Для определения следующей ступени берем из ряда следующее меньшее число Фибоначчи (в данном случае 8) и откладываем его от индекса, соответствующего большему значению C , в сторону меньшего (рис. 8.11 б). Получаем, что вычисление следует проводить при частоте вращения n_{16} . Полученное значение $C_3 > C_2$, следовательно, интервал не-

определенности сужается, охватывая ступени частот вращения от 8-й до 16-й.

Аналогично (рис. 8.11 в) определяем, что следующее вычисление следует проводить при частоте вращения n_{11} . Поскольку $C_4 > C_2$, то новый интервал неопределенности охватывает только ступени частот вращения от 8-й до 13-й. После следующего вычисления при частоте вращения n_{10} интервал неопределенности опять сужается (от 10-й до 13-й ступени). И, наконец, шестое вычисление при n_{12} окончательно показывает, что оптимальной будет частота вращения, соответствующая 11-й ступени коробки скоростей.

Аналогично можно проводить оптимизацию режима обработки неоднородным блоком с общей минутной подачей. Необходимо только соответствующим образом изменить функцию цели.

Если n (или $S_{мин}$) на станке может принимать любые значения в заданном диапазоне, то поиск оптимальной частоты вращения (или минутной подачи) лучше проводить методом «золотого сечения». В данном случае начальный интервал неопределенности $L_0 = n_{max} - n_{min}$. Тогда $L_1 = L_2 = L_0 / \tau$, где $\tau = 1,618$. А затем при последующих вычислениях

$$L_j = L_{(j-1)} / \tau, \quad (8.60)$$

где j – номер вычисления.

Для первых двух вычислений $n_1 = n_{max} - L_1$, $n_2 = L_{min} + L_2$. Затем, в зависимости от результатов вычисления L_j по формуле (8.60), определяют n_j , откладывая L_j от n , соответствующего большему значению C , в сторону, соответствующую меньшему значению (рис. 8.12 а). После p вычислений интервал неопределенности сокращается до $L_p = L_0 / \tau^{(p-1)}$. Зависимость L_p / L_0 от p показана на рисунке 8.12 б.

Однако точные значения параметров μ , $t_{с.и}$, $t_{р.н}$, Z_u и E , которые используются для оценки оптимальной скорости резания, никогда не бывают известны. Данные, приведенные в справочной литературе, являются среднестатистическими и, следовательно, приближенными.

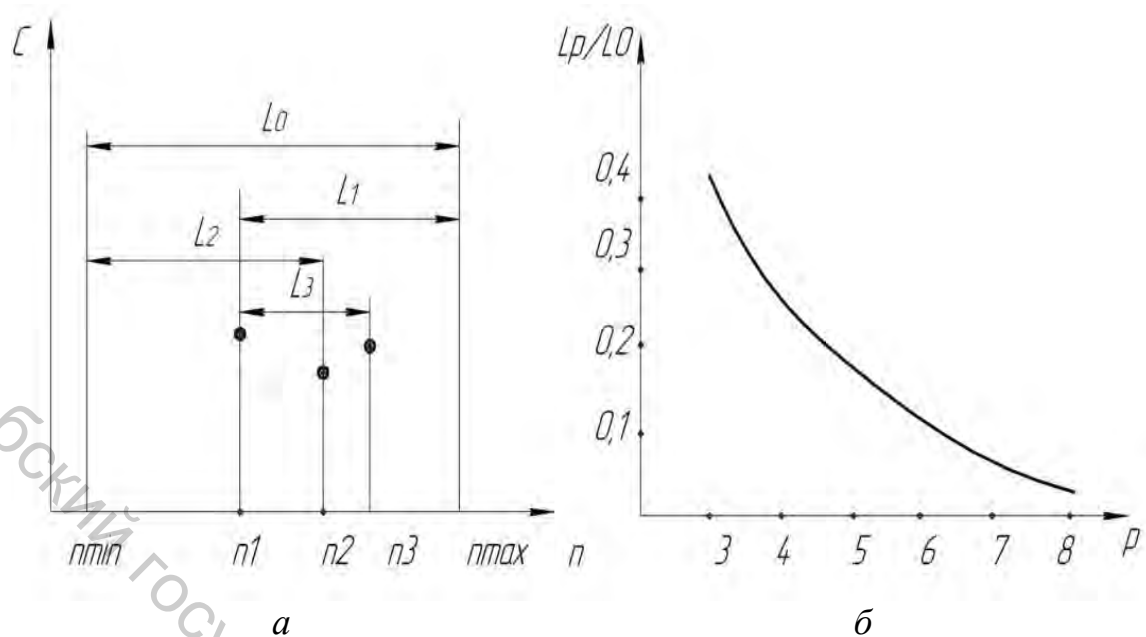


Рисунок 8.12 – Метод «золотого сечения»:

а – схема поиска, б – зависимость интервала неопределенности от числа шагов

Исследования показали, что при идентичных инструментальных и обрабатываемых материалах и одинаковой геометрии резца в разных лабораториях получены разные значения μ , отличающиеся от среднего на 25...45 % в ту и другую сторону. Но погрешность оценки параметров μ , $t_{c,u}$, $t_{p,n}$, Z_u и E в пределах 25 % вполне допустима, так как при этом неправильно оцененная и установленная на станке скорость резания $V_{эк}$ приведет к увеличению затрат не более, чем на 5...10 % [1–5, 98–101].

8.8 Влияние временной структуры операции на ее эффективность

Базовым вариантом для сравнения эффективности будет однозонная периодическая операция, состоящая из одного инструментального перехода, когда в единственной рабочей зоне за один установ обрабатывается одна заготовка. Критерием эффективности в данном случае будем считать производительность или конкретные элементы штучного времени. В качестве альтернативы будут рассматриваться операции с концентрацией обработки, организованные либо путем последовательного совмещения инструментальных переходов, либо путем применения блочных переходов (рис. 8.10). Кроме того, будут рассмотрены опера-

ции с концентрацией заготовок в рабочей зоне и двузонные операции [1–5, 98–101].

Предположим, что для обработки детали, согласно базовому варианту, необходимо выполнить M операций. Тогда общее оперативное время $t_{on.б}$ базового варианта можно определить из выражения:

$$t_{on.б} = \sum_{i=1}^M (t_y + t_{npxi} + t_{oi}(1 + t_{c.ui} / T_i)) \quad (8.61)$$

где t_y – время установки заготовки (считаем для всех операций одинаковым); t_{npxi} – часть вспомогательного времени, связанного с выполнением i -го перехода; $t_{c.ui}$ – время на смену затупившегося i -го инструмента; T_i – его стойкость; t_{oi} – основное время выполнения i -го перехода.

При последовательном совмещении M переходов в операции заготовки будет устанавливаться только один раз. Тогда оперативное время $t_{on.a}$ альтернативного варианта

$$t_{on.a} = t_y + \sum_{i=1}^M (t_{npxi} + t_{oi}(1 + t_{c.ui} / T_i)).$$

Индекс производительности I_{np} в данном случае можно записать так

$$I_{np} = t_{on.б} / t_{on.a} = (M \cdot t_y + \Pi) / (t_y + \Pi),$$

где $\Pi = \sum_{i=1}^M (t_{npxi} + t_{oi}(1 + t_{c.ui} / T_i)).$

Зависимость индекса производительности от количества последовательно совмещенных переходов (которые условно считаются одинаковыми) и отношения затрат времени на один инструментальный цикл обработки к затратам времени на установку заготовки можно отразить следующим выражением:

$$I_{np} = M \cdot (1 + \Pi_1 / t_y) / (1 + M \cdot \Pi_1 / t_y),$$

где $\Pi_1 = t_{\text{прх}} + t_o(1 + t_{\text{с.и}} / T)$. Эту зависимость отражают графики на рисунке 8.13 а.

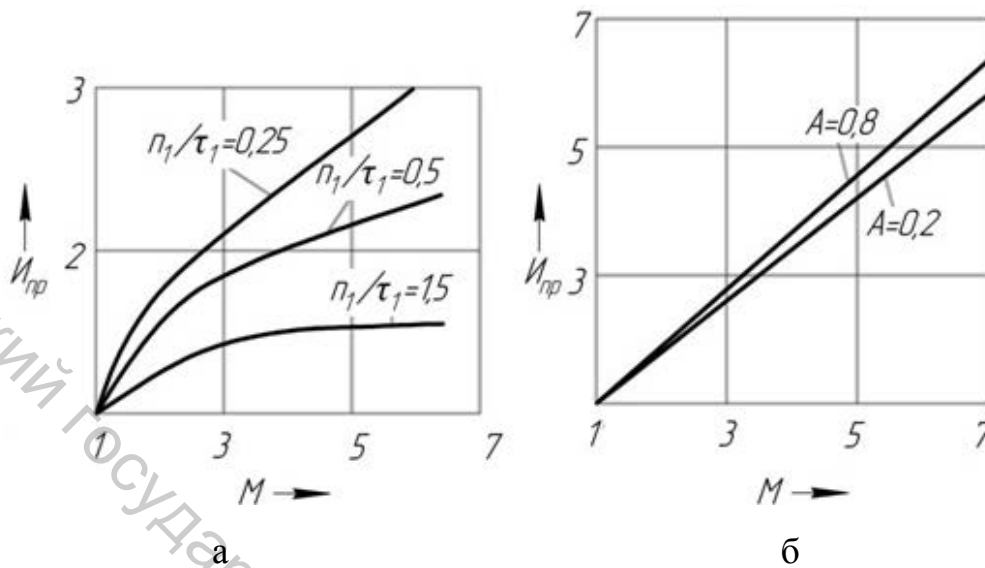


Рисунок 8.13 – Зависимость индекса производительности операции от уровня концентрации переходов в операции:
а – последовательной, б – параллельной

Если альтернативным вариантом является обработка инструмен-
тальным блоком из M инструментов, то:

$$I_{\text{пр}} = \frac{M \cdot t_y + \Pi}{t_y + t_{\text{прх.лим}} + t_{\text{о.лим}} \cdot (1 + t_{\text{с.и.лим}} / T_{\text{лим}})},$$

где индекс «лим» указывает на лимитирующий инструмент. Посчитав условно все инструментальные переходы одинаковыми, можем для дан-
ного случая записать:

$$I_{\text{пр}} = M \cdot (t_y + \Pi_{1б}) / (t_y + \Pi_{1а}) \quad (8.62)$$

Учитывая, что оптимальная по производительности стойкость
альтернативного варианта $T_{\text{онм.а}} = M \cdot T_{\text{онм.б}}$, а отношение скоростей
резания поэтому будет:

$$V_{\text{онм.б}} / V_{\text{онм.а}} = (T_{\text{онм.а}} / T_{\text{онм.б}})^m = M^m,$$

по формуле (8.62) получим:

$$I_{np} = M(A(1-m) + 1) / (A(1-m) + M^m(1-m + m/M)),$$

где $A = (t_y + t_{npх}) / t_{об}$; $t_{об}$ – время обслуживания станка.

Результаты расчета по данной модели приведены на рисунке 8.13 б.

Сравнение графиков на рисунке 8.13 позволяет сделать следующие выводы:

- 1) эффективность параллельного совмещения переходов значительно выше, чем последовательного;
- 2) последовательное совмещение переходов достаточно эффективно только тогда, когда время на установку заготовки существенно (в 2...4 раза) превышает затраты времени на выполнение одного инструментального перехода (без учета τ_y);
- 3) влияние параметра A незначительно.

При последовательном совмещении заготовок (рис. 8.14) оперативное время определяется выражением:

$$t_{on.a} = t_y + \frac{L_{общ}(1/S_{раб} + 1/S_x)}{k} + \frac{2L_x}{S_x},$$

где $L_{общ} = kL + (k-1)L_{заз} + L_{вр}$; k – количество заготовок; $S_{раб}$ и S_x – рабочая и холостая минутные подачи; L_x – добавочный холостой ход; L – длина фрезеруемой поверхности; $L_{заз}$ – зазор между обрабатываемыми поверхностями; $L_{вр}$ – длина врезания.

А при обработке одной заготовки ($k = 1$):

$$t_{on.б} = t_y + (L + L_{вр})(1/S_{раб} + 1/S_x) + 2L_x/S_x.$$

После несложных преобразований из последних уравнений получим:

$$I_{np} = 1 / (1 - A_1 / A_2). \quad (8.63)$$

где $A_1 = (k-1)(K_{вр} - K_{заз}) / k$; $A_2 = X + (1 + K_{вр})$;

$X = (K_s \cdot K_y + 2K_x) / (1 + K_s)$; $K_{вр} = L_{вр} / L$; $K_{заз} = L_{заз} / L$;

$K_s = S_x / S_{раб}$; $K_x = L_x / L$; $K_y = t_y \cdot S_{раб} / L$.

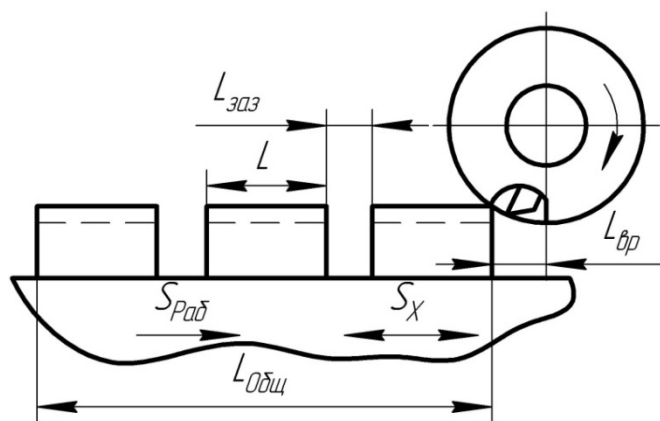


Рисунок 8.14 – Расчетная схема операции с последовательным совмещением заготовок

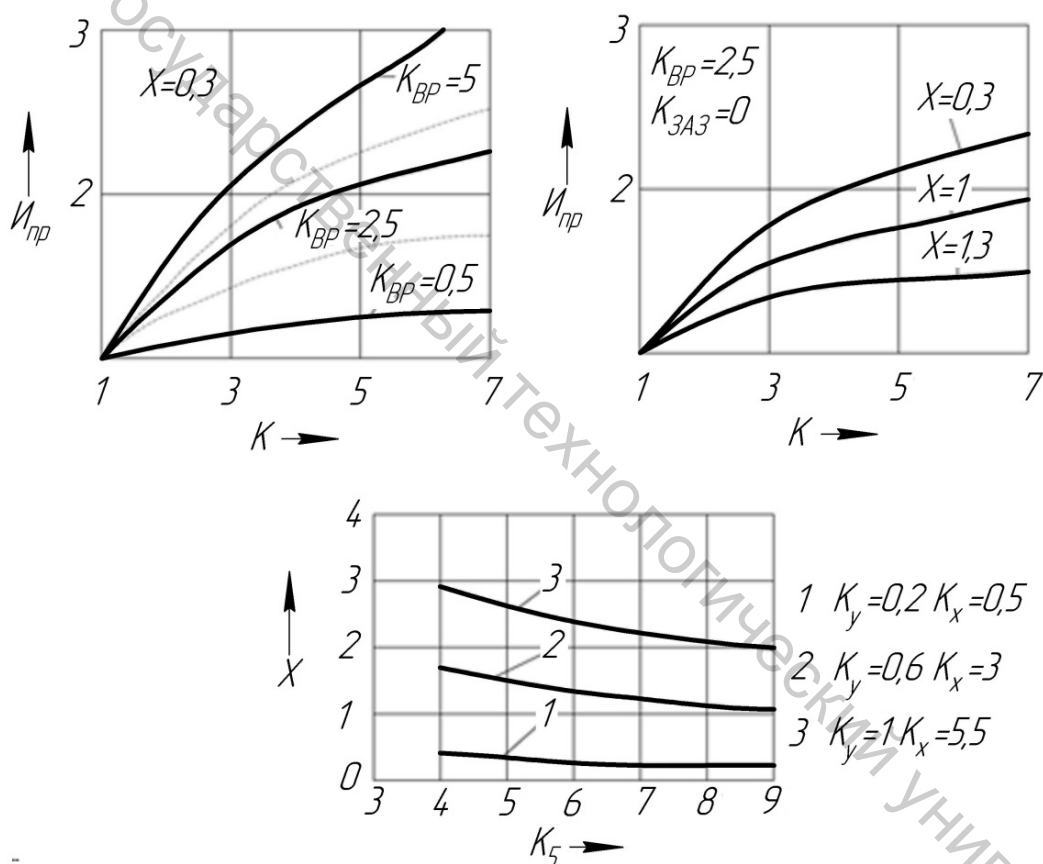


Рисунок 8.15 – Зависимость индекса производительности от параметров условий последовательного совмещения заготовок (сплошные линии для $K=0$, штриховые – для $K=0,5$)

Результаты расчетов по модели (8.63), показанные на рисунке 8.15, позволяют сделать следующие выводы:

– последовательное совмещение заготовок достаточно эффективно, когда длина врезания на много больше длины детали;

– зазоры между заготовками сильно снижают эффективность последовательного совмещения;

– значительно снижает эффективность последовательного совмещения заготовок увеличение параметра X , характеризующего относительную длительность вспомогательных переходов (установки и холостых перемещений).

В двухзонных периодических операциях, выполняемых на агрегатных станках с поворотным столом, время на установку (переустановку) заготовки обычно перекрывается временем лимитирующего цикла. Предположим, что на станке имеется N рабочих позиций, в каждой из которых выполняется M одинаковых инструментальных переходов. Тогда

$$I_{np} = G_1 / G_2,$$

где $G_1 = 1 + (A_1 + A_2)(1 - m)$; $A_1 = t_y / t_{об}$; $A_2 = t_{npx} / t_{об}$;

$G_2 = A_2 \cdot (1 - m) + (N \cdot M)^m (1 - m + m / (N \cdot M))$.

Результаты расчета по данной модели, приведенные на рисунке 8.16, показывают, что эффективность операций с такой структурой значительно возрастает с увеличением уровня концентрации переходов. Влияние параметров A_1 и A_2 незначительно.

8.9 Автоматическая оптимизация режимов резания

В рассмотренных выше алгоритмах оптимизации режимов резания не учитывались зависимость параметров моделей ограничений от времени работы инструмента после его заточки и стохастический характер процесса изнашивания (и разрушения) инструмента. Однако на самом деле при затуплении инструмента увеличивается как параметр шероховатости Ra , так и составляющие силы резания (рис. 8.17). Следовательно, с течением времени работы инструмента границы области допустимых значений подачи и скорости резания будут смещаться, как это показано на рисунке 8.18. То есть при предварительной обработке, когда ограничением является мощность привода главного движения, необходимо, по мере затупления инструмента, уменьшать подачу и скорость резания. Если ограничением является прочность инструмента, то, по мере затупления, необходимо уменьшать подачу. А при чистовой обработке, когда ограничением является заданное значение параметра шерохо-

ватости, по мере затупления инструмента, необходимо уменьшать подачу и/или увеличивать скорость резания [1–5, 98–101].

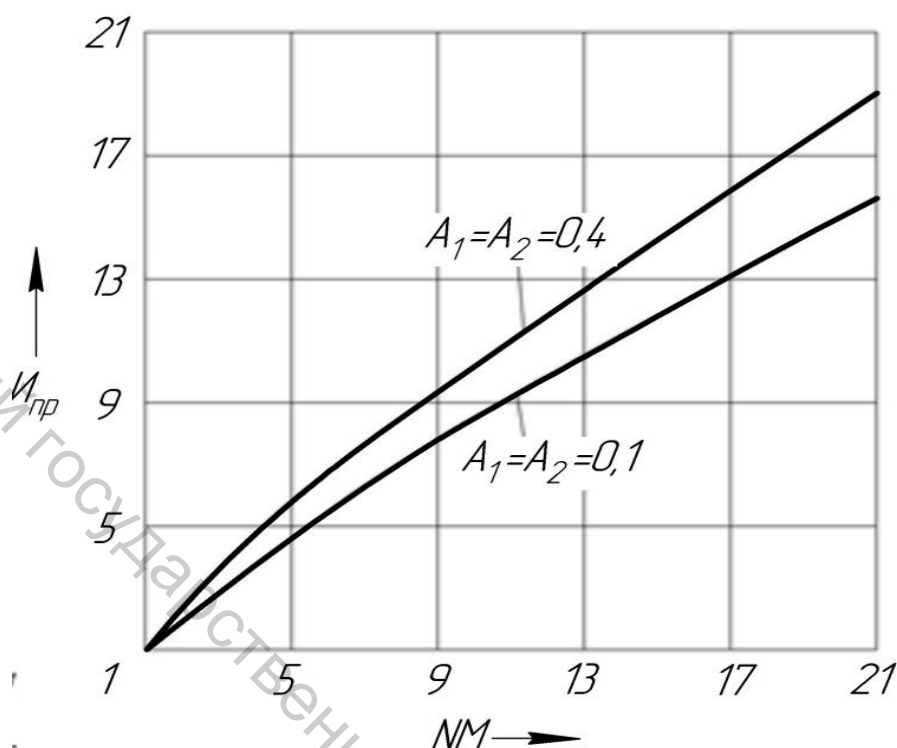


Рисунок 8.16 – Зависимость индекса производительности от уровня концентрации переходов в двухзонной периодической операции и от параметров вспомогательных переходов

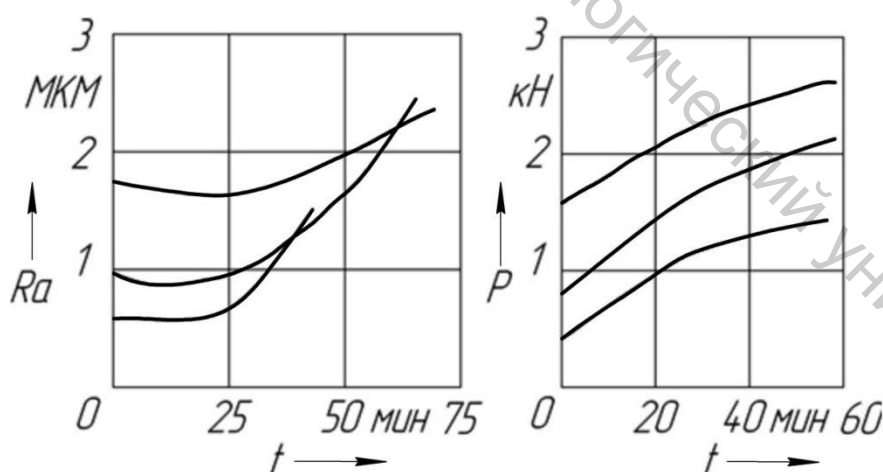


Рисунок 8.17 – Зависимость от времени t работы инструмента после переточки:

а – параметра Ra шероховатости, б – сил P резания

Исследования показали, что отказ инструмента, возникающий в связи с достижением допустимого износа, выкрашиванием, скалывани-

ем или разрушением, подчиняется закону Вейбулла. Параметры этого распределения существенно изменяются от переточки к переточке. Так, средняя стойкость инструмента при переточках может отличаться до 2 раз (рис. 8.19). Средняя стойкость максимальна после первой или реже после второй переточки. Число переточек, которое допускает инструмент, зависит от его прочности и нагрузки во время работы и при предварительной обработке обычно в 2...8 раз меньше, чем расчетное, допускаемое размером стачивания. Таким образом, каждый инструмент имеет свое индивидуальное значение параметра C_v и, следовательно, свою индивидуальную, оптимальную по экономическому критерию скорость резания.

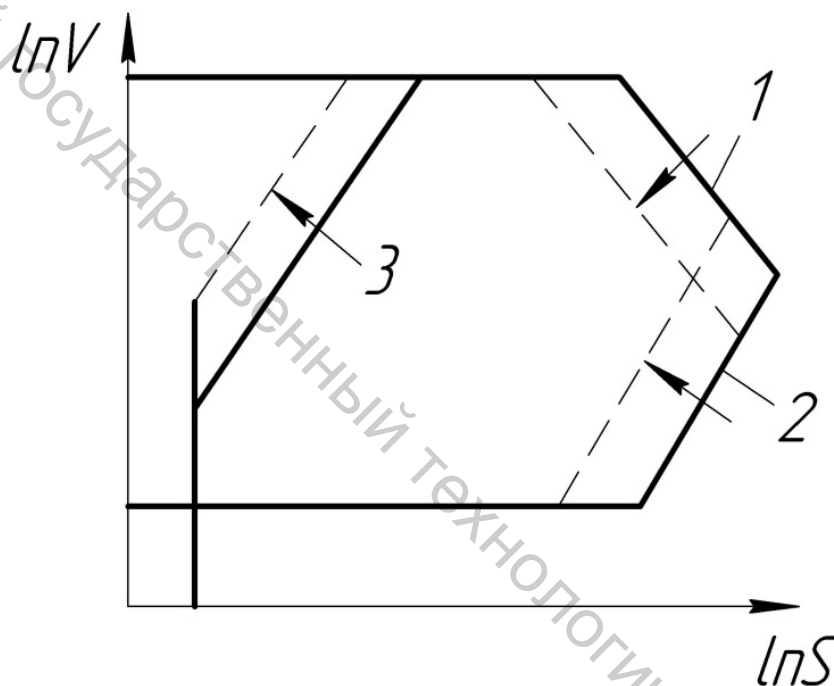


Рисунок 8.18 – Схема изменения области допустимых значений из-за затупления инструмента:

1 – ограничение по мощности; 2 – ограничение по прочности инструмента; 3 – ограничение по шероховатости

Оптимальная коррекция параметров режима резания, учитывая следствия затупления инструмента и разброс параметров его качества, возможна только с помощью автоматической системы управления (АСУ), в которую поступает по каналам обратной связи информация из зоны резания. На рисунке 8.20 приведена схема классификации АСУ режима резания. АСУ могут быть одно- и многопараметрическими (соответственно АСУО и АСУМ). Анализ показал, что возможны взаимосвязанные или независимые контуры управления частотой вращения шпинделя и подачей.

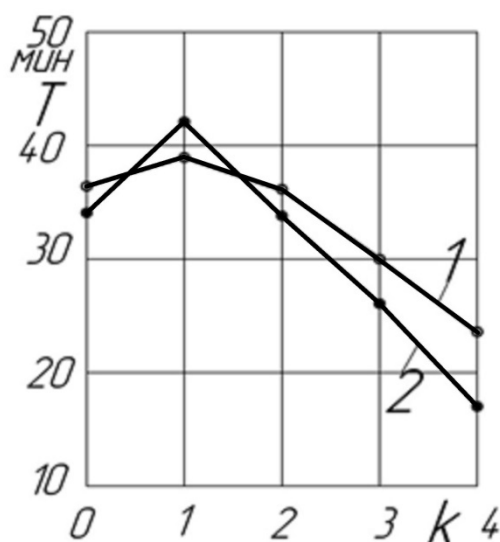


Рисунок 8.19 – Зависимость средней стойкости T инструмента от номера переточки:

1 – для проходных резцов; 2 – для отрезных резцов

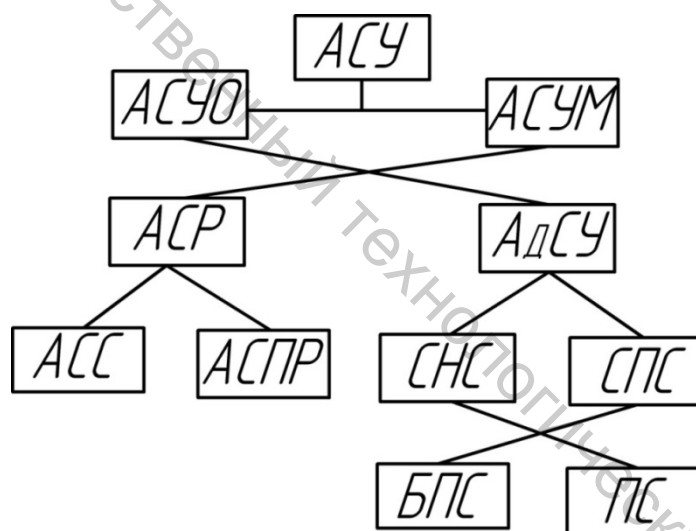


Рисунок 8.20 – Схема классификации АСУ режимами резания

Автоматические системы регулирования (АСР) в зависимости от характера задающего воздействия делятся на автоматические системы стабилизации (АСС) и автоматические системы программного регулирования (АСПР). Автоматические системы управления, управляющие воздействием, параметрами, структурой и алгоритмом работы которых автоматически изменяются в зависимости от реальных условий так, чтобы обеспечить экстремальное (или близкое к нему) значение выбранного критерия, получили название *адаптивных систем* (АДСУ). Дополнительными признаками АДСУ являются неполный детерминизм (неопределенность), избыточность, прогнозирование и самообучение. АДСУ делятся на *самонастраивающиеся* (СНС), в которых изменяются управ-

ляющие воздействия или параметры, и *самоприспосабливающиеся* (СПС), в которых изменяется структура или алгоритмы работы. СНС и СПС в свою очередь делятся на *беспоисковые* (БПС) и *поисковые* (ПС). Последние характеризуются изменением воздействий, параметров или алгоритма управляющего устройства в результате анализа результатов пробных обработок.

По каналам обратной связи в АСУ режимами резания должна поступать информация о фактическом значении параметров технических ограничений (силе, моменте, мощности) и/или фактической скорости изнашивания (и состоянии) режущей кромки инструмента. Исследования показали, что:

- скорость изнашивания, в основном, определяется температурой на передней и задней поверхностях режущего клина;

- для каждого сочетания материалов заготовки и инструмента, при работе на любой подаче существует скорость резания, которой соответствует минимальная скорость изнашивания;

- сочетаниям параметров режима резания (S и V_m), обеспечивающих для данной пары материалов заготовки и инструмента минимальное значение относительного поверхностного износа $h_{o.n}$, соответствует постоянная температура резания θ_m (рис. 8.21).

$$h_{o.n} = 100 \cdot h / (L \cdot S) \text{ (мкм/(100 см}^2\text{))},$$

где h – износ, накопленный за определенный промежуток времени; L – путь, пройденный инструментом в материале за тот же отрезок времени; S – подача.

Температура резания оценивается по термо-ЭДС (E) естественной термопары, образуемой материалами заготовки и режущей пластины. Каждой паре материалов заготовки и инструмента соответствует своя градуировочная кривая. Значение температуры θ_m (или соответствующего значения E) можно определить не только с помощью трудоемких стойкостных испытаний (рис. 8.21), но и косвенным способом.

Так, исследования показали, что θ_m может быть равна: температуре начала рекристаллизации материала заготовки; температуре провала пластичности материала заготовки; температуре максимального электросопротивления материала заготовки; температуре точек Кюри для инструментального материала; температуре, соответствующей равенству температур на передней и задней гранях режущего клина; температуре, соответствующей максимальному значению амплитуды электромагнитного излучения, которое возникает при облучении нагретой пластины инструментального материала лазером, работающим в режиме

коротких импульсов; температуре, соответствующей максимальному значению $d\theta/dv$. Данная информация позволяет существенно снизить трудоемкость экспериментов для определения значения θ_m .

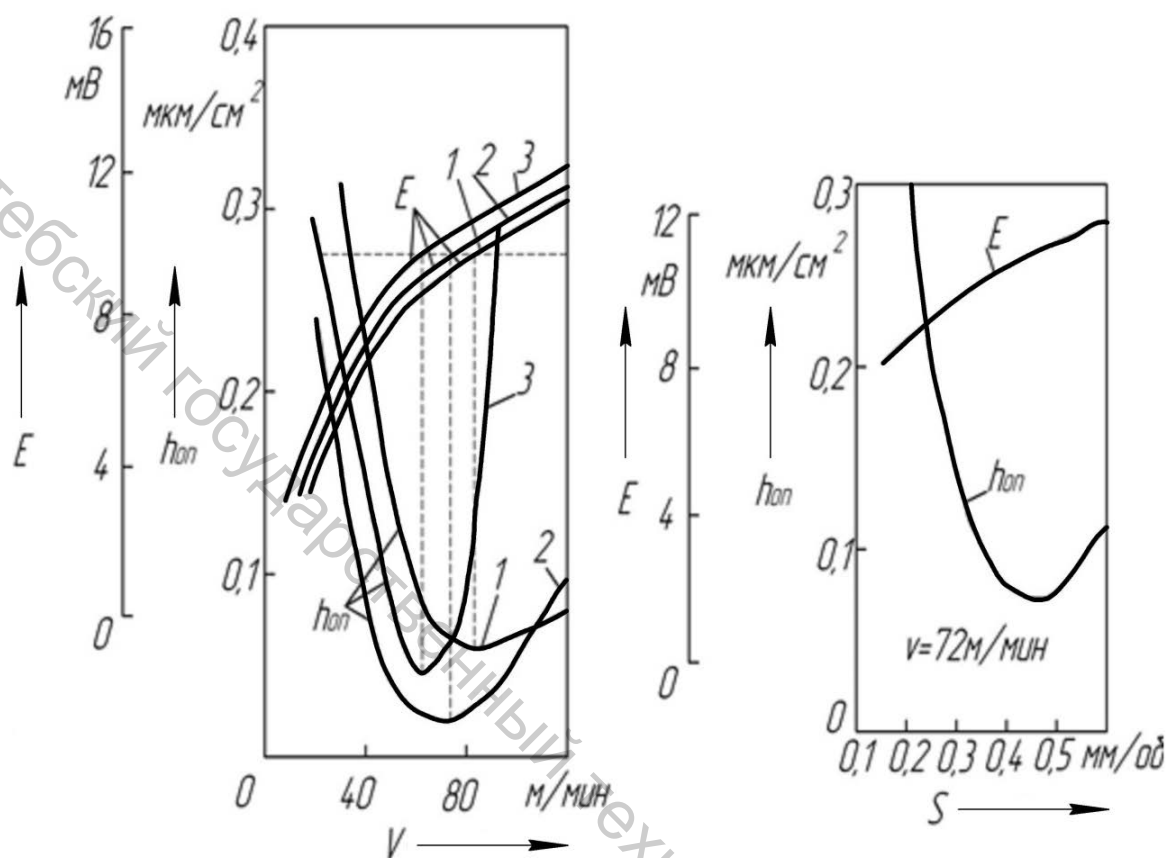


Рисунок 8.21 – Зависимость термо-ЭДС E и относительного износа $h_{o,n}$ от скорости резания и подачи:
1 – $S = 0,03$ мм/об; 2 – $S = 0,06$ мм/об; 3 – $S = 0,12$ мм/об

Температура резания θ_m является оптимальной по размерной стойкости инструмента, но не является оптимальной по экономическому критерию. Чтобы определить температуру резания $\theta_{opt.э}$, оптимальную по экономическому критерию, необходимо подставить в модель приведенных затрат указанные ниже зависимости температуры от скорости резания и стойкости от температуры резания:

$$\theta = \theta_m \cdot (V / V_m)^r; \quad T = T_m \cdot (\theta_m / \theta)^k. \quad (8.64)$$

Тогда, приравняв нулю $d\Pi_3/d\theta$, получим:

$$\theta_9 = \theta_m \cdot (T_m / ((r \cdot k - 1)(t_{c.u} + 3_u / E)))^{1/k}, \quad (8.65)$$

где $r = 0,3 \dots 0,5$; $k = 11 \dots 12$. Расчеты показали, что оптимальная по экономическому критерию температура $\theta_9 = (1,02 \dots 1,12) \cdot \theta_m$.

Полученная любым из указанных выше способов информация о значении θ_m может быть использована в автоматической системе стабилизации (АСС), схема которой показана на рисунке 8.22.

Сигнал термо-ЭДС (E), пропорциональный фактической температуре резания, и сигнал задающего устройства ЗУ (уставка) $E_{онм}$, пропорциональный $\theta_{онм.э}$, сравнивается в устройстве сравнения СУ, и на усилитель $У$ передается сигнал $\Delta E = E_{онм} - E$. Исполнительное устройство привода ИУ изменяет частоту вращения шпинделя так и до тех пор, пока значение ΔE не станет равным нулю. Таким образом, на любой ступени поддерживается постоянная оптимальная скорость резания. При этом компенсируются вариации твердости заготовки. Использование АСС температуры обеспечивает повышение технологической производительности по сравнению с традиционным способом назначения частоты вращения заготовки по ее максимальному диаметру. Однако, по сравнению с методом оптимизации режимов резания, рассмотренном в параграфе 8.3, эффект повышения технологической производительности от применения АСС температуры не так высок (не более 5 %). Наиболее эффективны АСС температуры при торцевой обточке на токарно-карусельных станках заготовок со значительной разницей наружного и внутреннего диаметров.

Необходимость в стабилизации мощности возникает в случаях, когда в течение цикла условия работы инструмента существенно изменяются. Например, на фрезерно-отрезном станке, по мере врезания в заготовку, изменяется длина реза $L_{рез}$ (рис. 8.23 а), что приводит к существенному изменению нагрузки на инструмент и эффективной мощности (N) (рис. 8.23 б). На большей части пути резания (L) с постоянной подачей возможности инструмента и станка недоиспользуются. Система автоматической стабилизации мощности, схема которой показана на рисунке 8.23 в, так изменяет подачу (рис. 8.23 г), чтобы эффективная мощность привода главного движения была постоянной. Для этого значение N , определенное измерительным преобразователем (датчиком) мощности ИПМ, сравнивается в устройстве сравнения СУ с сигналом задающего устройства ЗУ, а исполнительное устройство ИУ так и до тех пор изменяет подачу, пока разность $\Delta N = N_{онм} - N$ не станет равной нулю.

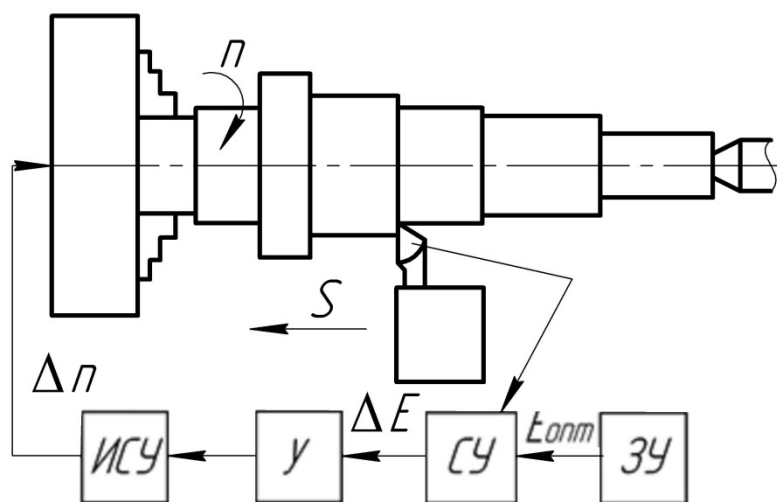


Рисунок 8.22 – Схема автоматической системы стабилизации температуры резания

Аналогичная система может быть использована для управления подачей на станках для глубинного шлифования пазов. Она особенно эффективна, когда длина паза $L \leq 2L_{вр}$, где $L_{вр}$ – длина врезания. Расчеты показали, что в таком случае технологическая производительность возрастает на 25...40 %.

Среди самоприспосабливающихся систем (СПС) наиболее распространенными являются *системы экстремального регулирования (СЭР)*. Они осуществляют автоматический поиск и поддержание на требуемом уровне такого значения регулирующего воздействия (v и/или S), при котором критерий оптимальности достигает максимального или минимального значения. На основании зависимостей (8.8), (8.64) и (8.65) легко получаем выражение для экономического критерия оптимизации J :

$$J = \frac{1 + (\theta / \theta_{опт.э})^k / (r \cdot k - 1)}{V \cdot S}.$$

С увеличением скорости резания V и подачи s , с одной стороны, непосредственно уменьшается значение критерия оптимальности, но, с другой стороны, это ведет к увеличению температуры резания θ и, следовательно, к увеличению J . Значит, существует такая совокупность значений V и S , при которой J принимает минимальное значение.

СЭР токарного станка, схема которой показана на рисунке 8.24, обеспечивает автоматическую минимизацию критерия оптимальности J за счет подсистемы стабилизации температуры (управление подачей) и поиска такой частоты вращения шпинделя, при которой эффективная

мощность, а, следовательно, и пропорциональная ей технологическая производительность (Vs) будут максимальными.

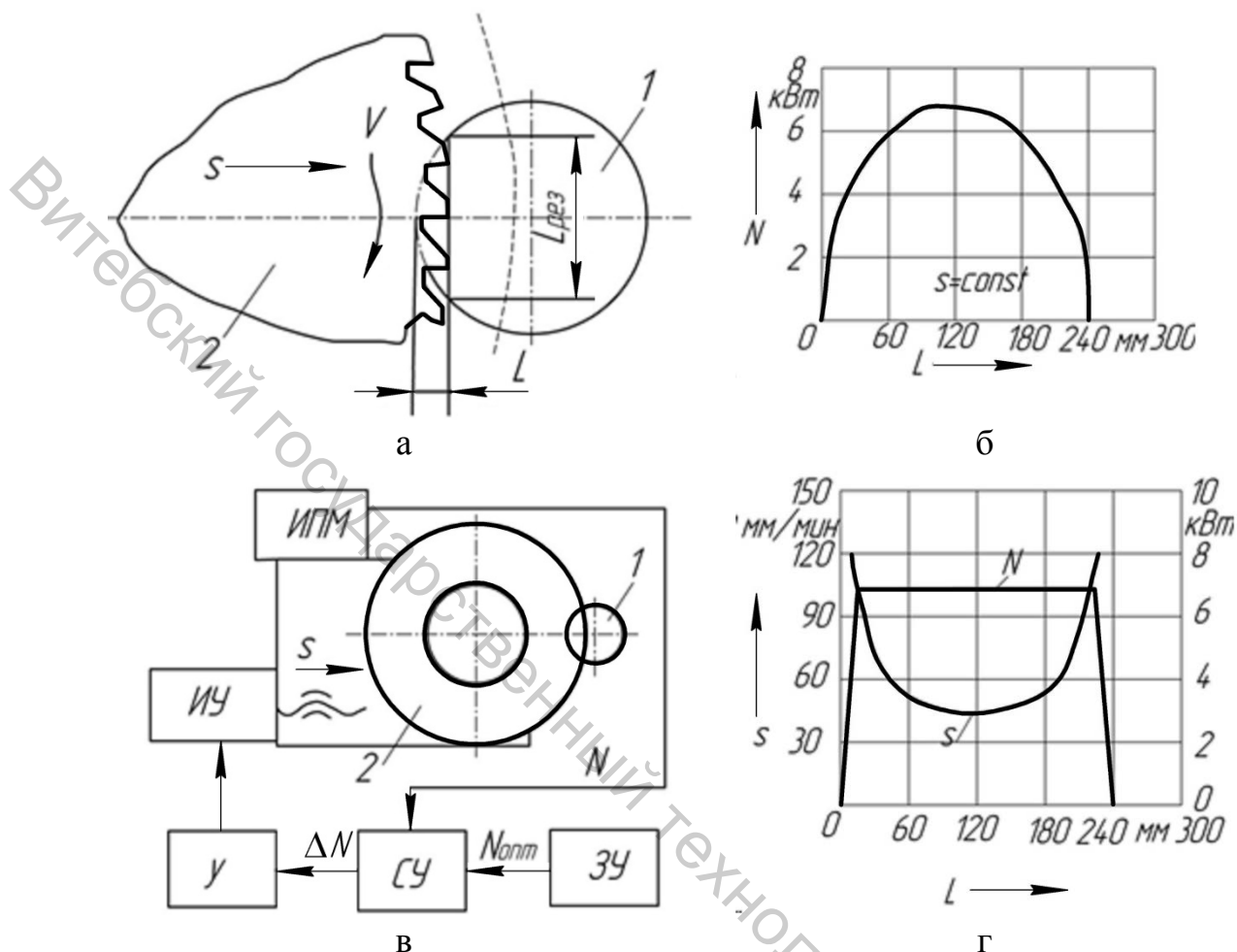


Рисунок 8.23 – Схема автоматической стабилизации мощности фрезерно-отрезного станка

На станке имеется отдельный привод главного движения ($Пр1$) и отдельный привод подачи ($Пр2$). Подсистема стабилизации температуры в устройстве сравнения $СУ2$ сравнивает сигнал E , пропорциональный фактической температуре резания, с сигналом задающего устройства $ЗУ$, а его исполнительное устройство $ИСУ2$ изменяет подачу, поддерживая равенство $\theta = \theta_0$.

Подсистема поиска по сигналам генератора импульсов $ГИ$ с помощью измерительного преобразователя мощности $ИПМ$ замеряет фактическую мощность резания N_i , соответствующую i -му такту $ГИ$. Этот сигнал передается в запоминающее устройство $ЗнУ$ и устройство сравнения $СУ1$. В момент подачи N_i в $ЗнУ$, содержащееся в нем предыдущее значение N_{i-1} передается в $СУ1$, где сравнивается с N_i . Получен-

Кроме поиска методом последовательных шагов, применяемого в рассмотренной СЭР, используют метод «золотого сечения» (рис. 8.12) и метод поиска по дискретам (рис. 8.11).

Использование сигналов вибрационного смещения и/или виброакустической эмиссии для диагностики состояния режущей кромки инструмента и автоматической оптимизации режима резания является развивающимся и перспективным направлением в технологии машиностроения. Исследования показали, что по мере изнашивания инструмента растет амплитуда относительного вибросмещения инструмента и дисперсия амплитудного распределения сигналов виброакустической эмиссии. А мода амплитудного распределения сигналов виброакустической эмиссии (A) может быть параметром, характеризующим стойкость инструмента (рис. 8.25). Графики на этом рисунке доказывают достаточную информативность этого параметра.

8.10 Оптимизация показателей алгоритма управления рабочим циклом врезного шлифования

8.10.1 Ограничения производительности при шлифовании

Производительность шлифования ограничивается: характером затупления шлифовального круга, допустимой упругой деформацией технологической системы, температурой в подповерхностном слое шлифуемой поверхности и заданным значением показателя шероховатости Ra [1–5, 98–101].

В зависимости от кода твердости шлифовального круга H_k , скорости на его рабочей поверхности $V_{кр}$ и удельной радиальной силы шлифования P_y / B (B – ширина шлифования) шлифовальный круг может работать в одном из трех режимов: 1) режим полного самозатачивания, 2) режим частичного самозатачивания и 3) режим затупления. Предпочтительным при точном шлифовании является режим частичного самозатачивания. Для заданных значений H_k и $V_{кр}$ по справочнику можно подобрать такое значение P_y / B , которое обеспечит приемлемый режим работы шлифовального круга.

Максимально допустимую упругую деформацию можно определить по следующей модели

$$y_m = 0,04 + TA / (0,5 + 3 \cdot TA),$$

где TA – допуск на размер шлифуемой поверхности.

Тогда получаем модель силового ограничения производительности:

при круглом шлифовании

$$V_{rm} = k \cdot y_m, \text{ где } k = K_p \cdot j / (\pi \cdot d \cdot B).$$

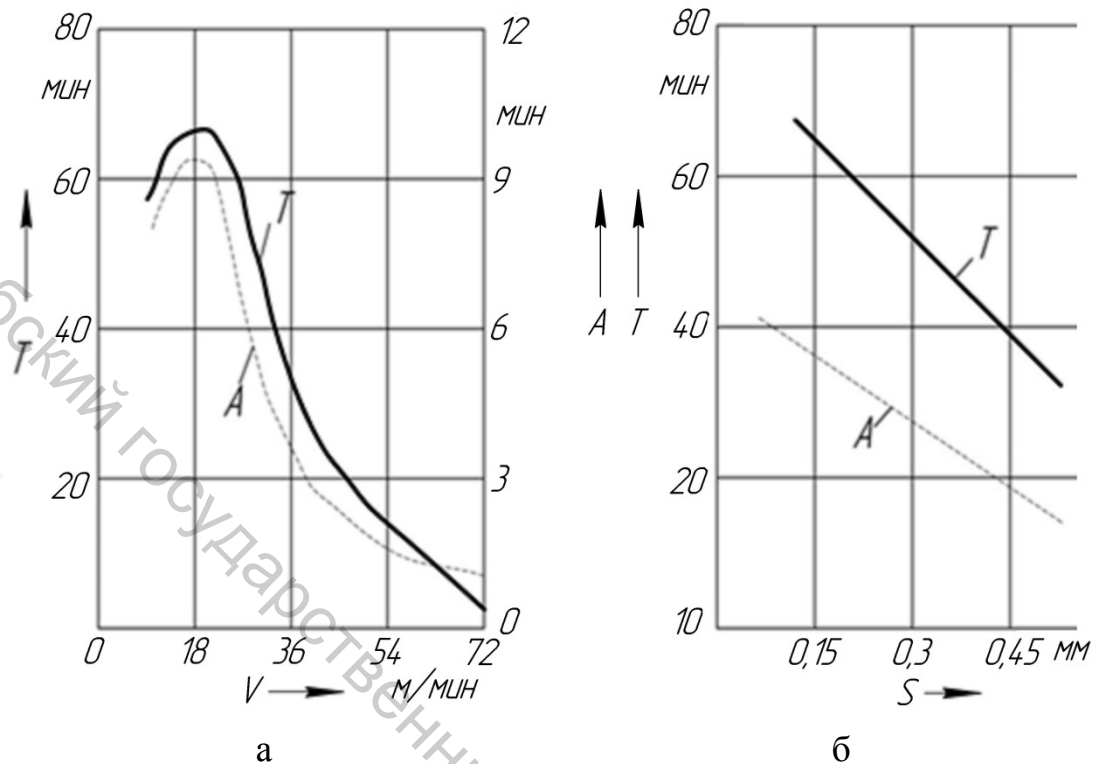


Рисунок 8.25 – Зависимость стойкости T инструмента и сигнала, пропорционального моде A амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии при точении:
а – от скорости резания, б – подачи

при плоском шлифовании

$$a_m = y_m / Y, \text{ где } Y = B \cdot V_{ze} / (j \cdot K_p).$$

На рисунке 8.26 показана зависимость глубины дефектного слоя (прижога) h_δ от объемной производительности $Q > Q_0$ при шлифовании «острым» (сразу после правки) шлифовальным кругом (1) и затупившимся шлифовальным кругом (2). Если $Q \leq Q_0$, то прижога не будет, т.е. $h_\delta = 0$. Аналогичной будет зависимость h_δ от линейной производительности V_p и глубины плоского шлифования a . В первом приближении эти зависимости можно считать линейными. Тогда для круглого шлифования при $V_r > V_{r0}$

$$h_\delta = K_\delta \cdot (V_r - V_{r0}), \text{ при } V_r \leq V_{r0}: h_\delta = 0.$$

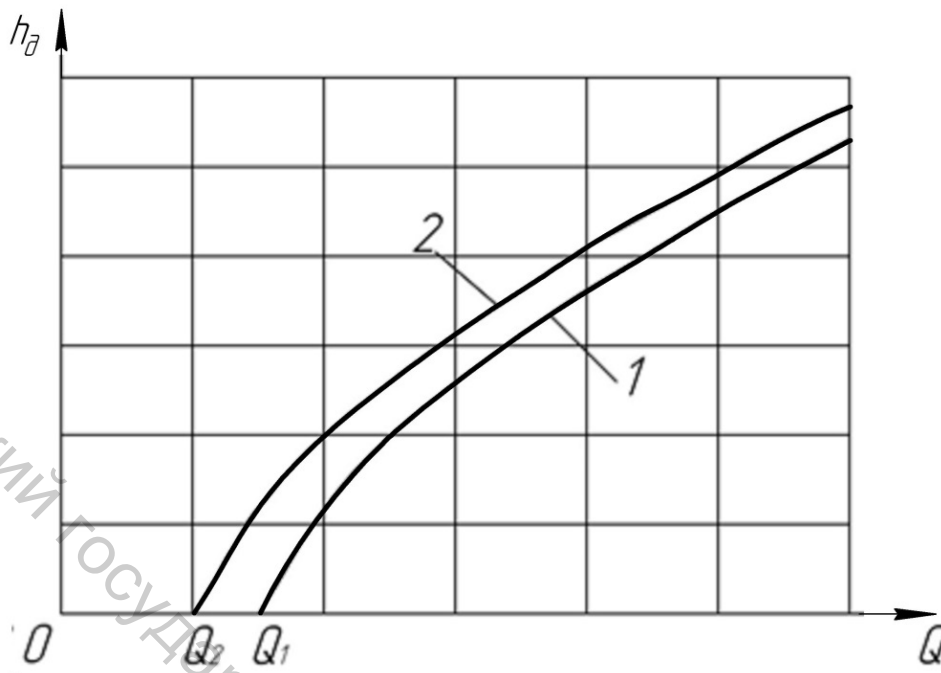


Рисунок 8.26 – Зависимость глубины прижога от объемной производительности

Чтобы на шлифованной поверхности не было прижога, необходимо шлифовать так, чтобы в любой момент рабочего цикла глубина дефектного слоя h_d была меньше или равна оставшейся части припуска Π . То есть

$$\Pi \geq K_d \cdot (V_r - V_{r0}), \text{ или } V_r \leq V_{r0} + \Pi / K_d.$$

Последнее выражение будет моделью теплового ограничения производительности шлифования.

Зависимость показателя шероховатости Ra от линейной производительности круглого шлифования V_r отражается следующей эмпирической моделью

$$Ra = Ra_{ok} + K_R \cdot V_r.$$

С другой стороны, согласно схеме, показанной на рисунке 8.27 припуск, удаляемый на заключительном этапе рабочего цикла, должен быть больше оставшегося показателя Rz .

То есть

$$\Pi \geq 0,008 \cdot (Ra - Ra_n),$$

где Ra и Ra_n – соответственно текущее и назначенное значение показателя шероховатости. Тогда из двух последних моделей получаем модель ограничений производительности по показателю шероховатости.

$$V_r \leq V_{rok} + 125 \cdot \Pi / K_R, \text{ где } V_{rok} = (Ra_n - Ra_0) / K_R.$$

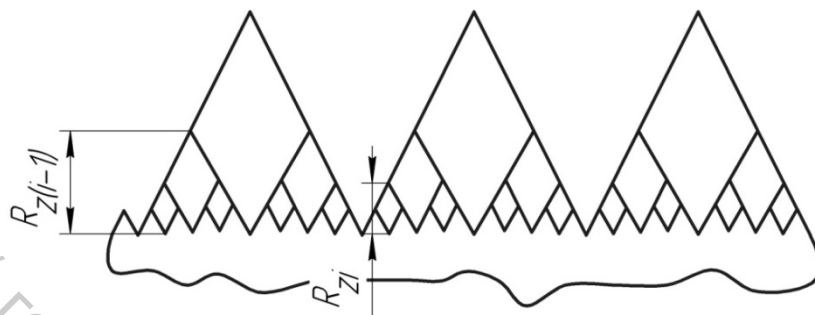


Рисунок 8.27 – Схема формирования модели ограничений производительности по шероховатости

На рисунке 8.28 показана схема ограничений производительности при круглом врезном шлифовании, где Π_0 – полный припуск, $\Pi_1 = K_\delta \cdot (V_{rm} - V_{r0})$, $\Pi_R = K_R \cdot K_\delta \cdot (V_{r0} - V_{rok}) / (125 \cdot K_\delta - K_R)$.

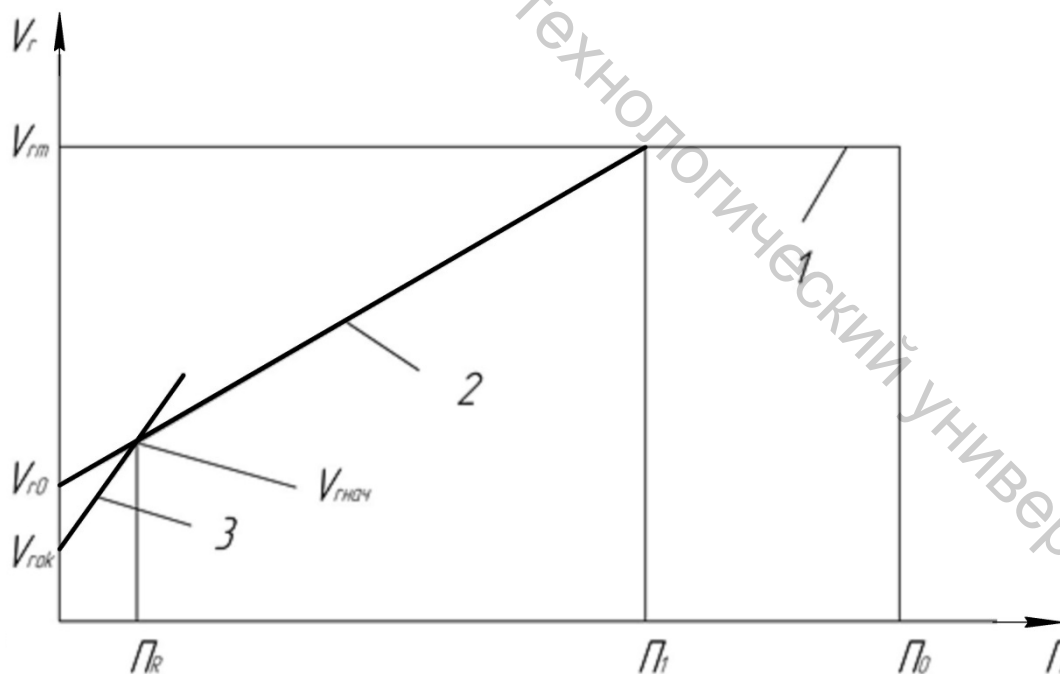


Рисунок 8.28 – Схема ограничений производительности при круглом шлифовании:

1 – силовое ограничение; 2 – тепловое ограничение; 3 – ограничение по показателю шероховатости

Аналогично получается модель ограничений при плоском врезном шлифовании.

8.10.2 Граничный алгоритм управления рабочим циклом

Управление радиальной подачей s при этом должно быть таким, чтобы линейная производительность V_r (глубина плоского шлифования a) точно соответствовала ограничениям при любом значении оставшегося припуска Π .

Рабочий цикл круглого шлифования состоит из этапов: ускоренного врезания с радиальной подачей S_b , предварительного шлифования с постоянной радиальной подачей S_1 , чистового шлифования с переменной радиальной подачей S_2 и отделочного шлифования с переменной подачей S_3 .

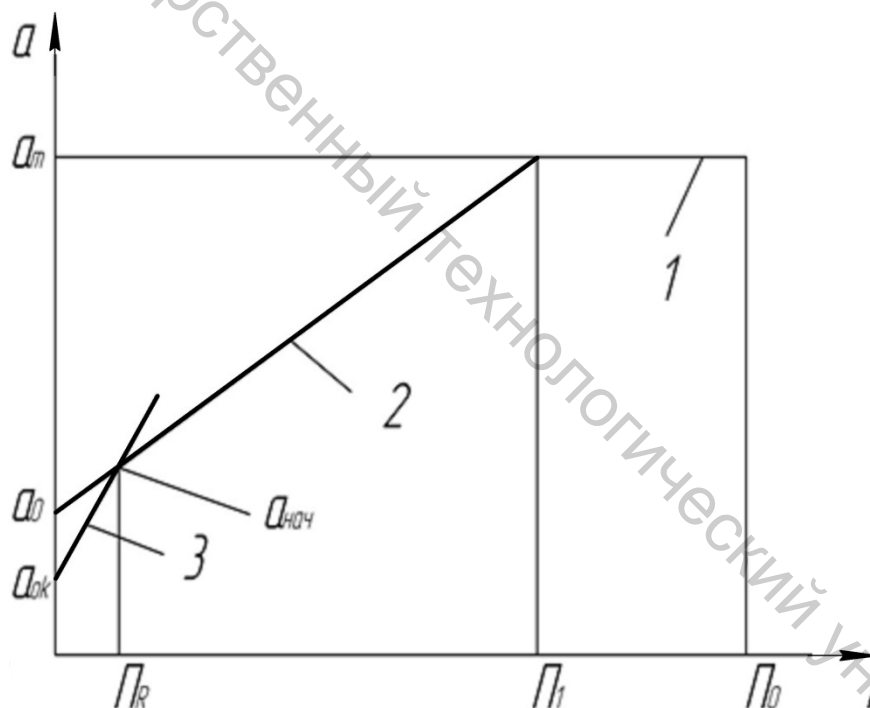


Рисунок 8.29 – Схема ограничений производительности при плоском шлифовании

Эффективность ускоренного врезания можно охарактеризовать коэффициентом относительного сокращения времени на предварительное шлифование $K_t = 1 - t_{1\epsilon} / t_{1\bar{\epsilon}}$, где $t_{1\epsilon}$ и $t_{1\bar{\epsilon}}$ — затраты времени на предварительное шлифование соответственно с врезанием и без него.

Значение $t_{1\bar{\epsilon}}$ можно определить из следующей модели методом итерации.

$$t_{1\delta} = \Pi_{1c} / S_1 + [1 - \exp(-k \cdot t_{1\delta})] / k ,$$

где начальное значение $t_{1\delta} = \Pi_{1c} / S_1$, а Π_{1c} – часть припуска, удаленная на этапе предварительного шлифования.

Значение K_t определяется согласно следующей модели

$$K_t = 1 - \frac{\frac{\Pi_{1c}}{S_1} + \frac{1}{k} \cdot \left[1 - (K_s - 1) \ln \left(\frac{K_s}{K_s - 1} \right) \right]}{t_{1\delta}} ,$$

где $K_s = S_g / S_1$.

Расчеты согласно последним моделям приведены на рисунке 8.30.

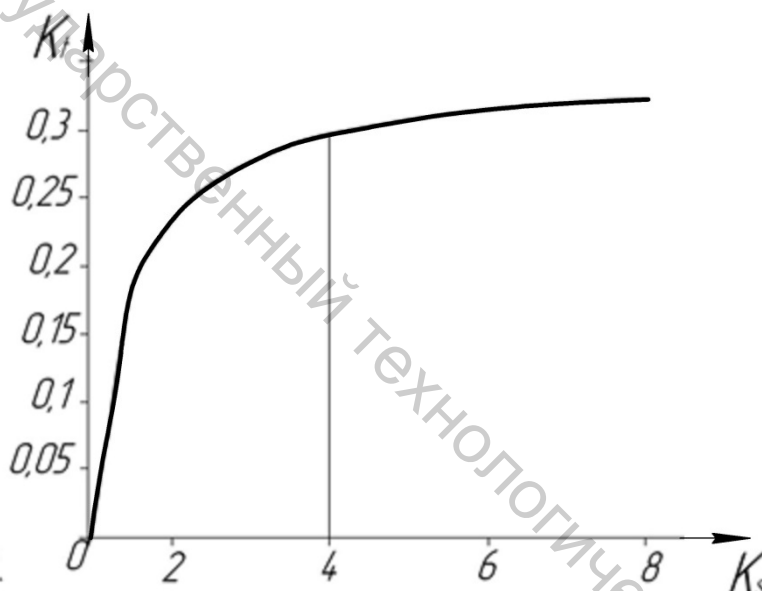


Рисунок 8.30 – Зависимость коэффициента относительного сокращения времени от коэффициента ускорения подачи на этапе врезания

График на этом рисунке показывает, что увеличение $K_s > 4$ неэффективно. Действительно увеличение K_s с 4 до 8 дополнительно увеличивает производительность всего этапа на 2,5 %. Поэтому в дальнейшем принимаем:

$$S_g = 4 \cdot S_1 . \quad (8.66)$$

Затраты времени на врезание и припуск, удаленный за это время, можно определить по следующим моделям:

$$t_{\theta} = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{K_s}{K_s - 1}\right) \quad \text{и} \quad \Pi_{\theta c} = \frac{K_s \cdot V_{rm}}{k} \cdot \left[\ln\left(\frac{K_s}{K_s - 1}\right) - \frac{1}{K_s} \right].$$

Если подставим $K_s = 4$, то получим:

$$\tau_{\theta} = \ln(4/3)/k = 0,2877/k, \quad \Pi_{\theta c} = 0,1507 \cdot V_{rm} / k. \quad (8.67)$$

$$S = V_r + \frac{1}{k} \cdot \frac{dV_r}{dt}.$$

Учитывая, что по определению

$$V_r = \frac{d\Pi_c}{dt},$$

получаем

$$S = V_r \cdot \left(1 + \frac{1}{k} \cdot \frac{dV_r}{d\Pi_c} \right). \quad (8.68)$$

На участке теплового ограничения ($\Pi_1 - \Pi_2$)

$$V_r = V_{r0} + \Pi / K_{\theta} = V_{r0} + (\Pi_1 - \Pi_c) / K_{\theta} = V_{rm} - \Pi_c / K_{\theta}. \quad (8.69)$$

Следовательно,

$$\frac{dV_r}{d\Pi_c} = -\frac{1}{K_{\theta}}.$$

Подставляя это значение производной в (8.68) с учетом (8.69), получим

$$S_2 = (V_{rm} - \Pi_c / K_{\theta}) \cdot (1 - 1/(k \cdot K_{\theta})). \quad (8.70)$$

Аналогично для участка ограничения по шероховатости ($\Pi_R - 0$)

$$S_3 = (V_{r_{нна}} - 125 \cdot \Pi_c / K_R) \cdot (1 - 125/(k \cdot K_R)). \quad (8.71)$$

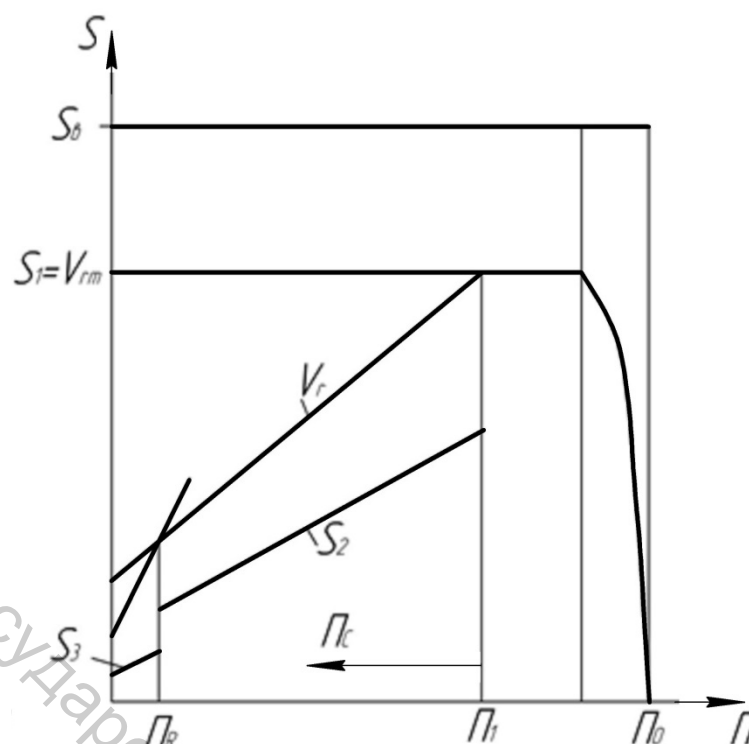


Рисунок 8.31 – Схема изменения подачи при реализации граничного алгоритма управления ($k \cdot K_\partial > 1$ и $k \cdot K_R > 125$)

8.11 Вопросы для самоконтроля

1. Какие Вам известны классы показателей эффективности?
2. Дайте определение понятию «технологическая производительность».
3. Изобразите график зависимости производительности операции от технологической производительности.
4. Дайте определение понятию «индекс производительности».
5. Дайте определение понятию «индекс эффективности».
6. Запишите формулу для определения приведенных затрат.
7. Назовите два уровня задач оптимизации.
8. Какими группами параметров можно характеризовать технологический процесс?
9. Дайте определение понятию «функция цели».
10. Какие технико-экономические задачи выбора параметров режима резания решаются при параметрической оптимизации?
11. Запишите модель процесса резания для решения оптимизационных задач параметрической оптимизации.
12. Запишите модель ограничений по шероховатости для шлифования с продольной подачей.

13. Запишите модель ограничения обработки по упругой деформации.

14. Изобразите график, отражающий области допустимых значений скорости и подачи при точении, ограниченных характеристиками станка.

15. Как вывести модели критерия оптимизации показателей режимов резания для элементарного и инструментального перехода?

16. Запишите выражение для определения стойкости, оптимальной по критерию максимальной производительности.

17. Запишите модель изменения скорости резания в случае торцового точения с постоянной подачей и глубиной.

18. Как определить модель приведенных затрат в случае торцового точения?

19. Как определить модель приведенных затрат в случае точения ступенчатой поверхности при постоянной частоте вращения с постоянной подачей и глубиной?

20. Запишите выражение для оценки эффективности по основному времени при точении ступенчатой поверхности при постоянной частоте вращения с постоянной подачей и глубиной.

21. Запишите выражение для функции цели при точении стали твердосплавным резцом с учетом затрат на электроэнергию.

22. Приведите математическую модель для определения оптимальной скорости фрезерования с учетом затрат на электроэнергию.

23. Изобразите варианты блочных переходов.

24. Какие схемы замены затупившихся инструментов возможны при обработке многоинструментными наладками?

25. Запишите функцию цели обработки однородным блоком.

26. Запишите функцию цели для случая групповой схеме замены инструментов блока.

27. В чем особенность функции цели при обработке однородным блоком с общей минутной подачей?

28. Запишите функцию цели для оптимизации режима обработки неоднородным блоком инструментов с общими частотой вращения и подачей.

29. В чем суть метода поиска оптимума по дискретам с помощью чисел Фибоначчи?

30. Как формируется ряд чисел Фибоначчи?

31. Опишите алгоритм поиска оптимума с помощью чисел Фибоначчи на примере станка со ступенчатой коробкой скоростей.

32. Изобразите схемы поиска с помощью чисел Фибоначчи.

33. В чем суть метода поиска оптимальной частоты вращения (или минутной подачи) методом «золотого сечения»?

34. Опишите зависимость индекса производительности операции от уровня последовательной и параллельной концентрации переходов в операции.

35. Какие выводы можно сделать на основе анализа зависимости индекса производительности операции от уровня последовательной и параллельной концентрации переходов в операции?

36. Как определяется оперативное время при последовательном совмещении заготовок в операции.

37. Опишите зависимость индекса производительности от параметров условий последовательного совмещения заготовок.

38. Опишите зависимость индекса производительности от уровня концентрации переходов и параметров вспомогательных переходов в двухзонной периодической операции.

39. Изобразите схему изменения области допустимых значений из-за затупления инструмента.

40. Как стойкость инструмента зависит от номера переточки?

41. Приведите классификацию и принципы работы автоматических систем регулирования.

42. Как термо-ЭДС зависит от скорости резания и подачи?

43. Как определить температуру резания, оптимальную по экономическому критерию?

44. Обоснуйте необходимость стабилизации мощности.

45. Изобразите схему автоматической системы стабилизации температуры резания.

46. Изобразите схему автоматической стабилизации мощности фрезерно-отрезного станка.

47. В чем суть систем экстремального регулирования?

48. Опишите систему экстремального регулирования для токарного станка.

49. Запишите модель теплового ограничения производительности шлифования.

50. Запишите модели силового ограничения производительности при круглом и плоском шлифовании.

51. Запишите модель ограничений производительности шлифования по показателю шероховатости.

52. Изобразите схему ограничений производительности при круглом шлифовании.

53. Изобразите схему ограничений производительности при плоском шлифовании.

54. Из каких этапов состоит рабочий цикл круглого шлифования?

55. Изложите порядок формирования моделей подач при шлифовании.

56. Изобразите схему изменения подачи при реализации граничного алгоритма управления съемом припуска при шлифовании.

9 МЕТОДЫ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

9.1 Классификация научно-исследовательских работ и методов их организации

В зависимости от классификационных признаков выделяют различные виды научно-исследовательских работ (рис. 9.1). Наиболее распространенной и комплексной является классификация научно-исследовательских работ (НИР) на фундаментальные и прикладные. Фундаментальные исследования направлены на решение принципиально новых теоретических проблем, открытие новых законов, создание новых теорий. На их основе решаются многие прикладные задачи применительно к потребностям конкретных отраслей науки, техники и производства. Прикладные исследования представляют собой поиск и решение практических задач различных отраслей производства на основе результатов фундаментальных исследований [120].

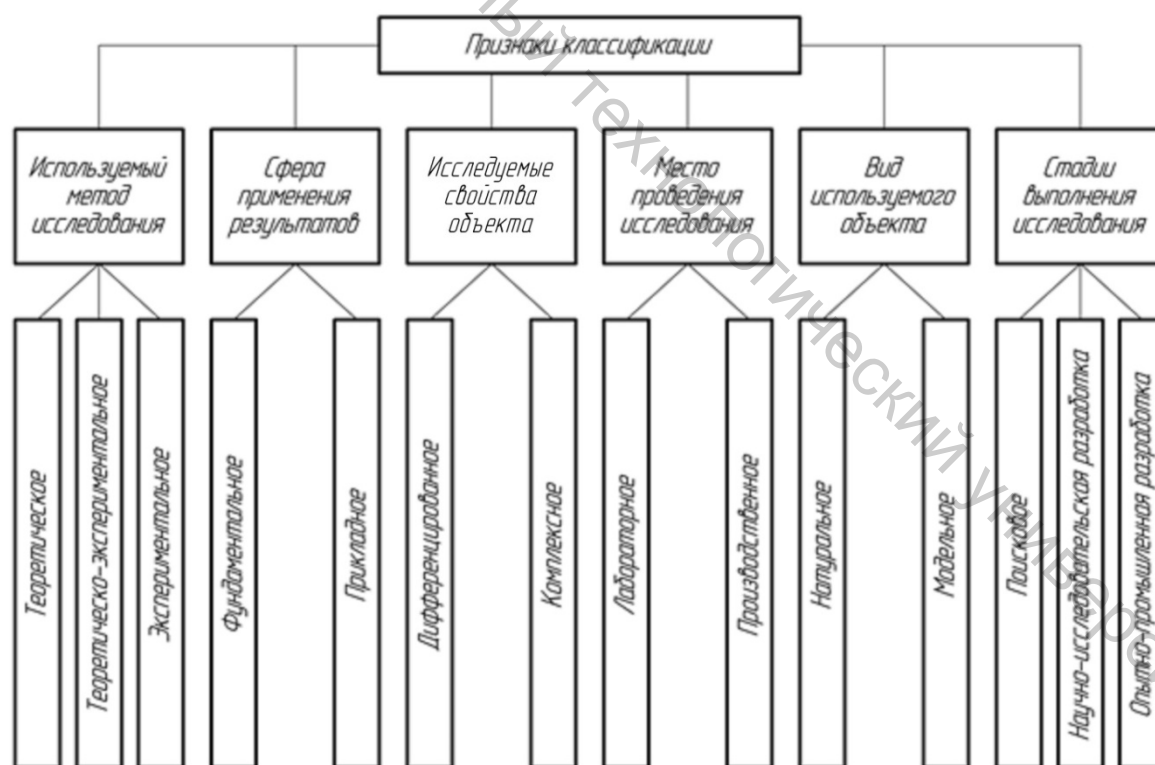


Рисунок 9.1 – Классификация видов научных исследований

В Республике Беларусь фундаментальные исследования проводятся в основном в институтах Академии наук, в учреждениях высшего об-

разования и финансируются государством. Прикладные исследования могут проводиться как в указанных организациях, так и на предприятиях. В странах Западной Европы значительный объем исследований выполняют научные центры, финансируемые крупными фирмами и корпорациями.

Метод исследования – это способ получения знаний и необходимой информации. Для различных видов и этапов научного исследования (познания) применяют теоретические, теоретико-экспериментальные и экспериментальные методы исследования.

9.2 Основные уровни методов научных исследований

Разнообразные методы научного познания условно подразделяются на уровни – *эмпирический, экспериментально-теоретический, теоретический и метатеоретический* [120–125].

Методы эмпирического уровня – наблюдение, сравнение, счет, измерение, анкетный опрос, собеседование, тесты, метод проб и ошибок и т.д. – конкретно связаны с изучаемыми явлениями и используются на этапе формирования научной гипотезы.

Методы экспериментально-теоретического уровня – эксперимент, моделирование, гипотетический, исторический и логический методы – помогают исследователю обнаружить те или иные достоверные факты, объективные проявления в протекании исследуемых процессов. С помощью этих методов производится накопление фактов, их перекрестная проверка. Следует при этом подчеркнуть, что факты имеют научно-познавательную ценность только в тех случаях, когда они систематизированы и между ними вскрыты неслучайные зависимости, определены причины и следствия. Таким образом, задача выявления истины требует не только сбора фактов, но и правильной их теоретической обработки. Первоначальная систематизация фактов и их анализ проводятся уже в процессе наблюдений, бесед, экспериментов, ибо эти методы включают в себя не только акты чувственного восприятия предметов и явлений, но и их отбор, классификацию, осмысление воспринятого материала, его фиксирование.

Методы теоретического уровня – абстрагирование, идеализация, формализация, анализ и синтез, индукция и дедукция, аксиоматика, обобщение и т.д. На теоретическом уровне производится логическое исследование собранных фактов, выработка понятий, суждений, делаются умозаключения. В процессе этой работы соотносятся ранние научные представления с возникающими новыми. Научное мышление освобождается от эмпирической описательности, создает теоретические обобщения. Таким образом, новое теоретическое содержание знаний

надстраивается над эмпирическими знаниями. На теоретическом уровне познания широко используются логические методы сходства, различия, сопутствующих изменений, разрабатываются новые системы знаний, решаются задачи дальнейшего согласования теоретически разработанных систем с накопленным новым экспериментальным материалом.

К методам метатеоретического уровня относят диалектический метод и метод системного анализа. С помощью этих методов исследуются сами теории и разрабатываются пути их построения, изучается система положений и понятий данной теории, устанавливаются границы ее применения, способы введения новых понятий, обосновываются пути синтеза нескольких теорий.

Охарактеризуем кратко некоторые из названных методов. *Наблюдение* – способ познания объективного мира, основанный на непосредственном восприятии предметов и явлений с помощью органов чувств без вмешательства в процесс со стороны исследователя. *Сравнение* – установление различия между объектами материального мира или нахождение в них общего, осуществляемое как с помощью органов чувств, так и с помощью специальных устройств. *Счет* – нахождение числа, определяющего количественное соотношение однотипных объектов или их параметров, характеризующих те или иные свойства. *Измерение* – физический процесс определения численного значения некоторой величины путем сравнения ее с эталоном.

Эксперимент – одна из сфер человеческой практики, в которой подвергается проверке истинность выдвигаемых гипотез или выявляются закономерности объективного мира. Экспериментальное изучение объекта или явления имеет определенные преимущества по сравнению с наблюдением, так как позволяет исследовать явления в «чистом виде» с помощью устранения побочных факторов; при необходимости испытания могут повторяться и организовываться так, чтобы исследовать отдельные свойства объекта, а не их совокупность. *Моделирование* – метод познания, заключающийся в замене изучаемого объекта его аналогом (моделью), по которому определяются характеристики объекта оригинала. Различают физическое и математическое моделирование. В случае физического моделирования в качестве аналога объекта выступает другой, менее сложный объект (так, контактные явления, происходящие при зацеплении зубчатых колес, можно изучать на примере контакта роликов). *Математическое* (интеллектуальное, абстрактное) *моделирование* – метод познания, опирающийся на математические (символьные) модели, учитывающие основные факторы, свойства изучаемого объекта. При интеллектуальном моделировании используют такие приемы, как абстрагирование и формализация.

Абстрагирование – это мысленное отвлечение от несущественных свойств, связей, отношений предметов и выделение нескольких сторон, интересующих исследователя. Оно, как правило, осуществляет-

ся в два этапа: на первом определяются несущественные свойства, связи и т.д., на втором исследуемый объект заменяют другим, более простым, представляющим собой упрощенную модель, сохраняющую главное в сложном. Выделяют следующие виды абстрагирования: отождествление (образование понятий путем объединения предметов, связанных по своим свойствам, в особый класс), изолирование (выделение свойств, неразрывно связанных с предметами), конструктивизация (отвлечение от неопределенности границ реальных объектов) и, наконец, допущение потенциальной осуществимости. *Формализация* – отображение объекта или явления в знаковой форме какого-либо искусственного языка (математики, химии и т.д.) и обеспечение возможности исследования. Гипотетический метод познания предполагает разработку научной гипотезы на основе изучения сущности (физической, химической и т.п.) исследуемого явления с помощью описанных выше способов познания и затем формулирование гипотезы, составление расчетной схемы алгоритма (модели), ее изучение, анализ, разработку теоретических положений.

Как в социально-экономических и гуманитарных науках, так и в естественных и технических исследованиях, часто используют *исторический метод познания*. Этот метод предполагает исследование возникновения, формирования и развития объектов в хронологической последовательности, в результате чего исследователь получает дополнительные знания об изучаемом объекте (явлении) в процессе их развития.

При *логическом методе познания* основное внимание уделяется не хронологии изменения объекта, а логичности, принципам этого развития, исключению второстепенных случайных обстоятельств. Абстрагирование и формализация являются начальными этапами и чисто теоретических исследований, мыслительной деятельности. При этом под мышлением понимается опосредованное и обобщенное отражение в мозгу существенных свойств, причинных отношений и закономерных связей между объектами, явлениями.

В процессе мыслительной деятельности выделяются следующие этапы и их результаты: *понятие, суждение, умозаключение*. *Понятие* – мысль, отражающая существенные и необходимые (неотъемлемые) признаки предмета (явления). Абстрактные понятия, представляемые зачастую в виде определений (дефиниций), – кирпичи, из которых возводится здание науки. *Суждение* – мысль, в которой посредством связи понятий что-либо утверждается или отрицается. *Умозаключение* – процесс мышления и его результат, при котором одни суждения (заклучения) выводятся из других (посылок). Умозаключение отражает и выражает способности абстрактного теоретического мышления вырабатывать новые знания на базе известных. Это основа исследовательской деятельности. *Классификация* – разделение явлений (понятий) на определенные группы (классы), позволяющие увидеть специфику явлений, их разнообразие, свойства, связи и зависимости, общее и специфическое и по-

средством этого проникнуть в сущность. *Обобщение* (индуцирование) – логическая операция, заключающаяся в том, что для некоторой группы явлений находится новое, более широкое по объему понятие, отражающее общность свойств этих явлений на уровне нового знания о них; средство образования новых понятий. Для обобщения должно существовать основание, т.е. свойство, позволяющее сгруппировать однородные явления. *Доказательство* – интеллектуальная деятельность, состоящая в установлении некоторого суждения посредством его вывода из других суждений, истинность которых полагается установленной до ее начала и независимо от нее, а также посредством подтверждения фактами и практической деятельностью. *Дедукция* (дедуктивное умозаключение) характеризуется направленностью мышления исследователя от общего к частному, выводением свойств составных частей исследуемого объекта из общих закономерностей, свойственных целому (объекту); направление, близкое (однонаправленное) анализу. *Анализ* состоит в том, что объект исследования, рассматриваемый как система, мысленно расчленяется на составные части (признаки, свойства, отношения и др.) для изучения каждого из них в отдельности и выявления роли и места в системе, вклада выделенных частей в целое. Основа анализа – абстракция. *Индукция* (наведение, индуктивное умозаключение) характеризуется направленностью мышления исследователя от частных к общему, выводением свойств исследуемого объекта из свойств его составных частей; направление, обратное дедукции и близкое синтезу. *Синтез* сводится к представлению исследуемого объекта как целого, хоть и состоящего из условно выделенных составных частей (деятельность, обратная анализу). Основа синтеза – системное сведение частей к целому.

Одним из методов научного познания является *аналогия*, посредством которой достигается знание о предметах и явлениях на основании того, что они имеют сходство с другими. Степень вероятности (достоверности) умозаключений по аналогии зависит от количества сходных признаков у сравниваемых явлений (чем их больше, тем большую вероятность имеет заключение, и она повышается, когда связь выводного признака с каким-либо другим признаком известна более или менее точно). Аналогия тесно связана с моделированием или модельным экспериментом. Если обычный эксперимент непосредственно взаимодействует с объектом исследования, то в моделировании такого взаимодействия нет, так как эксперимент проводится не с самим объектом, а с его заменителем.

Важным условием успеха научного исследования является применение *системного подхода* при выполнении исследования. Системный подход предполагает комплексное исследование объектов и процессов в совокупности с параметрами внешней среды. Изучать системы нужно как единое целое с общих позиций с учетом функционирования и взаи-

модействия всех ее элементов. Рассмотренные выше методы исследования являются инструментами *системного анализа*.

9.3 Методы научных исследований в технологии машиностроения

9.3.1 Теоретические и теоретико-экспериментальные исследования

В технологии машиностроения, как и в других областях, используются теоретические, экспериментальные и теоретико-экспериментальные исследования.

Теоретические исследования заключаются в установлении физической картины процесса и ее математическом описании. Точность математической модели при этом, как правило, зависит от правильности и достоверности физического представления процесса. Развитие науки в целом, как правило, приводит к уточнению, а иногда и к новому представлению физической картины процесса, а поэтому и к уточнению и изменению математических моделей. Хорошим и наглядным примером этого в технологии машиностроения является теоретическое описание формирования шероховатости при механической обработке [7].

В начале XX в. процесс формирования шероховатости при механической обработке представлялся как микронеровности, оставляемые на обработанной поверхности радиусной вершиной резца (рис. 9.2 а), а следовательно, и для описания формируемой шероховатости использовали уравнение Чебышева

$$Rz = \frac{S^2}{8r},$$

где S – подача, мм/об; r – радиус при вершине резца.

В середине XX в. проф. А. И. Исаев уточнил процесс формирования микронеровностей поверхности при точении. Он установил, что в зависимости от значений и соотношений S , r , φ и φ_1 на формирование шероховатости наряду с радиусом при вершине резца могут оказывать влияние главный и вспомогательный углы в плане φ и φ_1 (рис. 9.2 б).

Научные исследования по контактному взаимодействию твердых тел, интенсивно развиваемые во второй половине XX в., позволили в 70-е гг. XX столетия по-новому взглянуть на процесс формирования шероховатости поверхности при механической обработке. Во-первых, установлено единство процесса формирования шероховатости поверхности при всех методах механической обработки (лезвийная, алмазно-

абразивная и ОУО). Во-вторых, дана более полная картина процесса формирования микронеровностей поверхности при ее обработке.

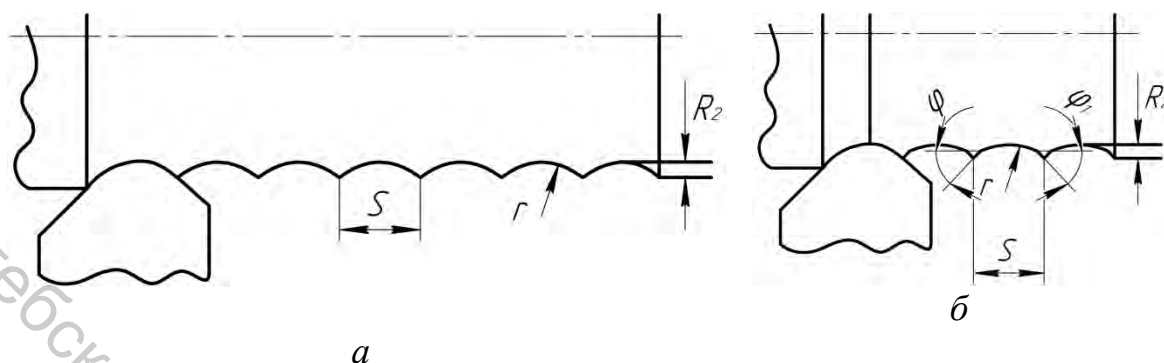


Рисунок 9.2 – Исходная схема для расчета R_z :

а – по Чебышеву (начало XX в.), б – по Исаеву (середина XX в.)

Научные исследования по динамике технологических систем, интенсивно развиваемые в конце XX в. в Донском государственном техническом университете проф. В. Л. Заковоротным, Саратовском государственном техническом университете проф. Б. М. Бржозовским и в Таганрогском государственном радиотехническом университете проф. А. А. Колесниковым, позволяют значительно уточнить составляющие профиля шероховатости и волнистости от динамических автоколебаний.

Аналогичным образом теоретические исследования проводились и в других направлениях технологии машиностроения, в частности при расчете погрешности установки цилиндрических деталей в призмах от чистой геометрической составляющей в середине XX в. до учета контактных и собственных деформаций призмы в 70–80-е гг. XX в.; в технологической наследственности – от наследования точности размеров деталей при их последовательной обработке в середине XX в. до наследования отдельных параметров шероховатости и структуры поверхности от получения заготовки до эксплуатации детали в конце XX в.

Анализ теоретических исследований в области технологии машиностроения показывает, что физическое представление процессов в основном базируется на использовании физики, химии и механики, а в математическом описании применяются геометрия, математическая статистика, теория вероятности, дифференциальные и интегральные исчисления. Наряду с классическим проведением теоретических исследований в технологии машиностроения применяется и метод теоретического обобщения результатов экспериментальных исследований или накопившегося опыта.

Такое обобщение связей в технологии машиностроения позволило установить рассеяние размеров обрабатываемых деталей от случайных погрешностей, использовать математические законы для описания их

рассеяния (нормальное распределение, равновероятности Рэля, Симпсона), определив области их приложения, создать технологическую теорию графов и применить синергетический подход.

Теоретико-экспериментальные исследования заключаются в экспериментальной проверке и уточнении научных теоретических зависимостей и в опытном определении отдельных составляющих и коэффициентов, которые на данный период времени не могут быть рассчитаны теоретически, например опытным определении коэффициента линейного расширения материала инструмента при расчете погрешности обработки, обусловленной температурными деформациями, или экспериментальном определении формируемого радиуса режущей кромки резца при точении, используемого в теоретической зависимости для расчета параметров шероховатости.

9.3.2 Разновидности и задачи экспериментальных исследований. Общая схема эксперимента

Экспериментальные исследования (эксперименты) проводятся практически во всех областях науки и техники. Задачей эксперимента может быть проверка либо ранее выдвинутых гипотез, либо установленных ранее неизвестных закономерностей [120–125]. Эксперимент включает в себя ряд опытов, в процессе каждого из которых происходит воспроизведение исследуемого явления в определенных условиях проведения эксперимента при возможности регистрации его результатов. Условия опытов представляют собой значения факторов или независимых переменных величин $x_1, \dots, x_k$, по предположению влияющих на объект исследования. В результате опыта устанавливается значение отклика, или зависимой переменной y , по предположению зависящей от факторов $x_1, \dots, x_k$. По данным эксперимента определяется зависимость математического ожидания отклика $\bar{y}$ от факторов – функция отклика:

$$\bar{y} = f(x_1, \dots, x_k; \theta_1, \dots, \theta_m),$$

где $\theta_1, \dots, \theta_m$ – параметры модели.

Геометрическое представление функции отклика называется поверхностью отклика (рис. 9.3).

Координатное пространство, по осям которого отложены факторы, есть факторное пространство. Для удобства рассмотрения поверхность отклика может быть представлена на факторной плоскости (x_1, x_2) линиями постоянных значений функций отклика (аналогично изображению рельефа местности на географических картах) (рис. 9.4). Поверхность отклика может иметь вид вершины (рис. 9.4 а). Такая поверхность соот-

ветствует области факторов, где расположен максимум величины y . Очевидно, аналогичный вид имеют линии постоянного уровня и в случае минимума функции y . Их называют кратером. Поверхность, изображенная на рисунке 9.4 б, характеризует плавное возрастание функции отклика с уменьшением фактора x_1 и увеличением фактора x_2 . Такую поверхность принято называть стационарным возвышением.

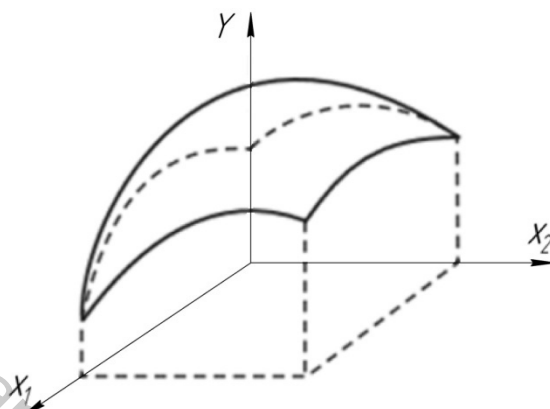


Рисунок 9.3 – Поверхность отклика

На рисунке 9.4 в показана поверхность, называемая хребтом. Его вершина соответствует наибольшим значениям функции отклика. Аналогично располагаются линии постоянных значений y и в случае оврага, дно которого соответствует минимальным значениям функции отклика. Наконец, поверхность может иметь вид седла (рис. 9.4 г). На двух участках этой поверхности наблюдается возрастание функции отклика, а на двух других – убывание. Следует отметить, что на практике встречаются поверхности отклика и с более сложной конфигурацией. Если число влияющих факторов больше двух, то для изображения поверхности отклика пользуются ее двумерными сечениями. С этой целью каждый раз фиксируют все факторы, кроме двух.

По числу переменных эксперименты могут быть классифицированы на одно- и многофакторные: при однофакторных экспериментах изменению и регистрации подлежит один фактор (одна независимая переменная), при многофакторных – несколько факторов (независимых переменных).

Объекты исследований в экспериментах можно разделить на статистические и детерминированные, управляемые и неуправляемые. В статистических объектах отклик (случайная зависимая переменная y) находится в стохастической связи со случайными или неслучайными факторами $x_1, \dots, x_k$. Примером связи первого вида является зависимость характеристик качества готовых деталей от характеристик качества заготовок при их обработке, а примером связи второго вида – зависимость характеристик качества готовых деталей от режимов обработки. Стоха-

стическая связь проявляется в том, что изменение независимой величины приводит к изменению закона распределения зависимой случайной величины. Простейшим ее видом является корреляционная связь, при которой с изменением независимой переменной изменяется математическое ожидание или среднее значение отклика.

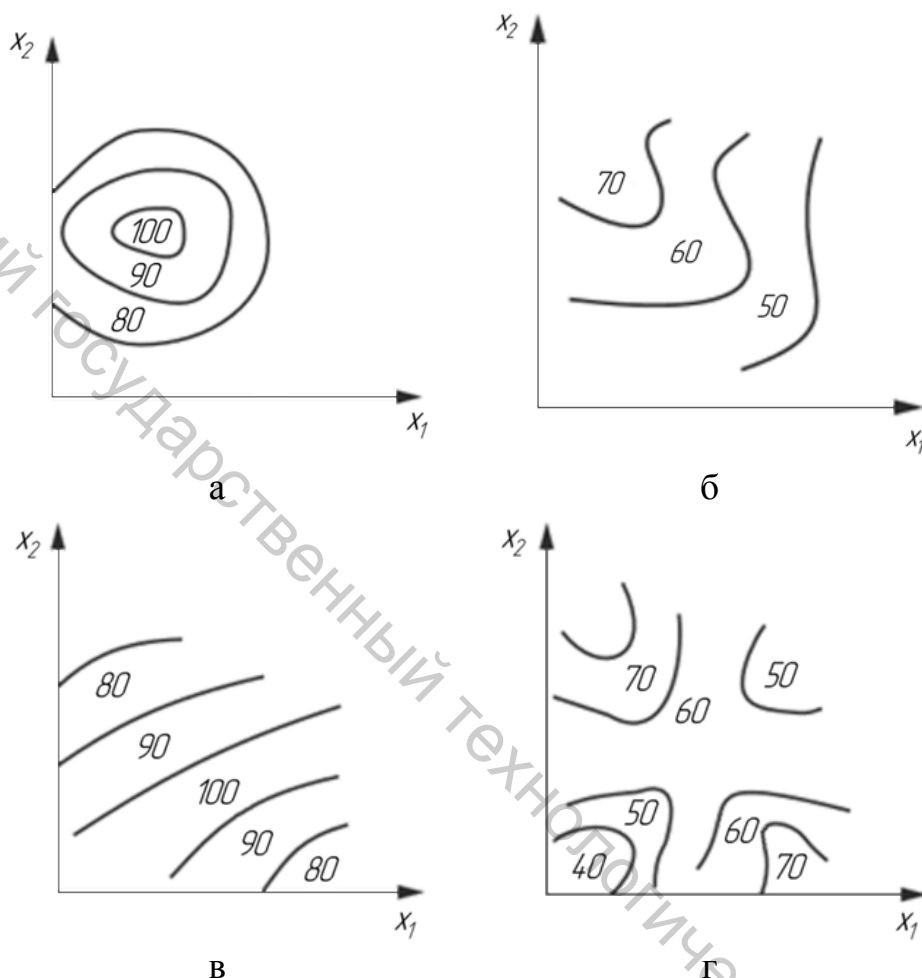


Рисунок 9.4 – Типы поверхностей отклика

Для детерминированных объектов характерны функциональные связи между неслучайными величинами, когда каждому значению аргумента соответствует строго определенное значение функции. Управляемость объекта определяется возможностью воспроизведения на нем результатов опыта. Для проверки этого свойства можно провести эксперимент при некоторых выбранных уровнях исследуемых факторов, а затем повторить его несколько раз через неравные промежутки времени и сравнить результаты. Воспроизводимость результатов характеризуется разбросом их значения. Если он не превышает некоторой заранее заданной величины (требований к точности эксперимента), то объект удовлетворяет требованию воспроизводимости результатов эксперимента.

В зависимости от *способа выбора уровней факторов* (значений независимых переменных) эксперименты делятся на пассивные и активные. Эксперимент, в котором уровни факторов в каждом опыте и порядок опытов задаются исследователем, называется активным. Эксперимент, при котором уровни факторов в каждом опыте регистрируются исследователем, но не задаются, называется пассивным.

Экспериментальные исследования классифицируют также на качественные (с целью установления только факта существования явления) и количественные, лабораторные и промышленные.

В последнее время все большее распространение получают *автоматизированные системы научных исследований* (см. далее).

Экспериментальное исследование включает ряд следующих друг за другом этапов (рис. 9.5), сопровождающихся проверками соблюдения условий их эффективности. Как видим, исследование объекта состоит из повторяющихся циклов, причем от цикла к циклу растет объем знаний об объекте, а выдвигаемые гипотезы все более приближаются к действительности.

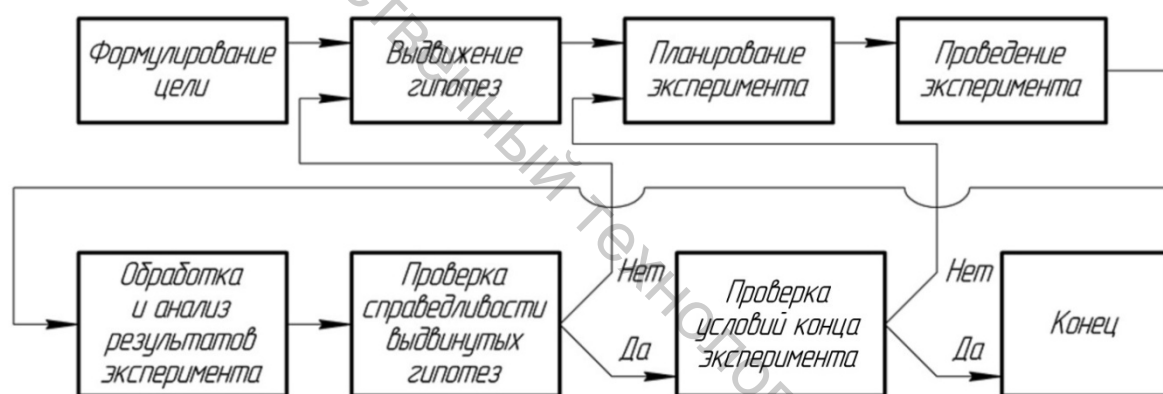


Рисунок 9.5 – Стратегия построения математической модели

9.3.3 Классификация переменных в технологических экспериментах

План эксперимента – общий термин, определяющий набор инструкций по проведению эксперимента, в которых указываются последовательность работы, характер и величина изменений переменных и даются указания о проведении повторных экспериментов [120–125]. *Переменная* – любая варьируемая физическая величина. Если варьирование переменной производится независимо от других величин, то имеем независимую переменную. Если же физическая величина изменяется при изменении одной или большего числа независимых, то она называется зависимой. Если некоторая физическая величина, оказывающая

влияние на эксперимент, изменяется случайным образом и ее нельзя контролировать, то она является внешней переменной. Независимые переменные, в свою очередь, можно разделить на управляемые и неуправляемые. Взаимодействие указанных переменных с исследуемым объектом, внутренняя структура (природа) которого нам неизвестна, лучше всего изобразить с помощью черного ящика. Это понятие введено в кибернетике Н. Винером с целью изучения сложности. Его построение основано на принципе: оптимальное управление возможно при неполной информации. Ясная формулировка этого факта является важнейшим достижением кибернетики. Данный принцип лежит в основе и методов планирования эксперимента. Итак, все переменные, определяющие состояние объекта независимо от их физико-химической сущности, можно разделить на четыре группы (рис. 9.6).

В группу $Z=(z_1...z_{n1})$ входят факторы, которые характеризуют качество сырья или промежуточных продуктов и не допускают целенаправленного изменения в ходе исследования. К этим факторам можно отнести физико-механические (твердость, прочность, структура и т.п.) и технологические (припуск, точность размеров и формы и т.п.) характеристики заготовок и деталей на промежуточных операциях механической обработки. Информация о значениях переменных этой группы получается в результате измерений, анализов и т.п.

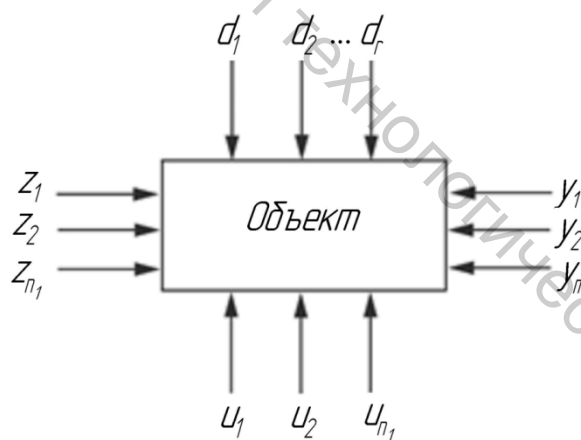


Рисунок 9.6 – Схематическое представление объекта

Группу $U=(u_1...u_{n2})$ образуют управляемые факторы процесса. С их помощью реализуется заданный технологический режим. К ним относятся режимы обработки, конструктивные, точностные и прочностные характеристики оборудования и оснастки. На значение управляемых факторов накладываются технологические ограничения, т.е. ограничивается область их допустимых значений. Переменные группы Z и U можно объединить в группу $X=(x_1...x_n)$ – группу контролируемых входных или независимых переменных процесса.

Переменные группы $Y=(y_1...y_m)$ часто называют выходными. К их числу относятся величины, характеризующие экономическую эффективность процесса, а также технико-экономические параметры, технологические свойства и характеристики готовых продуктов: себестоимость, трудоемкость, точность обработки, шероховатость поверхности и т.п. Часто задача состоит в том, чтобы определять зависимость между входными и выходными переменными процесса или найти значения входных факторов, обеспечивающие достижение экстремума (max и min) некоторой выходной переменной (возможно при каких-то ограничениях). Это означает, что переменные данной группы часто выступают в качестве целевых величин при оптимизации процессов.

Группу $D=(d_1...d_r)$ образуют неконтролируемые факторы. Они характеризуют действующие на объект возмущения, которые не могут быть измерены количественно (неконтролируемые изменения химического состава, физико-механических свойств и технологических характеристик заготовок и полуфабрикатов, колебания напряжения в электрической сети, температуры среды, изменения свойств оборудования и оснастки во времени и др.). Воздействие неконтролируемых факторов, медленно изменяющихся во времени, приводит к дрейфу характеристик объекта.

9.3.4 Классический эксперимент

Несмотря на свою неэкономичность, *классический эксперимент* еще не изжил себя в технологии машиностроения. Его применяют, когда неизвестна физическая картина процесса. Он позволяет более правильно и точно установить взаимосвязь функции с аргументом, а следовательно, провести детальный анализ этой взаимосвязи, например зависимость шероховатости обработанной поверхности от скорости резания (рис. 9.7; см. главу 4).

Анализ полученной взаимосвязи показал, что первоначальное увеличение высотных параметров шероховатости с увеличением скорости резания обусловлено процессом наростообразования на вершине резца, максимальная величина которого достигается при $v=20... 40$ м/мин. При дальнейшем увеличении скорости резания наростообразование снижается и происходит уменьшение высотных параметров шероховатости обработанной поверхности. При скоростях резания $v > 70$ м/мин наростообразование отсутствует и R_z является минимальной для данных условий обработки. Дальнейшее увеличение скорости резания оказывает незначительное влияние на изменение высотных параметров шероховатости обработанной поверхности за счет пластического оттеснения ма-

териала в зоне резания. Классический эксперимент с успехом применяется для проверки достоверности теоретических зависимостей.

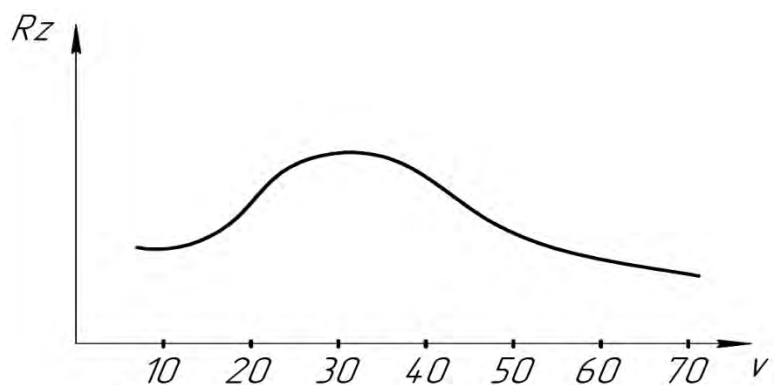


Рисунок 9.7 – Зависимость Rz от скорости резания v

9.3.5 Дисперсионный и корреляционно-регрессионный анализы

После классических экспериментальных исследований и получения графических и линейных однофакторных математических зависимостей в начале XX в. технология машиностроения пришла к математическим методам планирования экстремальных экспериментов (середина XX в.) и нейросетевому моделированию (конец XX в.) [126–132].

При большом числе исследуемых факторов классическое проведение экспериментов требует больших затрат времени и средств, поэтому во второй половине XX в. при проведении экспериментов все шире применяются различные математические методы: *дисперсионный и корреляционно-регрессионный анализы, планирование экстремальных экспериментов, нейросетевое моделирование* и др.

Дисперсионный анализ, как правило, применяется для установления степени влияния различных факторов на исследуемый параметр, в частности технологических условий на параметры качества обработанных поверхностей деталей машин.

Сущность дисперсионного анализа заключается в разложении суммы квадратов отклонений выходного параметра от среднего на компоненты, соответствующие предположенным входным факторам.

При *однофакторном эксперименте* каждому значению входного фактора x соответствует определенное значение выходного параметра y . Для большей достоверности эксперимента на каждом уровне x проводится несколько повторений (u), т.е. получается $N=iu$ экспериментов, результаты которых заносятся в таблицу 9.1.

Таблица 9.1 – Результаты экспериментальных данных

Характеристика	Уровни входного фактора			
	x_1	x_2	$\dots$	x_i
Выходной параметр	y_{11}	y_{21}	$\dots$	y_{i1}
	y_{12}	y_{22}	$\dots$	y_{i2}
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	y_{1u}	y_{2u}	$\dots$	y_{iu}

Условные обозначения: y_{11} – значение выходного параметра y при первом уровне входного фактора x в первом повторении; y_{12} – значение выходного параметра y при первом уровне входного фактора x во втором повторении и т.п.

Математическую модель однофакторной системы можно представить следующим образом:

$$y_{iu} = \mu + x_i + \varepsilon_{u(i)},$$

где μ – генеральное среднее выходного параметра системы, т.е. величина выходного параметра, не зависящая от изменения входного фактора; x_i – член, учитывающий влияние изменения уровня входного фактора; $\varepsilon_{u(i)}$ – случайная ошибка в u -м повторении на i -м уровне.

Обычно предполагают, что $\varepsilon_{u(i)}$ не зависит от уровня входного фактора x .

Вводятся условные обозначения:

$y_{..}$ – среднее значение выходного параметра по всей таблице;

$y_{i.}$ – среднее значение y в i -м столбце.

Тогда

$$y_{iu} - y_{..} = (y_{i.} - y_{..}) + (y_{iu} - y_{i.}).$$

Возведя обе части в квадрат и суммировав по всем i и u , получим:

$$\sum_{i=1}^i \sum_{u=1}^u (y_{iu} - y_{..})^2 = \sum_{i=1}^i \sum_{u=1}^u (y_{i.} - y_{..})^2 + \sum_{i=1}^i \sum_{u=1}^u (y_{iu} - y_{i.})^2.$$

Член с перекрестным произведением исчезает, поскольку сумма отклонений любой группы опытов от их среднего равна нулю.

Кратко можно записать:

$$S_0 = S_{xi} + S_{от}.$$

Сумма квадратов S_0 вычисляется по $N-1$ значениям выходного параметра, т.е. имеет $N-1 = i(i-1)$ степеней свободы.

S_{xi} определяется по отклонениям i средних от общего среднего, и потому ей соответствует $i-1$ степеней свободы.

$S_{от}$ вычисляется по N отклонениям от i выборочных средних и потому имеет $N-1 = i(u-1)$ степеней свободы.

$\frac{S_{xi}}{i-1} = \mu_i$ – средний квадрат, характеризующий изменчивость выходного параметра системы y_i под влиянием уровней (значений) фактора x .

$\frac{S_{от}}{i(u-1)} = S_{от}^2$ – средний квадрат, характеризующий изменчивость выходного параметра y_{ui} от случайных влияний.

По критерию Фишера определяется, влияет ли изменение входного фактора x на выходной параметр y по следующему выражению:

$$F = \frac{\mu_i}{S_{от}^2} > F_{1-\alpha[i-1]; i[u-1]},$$

где α – уровень значимости (0,05; 0,01); F – табличное значение.

При *двухфакторном эксперименте* каждый из входных факторов имеет несколько уровней: x_1 – i уровней, x_2 – j уровней. На каждом уровне проводится u испытаний. Таким образом, общее число испытаний $N = iju$. Математическая модель в этом случае:

$$y_{iju} = \mu + x_{1i} + x_{2j} + x_{1i}x_{2j} + \varepsilon_{u(ij)},$$

где x_{1i} x_{2j} – члены, учитывающие влияние факторов x_1 и x_2 при изменении их уровней; $x_{1i}x_{2j}$ – член, учитывающий совместное влияние факторов (их взаимодействие) и показывающий, насколько влияние фактора x_1 зависит от уровней фактора x_2 и, наоборот, насколько влияние фактора x_2 обусловлено уровнем фактора x_1 ; $\varepsilon_{u(ij)}$ – ошибка в u -м испытании.

При *трехфакторном эксперименте* математическая модель системы имеет вид:

$$y_{ijk} = \mu + x_{1i} + x_{2j} + x_{3k} + x_{1i}x_{2j} + x_{1i}x_{3k} + x_{2j}x_{3k} + x_{1i}x_{2j}x_{3k} + \varepsilon_{u(ij)},$$

где x_{1i} ; x_{2j} ; x_{3k} – члены, учитывающие влияние уровней соответствующих входных факторов; $x_{1i}x_{2j}$; $x_{1i}x_{3k}$; $x_{2j}x_{3k}$ – парные взаимодействия (первого порядка), учитывающие совместное влияние двух факторов; $x_{1i}x_{2j}x_{3k}$ – тройное взаимодействие (взаимодействие второго порядка), учитывающее, насколько влияние фактора x_1 зависит от влияния факторов x_2x_3 или насколько совместное влияние факторов x_2x_3 зависит от уровней фактора x_1 и т.п.

Соответственно для оценки влияния входных факторов на исследуемый параметр используют критерий Фишера.

Иногда проведение испытаний с повторениями затруднено в силу их трудоемкости и длительности. Достоверность экспериментов с одним повторением повышается, если они основаны на результатах дисперсионного анализа.

Например, при трех входных факторах x_1, x_2, x_3 соответственно имеются i, j, k уровней. На каждом уровне проведено по одному испытанию, общее число испытаний $N = ijk$.

Математическая модель такого трехфакторного эксперимента имеет вид:

$$x_{ijk} = \mu + x_{1i} + x_{2j} + x_{3k} + x_{1i}x_{2j} + x_{1i}x_{3k} + x_{2j}x_{3k} + \varepsilon_{(ijk)}.$$

Ошибка эксперимента в данном случае смещена со взаимодействием второго порядка. Обычно взаимодействия второго и выше порядков редко бывают значимы.

В технологии машиностроения часто используются строгие функциональные зависимости, сущность которых заключается в том, что какая-либо переменная определяется как однозначная функция одной ($y = f(x)$) или нескольких ($y = f(x_1, x_2, \dots, x_i)$) переменных, например зависимость между скоростью резания, числом оборотов и диаметром заготовки $v = \frac{\pi D_3 n}{1000}$.

Одновременно в технологической системе между ее выходным параметром (откликом) y и входными параметрами (независимые переменные) $x_1, x_2, \dots, x_i$ существует связь и другого рода, называемая стохастической (вероятностной), когда с изменением x меняется распределение y . Стохастические зависимости изучаются методами *корреляционно-регрессионного анализа*. Одним из важнейших показателей, оценивающих степень стохастической связи, является коэффициент корреляции. С помощью корреляционного анализа можно определить пределы, в которых с принятой вероятностью будет содержаться исследуемая величина y , если другие связанные с ней величины x_i получают определенные значения. Отыскание количественных зависимостей, характеризующих стохастические связи, является задачей регрессионного анализа. Зависимость средних значений y от x называется регрессией. Точное уравнение регрессии находят, зная истинные значения средних y для всех допустимых значений. Поскольку в практических исследованиях отдельные значения y не могут быть установлены точно, а допускают лишь приближенные оценки, связь между y и x_i выражают уравнением приближенной регрессии, оценивая при этом вероятность такого приближения.

В большинстве случаев очень трудно установить существующие функциональные связи, и тогда оказывается удобнее методами регрессионного анализа аппроксимировать их простыми математическими

функциями, т.е. построить функциональные модели связи, которые можно использовать для управления выходными параметрами системы [7, 126–132].

Простейшая форма связи между двумя переменными – линейная зависимость. Предположим, имеется определенное число пар наблюдений (y_i и x_i), где y_i – зависимая переменная или отклик (исследуемый выходной параметр системы) и независимая переменная (или входной параметр системы). По этим парам наблюдений можно построить прямую в виде:

$$\hat{y}_1 = b_0 + b_1 x_i,$$

где $\hat{y}_1$ обозначает предсказываемое уравнение регрессии значения отклика.

Значения коэффициентов b_0 и b_1 можно найти методом наименьших квадратов:

$$b_1 = \frac{\sum_1^i y_i x_i - \frac{(\sum_1^i y_i)(\sum_1^i x_i)}{i}}{\sum_1^i x_i^2 - \frac{(\sum_1^i x_i)^2}{i}},$$

$$b_0 = \frac{\sum_1^i y_i - b_1 \sum_1^i x_i}{i} = \bar{y} - b_1 \bar{x}.$$

В качестве меры тесноты связи между x_i и y_i может быть принято значение коэффициента корреляции R , называемого в случае исследования связи между двумя переменными коэффициентом парной корреляции, вычисляемым по формулам:

$$R = \sqrt{\frac{S_{\text{per}}}{S_0}} = \frac{\sum_1^i y_i x_i - \frac{(\sum_1^i y_i)(\sum_1^i x_i)}{i}}{\sqrt{\sum_1^i x_i^2 - \frac{(\sum_1^i x_i)^2}{i}} \sqrt{\sum_1^i y_i^2 - \frac{(\sum_1^i y_i)^2}{i}}},$$

$$R = \frac{\sum_1^i y_i x_i - \overline{y} \overline{x}}{(i-1)s_x s_y},$$

где $s_x s_y$ – соответственно средние квадратические отклонения независимой x и зависимой y переменных.

Уравнение связи коэффициента корреляции с угловым коэффициентом b_1 в уравнении регрессии: $b_1 = R s_y / s_x$.

Коэффициент корреляции может находиться в следующих пределах: $-1 \leq R \leq +1$. Когда коэффициент корреляции положительный, это значит, что с ростом значения x увеличивается y . Если коэффициент корреляции отрицательный, с ростом значения x уменьшается y (при функциональной связи между x и y , значение $R=1$; при отсутствии всякой связи $R=0$).

Если окажется, что найденный коэффициент корреляции удовлетворяет неравенству $|R| > R_{(1-\frac{\alpha}{2}):(i-1)}$, то его следует признать значимым (на уровне значимости α). Квантили R -распределения приведены в соответствии с принятым уровнем значимости и числом степеней свободы. Кроме проверки значимости коэффициентов регрессии b_0 и b_1 с помощью F -критерия существует также проверка по t -критерию Стьюдента.

В большинстве случаев нас интересуют доверительные интервалы для новых наблюдений $\bar{y}_m$ (предположим, что $\bar{y}_m$ – среднее из m новых наблюдений, m может быть равно 1, тогда $\bar{y}_m$ – единичное новое наблюдение) при некоторых фиксированных значениях x_k (независимая переменная или фактор). Доверительный интервал для таких наблюдений относительно значения $\hat{y}_k$ (значения, предсказанного уравнением регрессии при x_k):

$$\bar{y}_k = \hat{y}_k \pm t_{(1-\alpha/2):(i-2)} S_{\text{ост}} \sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{i} + \frac{\left(x_k - \frac{\sum_1^i x_i}{i}\right)^2}{\sum_1^i x_i^2 - \frac{(\sum_1^i x_i)^2}{i}}}.$$

Значимость уравнения регрессии определяется по критерию Фишера.

При анализе линейной регрессии типичны следующие ситуации. Линейная регрессия значима и адекватна, т.е. нет неадекватности – связь между зависимой y и независимой x переменными выражается выше-приведенным уравнением. Линейная регрессия незначима, но адекватна – изменение значения x не приводит к изменению величины y (во всех случаях $\hat{y} = \bar{y}$). Линейная регрессия значима, но неадекватна. Линейная регрессия незначима и неадекватна – в этих случаях необходимо исследовать уравнение связи между y и x в виде:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_i + b_2 x_i^2.$$

Параметры такой криволинейной зависимости находят из системы нормальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} ib_0 + b_1 \sum_1^i x_i + b_2 \sum_1^i x_i^2 &= \sum_1^i y_i \\ b_0 \sum_1^i x_i + b_1 \sum_1^i x_i^2 + b_2 \sum_1^i x_i^3 &= \sum_1^i y_i x_i \\ b_0 \sum_1^i x_i^2 + b_1 \sum_1^i x_i^3 + b_2 \sum_1^i x_i^4 &= \sum_1^i y_i x_i^2 \end{aligned} \right\}$$

Систему можно решить следующим образом. Вначале каждое уравнение делится на коэффициент при b_0 . Затем, вычитая из второго уравнения первое и из третьего второе, получаем систему из двух новых уравнений с двумя неизвестными. Каждое полученное уравнение снова разделим на коэффициент b_1 и, вычитая одно уравнение из другого, придем к уравнению с одним неизвестным. Правильность решения системы уравнений проверяем по уравнению:

$$\bar{y} = b_0 + b_1 \bar{x} + b_2 (\bar{x})^2,$$

$$\text{где } \bar{y} = \frac{\sum_1^i y_i}{i}, \bar{x} = \frac{\sum_1^i x_i}{i}, (\bar{x})^2 = \frac{\sum_1^i x_i^2}{i}.$$

Значимость уравнения регрессии оценивается так же, как и при линейной регрессии. Сумма квадратов S_{per} определяется как

$$S_{\text{per}} = b_0 \sum_1^i y_i + b_1 \sum_1^i y_i x_i + b_2 \sum_1^i y_i x_i^2 - \frac{(\sum_1^i y_i)^2}{i}.$$

Такая сумма имеет две степени свободы. Остаточная сумма квадратов имеет $i-3$ степени свободы. Если для каждого x_i имеется u повторений, то

$$S_{\text{per}} = b_0 \sum_1^i \sum_1^u y_{iu} + b_1 \sum_1^i \sum_1^u x_i y_{iu} + b_2 \sum_1^i \sum_1^u y_{ui} x_i^2 - \frac{(\sum_1^i \sum_1^u y_{iu})^2}{\sum_1^i U_i}.$$

Остаточная сумма квадратов $S_{\text{ост}} = S_0 - S_{\text{per}}$. Число степеней свободы $f_{\text{ост}}$ также определяется по разнице $f_{\text{ост}} = f_0 - f_{\text{per}}$. Проверка адекватности производится, как и в случае линейной регрессии.

Теснота связи при криволинейной зависимости оценивается с помощью индекса корреляции $L = \sqrt{\frac{S_{\text{per}}}{S_0}}$. Значение индекса корреляции с

коэффициентом парной корреляции изменяется в пределах от 0 до 1. Сравнение индекса корреляции с коэффициентом парной корреляции позволяет оценить, какая форма связи точнее отражает зависимость между изучаемыми переменными: линейная или криволинейная.

9.3.6 Планирование экстремальных экспериментов

С увеличением количества входных факторов для экономии времени и средств на проведение экспериментальных исследований в технологии машиностроения зачастую используют *метод планирования экстремальных экспериментов*. Сущность этого метода заключается в том, что экспериментальные исследования проводятся только при экстремальных (наибольших и наименьших) значениях входных факторов. Математически это является вполне обоснованным решением при линейных зависимостях. В случаях отсутствия прямой линейной зависимости, например степенной, прибегают к ее линеаризации с помощью логарифмирования, в том числе двойного и тройного. Этот метод нельзя использовать, если входной фактор не может иметь фиксированных независимых минимального и максимального значений при изменении других исследуемых входных факторов [7, 126–132].

При этом в зависимости от числа входных факторов и необходимой точности получаемой эмпирической зависимости может быть поставлен полный факторный эксперимент с числом опытов $N=2^n$ или неполный факторный эксперимент (дробная реплика) с числом опытов $N=2^{n-k}$.

Здесь n – число входных факторов, k – число частично взаимосвязанных входных факторов. При этом для проверки адекватности полученной математической модели число опытов N не должно быть меньше $(n+2)$. Для проведения исследований производится кодирование входных факторов и составляется матрица планирования экстремальных экспериментов.

Сущность кодирования заключается в том, чтобы при максимальном значении входного фактора его кодировочное значение было равно $+1$, а при минимальном -1 . Для этого могут быть использованы следующие зависимости:

– при линейной взаимосвязи

$$x = \frac{2v - v_{\max} - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}};$$

– при степенной взаимосвязи:

$$x = \frac{2 \ln v - \ln v_{\max} - \ln v_{\min}}{\ln v_{\max} - \ln v_{\min}}.$$

При степенной взаимосвязи для линеаризации при кодировании могут быть взяты как натуральные, так и десятичные логарифмы, а возможно, и двойное логарифмирование.

Матрица планирования полного факторного эксперимента представляет собой таблицу с перебором всевозможных сочетаний кодированных значений входных факторов. При этом написание 1, как правило, опускается. В правой части матрицы записывают значения исследуемого параметра.

Для проверки значимости входных факторов предусматривается повторение каждого опыта не менее 3 раз, для каждого из которых определяют кодированное значение исследуемого параметра (y_1, y_2, y_3), а затем его среднее значение $\bar{y}$. При логарифмировании и кодировании входных факторов $y = \ln Ra$, где Ra – исследуемый параметр.

Так, для трех входных факторов такая матрица имеет вид, представленный в таблице 9.2.

Таблица 9.2 – Матрица планирования полного трехфакторного эксперимента N^3

№ опыта	Входные факторы			Исследуемые параметры			
	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}$
1	+	+	+				
2	+	+	-				
3	+	-	+				
4	-	+	+				
5	+	-	-				
6	-	-	+				
7	-	+	-				
8	-	-	-				

С увеличением числа входных факторов иногда прибегают к дробным матрицам. Например, если исследуется влияние скорости – v , подачи – S , глубины резания – t , радиуса при вершине резца – r , главного угла в плане – φ и жесткости станка – j на параметры шероховатости поверхности при точении, то можно прибегнуть к дробной матрице типа $N = 2^{6-2} = 16$. При этом влияние главного угла в плане $\varphi(x_3)$ можно рассматривать как взаимосвязанное влияние подачи – $s(x_2)$ и радиуса при вершине резца $r(x_4)$, а жесткость станка $j(x_6)$ – как взаимосвязанное влияние $S(x_2)$, $t(x_3)$ и $r(x_4)$, т.е. $x_5 = x_2 x_4$, а $x_6 = x_2 x_3 x_4$. Тогда матрица планирования экспериментов будет иметь вид, соответствующий таблице 9.3.

Правильность составления матрицы проверяется, по условию, что в каждом столбце количество «+» должно быть равно количеству «-».

Последовательность проведения опытов должна быть случайной.
Коэффициенты эмпирического уравнения определяются по формулам

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i}{N},$$

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i x_{ij}}{N},$$

где x_{ij} – кодированное значение j -го входного фактора в i -м опыте.

Таблица 9.3 – Матрица планирования эксперимента типа $N=2^{6-2}$

№ опыта	Входные факторы						Исследуемые параметры			
	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_5 = x_2 x_4$	$x_6 = x_2 x_3 x_4$	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}$
1	+	+	+	+	+	+				
2	+	+	+	-	-	-				
3	+	+	-	+	+	-				
4	+	-	+	+	-	-				
5	-	+	+	+	+	+				
6	+	+	-	-	-	+				
7	+	-	-	+	-	+				
8	-	-	+	+	-	-				
9	+	-	+	-	+	+				
10	-	+	-	+	+	-				
11	-	+	+	-	-	-				
12	+	-	-	-	+	-				
13	-	-	-	+	-	+				
14	-	-	-	-	-	+				
15	-	+	+	-	+	+				
16	-	-	-	-	+	-				

Значимость коэффициентов b_j определяется по критерию Стьюдента

$$t = \frac{b_j}{S_{b_j}}.$$

Адекватность полученных уравнений – по критерию Фишера.

9.3.7 Нейросетевое моделирование

Решение задач по обеспечению эксплуатационных свойств деталей возможно на основе исследования взаимосвязей «эксплуатационные свойства – методы и режимы обработки». Для этих целей наиболее эффективным представляется применение *метода нейросетевого моделирования*, все чаще приходящего на смену статистическому моделированию и позволяющего осуществлять решение плохо формализуемых задач с неполной или частично определенной информацией при большом объеме исходных данных, отсутствии единого подхода к их получению, необходимости исключения субъективного подхода к созданию модели и значительного снижения затрат времени на моделирование. На рисунке 9.8 представлен сравнительный анализ методов моделирования, применяемых в трибологических исследованиях [7, 133–139].

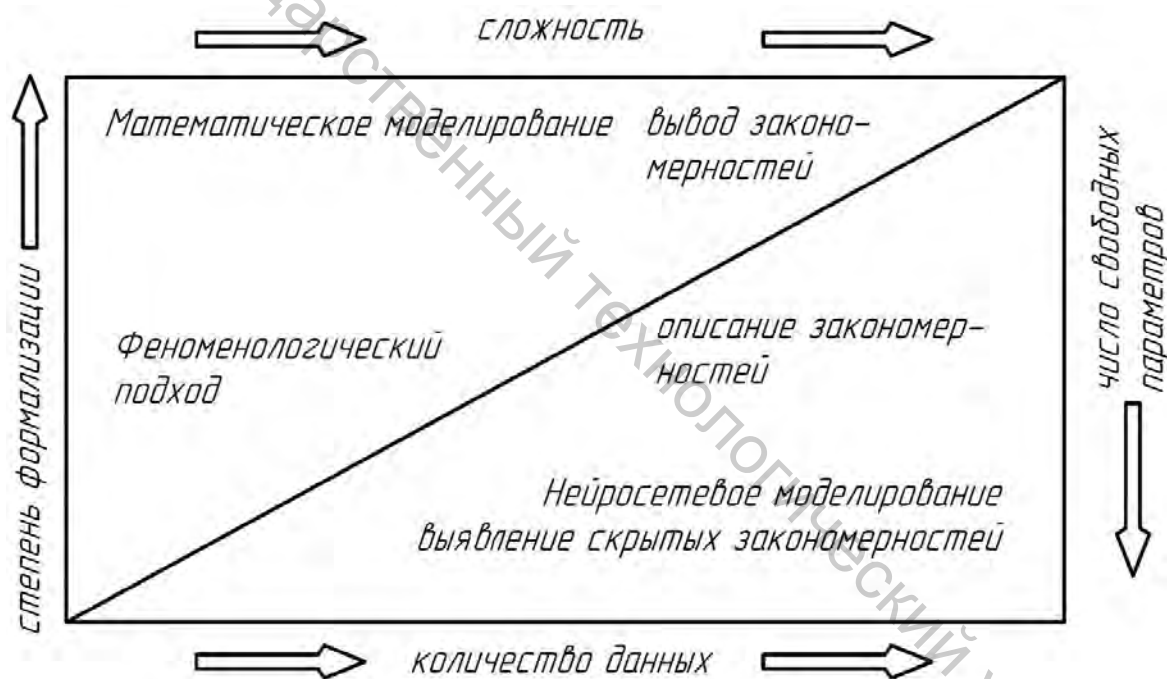


Рисунок 9.8 – Сравнительный анализ методов моделирования

Принципиально новый подход при нейросетевом моделировании заключается в том, что для создания модели необходим только набор примеров, опытов (т.е. результатов эксперимента с известными входными и выходными факторами), по которым проводится обучение нейронной сети. Обученная нейронная сеть с помощью соответствующего математического аппарата приобретает способность строить ассоциации между входными и выходными факторами технической системы и представляет собой модель явления, а лучше сказать, программу на ЭВМ, с помощью которой можно проводить целенаправленные исследования.

Модель нейронной сети построена на базе многослойных нейронных сетей и состоит из входного, выходного, нижнего, верхнего и общих скрытых слоев.

Архитектура многослойной нейронной сети должна отвечать следующим требованиям:

- каждый физический вход X_n должен быть соединен только с одним нейроном входного слоя;
- выход каждого нейрона любого из интерфейсных слоев m подается на каждый нейрон слоя $m+1$;
- выход каждого нейрона последнего из общих скрытых слоев должен быть соединен только с одним нейроном верхнего слоя.

Архитектура нейронной сети, разработанная на базе нейросети Хемминга, представлена на рисунке 9.9.

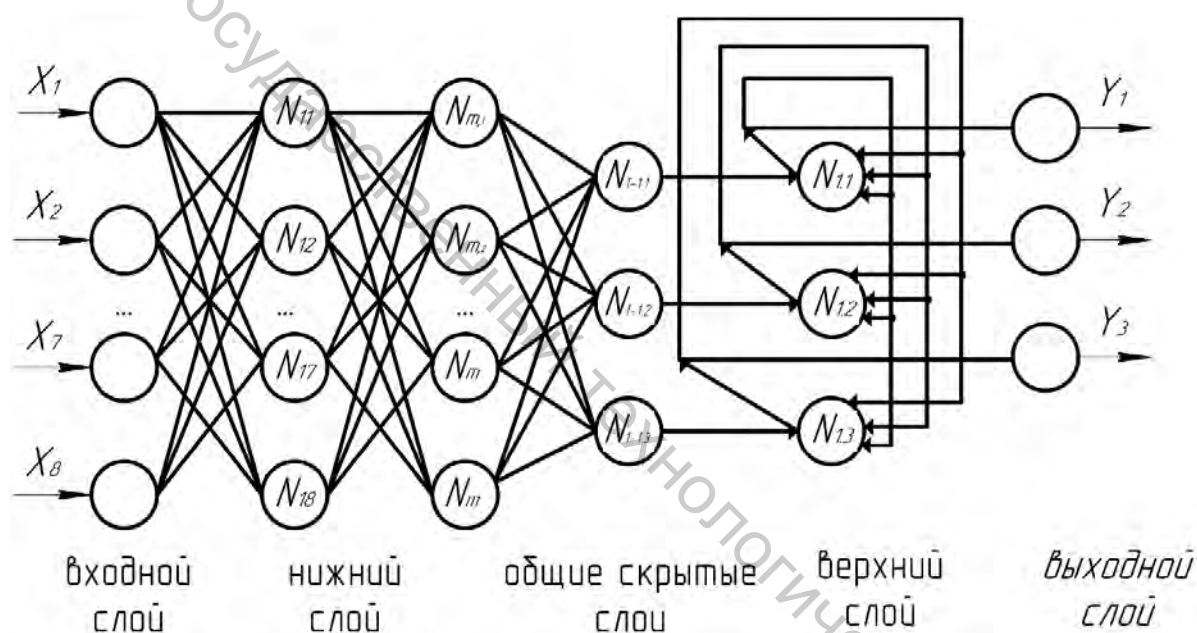


Рисунок 9.9 – Архитектура многослойной нейронной сети

Функционирование многослойной нейронной сети осуществляется следующим образом [133–139]. Нейроны каждого слоя m выполняют взвешенное суммирование элементов входных сигналов. К сумме элементов входных сигналов, умноженных на соответствующие синаптические веса, прибавляется смещение нейрона:

$$S_{im} = \sum [W_{im;(m-1)} y_{i(m-1)}] - b_{im},$$

где S – выход сумматора; W – вес связи; y – выход нейрона; b – смещение нейрона; i – номер нейрона, $im=1, 2, \dots, N_m$ (N_m – число нейронов в слое); m – номер слоя, $m=1, 2, \dots, L$ (L – число слоев).

Результат суммирования подвергается нелинейному преобразованию – функции активации (передаточная функция). Значение функции активации есть выход нейрона:

$$y_{im} = f(S_{im}).$$

В качестве функции активации используются сигмоидальные передаточные функции типа

$$f(S) = \frac{S}{|S| + \alpha}.$$

Сигмоидальные функции являются монотонно возрастающими и имеют отличные от нуля производные на всей области определения. Эти характеристики обеспечивают правильное функционирование и обучение сети.

Число нейронов входного, выходного, нижнего, верхнего и последнего из общих скрытых слоев определяется заданной обучающей выборкой. Число нейронов в скрытых слоях определяется исходя из оценки необходимого числа синаптических весов N_m в многослойной сети с сигмоидальными передаточными функциями:

$$\frac{N_y N_p}{1 + \log_2(N_p)} \leq N_w \leq N_y \left(\frac{N_p}{N_x} + 1 \right) (N_x + N_y + 1) + N_y,$$

где N_x , N_y – размерности входного и выходного сигналов; N_p – число элементов обучающей выборки.

Оценив необходимое число синаптических весов, можно рассчитать число нейронов в скрытых слоях

$$N_m = \frac{N_w}{N_x + N_y}.$$

Число скрытых слоев устанавливается исходя из условия достижения минимальной суммарной ошибки при обучении сети.

Обучение нейронной сети проводится методом обратного распространения ошибки, представляющим собой итеративный градиентный алгоритм обучения, который используется с целью минимизации среднего квадратического отклонения текущих выходов нейронов и общего выхода многослойных нейронных сетей.

Алгоритм обратного распространения ошибки используется в многослойных нейронных сетях с последовательными связями для их обучения и состоит из следующих этапов.

1. Инициализация сети. Весовым коэффициентам и смещениям нейронов присваиваются малые случайные значения из диапазонов $[W_{\min}; W_{\max}]$ и $[b_{\min}; b_{\max}]$ соответственно.

2. Определение элементов обучающей выборки

$$X(X_1, X_2, \dots, X_n) - Y(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \text{ (вход – известный выход)}.$$

3. Масштабирование входных и выходных данных. Оно выполняется для того, чтобы представить все элементы входного и выходного сигналов числами одного типа данных (двоичными, целыми или действительными) из одного диапазона их изменений. Для этого выбирается общий диапазон изменения элементов входного и выходного сигналов, для каждого элемента сигнала определяется его диапазон и выполняется линейное преобразование данного элемента таким образом, чтобы в результате его значения принадлежали общему диапазону.

4. Вычисление текущих выходных значений нейронов y_{im} в соответствии со схемой функционирования многослойной нейронной сети.

5. Настройка синаптических весов.

Для настройки весовых коэффициентов используется рекурсивный алгоритм, который сначала применяется к нейронам сети верхнего слоя, а затем проходит сеть в обратном направлении до нижнего слоя. Синаптические веса настраиваются в соответствии с формулой:

$$W_{im;i(m-1)}(t+1) = W_{im;i(m-1)}(t) + r g_{im} y_{i(m-1)},$$

где $W_{im;i(m-1)}$ – весовой коэффициент связи нейронов i слоев m и $m-1$ в моменты времени t и $t+1$; r – шаг обучения; $y_{i(m-1)}$ – выход нейрона i -го слоя $m-1$; g_{im} – значение ошибки для нейрона i -го слоя m .

Для верхнего слоя:

$$g_{im} = y_{im}(1 - y_{im})(d_{im} - y_{im}),$$

где d_{im} – требуемый выход нейрона im .

Для остальных слоев:

$$g_{im} = y_{i(m-1)}(1 - y_{i(m-1)}) \sum (g_{Nm} W_{im;i(m-1)}),$$

где g_{Nm} – значение ошибки для нейрона N_m .

Внешние смещения нейронов b_{im} настраиваются аналогичным образом.

6. Определение суммарной ошибки.

Если условие $\varepsilon_{\Sigma} < [\varepsilon]$ не выполняется, т.е. суммарная ошибка ε_{Σ} больше заданной $[\varepsilon]$, то процедура обучения повторяется с шага 1. В противном случае происходит переход к следующему шагу обучения.

7. Организация модели гетероассоциативной памяти. Для построения модели гетероассоциативной памяти используется нейропарадигма «back propagation».

Нейронная сеть в процессе обучения приобретает способность строить ассоциации между входным сигналом X и выходным сигналом Y . Размерности входного и выходного векторов, как правило, различаются. В большинстве задач $\dim X > \dim Y$.

После окончания обучения проводится тестирование обученной нейронной сети с целью определения погрешности расчетов при ее функционировании. При неудовлетворительных результатах проводится дообучение сети.

Обученная нейронная сеть, успешно прошедшая тестирование, является готовой нейросетевой моделью, настроенной на решение конкретной задачи и входящей в состав интегрированной системы, содержащей, кроме того, модули: подготовки данных; определения параметров нейронной сети; обучения; тестирования; выделения нейросети.

Подготовка данных осуществляется с помощью встроенных таблиц. Число общих скрытых слоев не превышает 10, число нейронов в слое – не более 100, число входов и выходов – не более 100.

Алгоритм проведения исследований на нейросетевой модели представляется в следующем виде: локализация задачи, определение числа входов и выходов; подготовка результатов исследований в виде таблиц данных; уточнение архитектуры нейронной сети, числа скрытых слоев, числа нейронов в слоях; обучение нейронной сети; тестирование сети; испытания на нейросетевой модели.

В качестве примера рассмотрим нейросетевую модель процесса формирования эксплуатационных свойств деталей при упрочняющей электромеханической обработке (ЭМО), основанной на сочетании термического и силового воздействий на поверхность обрабатываемой детали, что приводит к изменению физикомеханических и геометрических показателей поверхностного слоя деталей и, как следствие, к повышению износостойкости, предела выносливости и других эксплуатационных свойств. В качестве входов X рассматриваются режимы ЭМО (плотность тока j , давление ролика-инструмента на обрабатываемую поверхность детали p , скорость обработки v_0 , длительность импульсов тока $t_{и}$, длительность пауз тока $t_{п}$); шероховатость упрочненной поверхности Ra , условия трения и изнашивания (давление в зоне контакта соприкасающихся деталей q , скорость их относительного скольжения v). В ка-

честве выходных факторов Y рассматриваются микротвердость упрочненной поверхности HV , скорость изнашивания трущихся деталей J_t , коэффициент изнашивания K_w .

Результаты испытаний на нейросетевой модели, имеющей архитектуру многослойной нейронной сети, представлены в таблицах 9.4 и 9.5.

Сравнительный анализ выявления связей режимов упрочнения с износостойкостью исследуемых деталей представлен на рисунке 9.10.

Опыты проводились при очередном варьировании режимов ЭМО: $j=875 \text{ А/мм}^2$; $p=12,5 \text{ МПа}$; $v_0=0,046 \text{ м/с}$; $t_n=0,4 \text{ с}$.

Значения остальных неизменных входных факторов: $t_n=0,02 \text{ с}$; $q=4 \text{ МПа}$; $v=0,08 \text{ м/с}$.

В качестве выходного фактора рассматривалась скорость изнашивания исследуемых деталей J_t .

Результаты испытаний на нейросетевой модели показывают коррелированную связь между расчетными и экспериментальными данными, что подтверждает адекватность модели.

Основным ограничением при использовании нейросетевого моделирования является требование случайности значений для параметров, не вошедших в конкретную задачу, т.е. неизвестные в данной задаче параметры должны быть случайными. Основное применение данного подхода – определение эксплуатационных показателей деталей триботехнических систем [7, 133–139].

Таблица 9.4 – Результаты испытаний на нейросетевой модели

Режим работы	№ опыта	Входные факторы							
		Режимы упрочнения					Трение		
		j , А/мм ²	p , МПа	v_0 , м/с	t_n , с	t_n , с	Ra , мкм	q , МПа	v , м/с
Обучение, тестирование	1	500	12,5	0,03	0,8	0,1	3,2	4,0	0,8
	2	500	12,5	0,08	0,8	0,1	3,2	4,0	0,8
	3	50	25	0,03	0,8	0,1	3,2	4,0	0,8
	4	750	7,5	0,046	0,1	0,02	2,8	2,8	1,1
	5	825	7,5	0,046	0,4	0,02	0,9	2,8	1,1
	6	875	7,5	0,046	2,0	0,02	1,6	1,6	0,6
	7	875	12,5	0,08	0,8	0,1	3,2	4,0	0,8
	8	875	25	0,03	0,8	0,1	3,2	4,0	0,8
	9	875	25	0,08	0,8	0,1	3,2	4,0	0,8
Расчет, тестирование	10	500	25	0,08	0,8	0,1	3,2	4,0	0,8
	11	750	7,5	0,046	0,4	0,02	0,9	2,8	1,1
	12	825	7,5	0,046	0,1	0,02	2,8	2,8	1,1
	13	875	12,5	0,03	0,8	0,1	3,2	4,0	0,8

Таблица 9.5 – Результаты испытаний на нейросетевой модели

Режим работы	№ опыта	Входные факторы								
		Микротвердость, HV			Скорость изнашивания j_t мкм/ч			Коэффициент изнашивания $K_w \cdot 10^{-2}$		
		HV _э	HV _р	ε, %	$J_{тэ}$	$J_{тр}$	ε, %	K _{wэ}	K _{wр}	ε, %
Обучение, тестирование	1	630	615	2,36	2,88	2,80	2,95	1,50	1,51	0,67
	2	505	535	5,91	3,59	3,47	3,25	1,87	1,79	4,35
	3	705	706	0,10	2,40	2,46	2,48	1,25	1,22	2,53
	4	735	742	1,01	2,38	2,39	0,63	1,29	1,29	0,36
	5	791	782	1,13	2,16	2,13	1,26	1,17	1,5	1,57
	6	810	822	1,49	0,98	1,08	10,78	0,72	0,72	0,23
	7	770	775	0,72	1,65	1,61	2,15	0,86	0,89	3,01
	8	1010	946	6,31	0,71	0,85	19,64	0,47	0,54	14,14
	9	845	859	1,68	1,22	1,18	3,69	0,64	0,65	1,57
Расчет, тестирование	10	565	576	2,02	3,20	3,16	1,31	1,67	1,60	4,03
	11	708	754	6,50	2,25	2,29	1,71	1,22	1,24	1,85
	12	715	759	6,26	2,50	2,33	6,83	1,35	1,25	7,62
	13	930	931	0,08	1,12	0,93	16,67	0,58	0,57	1,00

Примечание. Индекс «э» относится к экспериментальным, индекс «р» – к расчетным данным; ε – погрешность расчета.

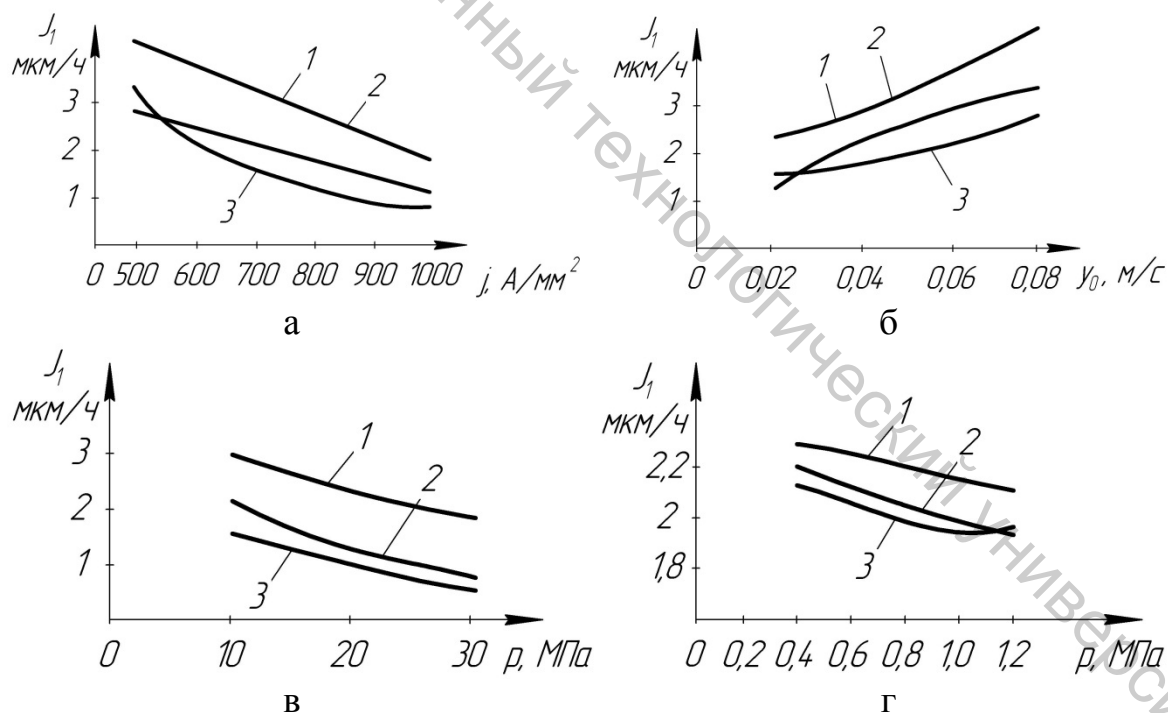


Рисунок 9.10 – Связь режимов упрочнения с износостойкостью деталей:

- а – плотности тока, б – давления ролика-инструмента, в – скорости обработки, г – длительности импульсов тока;
 1 – математико-статистическое моделирование; 2 – нейросетевое моделирование; 3 – экспериментальные данные

9.3.8 Понятие крутого восхождения по градиенту и симплекс-планирования

Для *определения оптимальных условий обработки* в технологии машиностроения с успехом применяются *математические методы крутого восхождения по градиенту и симплекс-планирование*.

Сущность метода крутого восхождения по градиенту заключается в следующем [7, 133–139].

Определяется нулевой уровень. В качестве нулевого уровня принимается опыт, в котором исследуемый параметр оказался наилучшим при проведении экспериментов по математическому описанию поверхности отклика.

Определяется интервал варьирования входных факторов I_i как *полуразность их максимальных и минимальных значений*.

Строится таблица расчета шагов и движения по градиенту, в которую заносятся нулевой уровень, интервал варьирования и коэффициенты регрессии.

Подсчитывается произведение коэффициентов регрессии на соответствующие интервалы варьирования, и результаты заносятся в таблицу.

Устанавливается величина a_k , на которую будет изменен один из факторов.

Осуществляется пропорциональный пересчет всех факторов на изменение данного фактора a_k :

$$a_i = a_k b_i I_i / b_k I_k.$$

Определяются шаги, т.е. координаты факторного пространства, в которых должны ставиться опыты.

В полученных точках факторного пространства проводятся эксперименты по определению наилучшего значения оптимизируемого параметра.

Условия наилучшего опыта принимаются за нулевую точку, в окрестностях которой проводится следующая серия опытов с меньшими интервалами варьирования.

Из этой серии опытов проверяется значимость входных факторов и адекватность модели.

Все это повторяется до тех пор, пока линейное приближение при минимальных интервалах окажется неэффективным. Это будет означать, что достигнута область оптимума и условия обработки, на которых проводились эксперименты в этой области, являются оптимальными для исследуемого параметра.

Сущность симплекс-планирования заключается в следующем.

На основании опытов в точках пространства, близких к оптимальным, проводится серия экспериментов.

Из этой серии экспериментов, образующих симплекс, отбрасывается точка с худшими значениями оптимизируемого параметра.

Эта точка заменяется на новую, симметрично расположенную относительно других точек.

В этой точке ставятся эксперименты и рассматриваются значения оптимизируемых параметров в точках нового симплекса.

Исследования продолжаются до тех пор, пока применение пп. 1–3 приведет к тому, что система симплексов начнет вращаться вокруг некоторого наиболее высокого значения оптимизируемого параметра. Это означает, что достигнута область оптимума.

9.4 Автоматизированные системы научных исследований в технологии машиностроения

9.4.1 Понятие АСНИ

Особое значение для повышения эффективности науки приобретает автоматизация научных исследований, позволяющая получать более точные и полные модели исследуемых объектов и явлений, ускорять ход научных исследований и снижать их трудоемкость, изучать сложные объекты и процессы, исследование которых традиционными методами затруднительно или невозможно [140–145].

Автоматизированная система научных исследований (АСНИ) – это программно-аппаратный комплекс на базе средств вычислительной техники, предназначенный для проведения научных исследований или комплексных испытаний образцов новой техники на основе получения и использования моделей исследуемых объектов, явлений и процессов. Программно-аппаратный комплекс АСНИ состоит из средств методического, программного, технического, информационного и организационно-правового обеспечения.

В организациях и на предприятиях АСНИ создаются в *целях*:

- обеспечения высоких темпов научно-технического прогресса;
- повышения эффективности и качества научных исследований на основе получения или уточнения с помощью АСНИ математических моделей исследуемых объектов, а также применения этих моделей для проектирования, прогнозирования и управления;
- повышения эффективности разрабатываемых с помощью АСНИ объектов, уменьшения затрат на их создание;
- получения качественно новых научных результатов;
- сокращения сроков, уменьшения трудоемкости научных исследований и комплексных испытаний образцов новой техники.

Достижение этих целей создания АСНИ обеспечивается путем: систематизации и совершенствования процессов научных исследований и испытаний на основе применения математических методов и средств вычислительной техники; комплексной автоматизации исследовательских работ с перестройкой ее структуры и кадрового состава; повышения качества управления научными исследованиями; использования методов обработки и представления результатов научных исследований и испытаний в виде математических моделей, имеющих заданную форму; замены натуральных испытаний и макетирования математическим моделированием.

9.4.2 Задачи и функции АСНИ

Основные задачи АСНИ – это планирование, организация и проведение научного эксперимента и в результате получение точных результатов в минимально короткое время и с наименьшей стоимостью. Итогом работы АСНИ обычно является проверка научных гипотез. Областям техники и науки, имеющим дело с использованием большого количества информации, наиболее эффективно применять именно АСНИ. Они отличаются от других типов автоматизированных систем (АСУ, АСУТП, САПР и т.д.) характером информации, получаемой на выходе системы. Прежде всего это обработанные или обобщенные экспериментальные данные, но главное – полученные на основе этих данных математические модели исследуемых объектов, явлений или процессов.

Основная функция АСНИ состоит в получении результатов научных исследований (комплексных испытаний) путем автоматизированной обработки экспериментальных данных и другой информации, получения и исследования моделей объектов, явлений и процессов, автоматизированных процедур, планирования и управления экспериментом [140–145].

Автоматизированные процедуры в АСНИ состоят в том, что исследования (испытания) объектов осуществляются путем взаимодействия пользователя с АСНИ в режиме диалога.

В АСНИ могут осуществляться автоматические процедуры, при которых обработка данных, идентификация или построение математических моделей производятся без участия человека.

В АСНИ также могут применяться процедуры планирования и управления экспериментом, при которых использование моделирования корректирует условия эксперимента, а экспериментальная информация используется для выбора математической модели из некоторого заданного множества таких моделей.

Результатом функционирования АСНИ является подтверждение (отклонение) гипотез или совокупность законченных математических моделей, удовлетворяющая заданным требованиям. Функционирование АСНИ должно обеспечивать получение выходных документов, содержащих результаты исследований, а также рекомендации по использованию этих результатов для прогнозирования, управления или проектирования.

9.4.3 Особенности научных исследований как объекта автоматизации

Для того чтобы автоматизировать тот или иной объект, необходимо ясно представить его основные особенности. Для автоматизации научных исследований целесообразно выделить некоторые их главные черты. К ним относят следующие [140–145].

Многогранность исследовательской деятельности. Научные исследования включают в себя элементы разного характера: постановка научной задачи, разработка теории, проведение научных расчетов, моделирование, проведение эксперимента, обработка, накопление и отображение информации, принятие решений и т.д. Различные стороны научной деятельности в неодинаковой степени поддаются формализации и реализации в рамках АСНИ. Сравнительно просто автоматизируются процедуры, связанные с проведением эксперимента (регистрация, обработка, накопление, отображение информации и т.п.). Вместе с тем такие стороны научной деятельности, как постановка задачи исследования, разработка теории, требуют обязательного творческого участия человека-исследователя.

Существенная роль человеческого фактора. С точки зрения разработчика АСНИ, это означает необходимость создания максимальных удобств пользователю при работе с системой. Как следствие, в современных АСНИ наблюдается широкое использование диалогового режима работы, средств графического представления информации.

Высокий уровень неопределенности хода и результатов исследования. Научные исследования всегда проводятся для получения некоторой новой информации о свойствах объекта исследований. Разработчики АСНИ вынуждены работать при дефиците заранее известной информации. Это одно из принципиальных отличий АСНИ от автоматизированных систем других классов (АСУТП, АСУП, САПР). Данная особенность требует таких технических решений при создании АСНИ, которые позволяют сделать систему максимально гибкой, легко модернизируемой с учетом новой информации об объекте исследования, полученной в ходе отработки системы автоматизации.

Непрерывность процесса научного исследования. Исследовательская деятельность носит, как правило, непрерывный характер, так как любой исследователь по завершении некоторого этапа работ обычно намечает их дальнейшее развитие, формулируя новую программу работ (новую цель, задачу и т.п.) для того же или другого объекта. Это означает необходимость непрерывного развития, совершенствования соответствующей АСНИ.

Уникальность научного исследования. Каждое научное исследование имеет определенные особенности, отличающие его от других аналогичных исследований. Их присутствие обязательно, ведь иначе такое исследование уже не может относиться к категории научного. В связи с этим каждая АСНИ, как правило, обладает специфическими чертами, присущими только данной системе в части ее технического, программного или научно-методического обеспечения.

9.4.4 Виды обеспечений АСНИ

Для функционирования АСНИ необходимо [140–145]:

- техническое обеспечение, которое включает комплекс используемых техсредств: измерительную аппаратуру, ЭВМ, устройства связи с объектом, экспериментальную установку;
- научно-методическое обеспечение, включающее в себя различные методы, методики, способы и алгоритмы проведения эксперимента, обработки и представления экспериментальных данных;
- информационное обеспечение – справочные и обучающие системы, информационно-поисковые системы, базы данных;
- программное обеспечение – документы с текстами программ, эксплуатацией, программы на машинных носителях, эффективное взаимодействие пользователей с техресурсами АСНИ;
- метрологическое обеспечение АСНИ и организационно-правовое обеспечение.

9.4.5 Принципы построения АСНИ

Современные АСНИ строятся с использованием определенных *основополагающих принципов*, наиболее существенные представлены ниже [140–145].

Комплексность, т.е. изначальная направленность АСНИ на решение всего комплекса задач, стоящих перед исследователем; обеспечение возможности применения АСНИ на различных этапах исследований.

Многоуровневая организация. В соответствии с этим принципом при построении современных АСНИ выделяется несколько структурных уровней. Подобная организация позволяет реализовать принцип комплексности в условиях ограничения возможных затрат на создание и эксплуатацию АСНИ.

Наиболее целесообразна структура, содержащая три уровня: объектный, инструментальный и сервисный (базовый).

Объектный уровень характеризуется связью с объектом исследований. Его назначение состоит в организации процесса экспериментирования, т.е. реализации управления экспериментальной установкой, регистрации данных, их оперативной обработки, накопления и представления первичных результатов исследователю, в том числе и оказание ему помощи в интерпретации результатов эксперимента и принятии решения о дальнейшем проведении исследований. На объектный уровень также возлагают операции, связанные с проверкой и тестированием экспериментального оборудования, текущей регистрацией и документированием данных.

Инструментальный уровень предназначен для проведения достаточно сложных видов обработки экспериментальных данных, научных расчетов и моделирования, если они не требуют слишком больших мощностей вычислительного оборудования. Здесь осуществляется накопление и длительное хранение информации, полученной в результате исследований, формируются архивы и банки данных по отдельным проблемам исследований. На инструментальном уровне осуществляется отработка различных алгоритмов и программ, составленных пользователем, в том числе и программ, используемых на объектном уровне.

Базовый (или сервисный) уровень используется для осуществления наиболее сложных и громоздких научных расчетов, моделирования, обработки и представления информации, формирования крупных банков и баз данных, создания информационно-поисковой системы.

Нужно обратить внимание на то, что для АСНИ наиболее важным является объектный уровень, так как именно на этом уровне фигурирует исследователь, роль которого является ключевой. Именно на объектном уровне в первую очередь регистрируется новая информация об изучаемом явлении или объекте. Поэтому АСНИ, являясь многоуровневыми системами, не относятся к категории иерархических систем. Можно считать, что верхние этажи этой организации – инструментальный и базовый уровни – являются вспомогательными, оказывающими дополнительные услуги при извлечении полезной информации, разработке и проверке теоретических положений на основе экспериментальных данных.

Расширяемость (модульный принцип построения), т.е. использование при создании АСНИ таких технических решений, которые бы делали возможным дальнейшее быстрое развитие системы, увеличение

количества пользователей, развитие функциональных возможностей системы без переделок и изменений принципиального характера.

Адаптируемость, которая означает достижение большей гибкости АСНИ, возможности ее подстройки и модернизации с учетом конкретной задачи.

Коллективность использования. Это означает, с одной стороны, организацию коллективного доступа к наиболее сложным и дорогостоящим системам АСНИ, а с другой – объединение усилий при создании и последующем использовании АСНИ, когда отдельные удачные разработки и результаты исследований становятся общедоступными и могут применяться всеми пользователями системы.

Интеграция АСНИ, включающая в себя два аспекта:

- использование технических ресурсов АСНИ для решения задач иного характера (учебных, организационно-управленческих, расчетных, фоновых и т.п.);

- тесное взаимодействие с автоматизированными системами других типов (САПР, АСУТП, АСУП).

Типизация инженерных решений при создании АСНИ означает разработку таких компонентов систем, которые могут найти применение при автоматизации основной массы научно-технических исследований в самых разных предметных областях. Такие решения способствуют проведению единой технической политики при построении АСНИ в отдельных отраслях науки.

9.4.6 Пример АСНИ для измерения сил резания

В технологических экспериментальных исследованиях зачастую возникает необходимость в измерении различных физических величин в процессе обработки, например, сил резания, температуры в зоне резания, шероховатости и т.д. При этом, как правило, представляет интерес не мгновенное значение искомой величины, а ее изменение с течением времени, а также обработка результатов экспериментов и получение готовых протоколов в виде таблиц, графиков и эмпирических зависимостей.

Так, для получения эмпирических зависимостей сил резания от условий обработки внутренних резьб и оптимизации геометрических параметров инструмента с успехом применяется АСНИ, включающая в себя силоизмерительное устройство, усилитель, аналого-цифровой преобразователь и персональный компьютер (рис. 9.11) [7].

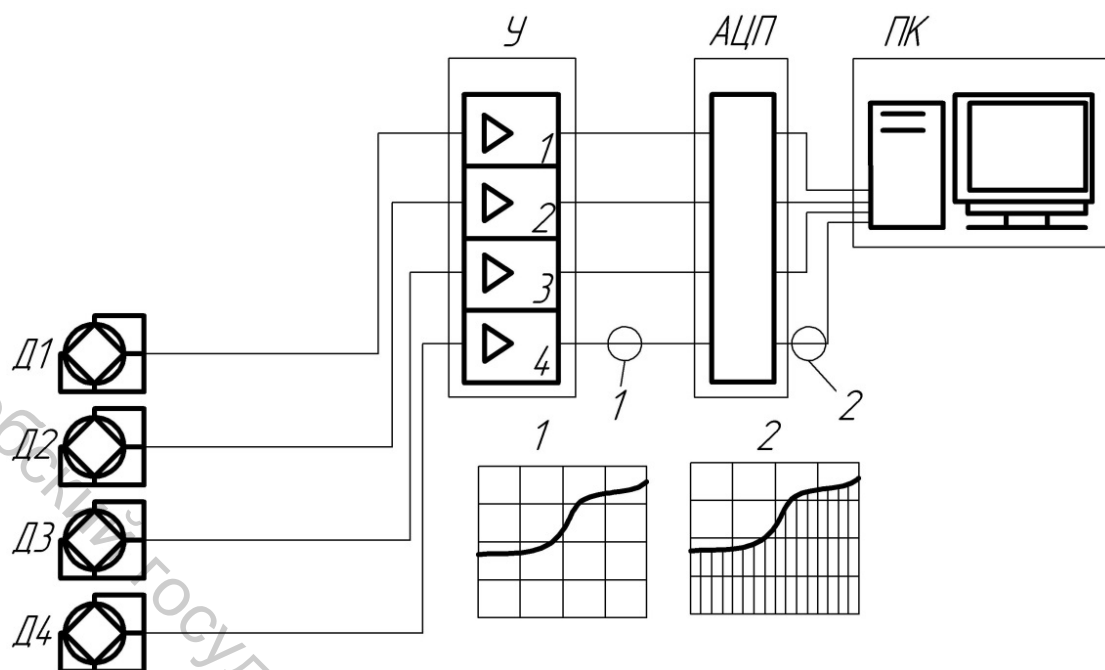


Рисунок 9.11 – Общая схема комплекса для измерения сил резания:
 Д1... Д4 – датчики каналов; У – усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер

В зависимости от проводимых исследований система имеет возможность фиксировать сигналы в диапазонах частот от 10 до 100 кГц, что существенно меньше тактовой частоты современных компьютеров. Некоторые ограничения могут налагаться программным обеспечением в связи с необходимостью математической обработки результатов измерений.

Силоизмерительный модуль выполнен на тензометрических датчиках сопротивления, подключенных по мостовой схеме как наиболее точной и обеспечивающей максимальное усиление измеряемого сигнала. Применение тензодатчиков оправдано простотой реализации, наличием промышленных усилителей сигнала, высокой чувствительностью в широком спектре колебаний, возможностью работы в сложных условиях (в частности, в контакте с СОТС).

Усилительный модуль является важной компонентой при тензометрировании. В разработанной системе дополнительные ограничения накладывались особенностями цифрового способа измерения сигнала. За основу усилительного блока приняты промышленные усилители. Связь между усилительным модулем и ПК реализована через универсальный адаптер.

Малый сигнал, формируемый силоизмерительным модулем, необходимо усиливать. Приемлемый уровень усиления обеспечивают усилители переменного тока, но обработка модулированного сигнала резко снижает чувствительность системы. Усиление же приборов, работаю-

щих на постоянном токе, недостаточно. При нарезании внутренней резьбы усилию 300 Н соответствует сигнал 0,5 В. Для обеспечения нормальной работы системы разработан прецизионный согласующий усилитель, имеющий возможность работы с АЦП.

Базовое программное обеспечение представлено на языке СИ, что облегчает разработку прикладных программ. Значения сигналов из четырех каналов сохраняются в одном динамически выделенном массиве - буфере. Содержимое массива передается на отображение и может быть переписано в файл. С целью наглядности и удобства исследований диаграмма изображается в режиме «осциллограф», т.е. измеряемые значения тотчас же выводятся на экран. Вывод происходит в координатной сетке «сила резания – время». По умолчанию так отображается сила P_z . По завершении процесса замера массив-буфер можно использовать для всех необходимых манипуляций – просмотра сил P_z , P_y , P_x , $M_{кр}$ и суммарной силы (суммирование выполнено по рекомендациям теории резания).

Для удобства обработки полученных диаграмм на них автоматически формируется временная сетка, позволяющая легко найти характерные точки (например, установить момент начала резания очередным витком резца или метчика). Временная сетка формируется на основе шага резьбы и частоты вращения шпинделя. Также для удобства анализа диаграмм служит реперная точка – начало процесса резания, записываемая на графике при превышении сигнала уровня обычного «шума». Сама временная сетка не привязана жестко к диаграмме, а может сдвигаться по оси «время». При этом автоматически осуществляется оцифровка сетки, т.е. выставляются численные значения сил резания, соответствующие каждому из временных интервалов, приведенных во временной сетке.

Программа предусматривает некоторую статистическую обработку результатов замеров. В частности, можно усреднить несколько замеров, выполненных для разных деталей. Предусмотрена возможность сохранения графической информации с последующей обработкой изображения распространенными растровыми графическими редакторами.

9.5 Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите известные Вам виды научно-исследовательских работ.
2. Где проводятся фундаментальные и прикладные исследования в Республике Беларусь и странах Западной Европы?
3. На какие уровни делятся методы научного познания?
4. Перечислите методы эмпирического уровня научного познания.

5. Перечислите методы теоретического уровня научного познания.

6. Перечислите методы экспериментально-теоретического уровня научного познания.

7. Перечислите методы метатеоретического уровня научного познания.

8. Дайте определение понятиям «наблюдение», «сравнение», «счет», «измерение».

9. Дайте определение понятиям «эксперимент» и «моделирование».

10. Дайте определение понятиям «абстрагирование» и «формализация».

11. Дайте определение понятиям «дедукция», «индукция», «синтез».

12. Дайте определение понятиям «классификация», «обобщение», «доказательство».

13. В чем суть исторического метода познания?

14. В чем суть логического метода познания?

15. В чем суть метода аналогии?

16. Какие этапы и их результаты выделяют в процессе мыслительной деятельности?

17. В чем суть теоретических исследований?

18. Каким образом уточнялись и изменялись теоретические представления и модели формирования шероховатости при механической обработке?

19. Изобразите исходные схемы схема для расчета R_z по Чебышеву и по Исаеву.

20. На чем базируется физическое представление процессов в технологии машиностроения?

21. В чем суть теоретико-экспериментальных исследований?

22. В чем суть экспериментальных исследований?

23. Перечислите признаки классификации экспериментальных исследований.

24. Изобразите модель поверхности отклика при планировании эксперимента.

25. На какие группы делятся объекты исследований в экспериментах?

26. Как классифицируются эксперименты по числу переменных?

27. Перечислите, изобразите и опишите типы поверхностей отклика при планировании эксперимента.

28. Как классифицируются эксперименты по способу выбора уровней факторов?

29. Перечислите последовательность этапов экспериментальных исследований.

30. Дайте определение понятию «план эксперимента».
31. На какие группы делятся переменные, определяющие состояние объекта при планировании эксперимента?
32. Изобразите схематическое представление объекта при планировании эксперимента.
33. Дайте определение понятию «классический эксперимент» и приведите примеры его использования в машиностроении.
34. Перечислите известные Вам математические методы, применяемые при проведении экспериментов.
35. Изложите суть и опишите область применения дисперсионного анализа.
36. Как формируется математическая модель однофакторной системы при дисперсионном анализе?
37. Как формируется математическая модель двухфакторной системы при дисперсионном анализе?
38. Как формируется математическая модель трехфакторной системы при дисперсионном анализе?
39. Для чего используется критерий Фишера?
40. Изложите суть и опишите область применения корреляционно-регрессионного анализа.
41. О чем говорит знак коэффициента корреляции?
42. Какие случаи типичны при анализе линейной регрессии?
43. Изложите суть и опишите область применения метода планирования экстремальных экспериментов в машиностроении.
44. В чем сущность кодирования при реализации метода планирования экстремальных экспериментов?
45. Что собой представляет матрица планирования полного факторного эксперимента?
46. Приведите пример матрицы планирования полного факторного эксперимента для трех входных факторов.
47. Изложите суть и опишите область применения метода нейросетевого моделирования.
48. Каким требованиям должна отвечать архитектура многослойной нейронной сети?
49. Изобразите архитектуру нейронной сети, разработанной на базе нейросети Хемминга.
50. Опишите алгоритм функционирования многослойной нейронной сети.
51. Как осуществляется обучение нейронной сети?
52. Из каких этапов состоит алгоритм обратного распространения ошибки в многослойных нейронных сетях с последовательными связями?
53. Представьте алгоритм проведения исследований на нейросетевой модели.

54. Приведите пример нейросетевой модели процесса формирования эксплуатационных свойств деталей при упрочняющей электрохимической обработке.

55. Изложите суть и опишите область применения метода крутого восхождения по градиенту.

56. Изложите суть и опишите область применения метода симплекс-планирования.

57. Дайте определение понятию «автоматизированная система научных исследований».

58. Какие цели преследуют при создании АСНИ в организациях и на предприятиях?

59. Из каких средств состоит программно-аппаратный комплекс АСНИ?

60. Перечислите основные задачи АСНИ.

61. Перечислите основные функции АСНИ.

62. Что является результатом функционирования АСНИ?

63. Опишите особенности научных исследований как объекта автоматизации.

64. Дайте краткую характеристику видам обеспечения АСНИ.

65. Опишите основополагающие принципы построения АСНИ.

66. Изобразите схему комплекса для определения эмпирических зависимостей сил резания от условий обработки и оптимизации геометрических параметров инструмента.

67. Опишите суть работы комплекса для определения эмпирических зависимостей сил резания от условий обработки и оптимизации геометрических параметров инструмента.

10 НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И СОЗДАНИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

10.1 Признаки классификации методов обработки деталей машин

В курсе рассматриваются только методы обработки (формообразования) поверхностей деталей машин. В основу классификации методов обработки могут быть положены следующие признаки [1–5]:

- природа воздействия, играющего главную роль в формообразовании;
- характер воздействия на заготовку;
- схема формообразования (сочетание вида инструмента и кинематики формообразования);
- способ генерирования направляющей и образующей;
- характер связи формообразующего элемента инструмента с последним звеном энергетического комплекса, сообщающего движение инструменту;
- динамика процесса формообразования.

По *природе воздействия* различают: *механическую* обработку, *электрофизикохимическую* (электроэрозионную, электрохимическую, ультразвуковую), *светолучевую*, *плазменную* и *комбинированную* обработку. В результате механического воздействия происходит пластическое деформирование части материала заготовки (чаще всего с последующим вязким или хрупким разрушением). При светолучевой и плазменной обработке главным является тепловое воздействие, приводящее к плавлению или испарению материала заготовки. При электроэрозионной обработке локальный нагрев обрабатываемой поверхности является результатом короткого искрового или более длительного искродугового электрического разряда между инструментом и поверхностью заготовки. В основе процесса электрохимической обработки лежат явления анодного растворения металла электролитом под действием электрического тока или выделение металла из электролита с его осаждением на поверхности заготовки.

По *характеру (результату) воздействия* на заготовку различают обработку с: *частичным удалением материала* с заготовки; *частичным перераспределением материала* заготовки за счет его пластического деформирования; *нанесением* (присоединением) *материала* к заготовке; *комбинированием* способов воздействия.

При обработке с частичным удалением материала заготовки удаляемый слой называют *припуском*, если форма заготовки подобна форме обрабатываемой поверхности, и *напуском*, если форма заготовки существенно отличается от формы детали (т.е. проще ее).

Схема формообразования дает наименование методу и поэтому является основным признаком классификации. Например, точение – это метод обработки при помощи резца, когда заготовке сообщается вращение, а инструменту – поступательное движение вдоль и (или) поперек оси вращения заготовки. Учитывая неопределенность этого признака, часто уточняют название метода с указанием вида обрабатываемой поверхности (например, нарезание резьбы резцом или круглое, плоское или внутреннее шлифование).

Несмотря на коренные различия в природе воздействия на заготовку, *всем известным методам обработки присущ общий признак – наличие относительного перемещения заготовки и инструмента в процессе формообразования*. При этом форму обрабатываемой поверхности можно рассматривать как след линии (образующей), движущейся в пространстве в соответствии с законом, который определяется другой линией (направляющей), либо как огибающую некоторого семейства поверхностей. В последнем случае образующей является линия соприкосновения огибающей и огибаемой поверхностей. В процессе обработки образующую и направляющую будем различать по следующим признакам: 1) образующая подвижна в пространстве, а направляющая – неизменна; 2) форма и размеры образующей в общем случае переменны, а направляющей – неизменны; 3) скорость образования (генерации) образующей существенно выше, чем у направляющей.

Во времени образующая и направляющая могут возникать прерывисто (П), непрерывно (Н) или одновременно (Е). По этому признаку можно выделить следующие виды схем формообразования:

- образующая и направляющая возникают прерывисто (ПП) (к данному виду можно отнести фрезерование тел вращения (рис. 10.1 а), зубофрезерование червячной фрезой, дробеструйную обработку и т.д.);

- образующая возникает непрерывно, а направляющая – прерывисто (ПН) (к данному виду можно отнести продольное точение (рис. 10.1 б), строгание и торцевое фрезерование плоскости и т.д.);

- направляющая возникает во времени прерывисто, а образующая – одновременно (ПЕ) (к данному виду можно отнести фрезерование фасонных канавок (рис. 10.1 в), плоскостей цилиндрической фрезой и т.д.);

- направляющая и образующая возникают непрерывно (НН) (к данному виду можно отнести поперечное точение с тангенциальной подачей (рис. 10.1 г));

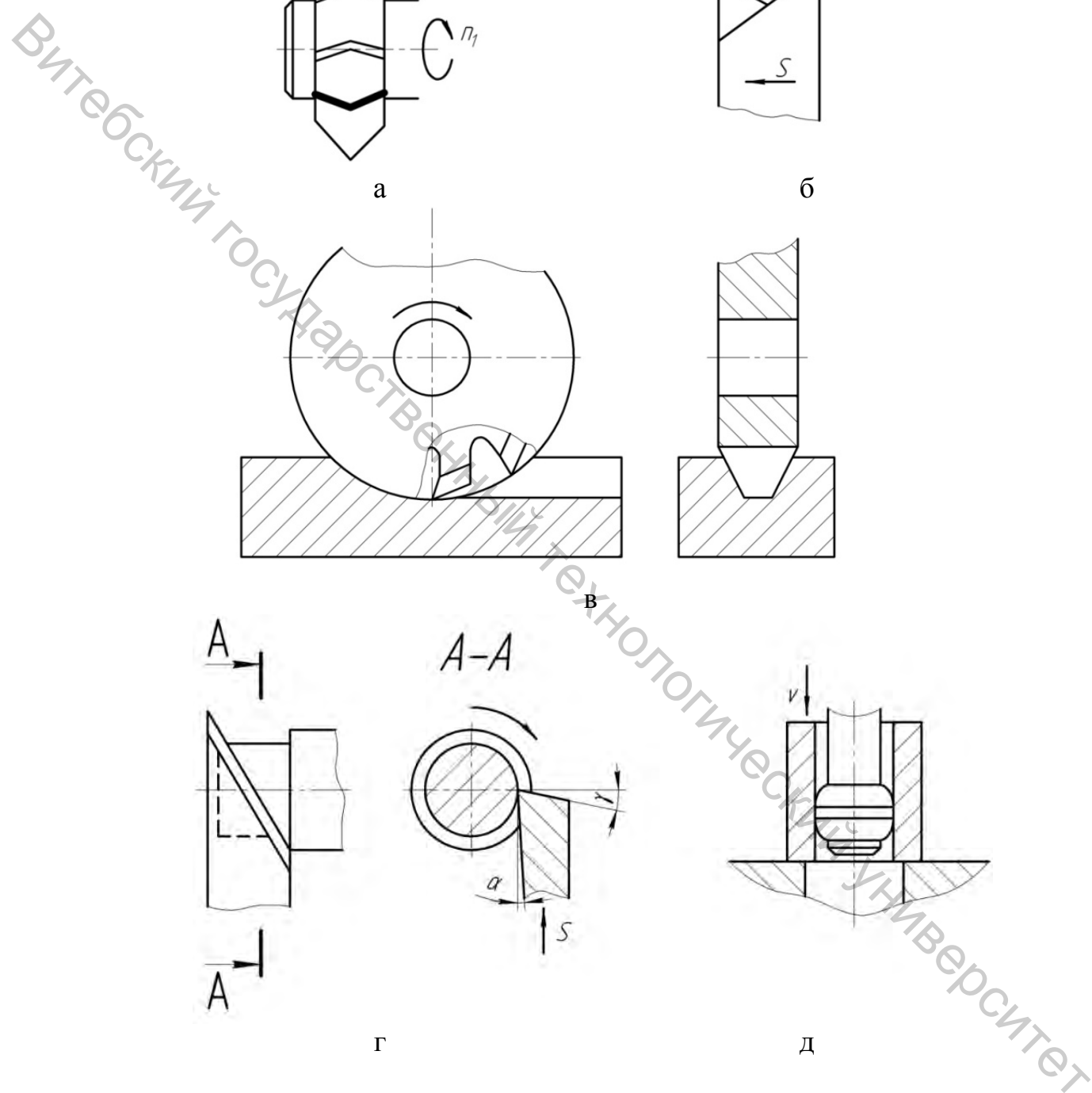


Рисунок 10.1 – Схемы формообразования в зависимости от типа генерации образующей и направляющей во времени:
а – ПП, б – ПН, в – ПЕ, г – НН, д – НЕ

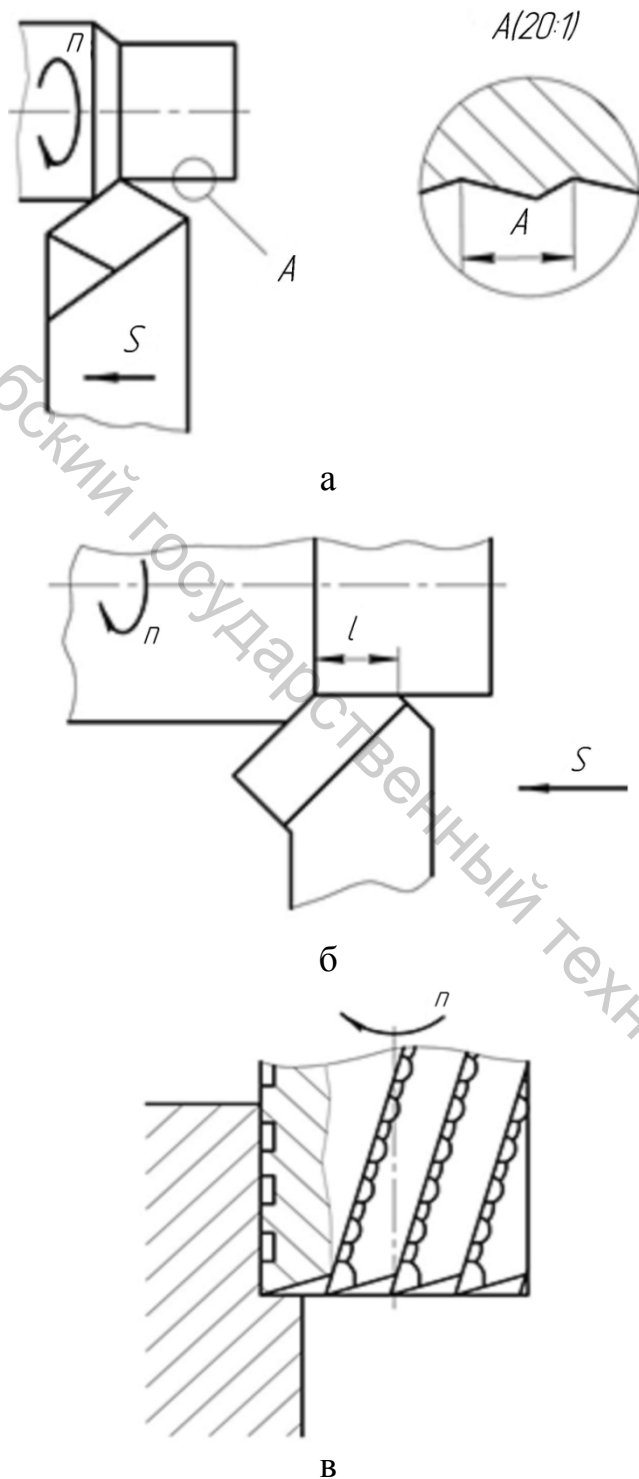


Рисунок 10.2 – Схемы изменения длины контакта формообразующего элемента с направляющей и образующей

неподвижной системе координат станка; 2) *энергетические комплексы*, то есть механизмы, передающие заготовке и инструменту энергию, необходимую для осуществления этого движения.

– направляющая возникает во времени непрерывно, а образующая – единовременно (НЕ) (к данному виду можно отнести обработку отверстия однозубой прошивкой (рис. 10.1 е)).

Прерывистый характер генерации производящих линий обрабатываемых поверхностей является одной из причин образования погрешностей формы (шероховатости, волнистости, огранки). Пример формирования этих поверхностей приведен на рисунке 10.2 а. Частичное уменьшение погрешности формы направляющей возможно за счет увеличения длины ее контакта с формообразующим элементом инструмента (рис. 10.2 б). Для повышения устойчивости процесса резания часто уменьшают длину контакта формообразующего элемента с образующей (рис. 10.2 в).

На станке каждое движение обеспечивается соответствующей кинематической цепью. Все устройства, выполняющие данную функцию, можно разбить на два класса: 1) *направляющие комплексы*, обеспечивающие заданный вид траектории в

Некоторые схемы формообразования позволяют отказаться от части направляющих комплексов, передав их функцию заготовке или инструменту. При этом, поскольку каждый направляющий комплекс состоит из двух элементов: подвижного и неподвижного, передача его функции может быть полной или частичной. При частичной передаче на станке остается один элемент направляющей пары, а функции второго передаются заготовке или инструменту. При полной передаче из станка изымаются оба элемента направляющей пары, причем функции одного элемента передаются заготовке, а другого – инструменту.

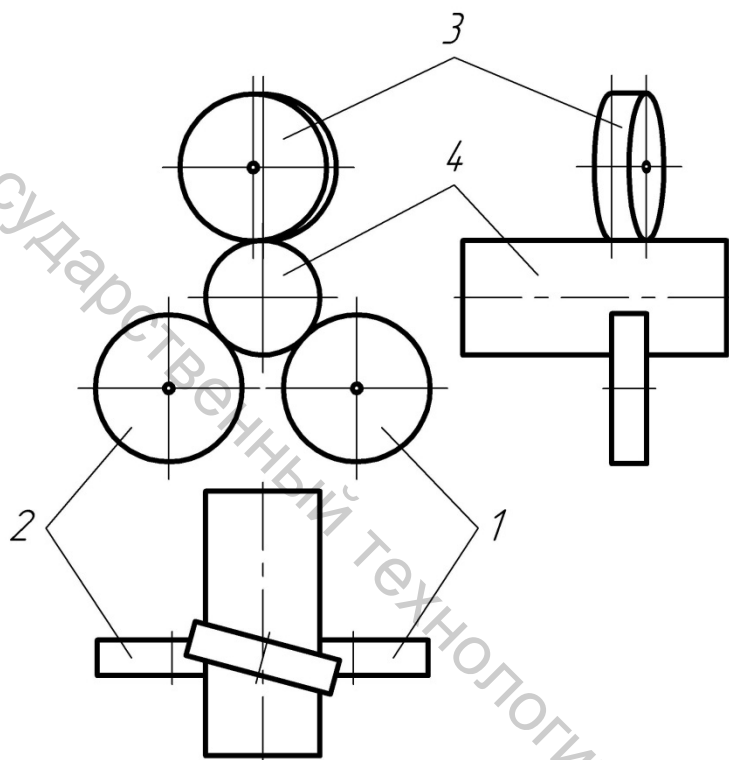


Рисунок 10.3 – Схема обкатывания с самоподачей

В некоторых случаях функции энергетических комплексов могут частично передаваться заготовке или инструменту. Один из примеров передачи функции направляющего и энергетического комплексов показан на рисунке 10.3, где заготовка 2 обкатывается тремя роликами с целью снижения шероховатости ее поверхности. В данном случае функция подвижного направляющего элемента передана обрабатываемой поверхности заготовки. Кроме того, отсутствует энергетический комплекс вращения и осевой подачи заготовки. Его функции взял на себя ведущий ролик 1 и поддерживающие ролики 4 и 3. Энергия для вращения и подачи заготовки передается ей через зону обработки (линии контакта с роликами).

Характер связи формообразующего элемента инструмента с последним звеном его энергетического комплекса определяется жестко-

стью этой связи вдоль одной или двух осей координат и количеством степеней свободы, которых лишается формообразующий элемент по отношению к его направляющему комплексу.

По первому признаку различают *жесткое* (обычное) и *эластичное* (с пониженной жесткостью) крепление формообразующего элемента. Примером метода обработки с эластичным креплением формообразующих элементов является ленточное шлифование, один из способов которого показан на рисунке 10.4. Эластичность ленты 2, покрытой абразивными зернами, позволяет ей принимать в зоне контакта форму фрагмента обрабатываемой поверхности заготовки 1. При этом нагрузка более или менее равномерно распределяется между абразивными зернами, находящимися в зоне обработки.

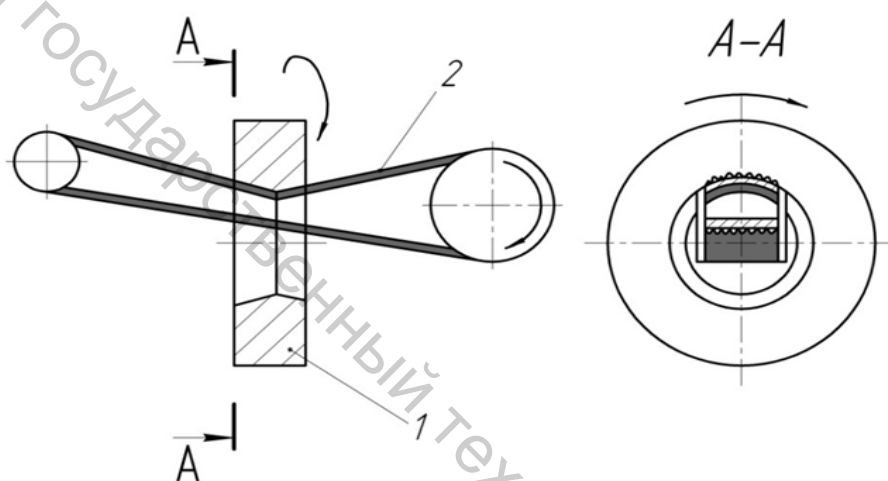


Рисунок 10.4 – Схема ленточного шлифования

По второму признаку различают: *обработку закрепленным инструментом*; *обработку инструментом с одной или двумя степенями свободы (самоустанавливающимся)*; *обработку «свободным» (т.е. незакрепленным) инструментом (чаще всего это абразивные зерна)*. Пример обработки отверстия самоустанавливающимся (плавающим) двухлезвийным блоком 1 показан на рисунке 10.5. В данном случае формообразующие элементы 2 инструмента имеют одну степень свободы по отношению к направляющему комплексу оправки 1, что позволяет им самоустанавливаться по предварительно обработанному отверстию. Примеры обработки свободным абразивом показаны на рисунке 10.6. Обработка в струе жидкости (см. рис. 10.6 а) применяется для поверхностной особо сложной конфигурации. Поверхность 1 обрабатываемой заготовки подвергается воздействию струи жидкости 2, содержащей абразивные частицы. Струя жидкости подается из сопла 3 под углом (чаще всего 40°). При магнитоабразивном полировании (рис. 10.6 б) в зазор между полюсами электромагнита 2 подается порошок 3, обладающий магнитными и абразивными свойствами. Магнитное поле удерживает

(временно) эти частицы и прижимает их к обрабатываемой поверхности заготовки *1*.

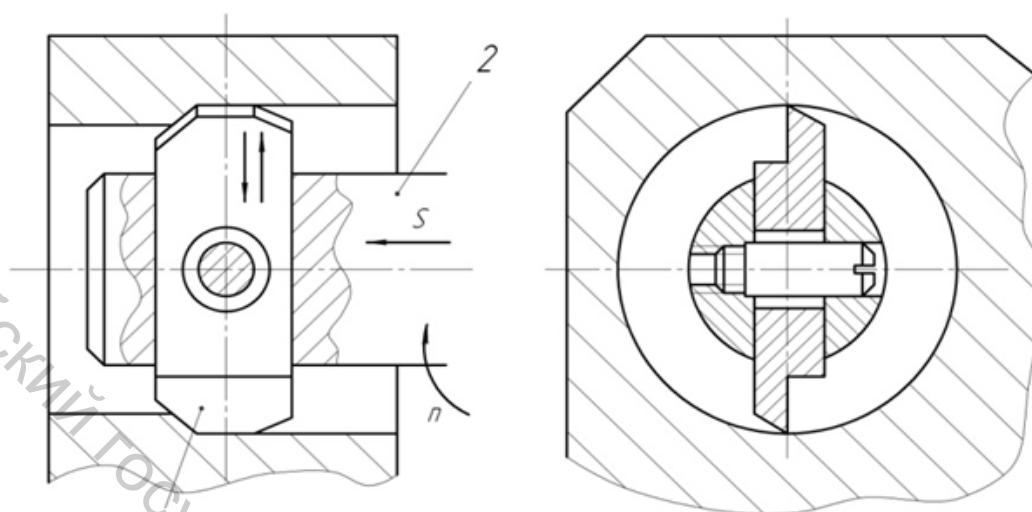


Рисунок 10.5 – Схема обработки плавающим двухлезвийным блоком

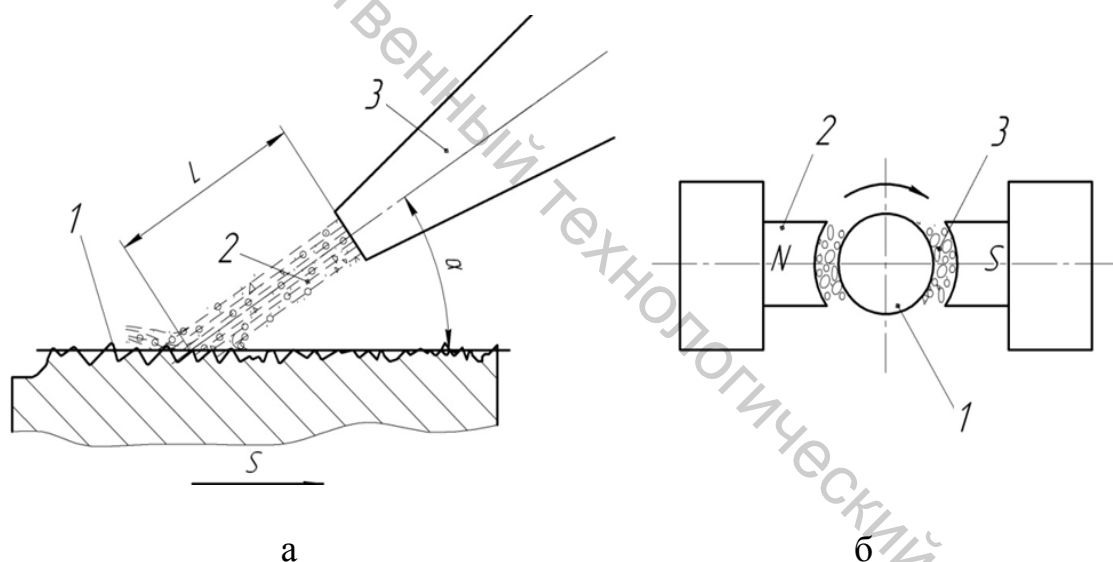


Рисунок 10.6 – Схема обработки свободным абразивом

По динамике процесса формообразования различают: предварительную, чистовую и отделочную обработку. Цель предварительной обработки – приблизить форму обрабатываемой поверхности к заданной. При чистовой и отделочной обработке достигаются заданные параметры качества обрабатываемой поверхности. Однако, при возможности, рационально использовать так называемую интеграцию обработки, то есть сразу, без предварительной обработки получать заданную точность и шероховатость. Такая однократная обработка возможна как лезвийным, так и абразивным инструментом, но она предъявляет повышенные требования к жесткости и виброустойчивости технологического оборудо-

вания и оснастки, требует значительного повышения мощности привода.

Обычные методы обработки характеризуются одним типом подводимой энергии, одним способом ее подвода, а также одним способом воздействия на заготовку. *Комбинированные методы обработки* могут быть построены как путем подвода в зону обработки двух и более типов энергии или путем совмещения различных способов ее подвода. Комбинированные методы обработки классифицируются по следующим признакам:

- 1) последовательность совмещения видов энергии, способов ее подвода или способов воздействия на заготовку;
- 2) число совмещаемых видов энергии, способов ее подвода или способов воздействия на заготовку.

По первому признаку комбинированные методы делятся на *последовательные* и *параллельные*, а по второму – на три группы:

- 1) используется один вид энергии, но два разных вида подвода;
- 2) совмещаются два вида энергии, подводимые в зону обработки;
- 3) совмещаются три вида энергии или два вида энергии и два способа ее подвода в зону обработки. Примеры комбинированных методов показаны на рисунке 10.7.

На рисунке 10.7 а приведена схема комбинированного точения заготовки 1 с поверхностным пластическим деформированием (ППД) обработанной поверхности подпружиненным роликом 2. Таким образом, совмещаются два способа воздействия на заготовку. Кроме того, для повышения стойкости резца ему сообщаются ультразвуковые колебания, параллельные скорости резания. Следовательно, в данном случае совмещаются еще два способа подвода механической энергии к зоне обработки.

На рисунке 10.7 б приведена схема протягивания отверстия комбинированной протяжкой, у которой каждая секция состоит из деформирующего элемента 1 и режущих зубьев 2. Это один из методов обработки с опережающим пластическим деформированием (ОПД) срезаемого слоя, благодаря чему повышается стойкость инструмента и улучшается качество обработанной поверхности.

На рисунке 10.7 в приведена схема одного из способов плазменно-механической обработки (ПМО). В данном случае на заготовку 1 (на поверхность резания впереди резца 2) воздействует дуга плазмы 4, которая формируется в среде аргона и водорода при проходе через электрическую дугу, горящую между корпусом плазмотрона и вольфрамовым электродом 3. Манипулятор 5 обеспечивает заданное опережение пятна разогрева срезаемого слоя. При предварительном точении труднообрабатываемых материалов ПМО обеспечивает повышение производительности в 5...12 раз. При ПМО в зону обработки подводится два вида

энергии – механическая и тепловая. Срезаемый слой подогревается до 600...900 °С, а в некоторых случаях частично расплавляется.

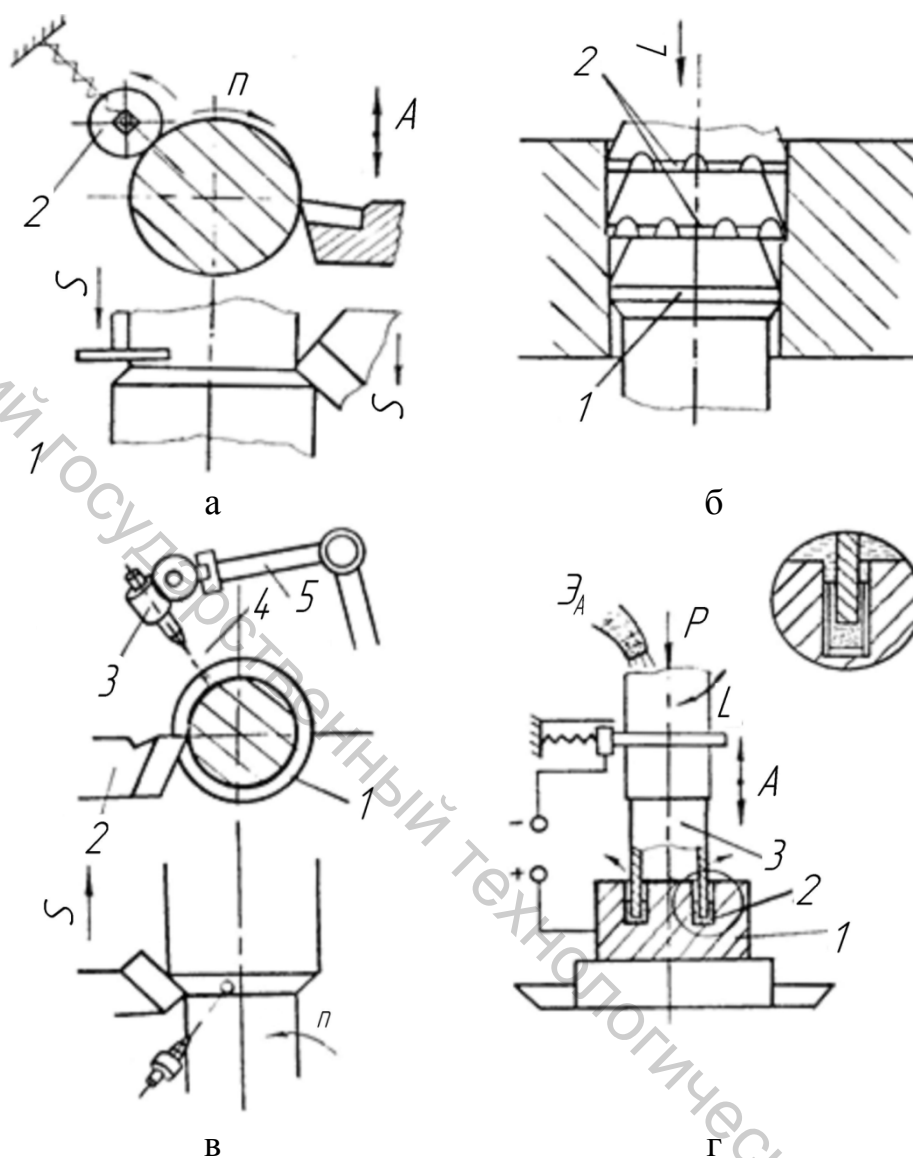


Рисунок 10.7 – Схемы комбинированных методов обработки

На рисунке 10.7 г приведена схема комбинированного кольцевого механоэлектрохимического кольцевого сверления твердосплавной заготовки 1, кольцевым сверлом 3 с алмазным рабочим кольцом 2. При этом, кроме вращения с частотой n и осевого прижима с силой P , сверлу сообщаются ультразвуковые колебания с амплитудой $A = 5...15$ мкм. Сверло и заготовка подключены к источнику постоянного тока, а внутрь сверла под давлением подается электролит (3 л/мин), благодаря чему механическая обработка совмещается с электрохимическим растворением. Алмазное кольцо инструмента имеет каналы для подвода электролита в торцевой межэлектродный зазор и удаления из него продуктов

разрушения. Данный процесс в 13 раз производительнее обычного алмазного сверления.

Любой из обычных методов обработки используется в определенном диапазоне условий, определяемом свойствами материала заготовки и инструмента. Критическими называют такие условия данного метода, когда дальнейшее повышение уровня показателей свойств обрабатываемого материала делает его использование невозможным по техническим причинам или нерентабельным по экономическим соображениям. Например, условия обработки инструментом из быстрорежущей стали становятся критическими, когда твердость обрабатываемого материала приближается к 46...51 HRC₃. В подобных ситуациях выходом из положения часто является комбинирование методов обработки [146–148].

10.2 Научные основы совершенствования технологических методов обработки деталей машин

Практически все методы обработки основаны на механическом, физическом, химическом или их совместном воздействии на заготовку при определенной кинематике перемещений инструмента и заготовки. В то же время любая изготовленная деталь имеет определенное функциональное назначение. Наряду с первоначальным позиционированием деталей в сборочной единице, определяемым точностью размеров, в процессе эксплуатации детали испытывают новое механическое, физическое или химическое воздействие при определенной кинематике их движений. Это приводит к изменению взаимного положения собранных деталей, потере точности, а иногда и к разрушению машин.

Все это говорит об идентичности процессов воздействия на деталь как при ее изготовлении, так и в процессе эксплуатации (рис. 10.8). Все эти факторы определяются [7–8]:

- формой и размерами рабочей части инструмента (см. пункт 1.1, рис. 10.8);
- макроотклонением, волнистостью и шероховатостью рабочих поверхностей и инструмента (см. пункт 1.2, рис. 10.8);
- скоростями и подачами взаимного перемещения заготовки и инструмента (см. пункт 1.3, рис. 10.8);
- геометрией рабочей части инструмента (см. пункт 2.1, рис. 10.8);
- силой и жесткостью технологической системы (см. пункт 2.2, рис. 10.8);
- временем воздействия (см. пункт 2.3, рис. 10.8);
- величиной снимаемого или пластически деформируемого поверхностного слоя (см. пункт 3.1, рис. 10.8);

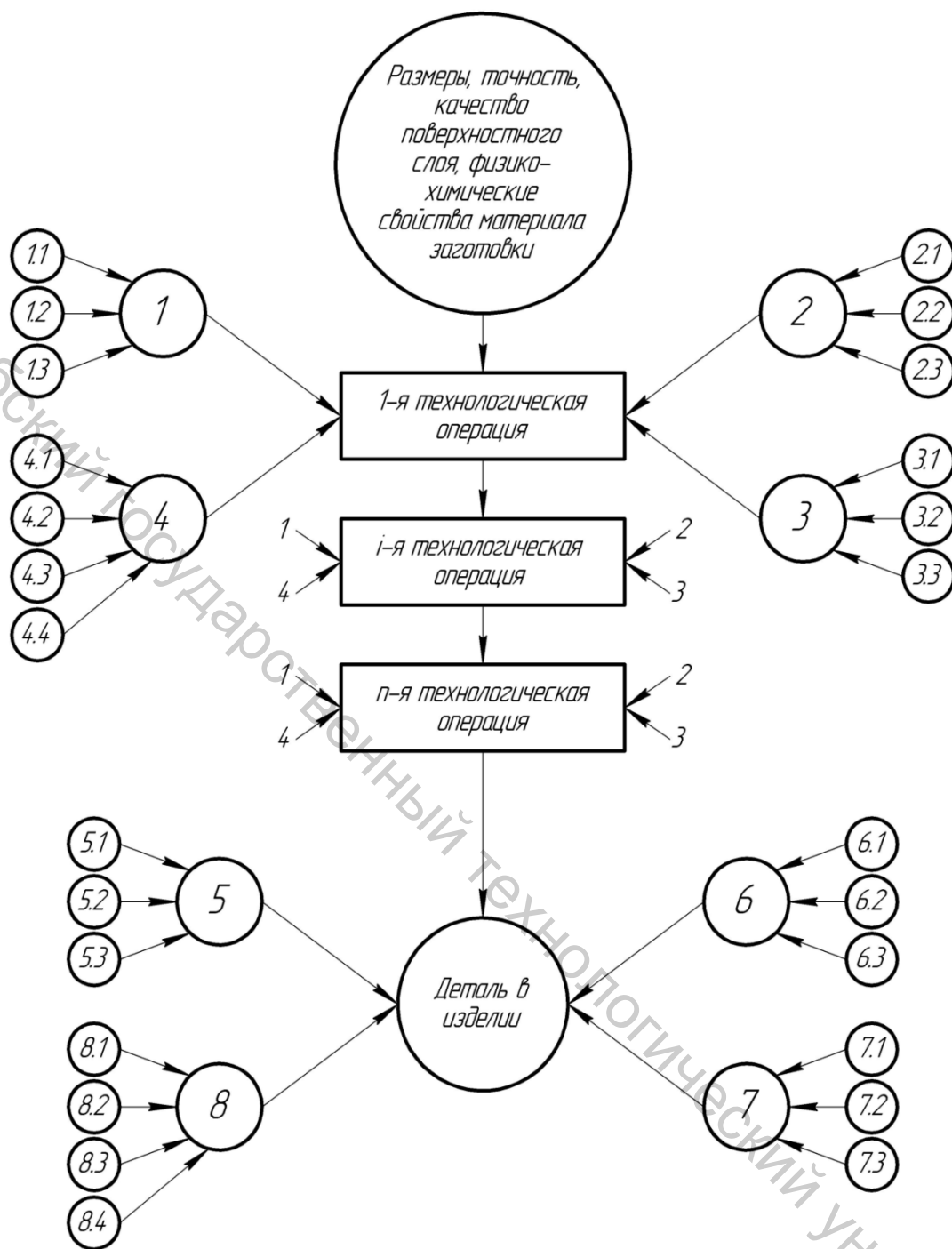


Рисунок 10.8 – Структурная схема воздействия различных факторов на заготовку при обработке и на готовую деталь при эксплуатации:

1, 2, 3, 4 – кинематическое, силовое, температурное, химическое воздействие на обрабатываемую заготовку при изготовлении итоговой детали (соответственно); 5, 6, 7, 8 – при эксплуатации

- СОТС (см. пункт 3.2, рис. 10.8);
- временем воздействия температуры (см. пункт 3.3, рис. 10.8);
- материалом рабочей части инструмента (см. пункт 4.1, рис. 10.8);

- СОТС (см. пункт 4.2, рис. 10.8);
- величиной снимаемого слоя или пластически деформируемого поверхностного слоя (см. пункт 4.3, рис. 10.8);
- временем протекания химического процесса при обработке (см. пункт 4.4, рис. 10.8);
- формой и размерами сопрягаемой поверхности (см. пункт 5.1, рис. 10.8);
- макроотклонением, волнистостью и шероховатостью сопрягаемой поверхности (см. пункт 5.2, рис. 10.8);
- кинематикой и скоростью взаимного перемещения сопрягаемых поверхностей (см. пункт 5.3, рис. 10.8);
- формой и размерами сопрягаемой поверхности (см. пункт 6.1, рис. 10.8);
- макроотклонением, волнистостью и шероховатостью сопрягаемой поверхности (см. пункт 6.2, рис. 10.8);
- рабочей нагрузкой на деталь при эксплуатации (см. пункт 6.3, рис. 10.8);
- температурой окружающей среды в процессе сборки и эксплуатации (см. пункт 7.1, рис. 10.8);
- промежуточной средой (смазкой) (см. пункт 7.2, рис. 10.8);
- рабочими нагрузками (см. пункт 7.3, рис. 10.8);
- физико-механическими свойствами поверхностного слоя сопрягаемой детали (см. пункт 8.1, рис. 10.8);
- промежуточной средой (смазкой) (см. пункт 8.2, рис. 10.8);
- температурой окружающей среды (см. пункт 8.3, рис. 10.8);
- временем контактного взаимодействия (см. пункт 8.4, рис. 10.8).

Это говорит о необходимости целенаправленных кинематического, силового, температурного и химического воздействий на детали при изготовлении, исходя из их дальнейшего функционального назначения.

Подтверждением этой концепции являются поверхности трения деталей, финишную обработку которых можно рассматривать как процесс приработки, обеспечивающий их равновесное состояние.

При эксплуатации отдельные участки одной и той же рабочей поверхности испытывают различные механическое, физическое и химическое воздействия, что сказывается на их долговечности. Это относится:

- к цилиндрическим, сферическим и криволинейным поверхностям трения (подшипники скольжения, чашки дифференциала заднего моста автомобиля, кулачки распредвалов, рабочие поверхности зубьев и др.);
- к цилиндрам двигателей, к цилиндрическим и коническим подшипникам качения;
- к рабочим поверхностям катания железнодорожных рельсов и колес;
- к резьбовым соединениям;

– к рабочим поверхностям режущих и деформирующих инструментов и т.д.

Большинство деталей машин, их соединений и инструментов работают при изменяющихся условиях эксплуатации (скорости, нагрузки, температуры). Рабочие поверхности трения таких деталей и инструментов должны обладать быстрой прирабатываемостью. Естественно, что для повышения долговечности таких деталей, соединений и инструментов необходимо при изготовлении обеспечить различные эксплуатационные показатели, а в большинстве случаев создавать новые поверхностные слои, обладающие быстрой прирабатываемостью. Все это ставит задачу целенаправленного системного совершенствования существующих и разработки новых методов обработки деталей машин, исходя из их функционального назначения.

Совершенствование существующих методов обработки, как правило, происходит случайно, а иногда исходя из поставленной задачи. Так, придание дополнительно осциллирующего движения рабочему шарiku при накатывании позволило получить новый метод обработки – вибронакатывание. Пропускание тока через зону контакта «рабочий ролик – заготовка» при накатывании привело к открытию электромеханической обработки.

Затруднения с механической обработкой резанием труднообрабатываемых материалов, а также необходимость повышения производительности труда привели к комбинированным методам обработки. Совершенствование существующих технологий обработки деталей зачастую происходит из необходимости повышения их долговечности. Так, цилиндрические и конические ролики подшипников качения для предотвращения их разрушения по краям необходимо обрабатывать с эксплуатационным распределением давлений вдоль образующей (рис. 10.9). Это позволяет обеспечить шлифование роликов бесконечной лентой. В результате такого шлифования ролики приобретают бочкообразную форму, которая при эксплуатации дает почти равномерное распределение давления вдоль образующей ролика (рис. 10.9 б).

Правильный расчет условий обработки (ширина и натяжение ленты, радиальная сила) позволяет получить форму ролика, обеспечивающую практически равномерное распределение давления вдоль образующей при его эксплуатации. Аналогично обстоит дело и с подшипниками скольжения, но в данном случае неравномерность давления при эксплуатации возникает как вдоль образующей, так и по дуге контакта. Избежать этого можно отделочно-упрочняющей обработкой поверхностным пластическим деформированием (ППД) поверхности трения подшипника при закономерно изменяющемся рабочем давлении [7–8].

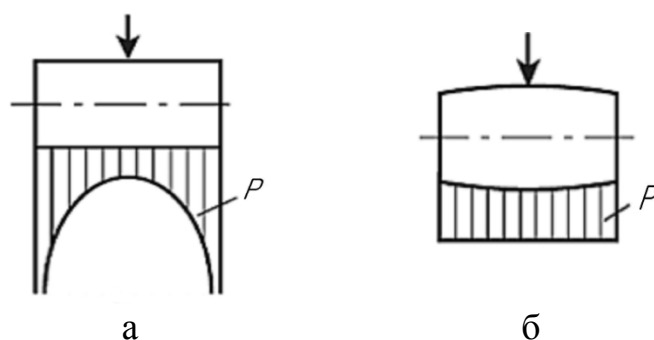


Рисунок 10.9 – Распределение рабочих давлений вдоль образующей при контакте ролика и поверхности катания:

а – при цилиндрической форме, б – при бочкообразной форме

Для обеспечения равномерности износа отдельных участков поверхностей трения чашек дифференциала и кулачков распредвалов можно применять электромеханическую обработку (ЭМО) с закономерно изменяющейся силой тока. Это позволяет получить поверхности трения с закономерно изменяющейся степенью упрочнения, обеспечивающей равномерный износ I при различных давлениях и скоростях:

$$I(\varphi) = 176 + 3,6HV_{исх} + U(\varphi) + 176v - 5,1P,$$

где $U(\varphi)$ – степень упрочнения поверхностного слоя; $HV_{исх}$ – исходная твердость обрабатываемой заготовки; v – скорость обработки, м/мин, P – рабочее усилие при ЭМО, Н.

Из полученного уравнения следует, что воздействие на степень упрочнения может быть осуществлено не только через силу тока, но и через скорость и давление, т.е. через те же факторы, которые при эксплуатации вызывают различную интенсивность износа. Это еще раз подтверждает правильность выдвинутой гипотезы о единстве процессов силового, температурного и других воздействий на рабочие поверхности деталей как при их изготовлении, так и эксплуатации.

Так как эти детали работают при постоянно изменяющихся режимах, необходимо, чтобы их поверхности обладали быстрой обрабатываемостью. Это лучше обеспечивается, если поверхности имеют чередующиеся мягкие и твердые участки. Получить такую поверхность можно, если току придать импульсный характер. Так появилась импульсная ЭМО.

Различные участки рабочих поверхностей зубьев наряду с тем, что они работают при различных условиях, должны также обеспечивать совершенно разные эксплуатационные свойства. Так, у их основания должно обеспечиваться сопротивление усталости, на участке у делительной окружности – контактная прочность, на остальных участках боковой поверхности – износостойкость. Это характерно особенно для си-

ловых зубчатых передач. Очевидно, что принятые технологии обработки боковых поверхностей зубьев (фрезерование и шлифование) не могут обеспечить выполнение таких условий. Это может быть обеспечено целенаправленным изменением силового и температурного воздействий на обрабатываемую поверхность зуба, что реализуется через комбинированную обработку ППД и ЭМО, которая требует целенаправленной разработки как инструмента, так и оборудования.

Анализ износа цилиндров двигателей показал, что они имеют наибольший износ в верхней части. Это, очевидно, объясняется повышенными температурами в этой части цилиндров при их эксплуатации, которая при недостаточной маслосъемности поверхности может приводить к явлениям схватывания, особенно в начальный период приработки. Для избежания этого вредного явления на цилиндрах двигателей целесообразно сформировать вибронакатыванием маслосъемные карманы. Величина этих карманов по длине цилиндра должна быть различной, что обеспечивается закономерно изменяющимися режимами обработки: частотой колебаний и усилием рабочего шарика вибронакатного устройства [7–8].

Обработка внутренних резьб в алюминий-кремнистых сплавах связана со значительными трудностями. Резание затруднено вследствие вязких свойств материала, а пластическое деформирование – его хрупкостью. Все это привело к необходимости комбинированной обработки и разработке специального инструмента, обеспечивающего при обработке благоприятные условия резания и пластического деформирования, что позволило значительно повысить производительность обработки и качество резьбы.

Рабочие поверхности вырубных пуансонов, как и других инструментов, работают в различных условиях. Основную нагрузку несет режущая кромка, которая должна обладать повышенной поверхностной динамической прочностью и износостойкостью. Для обеспечения благоприятных условий резания и достаточной поверхностной динамической прочности режущая кромка вырубных пуансонов должна иметь оптимальный радиус округления, что обеспечивается его виброобработкой. Для повышения поверхностной динамической прочности и износостойкости вырубных пуансонов их рабочая кромка должна быть легирована материалами, обеспечивающими это, что осуществляется лазерным легированием.

Изучение взаимодействия рабочей части режущего инструмента и обрабатываемой детали показывает на возможность частичного или полного перевода процесса резания к пластическому деформированию. Это в значительной мере расширяет возможности совершенствования обычных методов механической обработки.

Научно обоснованное определение требуемых величин воздействующих факторов или их соответствующего изменения, исходя из

функционального назначения детали, позволит создавать оптимальные технологии их производства, эксплуатации и ремонта.

10.3 Научные основы создания новых технологических методов обработки и процессов изготовления деталей машин

Новизна методов обработки определяется всеми компонентами технологической системы, станком, технологической оснасткой, процессом формообразования поверхностного слоя детали. Каждый из компонентов может иметь собственную новизну или же создавать новизну системы в целом за счет определенного нетрадиционного сочетания известных компонентов [7–8, 146–148].

При проектировании новых методов обработки и технологических процессов необходимо использовать как накопленный опыт, так и новый системный подход, базирующийся на единстве технологии проектирования, производства и эксплуатации изделий машиностроения. Так, накопленный опыт по механической, физической и химической обработке позволил создавать комбинированные методы обработки: резание – ППД; ППД – резание; ППД – резание – ППД; резание в химических средах; химико-механическое полирование; механическая обработка с наложением ультразвука и т.д. Необходимость в строгом управлении силой и количеством ударов металлической дроби на единицу площади привела к созданию нового метода обработки инструментом центробежноударного действия.

Создание новых методов обработки является творческой задачей, формализация которой возможна лишь в редких частных случаях.

Однако вполне реально, проанализировав состояние вопроса, указать основные направления, а также сформулировать отдельные приемы и методы решения данной задачи.

В целом эволюционную систему технологических преобразований и создания новых прогрессивных технологий можно представить в виде следующей модели (рис. 10.10). Основными объектами модели являются кадровое обеспечение, техническое обеспечение и технологические среды. Они осуществляют технологическое воздействие $N(t_k)$ материального $S_0(t_k)$, энергетического $E_0(t_k)$ и информационного $I_0(t_k)$ типов на предметы обработки (заготовки, изделия) и реализуют процесс технологических преобразований заготовок в изделия, которые имеют вход I и выход W . Сам процесс технологических преобразований имеет обратную связь с обеспечивающими объектами системы. Обратная связь позволяет получать сведения о количественных и качественных параметрах процессов технологических преобразований, а также дает возможность многократного использования средств технологического воз-

действия, организовать их поточность и непрерывность функционирования [7–8, 146–148].

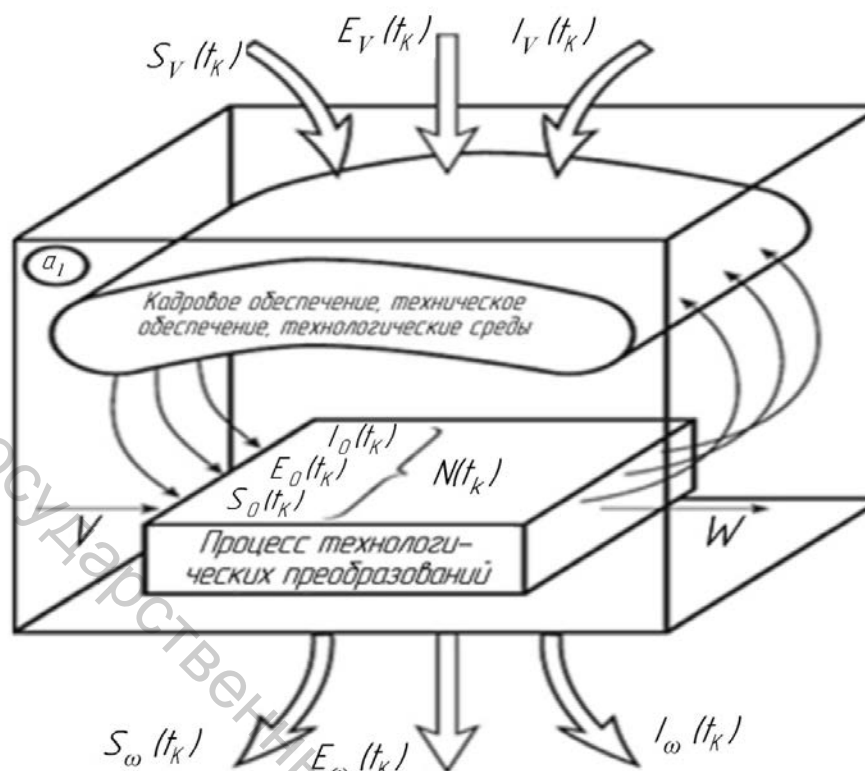


Рисунок 10.10 – Модель системы технологических преобразований (базовая модель технологии)

Все объекты системы технологических преобразований функционируют в пространстве и во времени, поэтому между ними действуют пространственно-временные отношения. Объекты модели ограничены пространственной границей, определяющей эту систему как функциональную единицу или объемно-пространственную производственную ячейку.

Воздействия, оказываемые на систему технологических преобразований со стороны других систем, могут быть представлены следующим множеством:

$$F^i = \{F_1^i, F_2^i, \dots, F_n^i\} \equiv S_V(t_k) \cup E_V(t_k) \cup I_V(t_k),$$

где F^i – вектор обобщенного входа; $S_V(t_k), E_V(t_k), I_V(t_k)$ – входные обобщенные воздействия соответственно материального, энергетического и информационного типа; t_k – момент времени.

Входные воздействия оказывают различное действие на систему технологических преобразований.

Основные задачи входных воздействий F^i следующие: обеспечение необходимой структуры объектов; реализация требуемого поведения объектов; восстановление потоков технологического воздействия орудий и средств обработки на изделия и др.

Воздействия, реализуемые системой технологических преобразований на другие системы, могут быть описаны следующим образом:

$$F_i = \{F_1^i, F_2^i, \dots, F_n^i\} \equiv S_\omega(t_k) \cup E_\omega(t_k) \cup I_\omega(t_k),$$

где F_i – вектор обобщенного выхода; $S_\omega(t_k)$, $E_\omega(t_k)$, $I_\omega(t_k)$ – выходные обобщенные воздействия соответственно материального, энергетического и информационного типа.

Входные и выходные обобщенные воздействия включают как основные потоки различных типов, направленные на прогрессивное развитие системы, так и побочные (вредные, сопутствующие), оказывающие отрицательное влияние на качественные показатели развития.

Проектирование технологии подразумевает учет противоречивых требований, причем продуктами его являются модели, позволяющие понять структуру будущей технологии. Однако разработка технологии остается до сих пор трудоемким процессом, целями которого являются: обеспечение требуемого алгоритма функционирования (технологического воздействия); реализация приемлемой цены; удовлетворение явным и неявным требованиям по эксплуатационным качествам, ресурсопотреблению и дизайну; удовлетворение требованиям к стоимости и продолжительности разработки технологии. При этом процессы проектирования технологий могут выполняться по различным схемам. Этапы традиционного жизненного цикла технологии характеризуются лавинообразным нарастанием сложности (рис. 10.11 а). Во многих компаниях и фирмах такую схему создания технологий рассматривают как незыблемую. Однако, несмотря на силу традиций, анализ жизненного цикла технологии показывает следующие недостатки этой схемы:

- непригодность для разработки сложных технологий, состоящих из большого количества подсистем и автономных модулей, образующих сетевые структуры;
- обязательно последовательное выполнение всех этапов создания технологии;
- несовместимость с эволюционным подходом;
- несовместимость с перспективными методами автоматизированного проектирования и управления технологиями [7–8, 146–148].

Поэтому для создания прогрессивных технологий традиционные методы не подходят.

Начинает развиваться объектно-ориентированное проектирование, что особенно перспективно для создания новых технологий.

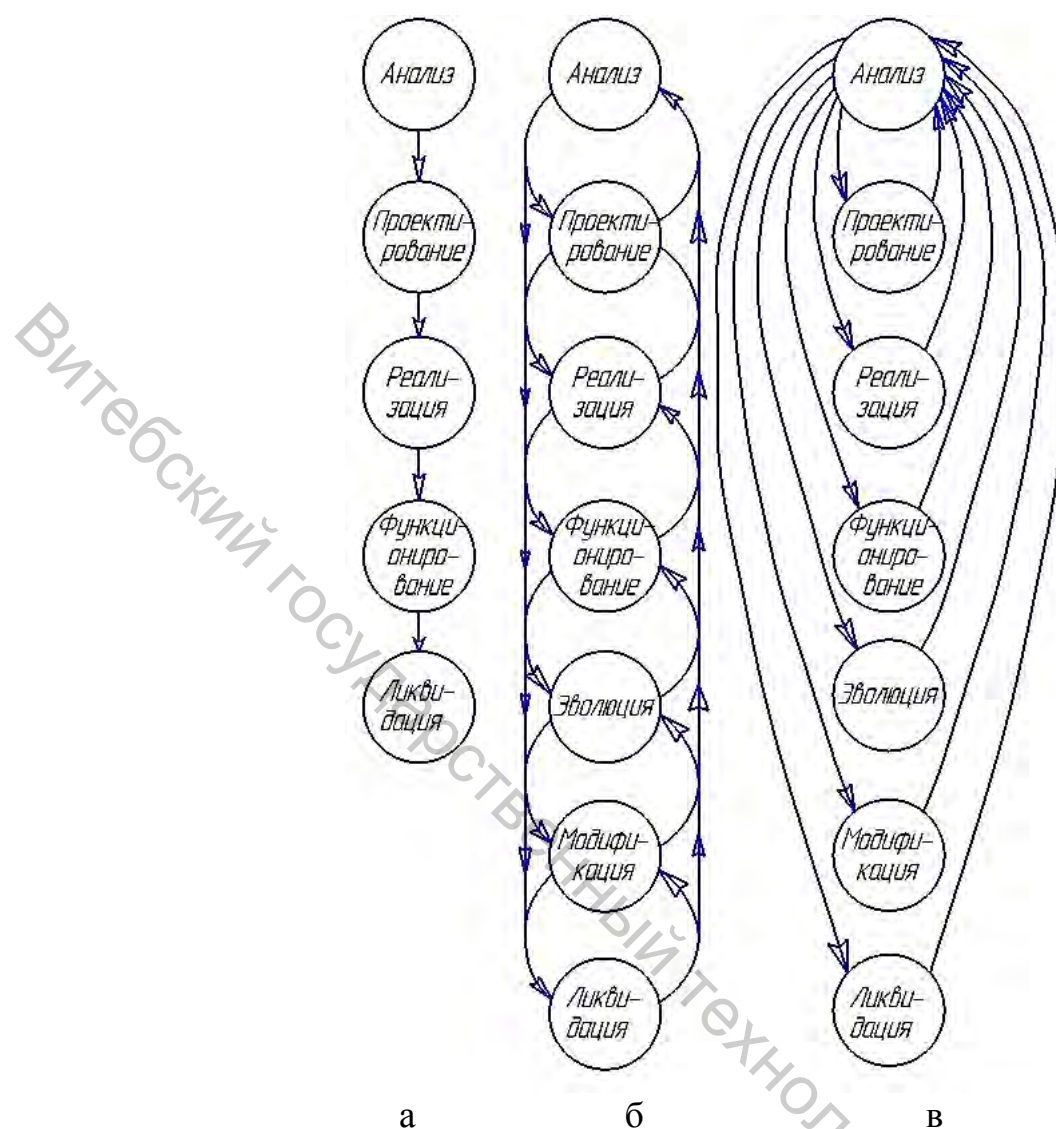


Рисунок 10.11 – Этапы жизненного цикла технологий

В основе объектно-ориентированного проектирования лежит объектный подход, главными принципами которого являются: абстрагирование, ограничение доступа, модульность, иерархичность, типизация, параллелизм и устойчивость.

На рисунке 10.11 б показаны этапы жизненного цикла технологии при объектно-ориентированном проектировании. Здесь процесс создания технологии не является отдельным монолитным этапом. Он представляет собой один из шагов на пути последовательной итеративной разработки технологии; при этом последовательность шагов может иметь произвольный характер. Частный вариант последовательной итеративной разработки технологии с направленными шагами через анализ представлен также на рисунке 10.11 в.

Применение описанных моделей позволило определить основные характеристики прогрессивных технологий нового поколения, которые, дополняя известными данными, можно представить структурной схе-

мой, изображенной на рисунке 10.12. Она имеет иерархическую структуру и содержит основные признаки, особенности и обеспечение прогрессивных технологий.

Основные признаки, характеризующие прогрессивность новых технологий, можно представить следующими категориями:

- качественно новая совокупность свойств изделий (причина);
- качественно новая мера полезности изделий (следствие).

С развитием науки и техники создаются возможности для улучшения свойств изделий, например, геометрических, кинематических, механических, тепловых, оптических и др., а также реализуются качественно новые свойства изделий, например, экологические, манипуляционные, отражения жестких космических лучей, свойства обладания эффектом «магнитная потенциальная яма» и др. Для обеспечения этого проектируемые технологии непрерывно совершенствуются и создаются качественно новые, а это значит, что они будут постоянно улучшать и создавать качественно новые свойства изделий.

Однако только мера этих свойств – полезность этих изделий или их ценность – имеет решающее значение, так как конечной целью изготовления любого изделия является обеспечение необходимой ценности. Создаваемые прогрессивные технологии непрерывно повышают ценность изделий и соответственно реализуют качественно новую меру их полезности, обеспечивается возможность использования их в работах *n*-го поколения, для «гипердвигателей» межгалактических кораблей, для марсианского транспорта, построенного по принципу мехатроники, и др.

Создаваемые прогрессивные технологии нового поколения имеют некоторые базовые особенности, основные из которых могут быть связаны с высокой наукоемкостью их создания, сложностью реализации и функционирования. При этом необходимы высокая информационность и компьютеризация, определенный уровень электрификации и энергообеспечения. Поэтому проектирование новых технологий должно базироваться на оптимальных технологических процессах. При необходимости могут быть использованы новые методы преобразования заготовок в изделия. Для этого должны применяться прогрессивные методы производства. На всех этапах жизненного цикла (см. рис. 10.11) новых технологий необходимо обеспечивать высокую степень автоматизации процессов.

Созданные технологии должны иметь высокую устойчивость и надежность функционирования по заданному алгоритму. Все это должно быть тщательно проработано на основе принципов объектно-ориентированного подхода и обеспечена экологическая чистота технологий. Вместе с тем создаваемые технологии должны быть открытыми к развитию и иметь возможность эволюционировать и модифицироваться в соответствии с изменяющимися внешними условиями. Кроме того,

прогрессивные технологии могут иметь ряд других особенностей, относящихся к специальным технологиям или технологиям будущего.

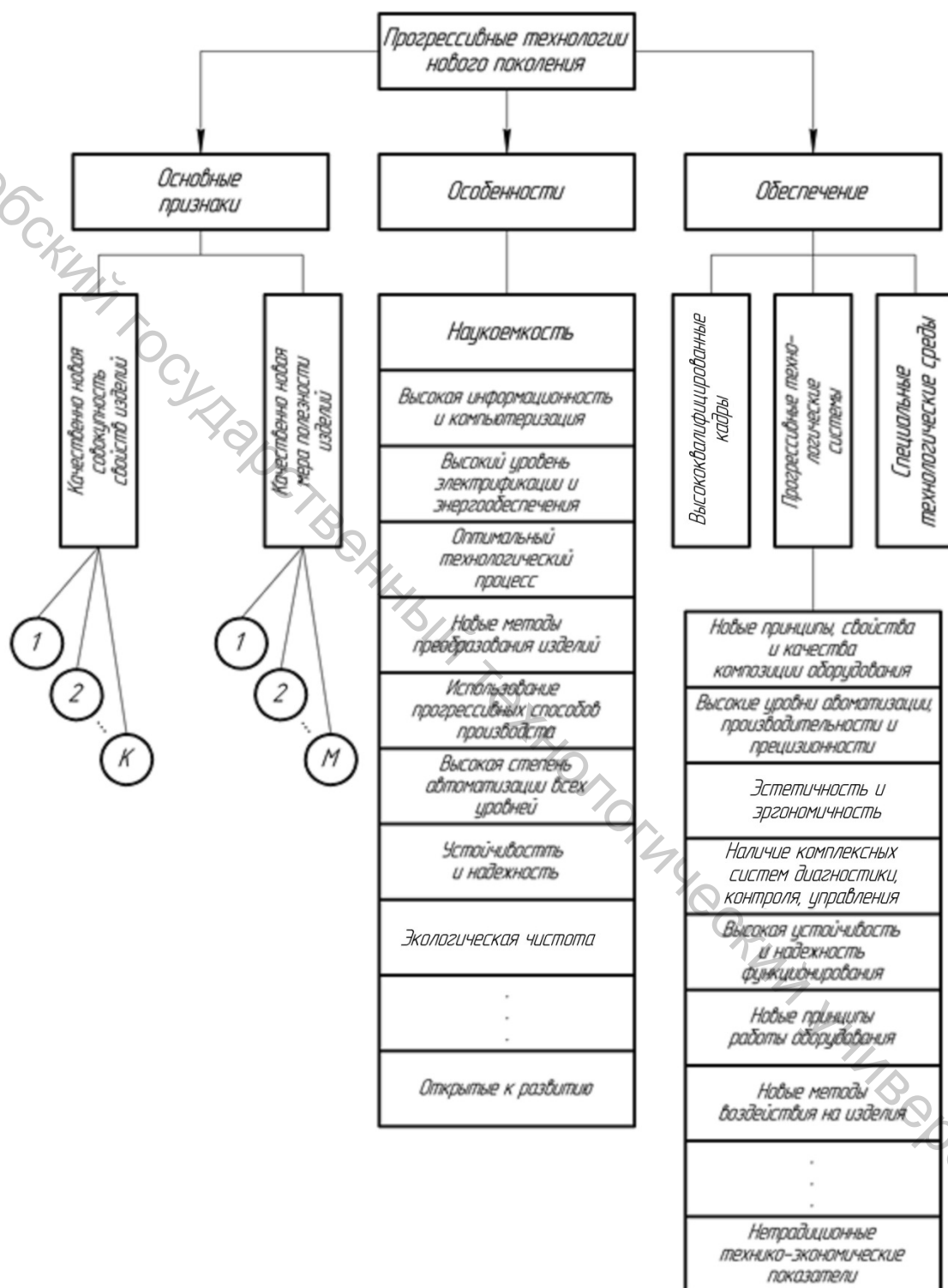


Рисунок 10.12 – Основные характеристики прогрессивных технологий нового поколения

Для создания прогрессивных технологий нового поколения необходимо нетрадиционное обеспечение, а именно: высококвалифицированные кадры, прогрессивные технологические системы и специальные технологические среды. В этом случае проектирование технологических систем должно прежде всего определяться конъюнктурой рынка, основываться на новых принципах, свойствах и качестве композиции элементов оборудования, иметь высокие уровни автоматизации, производительности и прецизионности оборудования, оснастки и инструментов. Созданные технологические системы должны быть эстетичны и эргономичны, иметь высокую устойчивость и надежность функционирования. Для этого широко должны быть использованы комплексные системы диагностики, контроля и управления, а также новые принципы работы оборудования и методы воздействия орудий и средств обработки на изделия. Такой комплексный подход в создании прогрессивных технологических систем дает качественно новые нетрадиционные технико-экономические показатели их создания и функционирования.

Проведенные исследования с использованием разработанных моделей позволили определить и дополнить известные тенденции прогрессивного развития технологий новыми, к которым можно отнести следующие:

- повышение концентрации и параллелизма технологических зон обработки, обеспечивающих повышение производительности;
- создание нетрадиционных прогрессивных пространственных структур технологических зон обработки (создание многомерных циклических структур, повышение размерности многообразия и объектов в каждом многообразии структуры), реализующих повышение технологических возможностей пространства и среды;
- компоновка технологических зон обработки в линейные, поверхностные и объемные структуры, компоновка этих структур в производственные ячейки;
- компоновка производственных ячеек в пространственные структуры и заполнение ими всего объема пространства производственного цеха с возможностью изменения их пространственного расположения;
- повышение степени компактирования структуры за счет увеличения плотности (линейной, поверхностной, объемной) технологических зон обработки;
- организация поточности функционирования технологических зон обработки и повышение их интенсивности;
- повышение непрерывности и устойчивости функционирования технологических систем в соответствии с заданным алгоритмом;
- повышение информативности технологий, снижение массы технологических систем и повышение их энергообеспеченности;
- создание технологий и технологических систем с использованием принципа механотроники;

– упрощение функциональной структуры за счет совмещения различных функций технологических систем; выполнение технологических функций посредством транспортных функций, и наоборот;

– применение комплексных систем диагностики, контроля и управления процессами.

Анализ этих тенденций позволил сформулировать и разработать общий теоретический подход в создании и функционировании нетрадиционных технологических систем, называемых поточно-пространственными технологическими системами. Эти технологические системы имеют качественно новые свойства и возможности, а также существенно повышают уровень автоматизации и интенсификации производственных процессов. Разработанная общая методика синтеза дает возможность создавать поточно-пространственные технологические системы непрерывного действия следующих видов:

– технологические системы высокой и сверхвысокой производительности для производства изделий медицинской, радиоэлектронной, пищевой промышленности, приборостроения и других отраслей народного хозяйства;

– технологические системы непрерывного действия для длительных циклов технологического воздействия (термические, химические, физико-химические методы обработки и др.);

– технологические системы непрерывного действия для комплексной обработки изделий;

– гибкие технологические системы непрерывного действия.

Эти технологические системы позволяют значительно повысить производительность производственных процессов, сократить занимаемые оборудованием производственные площади, уменьшить длительность производственного цикла, число рабочих, занятых в производстве, и улучшить другие показатели.

Данная методология, ориентированная на конечную цель, – создание прогрессивных технологий, дает возможность видеть взаимосвязи, понимать и применять целостность как принцип проектирования. Создаваемые технологии являются отражением современного развития техники: теория их создания позволяет объяснить и предсказывать закономерности эволюционного процесса развития прогрессивных технологий.

Методология разработки новых методов обработки базируется на предложенной концепции нового научного подхода к решению этой проблемы, основанной на единстве технологии изготовления и эксплуатации деталей машин и их соединений.

Так, для повышения долговечности пар трения необходимо, как только возможно уменьшить их приработку в процессе эксплуатации. Этого добиваются финишной обработкой поверхностей трения, моделирующей ускоренный процесс их приработки. В соответствии с разрабо-

танной теорией трения и износа, процесс приработки представляет микрорезание и пластические деформации микронеровностей поверхностей трения.

Обеспечить этот процесс приработки можно на стадии финишной обработки поверхности трения специальным инструментом с моделированными микронеровностями. Рабочая поверхность инструментов должна проскальзывать по поверхности трения обрабатываемой детали, вызывая микрорезание и микродеформирование ее шероховатости. В качестве такого инструмента могут быть использованы притирочный абразивный брусок (с определенной зернистостью) или иглофреза (с определенным диаметром рабочих игловок). Усилия прижатия и скорость проскальзывания инструмента определяются условиями эксплуатации обрабатываемой поверхности трения.

В зубчатых передачах в процессе приработки изменяется форма эвольвентной поверхности, увеличивается боковой зазор, что ведет к росту шума, изменению линии контакта и разрушению зубьев. Избежать этого явления можно, если в процессе изготовления и приработки зубчатых передач смоделировать все эти процессы: при зубонарезании и шлифовке зубьев – обеспечить их эксплуатационный профиль, а при обкатке – равновесное состояние качества поверхности. Для этого должен быть скорректирован рабочий профиль фрезы и шлифовального круга. Это, в свою очередь, говорит о необходимости учета при проектировании инструмента функционального назначения обрабатываемой поверхности.

Для окончательной обработки боковых поверхностей зубчатых колес может быть использована обкатка или специальная технология финишной обработки, обеспечивающая процесс микрорезания и пластических деформаций микронеровностей. Финишная обработка обеспечивается алмазным или обычным шевингованием.

10.4 Научные конкурентоспособные технологии в машиностроении

Научными конкурентоспособными считаются такие технологии, которые базируются на: последних достижениях науки; системном построении; моделировании; оптимизации себестоимости изготовления, эксплуатации и ремонте изделия; новых и комбинированных научных методах обработки и техпроцессах; компьютерной технологической среде и комплексной автоматизации производства [7–8, 146–148].

Реализация таких технологий требует соответствующего технического оснащения (прецизионное высокоточное оборудование, технологическая оснастка и инструмент для механической, физико-химической

и комбинированной обработки, в том числе и по нанесению различных покрытий, автоматизированные системы диагностики и контроля, компьютерные сети) и кадрового обеспечения (высокая квалификация всех работников, научное консультирование и др.).

Как правило, наукоемкие технологии в машиностроении применяются для повышения функциональных свойств изделий и их конкурентоспособности. Структурно это представлено на рисунке 10.13.

Основным свойством наукоемких технологий являются результаты фундаментальных и прикладных исследований, на которых они базируются.

Системность предполагает диалектическую взаимосвязь, взаимодействие всех элементов технологической системы, всех основных процессов, явлений и составляющих. Системность особо важна как требование прецизионности и соответствие этим требованиям всех структурных элементов технологической системы обработки и сборки (оборудование, инструмент, обрабатываемый материал, оснастка, измерения, диагностика, работа исполнительных органов).

Важнейшим свойством наукоемких технологий, безусловно, является новый техпроцесс. Он доминирует во всей технологической системе и должен отвечать самым разнообразным требованиям, но, главное, быть потенциально способным обеспечить достижение нового уровня функциональных свойств изделия. Здесь богатыми возможностями обладают те устойчивые и надежные техпроцессы, в которых эффективно используются физические, химические, электрохимические и другие явления в сочетании со специальными свойствами инструмента, технологической среды, например, криогенное резание, диффузионное формообразование изделий и т.п.

Несомненно, существенным признаком наукоемких технологий является комплексная автоматизация, базирующаяся на компьютерном управлении всеми процессами проектирования, изготовления и сборки, на физическом, геометрическом и математическом моделировании, всестороннем анализе моделей процесса или его составляющих.

Наличие рассматриваемого признака требует системного подхода к ее компьютерно-интеллектуальной среде, т.е. перехода к CAD/CAM-системам. Таким путем обеспечивается сочетание гибкости и автоматизации, прецизионности и производительности.

Системный подход предполагает использование не отдельных математических моделей, а системы взаимосвязанных моделей с непременной параметрической и структурной оптимизацией. Например, параметрическая оптимизация преследует цель минимизации ряда характеристик процесса размерной обработки, прежде всего энергетических затрат, минимизации толщины срезов, силы резания и уровня температуры, интенсивности окислительных процессов и т.д.

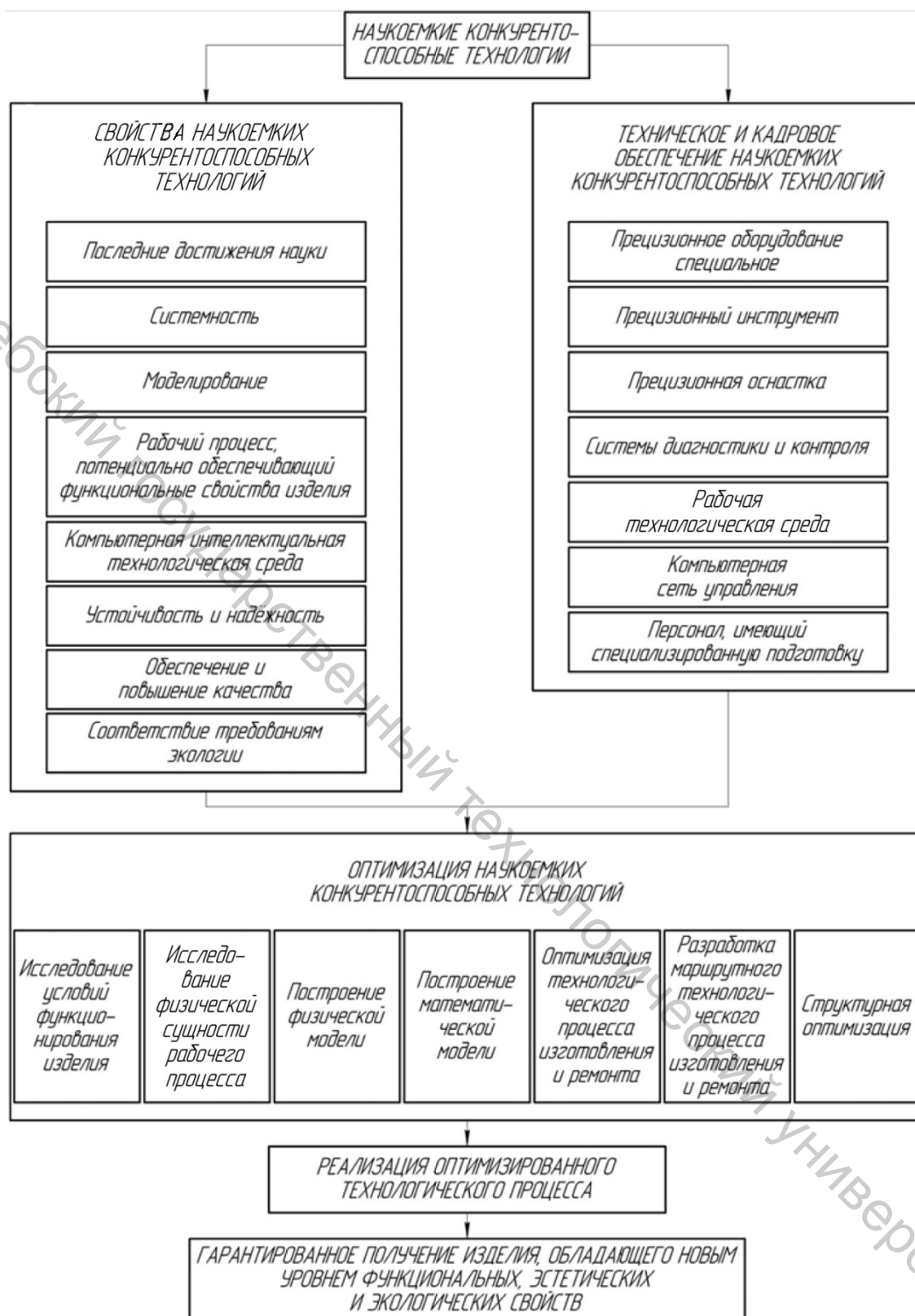


Рисунок 10.13 – Структура конкурентоспособных наукоемких технологий

Для наукоемкой технологии нужна высокая степень («глубина») оптимальности для сравнительно узкого конкретного диапазона условий и требований. Базой такой оптимальности могут быть только глубокие

специальные исследования в этой области, разработка автоматизированных систем научного обеспечения, включая использование мирового опыта, специальных методов оптимизации, методов достижения прецизионности, технологического обеспечения функциональных свойств и др.

Важную роль играет техническое обеспечение наукоемких технологий, в рамках которого в качестве основных условий реализации выступают прецизионность оборудования, инструмента, оснастки, системы диагностики и контроля. Результаты развития каждого из этих направлений в сочетании с новейшими достижениями науки и смежных областей техники являются естественными источниками наукоемких технологий.

При этом прогресс в создании техпроцессов наукоемких конкурентоспособных технологий, как и традиционных технологий, является определяющим и характеризуется наиболее высокими темпами повышения производительности и качества.

Важнейшим свойством наукоемких технологий является их кадровое обеспечение. Разработка и реализация таких технологий требует высокообразованных специалистов на всех стадиях их жизненного цикла. Практически все специалисты, включая станочников и операторов, должны иметь высшее образование. Это хорошо просматривается на примере многих японских, американских и западноевропейских фирм.

Таким образом, технология машиностроения подошла к новому этапу своего развития – новым наукоемким технологиям, реализация которых позволяет машиностроителям создавать конкурентоспособные изделия [7–8, 146–148].

10.5 Вопросы для самоконтроля

1. Какие признаки положены в основу классификации методов обработки?
2. Как различаются методы обработки по характеру (результату) воздействия на заготовку?
3. Как различаются методы обработки по природе воздействия на заготовку?
4. По каким признакам различают образующую и направляющую?
5. Приведите примеры схем формообразования, в которых образующая и направляющая возникают прерывисто.
6. Приведите примеры схем формообразования, в которых образующая возникает непрерывно, а направляющая – прерывисто.

7. Приведите примеры схем формообразования, в которых направляющая возникает во времени прерывисто, а образующая – единовременно.

8. Приведите примеры схем формообразования, в которых направляющая и образующая возникают непрерывно.

9. Приведите примеры схем формообразования, в которых направляющая возникает во времени непрерывно, а образующая – единовременно.

10. Приведите пример передачи функции направляющего и энергетического комплексов.

11. Чем определяется характер связи формообразующего элемента инструмента с последним звеном его энергетического комплекса?

12. Приведите пример метода обработки с эластичным креплением формообразующих элементов.

13. Приведите примеры обработки свободным абразивом.

14. Как различаются методы обработки по динамике процесса формообразования?

15. По каким признакам классифицируются комбинированные методы обработки?

16. Изобразите схему комбинированного течения заготовки с поверхностным пластическим деформированием.

17. Изобразите схему одного из способов плазменно-механической обработки.

18. Изобразите схему комбинированного механоэлектрохимического кольцевого сверления твердосплавной заготовки.

19. Чем определяется идентичность процессов воздействия на деталь как при ее изготовлении, так и в процессе эксплуатации?

20. Изобразите структурную схему воздействия различных факторов на заготовку при обработке и на готовую деталь при эксплуатации.

21. Приведите примеры совершенствования существующих методов обработки.

22. Представьте модель эволюционной системы технологических преобразований и создания новых прогрессивных технологий.

23. Перечислите основные задачи входных воздействий модели эволюционной системы технологических преобразований и создания новых прогрессивных технологий.

24. Приведите последовательность этапов традиционного жизненного цикла технологии.

25. Каковы недостатки схемы традиционного жизненного цикла технологии?

26. Назовите главные принципы объектно-ориентированного проектирования технологических процессов.

27. Приведите последовательность этапов жизненного цикла технологии при объектно-ориентированном проектировании.

28. Укажите основные характеристики прогрессивных технологий нового поколения.

29. Назовите основные признаки, характеризующие прогрессивность новых технологий.

30. Охарактеризуйте базовые особенности создаваемых прогрессивных технологий нового поколения.

31. Перечислите новые тенденции прогрессивного развития технологий.

32. В чем суть поточно-пространственных технологических систем?

33. Приведите примеры методологии разработки новых методов обработки, основанной на единстве технологии изготовления и эксплуатации деталей машин и их соединений.

34. Какие технологии в настоящее время считаются наукоемкими конкурентоспособными?

35. Изобразите структурную схему представления конкурентоспособных наукоемких технологий.

36. Что требуется для реализации наукоемких конкурентоспособных технологий?

37. Охарактеризуйте основные признаки наукоемких технологий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Махаринский, Е. И. Основы теории проектирования технических систем : учебное пособие для студентов вузов / Е. И. Махаринский, Ю. Е. Махаринский, В. И. Ольшанский, Н. В. Беляков ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2009. – 354 с.
2. Беляков, Н. В. Синтез технологических процессов : учебное пособие / Н. В. Беляков, Ю. Е. Махаринский, В. И. Ольшанский, В. А. Горохов ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2017. – 472 с.
3. Беляков, Н. В. Формализация проектирования технологических процессов механической обработки корпусных деталей машин : научное издание / Н. В. Беляков, Е. И. Махаринский, Ю. Е. Махаринский. – Витебск : УО «ВГТУ», 2006. – 147 с.
4. Основы технологии машиностроения и формализованный синтез технологических процессов : учебник. В 2 ч. Ч. 1 / В. А. Горохов [и др.]; под ред. В. А. Горохова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: ТНТ, 2019. – 496 с.
5. Основы технологии машиностроения и формализованный синтез технологических процессов : учебник. В 2 ч. Ч. 2 / В. А. Горохов [и др.]; под ред. В. А. Горохова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: ТНТ, 2019. – 576 с.
6. Цветков, В. Д. Система автоматизированного проектирования технологических процессов / В. Д. Цветков. – Москва : Машиностроение, 1972. – 240 с.
7. Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – Москва : Машиностроение, 2002. – 684 с.
8. Наукоемкие технологии в машиностроении / А. Г. Суслов [и др.]; под ред. А. Г. Суслова. – Москва : Машиностроение, 2012. – 528 с.
9. Схиртладзе, А. Г. Метрология, стандартизация и сертификация / А. Г. Схиртладзе. – Старый оскол : ТНТ, 2019. – 540 с.
10. Воронцова, А. Н. Сборник заданий по метрологии и техническим измерениям / А. Н. Воронцова. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 104 с.
11. Колесников, К. С. Технологические основы обеспечения качества машин / К. С. Колесников, Г. Ф. Баландин, А. М. Дальский. – Москва : Машиностроение, 1990. – 256 с.
12. Рыжов, Э. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э. В. Рыжов. – Москва : Машиностроение, 1979. – 176 с.

13. Федоров, В. П. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / В. П. Фёдоров [и др.]. – Москва : Машиностроение, 2000. – 480 с.

14. Сулима, А. Н. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. Н. Сулима. – Москва : Машиностроение, 1988. – 240 с.

15. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А. Г. Суслов, В. П. Федоров, О. А. Горленко. – Москва : Машиностроение, 2006. – 448 с.

16. Рыжов, Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э. В. Рыжов. – Киев : Наукова думка, 1984. – 272 с.

17. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин : учебник / И. М. Жарский [и др.]. – Минск : Вышэйшая школа, 2010. – 336 с.

18. Бойцов, В. Б. Технологические методы повышения прочности и долговечности / В. Б. Бойцов, А. О. Чернявский. – Москва : Машиностроение, 2005. – 128 с.

19. Допуски и посадки : справочник. В 2 ч. Ч. I / В. Д. Мягков [и др.]. – 6-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Машиностроение. Ленингр. отделение, 1982. – 543 с.

20. Допуски и посадки : справочник. В 2 ч. Ч II / В. Д. Мягков [и др.]. – 6-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Машиностроение, 1982. – 448 с.

21. Каменев, А. Ф. Технические системы : закономерности развития / А. Ф. Каменев. – Ленинград : Машиностроение, 1985. – 216 с.

22. Контрольно-измерительные приборы и инструменты : учебник для нач. проф. образования / С. А. Зайцев [и др.]. – Москва : Издательский центр «Академия», 2005. – 464 с.

23. Справочник по производственному контролю в машиностроении / под ред. А. К. Кутая. – Ленинград : Машиностроение, 1974. – 976 с.

24. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. I / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1986. – 656 с.

25. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. II / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1986. – 496 с.

26. Емельянов, С. Г. Нормирование точности в машиностроении / С. Г. емельянов. – Старый оскол : ТНТ, 2019. – 440 с.

27. Машиностроение. Энциклопедия. Т. III. технология изготовления деталей машин / А. М. Дальский [и др.]. – Москва : Машиностроени, 2000. – 840 с.

28. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – Москва : Машиностроение, 2000. – 320 с.
29. Гладков, К. М. Технология текстильного машиностроения / К. М. Гладков, Е. И. Глущенко, Б. И. Лившиц. – Москва : Машиностроение, 1966. – 439 с.
30. Маслов, Д. П. Технология машиностроения / Д. П. Маслов, В. В. Данилевский, В. В. Сасов. – Ленинград : Машгиз, 1957. – 424 с.
31. Каратыгин, А. М. Технология полиграфического машиностроения / А. М. Каратыгин [и др.]. – Москва : Книга, 1967. – 552 с.
32. Егоров, М. Е. Технология машиностроения / М. Е. Егоров, В. И. Дементьев, В. Л. Дмитриев ; под общ. ред. М. Е. Егорова. – Москва : Высшая школа, 1976. – 534 с.
33. Малкин, Я. А. Основы технологии механической обработки деталей машин / Я. А. Малкин. – Москва : Машгиз, 1961. – 199 с.
34. Гурин, Ф. В. Технология автотракторостроения / Ф. В. Гурин, В. Д. Клепиков, В. В. Рейн. – Москва : Машиностроение, 1971. – 344 с.
35. Яхин, А. Б. Технология приборостроения / А. Б. Яхин, В. П. Ефимов. – Москва : Оборонгиз, 1955. – 379 с.
36. Якобсон, М. О. Технология станкостроения / М. О. Якобсон. – Москва : Машиностроение, 1966. – 475 с.
37. Эттель, А. В. Технология сельскохозяйственного машиностроения / А. В. Эттель. – Москва : Машгиз, 1961. – 287 с.
38. Картавов, С. А. Технология машиностроения. Специальная часть : учеб. пособие для машиностроительных специальностей вузов / С. А. Картавов. – Киев : Вища школа, 1974. – 272 с.
39. Технология машиностроения. Специальная часть / Б. Л. Беспалов [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1965. – 456 с.
40. Технология вагоностроения. Ремонт и надежность вагонов : учебник для техникумов по специальности «Вагоностроение» / Т.К. Батюшин [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1990. – 360 с.
41. Данилевский, В. В. Технология машиностроения : учебник для техникумов / В. В. Данилевский. – 5-е изд., перераб и доп. – Москва : Высшая школа, 1984. – 416 с.
42. Ковшов, А. Н. Технология машиностроения : учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / А. Н. Ковшов. – Москва : Машиностроение, 1987. – 320 с.
43. Мосталыгин, Г. П. Технология машиностроения : учебник / Г. П. Мосталыгин, Н. Н. Толмачевский. – Москва : Машиностроение, 1990. – 288 с.
44. Воробьев, Л. Н. Технология машиностроения и ремонт машин : учебник для вузов / Л. М. Воробьев. – Москва : Высшая школа, 1981. – 344 с.
45. Проектирование технологии : учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / И. М. Баранчукова [и др.] ; под

общ. ред. Ю. М. Соломенцева. – Москва : Машиностроение, 1990. – 461 с.

46. Технология машиностроения (специальная часть) : учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1986. – 480 с.

47. Капустин, Н. М. Технология производства гусеничных и колесных машин : учеб. пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов / Н. М. Капустин ; под общ. ред. Н. М. Капустина. – Москва : Машиностроение, 1989. – 368 с.

48. Колесов, И. М. Основы технологии машиностроения : учебник для машиностроительных спец. вузов / И. М. Колесов. – Москва : Высшая школа, 1999. – 591 с.

49. Технология машиностроения. В 2 кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения : учеб. пособие для вузов / Э. Л. Жуков [и др.] ; под ред. С. Л. Мурашкина. – Москва : Высшая школа, 2003. – 278 с.

50. Маталин, А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Ленинград : Машиностроение, 1985. – 464 с.

51. Маталин, А. А. Технология механической обработки / А. А. Маталин. – Ленинград : Машиностроение, 1977. – 464 с.

52. Серебряков, В. И. Материализация схем базирования заготовок установочными элементами / В. И. Серебряков // Машиностроение : сборник научных трудов ; под ред. И. П. Филонова. – Минск : УП «Технопринт», 2002. – Вып. 18. – С. 156–160.

53. Ракович, А. Г. Основы автоматизации проектирования технологических приспособлений / А. Г. Ракович ; под ред. Е. А. Стародетко. – Минск : Наука и техника, 1985. – 285 с.

54. Автоматизация проектирования ТП и средств оснащения / под ред. А. Г. Раковича. – Минск : Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1997. – 276 с.

55. Байор, Б. Н. О развитии методологии базирования / Б. Н. Байор // СТИН. – 2000. – № 3. – С. 24–26.

56. Емельянов, В. Н. О разработке теоретических схем базирования / В. Н. Емельянов // СТИН. – 2002. – № 1. – С. 32–34.

57. Технология машиностроения : учебник для вузов. В 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения / В. М. Бурцев [и др.] ; под ред. А. М. Дальского. – Москва : Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 1997. – 564 с.

58. Колыбенко, Е. И. Системные знания теории базирования в машиностроении / Е. И. Колыбенко // Вестник машиностроения. – 2004. – № 6. – С. 58–62.

59. Колыбенко, Е. И. Системные знания теории базирования в машиностроении / Е. И. Колыбенко // Вестник машиностроения. – 2005. – № 10, 11.

60. Технологические основы гибких производственных систем : учебник для машиностроительных специальностей вузов / В. А. Медведев [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – 2-е изд., испр. – Москва : Высшая школа, 2000. – 255 с.

61. Абрамов, Ф. Н. О разработке терминологии базирования в машиностроении / Ф. Н. Абрамов // Вестник машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 67–72.

62. Абрамов Ф. Н. О классификации терминов базирования / Ф. Н. Абрамов // Вестник машиностроения. – 2006. – № 3. – С. 56–61.

63. Голембиевский, А. И. Основы системологии способов формообразующей обработки в машиностроении / А. И. Голембиевский ; под ред. В. А. Петрова. – Минск : Наука и техника, 1986. – 168 с.

64. Базирование в проблеме разработки АСТПП / В. А. Клевцов [и др.] // Технологические исследования и разработки в системах автоматизированного проектирования : сборник научных трудов. – Владивосток, 1980. – С. 32–43.

65. Базров, Б. М. Теория и практика базирования в машиностроении / Б. М. Базров // Вестник машиностроения. – 2017. – № 4. – С. 5–10.

66. Базров, Б. М. Практическое приложение теории базирования в машиностроении / Б. М. Базров // Вестник машиностроения. – 2017. – № 4. – С. 6–11.

67. Балакшин, Б. С. Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – Москва : Машиностроение, 1966. – 556 с.

68. Базров, Б. М. Выбор баз для установки сменных элементов системы СПИД / Б. М. Базров // СТИН. – 1982. – № 5. – С. 24.

69. Проектирование технологии : учебник для вузов / И. М. Баранчукова [и др.] ; под ред. Ю. Б. Соломенцева. – Москва : Машиностроение, 1990. – 416 с.

70. Проектирование технологических процессов в машиностроении : учебное пособие для вузов / И. П. Филонов [и др.] ; под общ. ред. И. П. Филонова. – Минск : УП «Технопринт», 2003. – 910 с.

71. Махаринский, Е. И. Методика синтеза индивидуальных технологических процессов изготовления корпусных деталей машин / Е. И. Махаринский, Н. В. Беляков // Вестник машиностроения. – № 2. – 2005. – С. 57–65.

72. Махаринский, Е. И. О теории базирования при механической обработке / Е. И. Махаринский, Ю. Е. Махаринский, Н. В. Беляков // СТИН. – № 4. – 2005. – С. 29–32.

73. Махаринский, Е. И. Теория базирования в проблеме проектирования технологических процессов механической обработки и станочных приспособлений / Е. И. Махаринский, Н. В. Беляков, Ю. Е. Махаринский // Вестник машиностроения. – 2008. – № 9. – С. 34–45.

74. Схиртладзе, А. Г. Основы механосборочного производства / А. Г. Схиртладзе. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 292 с.

75. Старостин, В. Г. Формализация проектирования процессов обработки резанием / В. Г. Старостин, В. Е. Лелюхин. – Москва : Машиностроение, 1986. – 136 с.

76. Технология машиностроения. Практикум : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по машиностроительным спец. / А. А. Жолобов [и др.]; под ред. А. А. Жолобова. – Минск: Вышэйшая школа, 2015. – 335 с.

77. Схиртладзе, А. Г. Производство деталей металлорежущих станков / А. Г. Схиртладзе. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 592 с.

78. Клименков, С. С. Проектирование и производство заготовок : учебник для вузов / С. С. Клименков. – Витебск : УО «ВГТУ», 2004. – 385 с.

79. Клименков, С. С. Современные технологии в машиностроении и приборостроении : учебник / С. С. Клименков ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2017. – 311 с.

80. Схиртладзе, А. Г. Технологические процессы в машиностроении / А. Г. Схиртладзе. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 524 с.

81. Обработка заготовок деталей машин : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по машиностроительным специальностям / А. А. Миранович [и др.] ; под ред. Ж. А. Мрочека. – Минск : Вышэйшая школа, 2014. – 172 с.

82. Современные методы и технологии создания и обработки материалов = Advanced methods and technologies of materials development and processing : сборник научных трудов : в 3 кн. Кн. 2 : Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / ГНУ ФТИ НАНБ. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2018. – 275 с.

83. Технология изготовления деталей на станках с ЧПУ : учебное пособие / Ю. А. Бондаренко [и др.]. – 4-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол : ТНТ, 2018. – 291 с.

84. Емельянов, С. Г. Размерный анализ в машиностроении / С. Г. Емельянов. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 332 с.

85. Стрелец, А. А. Размерные расчеты в задачах оптимизации конструкторско-технологических решений / А. А. Стрелец, В. А. Фирсов. – Москва : Машиностроение, 1988. – 120 с.

86. Солонин, С. И. Расчет сборочных и технологических размерных цепей / С. И. Солонин, И. С. Солонин. – Москва : Машиностроение, 1980. – 110 с.

87. Соколов, В. О. Размерный анализ технологических процессов в автоматизированном производстве / В. О. Соколов. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 220 с.

88. Цепи размерные. Расчет технологических размерных цепей : методические рекомендации. МР 43-82 / В. В. Матвеев [и др.]. – Москва : ВНИИНМАШ, 1982. – 225 с.

89. Размерный анализ технологических процессов обработки / И. Г. Фридлендер [и др.] ; под общ. ред. И. Г. Фридлендера. – Ленинград : Машиностроение, 1987. – 141 с.

90. Мордвинов, Б. С. Расчет технологических размеров и допусков при проектировании технологических процессов механической обработки / Б. С. Мордвинов, Е. С. Огурцов. – Омск : Изд-во ОмПИ, 1975. – 160 с.

91. Брук, С. И. Технологические размерные расчеты / С. И. Брук, Б. И. Лившиц, В. Н. Гостев. – Ленинград : Машиностроение, 1946. – 181 с.

92. Быков, Ю. М. Анализ точности и стабильности процессов / Ю. М. Быков. – Старый Оскол: ТНТ, 2019. – 96 с.

93. Быков, Ю. М. Статистический анализ стабильности и точности процессов на основе контрольных карт. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 104 с.

94. Драчев, О. И. Статистические методы управления качеством / О. И. Драчев, А. А. Жилин. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 148 с.

95. Горохов, В. А. Проектирование механосборочных участков и цехов : учебник / В. В. Горохов, Н. В. Беляков, А. Г. Схиртладзе ; под ред. д.т.н. проф. В. А. Горохова. – Минск : Новое знание; Москва : ИНФРА-М, 2016. – 540 с.

96. Беляков, Н. В. Проектирование технологических процессов сборки машин : учебное пособие / Н. В. Беляков, В. А. Горохов ; под ред. В. А. Горохова ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2017. – 97 с.

97. Горохов, В. А. Технологические процессы сборки машин и изготовления деталей : учебник / В. А. Горохов, Н. В. Беляков ; под ред. В. А. Горохова. – Старый Оскол : ТНТ, 2017. – 576 с.

98. Горохов, В. А. Основы технологии машиностроения : лабораторный практикум / В. А. Горохов, Н. В. Беляков, Ю. Е. Махаринский. – Минск : Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2013. – 446 с.

99. Беляков, Н. В. Основы технологии машиностроения : лабораторный практикум / Н. В. Беляков, В. А. Горохов, Ю. Е. Махаринский ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2012. – 351 с.

100. Горохов, В. А. Материалы и их технологии: учебник : в 2 ч. Ч. 1 / В. А. Горохов, Н. В. Беляков, А. Г. Схиртладзе; под ред. В. А. Горохова. – Минск: Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2016. – 588 с.

101. Горохов, В. А. Материалы и их технологии: учебник : в 2 ч. Ч. 2 / В. А. Горохов, Н. В. Беляков, А. Г. Схиртладзе; под ред. В. А. Горохова. – Минск: Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2016. – 532 с.

102. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей : монография / С. А. Клименко [и др.] ; под общ.ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца ; Институт сверхтвердых материалов имени В. Н. Бакуля. – Минск : Беларуская навука, 2017. – 376 с.

103. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки : учебное пособие / А. Г. Григорьянц, М. А. Казарян, Н. А. Лябин. – Москва : Физматлит, 2005. – 312 с.
104. Синдеев, Ю. Г. Гальванические покрытия / Ю. Г. Синдеев. – Ростов на Дону : феникс, 2000. – 256 с.
105. Ажогин, Ф. Ф. Гальванотехника / Ф. Ф. Ажогин, М. А. Бельский, И. Е. Галл. – Москва : Металлургия, 1987. – 736 с.
106. Восстановление деталей машин : справочник / Ф. И. Пантеленко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов. – Москва : Машиностроение, 2003. – 672 с.
107. Тушинский, Л. И. Методы исследований материалов: Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л. И. Тушинский, А. В. Плохов, О. А. Токарев. – Москва : Мир, 2004. – 384 с.
108. Удалов, Ю. П. Технология неорганических порошковых материалов и покрытий функционального назначения / Ю. П. Удалов [и др.]. – Санкт-Петербург : Янус, 2001. – 320 с.
109. Бобров, Г. В. Нанесение неорганических покрытий / Г. В. Бобров. – Москва : Интернет Инжиниринг, 2004. – 624 с.
110. Балдаев Л. Х. Газотермическое напыление : учебное пособие / Л. Х. Балдаев. – Москва : Маркет ДС, 2007. – 344 с.
111. Вакуумная техника : справочник / К. Е. Демихов, Ю. В. Панфилов, Н. К. Никулин. – Москва : Машиностроение, 2009. – 590 с.
112. Соснин, Н. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский. – Санкт-Петербург : Издательство политехн. ин-та, 2008. – 406 с.
113. Лащенко, Г. И. Плазменное упрочнение и напыление / Г. И. Лащенко. – Киев : Экотехнология, 2003. – 64 с.
114. Инженерия поверхности деталей / А. Г. Суслов [и др.]. – Москва : машиностроение, 2008. – 320 с.
115. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск : Наука и техника, 1977. – 256 с.
116. Дальский, А. М. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А. М. Дальский, Б. М. Базров, А. С. Васильев. – Москва : Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.
117. Кузнецов, В. П. Самоорганизация в технических системах / В. П. Кузнецов, М. А. Раков. – Киев : Наукова думка, 1987. – 200 с.
118. Князева, С. И. Законы эволюции и самоорганизация сложных систем / С. И. Князева, С. П. Курдюшов. – Москва : Наука, 1994. – 325 с.
119. Cyberleninka [Электронный ресурс] : самоорганизация в технологии машиностроения / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/-n/samoorganizatsiya-v-tehnologii-mashinostroeniya>. – Дата доступа: 28.01.2020.

120. Кане, М. М. Основы исследований, изобретательства и инновационной деятельности в машиностроении: учебник / М. М. Кане. – Минск : Вышэйшая школа, 2018. – 366 с.
121. Корнеев, С. В. Основы научных исследований. Эксперимент. Том 1 / С. В. Корнеев. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 336 с.
122. Корнеев С. В. Основы научных исследований. Эксперимент. Том 2 / С. В. Корнеев. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 268 с.
123. Соловьев, В. П. Организация эксперимента / В. П. Соловьев. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 256 с.
124. Спирин, А. Н. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента : конспект лекций / Н. А. Спирин, В. В. Лавров. – Екатеринбург : ГОУ ВПУ УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.
125. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Машиностроение, 1976. – 278 с.
126. Алабин, М. А. Корреляционно-регрессионный анализ статистических данных в двигателестроении / М. А. Алабин, А. Б. Ройтман. – Москва : Машиностроение, 2010. – 124 с.
127. Мещеряков, В. В. Задачи по статистике и регрессионному анализу с MATLAB / В. В. Мещеряков. – Москва : Диалог-Мифи, 2015. – 448 с.
128. Риордан, Дж. Введение в комбинаторный анализ / Дж. Риордан. – Москва : Машиностроение, 2012. – 195 с.
129. Романовский, В. И. Избранные труды. Том 2. Теория вероятностей, статистика и анализ / В. И. Романовский. – Москва : Машиностроение, 2011. – 961 с.
130. Соколов, Г. А. Введение в регрессионный анализ и планирование регрессионных экспериментов / Г. А. Соколов, Р. В. Сагитов. – Москва : ИНФРА-М, 2010. – 208 с.
131. Такахаси, С. Занимательная статистика. Регрессионный анализ / С. Такахаси. – Москва : Додэка, ДМК Пресс, 2015. – 216 с.
132. Шашков, В. Б. Прикладной регрессионный анализ : учебное пособие / В. Б. Шашков. – Оренбург : ГОУ ВПО ОГУ, 2003. – 363 с.
133. Васильев, А. Н. Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения / А. Н. Васильев, Д. А. Тархов. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического университета, 2009. – 527 с.
134. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – Москва : Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
135. Сергеев, А. П. Введение в нейросетевое моделирование : учебное пособие / А. П. Сергеев, Д. А. Тарасов. – Москва : Флинта, 2020. – 128 с.
136. Папандимитриу, Х. Комбинаторная оптимизация. Теория и алгоритмы / Х. Папандимитриу, К. Стейглиц. – Москва : Мир, 1983. – 510 с.

137. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования : учебник для вузов / И. П. Норенков. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 360 с.

138. Левин, В. И. Информационные технологии в машиностроении / В. И. Левин. – Москва : Академия, 2006. – 240 с.

139. Кондаков, А. И. САПР технологических процессов : учебник для студ. высш. учеб.заведений / А. И. Кондаков. – Москва : Издательский центр «Академия», 2007. – 272 с.

140. Музгин, С. С. Автоматизированная система научных исследований в горном деле / С. С. Музгин : Алма-Ата : Наука, 2012. – 127 с.

141. Фомичев, Н. И. Автоматизированные системы научных исследований / Н. И. Фомичев. – Ярославль : ЯрГУ, 2013. – 234 с.

142. Bibliofond [Электронный ресурс] : Автоматизированная система научных исследований / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=578565#text>. – Дата доступа: 15.02.2019.

143. Dissercat [Электронный ресурс] : Методы и средства анализа эффективности автоматизированных систем научных исследований на предприятиях стадии / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://www.dissercat.com/content/metody-i-sredstva-analiza-effektivnosti-avtomatizirovannykh-sistem-nauchnykh-issledovaniy-na>. – Дата доступа: 28.01.2020.

144. Scienceforum [Электронный ресурс] : АСНИ / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://scienceforum.ru/2020/article/2018018057>. – Дата доступа: 18.12.2019.

145. Studbooks [Электронный ресурс] : Автоматизированные системы научных исследований / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : https://studbooks.net/1386372/menedzhment/avtomatizirovannye_sistemy_upravleniya. – Дата доступа: 23.01.2020.

146. Хейфец, М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М. Л. Хейфец. – Москва : машиностроение, 2005. – 272 с.

147. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов. – Донецк : Дон НТУ, 2009. – 346 с.

148. Сторожук, О. А. Моделирование и вариантное прогнозирование развития техники / О. А. Сторожук. – Москва : Машиностроение, 2005. – 252 с.

Приложения

Приложение А

Таблицы однозначности задания ориентации поверхностей

Таблица А.1 – Комплект баз № 1

Обозначение	Допуск	Формула ориентации
O_{10}	перпендикулярности рассматриваемой оси поверхности вращения (ОПВ) к одной из плоскостей комплекта баз	$O_{10} \perp P_{i(j,k)}$
O_{11}	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно двух плоскостей комплекта баз	$O_{11} // P_i \wedge P_j$
O_{12}	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно одной плоскости и углового расположения относительно другой плоскости комплекта баз	$O_{12} // P_i \wedge O_{12} \angle P_{k,j}$
O_{13}	углового расположения рассматриваемой ОПВ относительно двух плоскостей комплекта баз	$O_{13} \angle P_i \wedge O_{13} \angle P_j$
Π_{10}	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к двум плоскостям комплекта баз	$\Pi_{10} \perp P_i \wedge P_j$
Π_{11}	параллельности рассматриваемой плоскости к одной плоскости комплекта баз	$\Pi_{11} // P_i \dots$
Π_{12}	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к одной плоскости комплекта и углового расположения относительно другой	$\Pi_{12} \perp P_i \wedge \Pi_{12} \angle P_{k,j}$
Π_{13}	углового расположения рассматриваемой плоскости относительно двух плоскостей комплекта баз	$\Pi_{13} \angle P_i \wedge \Pi_{13} \angle P_j$

Таблица А.2 – Комплект баз № 2

Обозначение	Допуск	Формула ориентации
1	2	3
O_{20}	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта перпендикулярной оси	$O_{20} \perp P_i$
O_{21}	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта баз параллельной оси комплекта	$O_{21} \perp P_j$
O_{22}	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно оси комплекта баз	$O_{22} // O_l$
O_{23}	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ к оси комплекта баз и параллельности к плоскости комплекта, параллельной оси	$O_{23} \perp O_l \wedge O_{23} // P_j$
O_{24}	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно плоскостей комплекта	$O_{24} // P_j \wedge O_{24} // P_i$
O_{25}	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно плоскости комплекта параллельной оси и углового расположения относительно другой плоскости комплекта	$O_{25} // P_j \wedge O_{25} \angle P_i$
O_{26}	углового расположения рассматриваемой ОПВ относительно двух плоскостей комплекта	$O_{26} \angle P_j \wedge O_{26} \angle P_i$
O_{27}	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно плоскости комплекта параллельной оси и углового расположения относительно оси комплекта	$O_{27} // P_j \wedge O_{27} \angle O_l$

Окончание таблицы А.2

1	2	3
O_{28}	углового расположения рассматриваемой ОПВ относительно плоскости комплекта параллельной оси и углового расположения относительно оси	$O_{28} \angle P_j \wedge O_{28} \angle O_l$
O_{29}	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно плоскости комплекта перпендикулярной оси комплекта баз и углового расположения относительно другой плоскости комплекта	$O_{25} // P_i \wedge O_{26} \angle P_j$
P_{20}	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к двум плоскостям комплекта баз	$P_{20} \perp P_i \wedge P_j$
P_{21}	параллельности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта баз параллельной оси	$P_{21} // P_j$
P_{22}	параллельности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта баз перпендикулярной оси	$P_{22} // P_i$
P_{23}	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к оси комплекта баз	$P_{23} \perp O_l$
P_{24}	параллельности рассматриваемой плоскости к оси комплекта и перпендикулярности плоскости комплекта параллельной оси	$P_{24} // O_l \wedge P_{24} \perp P_j$
P_{25}	углового расположения рассматриваемой плоскости относительно плоскости комплекта перпендикулярной оси и перпендикулярности плоскости к плоскости комплекта параллельной оси	$P_{25} \angle P_i \wedge P_{25} \perp P_j$
P_{26}	углового расположения рассматриваемой плоскости относительно плоскости комплекта параллельной оси и перпендикулярности плоскости к плоскости комплекта перпендикулярной оси	$P_{26} \angle P_j \wedge P_{26} \perp P_i$
P_{27}	углового расположения рассматриваемой плоскости относительно оси комплекта и перпендикулярности плоскости к плоскости комплекта параллельной оси	$P_{27} \angle O_l \wedge P_{27} \perp P_j$
P_{28}	углового расположения рассматриваемой плоскости относительно оси комплекта и углового расположения к плоскости комплекта параллельной оси	$P_{28} \angle O_l \wedge P_{28} \angle P_j$
P_{29}	углового расположения рассматриваемой плоскости относительно двух плоскостей комплекта	$P_{29} \angle P_j \wedge P_{29} \angle P_i$

Таблица А.3 – Комплект баз № 3

Обозначение	Допуск	Формула ориентации
1	2	3
O_{30}	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта баз	$O_{30} \perp P_i$
O_{31}	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно оси	$O_{31} // O_l \vee O_n$
O_{32}	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта образованного пересечением осей	$O_{32} \perp \{O_n O_l\}$
O_{33}	параллельности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта, образованного пересечением осей, и параллельности рассматриваемой ОПВ к плоскости комплекта	$O_{33} // \{O_n O_l\} \wedge O_{33} // P_i$
O_{34}	параллельности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта, образованного пересечением осей, и углового расположения оси к плоскости комплекта	$O_{34} // \{O_n O_l\} \wedge O_{34} \angle P_i$

Окончание таблицы А.3

1	2	3
O_{35}	углового расположения рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта, образованного пересечением осей, и углового расположения рассматриваемой ОПВ к плоскости комплекта	$O_{35} \angle \{O_n O_l\} \wedge O_{35} \angle P_i$
O_{36}	параллельности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта, образованного пересечением осей, и углового расположения оси к оси комплекта баз	$O_{36} // \{O_n O_l\} \wedge O_{36} \angle O_l \vee O_n$
O_{37}	углового расположения рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта, образованного пересечением осей, и параллельности ОПВ к плоскости комплекта	$O_{37} \angle \{O_n O_l\} \wedge O_{37} // P_i$
O_{38}	углового расположения рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта, образованного пересечением осей, и углового расположения ОПВ к оси комплекта.	$O_{38} \angle \{O_n O_l\} \wedge O_{38} \angle O_l \vee O_n$
P_{30}	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к двум плоскостям комплекта	$P_{30} \perp P_i \wedge \{O_n O_l\}$
P_{31}	параллельности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта, образованного пересечением осей	$P_{31} // \{O_n O_l\}$
P_{32}	параллельности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта	$P_{32} // P_i$
P_{33}	перпендикулярности рассматриваемой плоскости оси комплекта	$P_{33} \perp O_l \vee O_n$
P_{34}	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта и углового расположения к плоскости комплекта, образованного пересечением осей	$P_{34} \perp P_i \wedge P_{34} \angle \{O_n O_l\}$
P_{35}	углового расположения рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта и перпендикулярности к плоскости комплекта, образованного пересечением осей	$P_{35} \angle P_i \wedge P_{35} \perp \{O_n O_l\}$
P_{36}	углового расположения рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта, углового расположения к плоскости комплекта, образованного пересечением осей	$P_{36} \angle P_i \wedge P_{36} \angle \{O_n O_l\}$
P_{37}	углового расположения рассматриваемой плоскости к оси комплекта и углового расположения к плоскости комплекта, образованного пересечением осей	$P_{37} \angle O_l \vee O_n \wedge P_{37} \angle \{O_n O_l\}$

Таблица А.4 – Комплект баз № 4

Обозначение	Допуск	Формула ориентации
1	2	3
O_{40}	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта баз	$O_{40} \perp P_i$
O_{41}	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ к оси комплекта параллельной плоскости и параллельность ОПВ плоскости комплекта	$O_{41} \perp O_l \vee O_{41} // P_i$
O_{42}	параллельности рассматриваемой ОПВ к оси комплекта баз параллельной плоскости	$O_{42} // O_l$
O_{43}	параллельности рассматриваемой ОПВ к оси комплекта перпендикулярной плоскости	$O_{43} // O_l$
O_{44}	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ к оси комплекта параллельной плоскости и перпендикулярности к оси комплекта перпендикулярной плоскости	$O_{44} \perp O_l \vee O_{44} \perp O_n$

Окончание таблицы А.4

1	2	3
O_{45}	углового расположения рассматриваемой ОПВ к оси комплекта параллельной плоскости и параллельности плоскости комплекта баз	$O_{45} \angle O_l \vee O_{45} // P_i$
O_{46}	углового расположения рассматриваемой ОПВ к оси комплекта параллельной плоскости и углового расположения к плоскости комплекта	$O_{46} \angle O_l \vee O_{46} \angle P_i$
O_{47}	углового расположения рассматриваемой ОПВ к оси комплекта параллельной плоскости и углового расположения к оси комплекта перпендикулярной плоскости	$O_{47} \angle O_l \vee O_{47} \angle O_n$
P_{40}	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к оси комплекта перпендикулярной плоскости комплекта баз	$P_{40} \perp O_n$
P_{41}	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к оси комплекта баз параллельной плоскости комплекта	$P_{41} \perp O_l$
P_{42}	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта баз и параллельности к оси комплекта параллельной плоскости комплекта	$P_{42} \perp P_i \wedge P_{42} // O_l$
P_{43}	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта и углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта	$P_{43} \perp P_i \wedge P_{43} \angle O_l$
P_{44}	углового расположения рассматриваемой плоскости к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта, и параллельности к оси комплекта, перпендикулярной плоскости комплекта	$P_{44} \angle O_l \wedge P_{44} // O_n$
P_{45}	углового расположения рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта и параллельности к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта	$P_{45} \angle P_i \wedge P_{45} // O_l$
P_{46}	углового расположения рассматриваемой плоскости к оси комплекта, перпендикулярной плоскости комплекта, и параллельности к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта	$P_{46} \angle O_n \wedge P_{46} // O_l$
P_{47}	углового расположения рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта и углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта	$P_{47} \angle P_i \wedge P_{47} \angle O_l$
P_{48}	углового расположения к оси комплекта, перпендикулярной плоскости комплекта, и углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта	$P_{48} \angle O_n \wedge P_{48} \angle O_l$

Приложение Б
Числовые значения неуказанных допусков
перпендикулярности, соосности и симметричности

Таблица Б.1 – Числовые значения неуказанных допусков соосности и пересечения осей

Интервалы номинальных размеров	Значения неуказанных допусков соосности и пересечения осей при определяющем допуске размера			
	по квалитетам			
	12 и точнее	13 и 14	15 и 16	17
	по классам точности			
	точный	средний	грубый	очень грубый
До 3	0,05	0,12	0,20	0,30
Св. 3 до 10	0,06	0,16	0,25	0,40
>> 10 >>18	0,08	0,20	0,30	0,50
>> 18 >>30	0,10	0,25	0,40	0,60
>> 30 >>50	0,12	0,30	0,50	0,80
>> 50 >>120	0,16	0,40	0,60	1,00
>> 120 >>250	0,20	0,50	0,80	1,20
>> 250 >>400	0,25	0,60	1,00	1,60
>> 400 >>630	0,30	0,80	1,20	2,00
>> 630 >>1000	0,40	1,00	1,60	2,50
>> 1000 >>1600	0,05	1,20	2,00	3,00
>> 1600 >>2500	0,60	1,60	3,00	4,00

Таблица Б.2 – Числовые значения неуказанных допусков симметричности

Интервалы номинальных размеров	Значения неуказанных допусков симметричности при определяющем допуске размера			
	по квалитетам			
	12 и точнее	13 и 14	15 и 16	17
	по классам точности			
	точный	средний	грубый	очень грубый
До 3	0,20	0,30	0,50	0,80
Св. 3 до 10	0,25	0,40	0,60	1,00
>> 10 >>18	0,30	0,50	0,80	1,20
>> 18 >>30	0,40	0,60	1,00	1,60
>> 30 >>50	0,50	0,80	1,20	2,00
>> 50 >>120	0,60	1,00	1,60	2,50
>> 120 >>250	0,80	1,20	2,00	3,00
>> 250 >>400	1,00	1,60	2,50	4,00
>> 400 >>630	1,20	2,00	3,00	5,00
>> 630 >>1000	1,60	2,50	4,00	6,00
>> 1000 >>1600	2,00	3,00	5,00	8,00
>> 1600 >>2500	2,50	4,00	6,00	10,0

Таблица Б.3 – Числовые значения неуказанных допусков перпендикулярности

Интервалы номинальных размеров	Значения неуказанных допусков перпендикулярности при определяющем допуске размера			
	по квалитетам			
	12 и точнее	13 и 14	15 и 16	17
	по классам точности			
	точный	средний	грубый	очень грубый
До 10	0,06	0,10	0,16	0,25
Св. 10 до 16	0,08	0,12	0,20	0,30
>> 16 >>25	0,10	0,16	0,25	0,40
>> 25 >>40	0,12	0,20	0,30	0,60
>> 40 >>63	0,16	0,25	0,40	0,80
>> 63 >>100	0,20	0,30	0,60	1,00
>> 100 >>160	0,25	0,40	0,80	1,20
>> 160 >>250	0,30	0,60	1,00	1,60
>> 250 >>400	0,40	0,80	1,20	2,00
>> 400 >>630	0,60	1,00	1,60	2,50
>> 630 >>1000	0,80	1,20	2,00	3,00
>> 1000 >>1600	1,00	1,60	2,50	4,00
>> 1600 >>2500	1,20	2,00	3,00	5,00

За базу, к которой относится неуказанный допуск перпендикулярности в одном координатном направлении, принимается поверхность (или ее ось) из числа обрабатываемых или необрабатываемых поверхностей (в зависимости от того какой граф формируется), имеющая больший размер в рассматриваемых перпендикулярных направлениях, а при одинаковых размерах – поверхность, имеющая меньшую шероховатость. Если деталь имеет элементы, для которых указаны допуски перпендикулярности, то неуказанные допуски следует относить к тем же базам, что и указанные. Числовые значения неуказанных допусков перпендикулярности определяются в зависимости от номинального размера и определяющего допуска размера.

Приложение В

Установочные элементы

Таблица В.1 – Разные обозначения

№ п/п	Наименование	Обозначение на схеме установки		
		сбоку	сверху	снизу
1	Опора подвижная			
2	Опора регулируемая			
3	Люнет подвижный			
4	Люнет неподвижный			
5	Патрон поводковый			
6	Зажим одиночный			
7	Зажим двойной			

Таблица В.2 – Таблица соответствия установочных элементов технологическим базам

№ п/п	Наименование	Код	Обозначение на схеме установки		
			сбоку	сверху	снизу
1	2	3	4	5	6
Устано- вочная	Плоская поверхность корпуса приспособлений	Тр 1.1.			
	Две опорные пластины	Тр 1.2.			
	Опоры точечные неподвижные с плоской поверхностью	Тр 1.3.			
	Опоры точечные неподвижные со сферической поверхностью	Тр 1.4.			
	Опоры точечные неподвижные с рифленой поверхностью	Тр 1.5.			
	Опоры плавающие с плоской поверхностью	Тр 1.6.			
	Опоры плавающие со сферической поверхностью	Тр 1.7.			

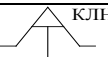
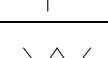
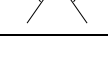
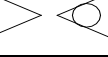
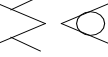
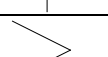
Продолжение таблицы В.2

1	2	3	4	5	6
	Опоры плавающие с рифленой поверхностью	Тр 1.8.			
	Опорное кольцо	Тр 1.9.			
	Пластина и точечная опора	Тр 1.10.			
	Магнитная плита	Тр 1.11.			
Направляющая	Плоская поверхность корпуса приспособлений	Тр 2.1.			
	Пластина опорная	Тр 2.2.			
	Опоры точечные неподвижные с плоской поверхностью	Тр 2.3.			
	Опоры точечные неподвижные со сферической поверхностью	Тр 2.4.			
	Опоры точечные неподвижные с рифленой поверхностью	Тр 2.5.			
	Опоры плавающие с плоской поверхностью	Тр 2.6.			
	Опоры плавающие со сферической поверхностью	Тр 2.7.			
	Опоры плавающие с рифленой поверхностью	Тр 2.8.			
	Два цилиндрических пальца	Тр 2.9.			
	Зажим самоцентрирующийся	Тр 2.10.			
Опорная	Опора точечная неподвижные с плоской поверхностью	Тр 3.1.			
	Опора точечная неподвижные со сферической поверхностью	Тр 3.2.			
	Опора точечная неподвижные с рифленой поверхностью	Тр 3.3.			
	Опора плавающая с плоской поверхностью	Тр 3.4.			
	Опора плавающая со сферической поверхностью	Тр 3.5.			
	Опора плавающая с рифленой поверхностью	Тр 3.6.			
	Палец ромбический	Тр 3.7.			

Продолжение таблицы В.2

1	2	3	4	5	6
	Палец цилиндрический	Тр 3.8.			
	Зажим самоцентрирующийся	Тр 3.9.			
	Опора призматическая подводя- мая	Тр 3.10.			
<i>Двойная опорная</i>	Призма	Тр 4.1.			
	Палец цилиндрический	Тр 4.2.			
	Палец конический плавающий	Тр 4.3.			
	Втулка	Тр 4.4.			
	Полувтулка	Тр 4.5.			
	Двухкулачковый патрон	Тр 4.6.			
	Трехкулачковый патрон	Тр 4.7.			
	Четырехкулачковый патрон	Тр 4.8.			
	Втулка разрезная	Тр 4.9.			
	Оправка цанговая	Тр 4.10.			
	Оправка кулачковая	Тр 4.11.			
	Оправка клиновая	Тр 4.12.			
	Оправка клиноплунжерная	Тр 4.13.			
	Оправка с гофрир. элементами	Тр 4.14.			
	Оправка с тарельчатыми пружи- нами	Тр 4.15.			
	Оправка с витой пружиной	Тр 4.16.			
	Оправка шлицевая	Тр 4.17.			
	Оправка резьбовая	Тр 4.18.			
<i>Двойная направ- ляющая</i>	Длинная призма	Тр 5.1.			
	Оправка цилиндрическая	Тр 5.2.			
	Оправка коническая	Тр 5.3.			
	Оправка цанговая	Тр 5.4.			

Окончание таблицы В.2

1	2	3	4	5	6
	Втулка	Тр 5.5			
	Оправка клиновья	Тр 5.6			
	Оправка клиноплунжерная	Тр 5.7.			
	Оправка с гофрированными элементами	Тр 5.8.			
	Оправка с тарельчатыми пружинами	Тр 5.9.			
	Двойная призма	Тр 5.10.			
	Оправка с витой пружиной	Тр 5.11.			
	Оправка шлицевая	Тр 5.12.			
	Оправка резьбовая	Тр 5.13.			
	Центра: неподвижный и вращающийся	Тр 5.14.			
	Центра: рифленый и вращающийся	Тр 5.15.			
	Центра: плавающий и вращающийся	Тр 5.16.			
	Трехкулачковый патрон и вращающийся центр	Тр 5.17.			
Тройная опорная	Трехкулачковый патрон с призматическими губками	Тр 6.1.			
	Центр неподвижный	Тр 6.2.			

Приложение Г **Правила назначения вида компонента комплекта** **технологических баз**

Таблица Г.1 – Комплект баз № 1

Правило	Содержание
O10	Если задан допуск перпендикулярности оси O_{10} относительно плоскости P_i , а допуск линейного размера относительно $P_{j(k)}$ меньше допуска линейного размера относительно $P_{k(j)}$, то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_{j(k)}$ – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость $P_{k(j)}$ – одиночной (опорной). Аналогично определяются компоненты комплекта, если задан допуск перпендикулярности относительно плоскости P_i либо плоскости P_k
O11	Если заданы допуски параллельности оси O_{11} относительно плоскостей P_i и P_j , а численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости $P_{i(j)}$ меньше численного значения допуска параллельности оси относительно плоскости $P_{j(i)}$, то плоскость $P_{i(j)}$ назначается установочной базой, плоскость $P_{j(i)}$ – направляющей, плоскость P_k – опорной. Аналогично определяются компоненты комплекта, если задан допуск параллельности оси относительно плоскостей P_i и P_k , P_i и P_k
O12	Если заданы допуски параллельности оси O_{12} относительно плоскости P_i и допуск углового расположения относительно $P_{j(k)}$, а численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости P_i меньше численного значения допуска углового расположения оси относительно плоскости $P_{j(k)}$, то плоскость P_i назначается установочной базой, плоскость $P_{j(k)}$ – направляющей, плоскость $P_{k(j)}$ – опорной. В том случае если численное значение допуска углового расположения меньше численного значения допуска параллельности, то в качестве установочной базы назначается плоскость $P_{j(k)}$, направляющей – P_i , опорной – $P_{k(j)}$. Аналогично определяются компоненты комплекта, если задан допуск параллельности оси относительно плоскостей P_j и P_k и углового расположения относительно $P_{i(k)}$ и $P_{i(j)}$
П10	Если заданы допуски перпендикулярности плоскости Π_{10} относительно плоскостей P_i и P_j , а численное значение допуска перпендикулярности плоскости относительно плоскости P_i меньше численного значения допуска перпендикулярности относительно плоскости P_j , то плоскость P_i назначается установочной базой, плоскость P_j – направляющей, плоскость P_k – опорной. В том случае если численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости P_i больше численного значения допуска перпендикулярности относительно плоскости P_j , то в качестве установочной базы назначается плоскость P_j , направляющей – P_i , опорной – P_k . Аналогично определяются компоненты комплекта, если задан допуск параллельности оси относительно плоскостей P_i и P_k , P_j и P_k
П11	Если задан допуск параллельности плоскости Π_{11} относительно плоскости P_i , а допуск линейного размера относительно $P_{j(k)}$ меньше допуска линейного размера относительно $P_{k(j)}$, то плоскость P_i назначается установочной базой, плоскость $P_{j(k)}$ – направляющей, плоскость $P_{k(j)}$ – опорной. Аналогично определяются компоненты комплекта, если задан допуск параллельности относительно плоскости P_i либо плоскости P_k
П12	Если заданы допуски перпендикулярности плоскости Π_{12} относительно плоскости P_i и допуск углового расположения относительно $P_{j(k)}$, а численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости P_i меньше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости $P_{j(k)}$, то плоскость P_i назначается установочной базой, плоскость $P_{j(k)}$ – направляющей, плоскость $P_{k(j)}$ – опорной. В том случае если численное значение допуска углового расположения меньше численного значения допуска параллельности, то в качестве установочной базы назначается плоскость $P_{j(k)}$, направляющей – P_i , опорной – $P_{k(j)}$. Аналогично определяются компоненты комплекта, если задан допуск перпендикулярности плоскости относительно плоскостей P_j и P_k , углового расположения относительно $P_{i(k)}$ и $P_{i(j)}$

Таблица Г.2 – Комплект баз № 2

Правило	Содержание
1	2
O20	Если задан допуск перпендикулярности оси O_{20} относительно плоскости P_i , то плоскость P_i назначается установочной базой, плоскость P_j – направляющей, ось O_1 – опорной. В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то плоскость P_i назначается установочной базой, ось O_1 назначается двойной опорной базой, а плоскость P_j – опорной
O21	Если задан допуск перпендикулярности оси O_{21} относительно плоскости P_j , а допуск линейного размера относительно P_i меньше допуска линейного размера относительно O_1 , то плоскость P_j назначается установочной базой, плоскость P_i – направляющей, ось O_1 – опорной. Если допуск линейного размера относительно P_i больше допуска линейного размера относительно O_1 , то плоскость P_j назначается установочной базой, ось O_1 – направляющей, плоскость P_i – опорной базами. В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то ось O_1 назначается двойной направляющей, базой плоскости P_j и P_i назначаются опорными базами
O22	Если задан допуск параллельности оси O_{22} относительно оси O_1 , то ось O_1 назначается двойной направляющей, базой плоскости P_i и P_j назначаются опорными базами. В частности, точка пересечения P_i и O_1 может быть тройной опорной базой (в зависимости от возможной реализации), ось O_1 – двойной опорной, а P_i – опорной
O23	Если задан допуск перпендикулярности оси O_{23} относительно O_1 и параллельности относительно P_j , то плоскость P_j назначается установочной базой, ось O_1 – направляющей, плоскость P_i – опорной
O24	Если заданы допуски параллельности оси O_{24} относительно плоскостей P_i и P_j , а численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости $P_{i(j)}$ меньше численного значения допуска параллельности оси относительно плоскости $P_{j(i)}$, то плоскость $P_{i(j)}$ назначается установочной базой, плоскость $P_{j(i)}$ – направляющей, ось O_1 – опорной. В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то плоскость P_i назначается установочной базой, ось O_1 назначается двойной опорной базой, а плоскость P_j – опорной
O25	Если заданы допуски параллельности оси O_{25} относительно плоскости P_j и допуск углового расположения относительно плоскости P_i , а численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости P_j больше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости P_i , то плоскость P_i назначается установочной базой, плоскость P_j – направляющей, ось O_1 – опорной. В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то плоскость P_i назначается установочной базой, ось O_1 назначается двойной опорной базой, а плоскость P_j – опорной. Если численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости P_j меньше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости P_i , то плоскость P_j назначается установочной базой, плоскость P_i – направляющей, ось O_1 – опорной
O27	Если заданы допуски параллельности оси O_{27} относительно плоскости P_j и допуск углового расположения относительно оси O_1 , то плоскость P_j назначается установочной базой, ось O_1 – направляющей, плоскость P_i – опорной. В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то ось O_1 назначается двойной направляющей базой, а плоскости P_j и P_i – опорными
O29	Если заданы допуски параллельности оси O_{29} относительно плоскости P_i и допуск углового расположения относительно плоскости P_j , а численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости P_i меньше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости P_j , то плоскость P_i назначается установочной базой, плоскость P_j – направляющей, ось O_1 – опорной. В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то O_1 назначается двойной опорной базой, а плоскости P_j и P_i – опорной и установочной соответственно. Если численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости P_i больше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости P_j , то плоскость P_j назначается установочной базой, плоскость P_i – направляющей, ось O_1 – опорной

Окончание таблицы Г.2

1	2
П20	Если заданы допуски перпендикулярности плоскости Π_{20} относительно плоскостей P_i и P_j , а численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости P_i меньше численного значения допуска перпендикулярности относительно плоскости P_j , то плоскость P_i назначается установочной базой, плоскость P_j – направляющей, ось O_1 – опорной. В том случае если численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости P_i больше численного значения допуска перпендикулярности относительно плоскости P_j , то в качестве установочной базы назначается плоскость P_j , направляющей – P_i , опорной – ось O_1
П21	Если задан допуск параллельности плоскости Π_{21} относительно плоскости P_j , то плоскость P_j назначается установочной базой, плоскость P_i – направляющей, ось O_1 – опорной. В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то O_1 назначается двойной направляющей базой, а плоскости P_i и P_i – опорными
П22	Если задан допуск параллельности плоскости Π_{22} относительно плоскости P_i , то плоскость P_i назначается установочной базой, плоскость P_j – направляющей, ось O_1 – опорной. В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то плоскость P_i назначается установочной базой, ось O_1 назначается двойной опорной базой, а плоскость P_j – опорной
П23	Если задан допуск перпендикулярности плоскости Π_{23} относительно оси O_1 , то ось O_1 назначается двойной направляющей базой, плоскости P_i и P_j назначаются опорными базами
П24	Если задан допуск параллельности плоскости Π_{24} относительно O_1 и перпендикулярности относительно P_j , то плоскость P_j назначается установочной базой, ось O_1 – направляющей, плоскость P_i – опорной. В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то O_1 назначается двойной направляющей базой, а плоскости P_i и P_i – опорными
П25	Если заданы допуски перпендикулярности плоскости Π_{25} относительно плоскости P_j и допуск углового расположения относительно плоскости P_i , а численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости P_j больше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости P_i , то плоскость P_i назначается установочной базой, плоскость P_j направляющей, ось O_1 опорной. В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то плоскость P_i назначается установочной базой, ось O_1 назначается двойной опорной базой, а плоскость P_j – опорной. Если численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости P_j меньше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости P_i , то плоскость P_j назначается установочной базой, плоскость P_i – направляющей, ось O_1 – опорной
П26	Если заданы допуски перпендикулярности Π_{26} относительно плоскости P_i и допуск углового расположения относительно плоскости P_j , а численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости P_i меньше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости P_j , то плоскость P_i назначается установочной базой, плоскость P_j – направляющей, ось O_1 – опорной. В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то O_1 назначается двойной опорной базой, а плоскости P_j и P_i – опорной и установочной соответственно. Если численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости P_i больше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости P_j , то плоскость P_j назначается установочной базой, плоскость P_i – направляющей, ось O_1 – опорной. В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то O_1 назначается двойной направляющей базой, а плоскости P_j и P_i – опорными
П27	Если заданы допуски перпендикулярности плоскости Π_{27} относительно плоскости P_j и допуск углового расположения относительно оси O_1 , а численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости P_j меньше численного значения допуска углового расположения относительно оси O_1 , то плоскость P_j назначается установочной базой, ось O_1 – направляющей, плоскость P_i – опорной. В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то ось O_1 назначается двойной направляющей базой, а плоскости P_i и P_i – опорными

Таблица Г.3 – Комплект баз № 3

Правило	Содержание
О30	Если задан допуск перпендикулярности оси O_{30} относительно плоскости P_i , то плоскость P_j назначается установочной базой, одна из осей – двойной опорной, вторая – опорной
О31	Если задан допуск параллельности оси O_{31} относительно оси $O_{l(n)}$, то ось $O_{l(n)}$ назначается двойной направляющей базой, ось $O_{n(l)}$ и плоскость P_i назначаются опорными базами
О32	Если задан допуск перпендикулярности оси O_{32} относительно плоскости, проходящей через две оси $\{O_i O_n\}$, то ось, от которой задан размер до обрабатываемой оси, назначается двойной направляющей базой, другая ось и плоскость назначаются опорными базами
О33	Если заданы допуски параллельности оси O_{33} относительно плоскостей P_i и плоскости проходящей через две оси $\{O_i O_n\}$, то плоскость P_i назначается установочной базой, одна из осей двойной опорной, вторая опорной
О34	Если заданы допуски параллельности оси O_{34} относительно плоскости, проходящей через две оси $\{O_i O_n\}$, и допуск углового расположения относительно плоскости P_i , то плоскость P_i назначается установочной базой, одна из осей – двойной опорной, вторая – опорной
О36	Если заданы допуски параллельности оси O_{36} относительно плоскости $\{O_i O_n\}$ и допуск углового расположения относительно оси $O_{l(n)}$, то ось $O_{l(n)}$ назначается двойной направляющей базой, одна из осей и плоскость P_i – опорными
П30	Если заданы допуски перпендикулярности плоскости P_{30} относительно плоскости $\{O_i O_n\}$ и P_i и численное значение допуска перпендикулярности относительно P_i меньше численного значения допуска перпендикулярности относительно $\{O_i O_n\}$, то плоскость P_i назначается установочной базой, одна из осей, от которой задан размер, – двойной опорной, вторая – опорной. Если численное значение допуска перпендикулярности относительно P_i больше численного значения допуска перпендикулярности относительно $\{O_i O_n\}$, то плоскость $\{O_i O_n\}$ назначается установочной базой, P_i – направляющей, одна из осей, от которой задан размер – опорной
П31	Если задан допуск параллельности плоскости P_{31} относительно плоскости $\{O_i O_n\}$, то одна из осей назначается двойной направляющей базой, вторая ось и плоскость P_i назначаются опорными базами
П32	Если задан допуск параллельности плоскости P_{32} относительно плоскости P_i , то плоскость P_i назначается установочной базой, одна из осей – двойной опорной, вторая – опорной
П33	Если задан допуск перпендикулярности плоскости P_{33} относительно одной оси, то эта ось назначается двойной направляющей базой, вторая ось и плоскость P_i назначаются опорными базами
П34	Если заданы допуски перпендикулярности плоскости P_{34} относительно плоскости P_i и углового расположения относительно плоскости $\{O_i O_n\}$ и численное значение допуска перпендикулярности относительно P_i меньше численного значения допуска углового расположения относительно $\{O_i O_n\}$, то плоскость P_i назначается установочной базой, одна из осей, от которой задан размер, – двойной опорной, вторая – опорной. Если численное значение допуска перпендикулярности относительно P_i больше численного значения допуска углового расположения относительно $\{O_i O_n\}$, то плоскость $\{O_i O_n\}$ назначается установочной базой, P_i – направляющей, одна из осей, от которой задан размер, – опорной
П35	Если заданы допуски перпендикулярности плоскости P_{35} относительно плоскости $\{O_i O_n\}$ и углового расположения относительно плоскости P_i $\{O_i O_n\}$ и численное значение допуска углового расположения относительно P_i меньше численного значения допуска перпендикулярности относительно $\{O_i O_n\}$, то плоскость P_i назначается установочной базой, одна из осей, от которой задан размер, – двойной опорной, вторая – опорной. Если численное значение допуска углового расположения относительно P_i больше численного значения допуска перпендикулярности относительно $\{O_i O_n\}$, то плоскость $\{O_i O_n\}$ назначается установочной базой, P_i – направляющей одна из осей, от которой задан размер, – опорной

Таблица Г.4 – Комплект баз № 4

Правило	Содержание
O40	Если задан допуск перпендикулярности оси O_{40} относительно плоскости P_i , то плоскость P_i назначается установочной базой, ось O_i – направляющей, O_n – опорной. В том случае, если ось O_i лежит в плоскости P_i то ось назначается двойной направляющей базой, а другая ось и плоскость – опорными
O41	Если задан допуск перпендикулярности оси O_{41} относительно оси O_i и параллельности относительно плоскости P_i , то плоскость P_i назначается установочной базой, ось O_i – направляющей, O_n – опорной. В том случае, если ось O_i лежит в плоскости P_i , то указанная ось назначается двойной направляющей базой, а другая ось и плоскость – опорными
O42	Если задан допуск параллельности оси O_{42} относительно оси O_i , то ось O_i назначается двойной направляющей базой, O_n и P_i – опорными. В частности, если плоскость совпадает с O_n , то O_n принимается в качестве двойной опорной базы
O43	Если задан допуск параллельности оси O_{43} относительно оси O_n , то ось O_n назначается двойной направляющей базой, O_i и P_i – опорными. В частности, если плоскость совпадает с O_i , то O_i принимается в качестве двойной опорной базы
O44	Если задан допуск перпендикулярности оси O_{44} относительно осей O_n и O_i , а ось лежит в плоскости и численное значение допуска относительно $O_{n(i)}$ меньше численного значения допуска относительно $O_{i(n)}$, то ось $O_{n(i)}$ назначается двойной направляющей базой, а $O_{i(n)}$ – двойной опорной
O45	Если заданы допуски параллельности оси O_{45} относительно плоскости P_i и углового расположения относительно оси O_i , то плоскость P_i назначается установочной базой, ось O_i – направляющей, ось O_n – опорной. В том случае, если ось O_i лежит в плоскости P_i , то указанная ось назначается двойной направляющей базой, а другая ось и плоскость – опорными
P42	Если заданы допуски перпендикулярности плоскости P_{42} относительно плоскости P_i и параллельности относительно оси O_i , то плоскость P_i назначается установочной базой, ось O_i – направляющей, ось O_n – опорной. В том случае, если ось O_i лежит в плоскости P_i , то указанная ось назначается двойной направляющей базой, а другая ось и плоскость – опорными
P43	Если заданы допуски перпендикулярности плоскости P_{43} относительно плоскости P_i и углового расположения относительно оси O_i , то плоскость P_i назначается установочной базой, ось O_i – направляющей, ось O_n – опорной. В том случае, если ось O_i лежит в плоскости P_i , то указанная ось назначается двойной направляющей базой, а другая ось и плоскость – опорными
P44	Если заданы допуски параллельности плоскости P_{44} относительно оси O_n и углового расположения относительно оси O_i , а ось лежит в плоскости, и численное значение допуска параллельности плоскости относительно оси O_n меньше численного значения допуска углового расположения относительно оси O_i , то ось O_n назначается двойной направляющей базой, ось O_i – опорной. Если численное значение допуска параллельности плоскости относительно оси O_n больше численного значения допуска углового расположения относительно оси O_i , то ось O_i назначается двойной направляющей базой, ось O_n – опорной
P45	Если заданы допуски углового расположения плоскости P_{45} относительно плоскости P_i и параллельности относительно оси O_i , то плоскость P_i назначается установочной базой, ось O_i – направляющей, ось O_n – опорной. В том случае, если ось O_i лежит в плоскости P_i , то указанная ось назначается двойной направляющей базой, а другая ось и плоскость – опорными
P46	Если заданы допуски параллельности плоскости P_{46} относительно оси O_i и углового расположения относительно оси O_n , а ось лежит в плоскости, и численное значение допуска параллельности плоскости относительно оси O_i меньше численного значения допуска углового расположения относительно O_n , то ось O_i назначается двойной направляющей базой, ось O_n – опорной. Если численное значение допуска параллельности плоскости относительно оси O_i больше численного значения допуска углового расположения относительно O_n , то ось O_n назначается двойной направляющей базой, ось O_i – двойной опорной

Приложение Д
Таблица сокращения вариантов технических решений

База	Код	Условия отбора																		
		Тип производства					Габариты и масса обрабатываемой детали				Показатели качества базы			Базирование		Характер базы		Обработка		
		е	МС	С	КС	М	М	С	К	ОК	Ra50 IT 16-14	Ra 6.3 IT 13-8	Ra 1.25 IT 6-7	По наруж. пов.	По внутр. пов.	Яв- ная	Скры- тая	От- делка	Чи- сто- вая	Пред- ва- рит.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Уста- новоч- ная	Tr 1.1.	x	x	x			x	x					x	x		x		x	x	x
	Tr 1.2.	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x		x		x	x	x
	Tr 1.3.	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		x			x	x
	Tr 1.4.	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		x		x		
	Tr 1.5.	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x		x				x
	Tr 1.6.	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x			x	x
	Tr 1.7.	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x		x		
	Tr 1.8.	x	x	x	x	x				x	x			x		x				x
	Tr 1.9.	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x		x		x	x	
	Tr 1.10.	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x		x		x	x	
	Tr 1.11.	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x		x	x	
Напра- вляю- щая	Tr 2.1.	x	x	x			x	x					x	x		x		x	x	x
	Tr 2.2.	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x		x		x	x	x
	Tr 2.3.	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		x	x		x	x
	Tr 2.4.	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		
	Tr 2.5.	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x		x	x			x
	Tr 2.6.	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x			x	x
	Tr 2.7.	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x		x		
	Tr 2.8.	x	x	x	x	x			x	x	x			x		x				x
	Tr 2.9.	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x		x	x	
	Tr 2.10.	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Опор- ная	Tr 3.1.	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x		x		x	x		x	x
	Tr 3.2.	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x		x	x	x		
	Tr 3.3.	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x		x	x			x
	Tr 3.4.	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x		x			x	x
	Tr 3.5.	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x		x		x		
	Tr 3.6.	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x		x				x
	Tr 3.7.	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x		x	x		x	x	
	Tr 3.8.	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x		x	x	x
	Tr 3.9.	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x
	Tr 3.10.	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x	x	x	x

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Двойная опорная	Тр 4.1.	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x	x	x	x
	Тр 4.2.	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x		x		x	x	x	x
	Тр 4.3.	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x		x	x	x	x
	Тр 4.4.	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x			x	x	x	x
	Тр 4.5.	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x			x	x	x	x
	Тр 4.6.			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x
	Тр 4.7.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x
	Тр 4.8.	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x
	Тр 4.9.	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x			x	x	x	x
	Тр 4.10.			x	x	x	x	x	x			x	x		x		x	x	x	x
	Тр 4.11.			x	x	x		x	x		x	x	x		x		x	x	x	x
	Тр 4.12.			x	x	x		x	x		x	x	x		x		x	x	x	x
	Тр 4.13.			x	x	x		x	x		x	x	x		x		x	x	x	x
	Тр 4.14.			x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
	Тр 4.15.			x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
	Тр 4.16.			x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
	Тр 4.17.			x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
	Тр 4.18.			x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
Двойная направ- ляющая	Тр 5.1.				x	x		x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	x
	Тр 5.2.			x	x	x		x	x	x		x	x		x		x	x	x	x
	Тр 5.3.	x	x	x			x	x	x			x	x		x		x	x	x	
	Тр 5.4.			x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
	Тр 5.5.				x	x		x	x			x	x	x			x	x		
	Тр 5.6.			x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	
	Тр 5.7.			x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	
	Тр 5.8.			x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	
	Тр 5.9.			x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	
	Тр 5.10.			x	x	x		x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x
	Тр 5.11.	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x		x		x	x	x	
	Тр 5.12.			x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
	Тр 5.13.			x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
	Тр 5.14.	x	x	x	x	x	l/d>2	l/d>2	l/d>2	l/d>2	x	x	x	x	x		x	x	x	x
	Тр 5.15.	x	x	x	x	x	l/d>2	l/d>2	l/d>2	l/d>2	x	x	x	x	x		x	x	x	x
	Тр 5.16.	x	x	x	x	x	l/d>2	l/d>2	l/d>2	l/d>2	x	x	x	x	x		x	x	x	x
	Тр 5.17.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Тройная опорная	Тр 6.1.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
	Тр 6.2.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x

Примечание. Тр 5.14. Тр 5.15. Тр 5.16. Тр 5.17. применяются для деталей класса «вал».

Приложение Е

Качество поверхностей заготовок

Таблица Е.1 – Качество поверхности отливок ($Rz + h$, мкм), достигаемое различными способами формовки

Отливка		Наибольший размер отливки, мм				
Материал	Класс точности	До 500	Св. 500 до 1250	Св. 1250 до 3150	Св. 3150 до 6300	Св. 6300 до 10000
Чугун	I	400	600	800	-	-
	II	500	700	900	-	-
	III	600	800	1000	1500	2000
Сталь	I	300	500	700	-	-
	II	400	600	800	-	-
	III	500	700	900	1300	1700
Цветные металлы и сплавы	I	200	400	-	-	-
	II	300	500	-	-	-
	III	400	600	800	1100	-

Классы точности отливки достигаются: I – литьем в формы, изготовленные машинной формовкой по металлическим моделям; II – машинной формовкой по деревянным моделям; III – ручной формовкой по деревянным моделям

Таблица Е.2 – Качество поверхности отливок, достигаемое специальными способами литья

Литье		Квалитет	Rz , мкм	h , мкм, для заготовки		
				из чугуна	из стали	из цветных металлов
В кокиль		14-15	200	300	200	100
Центробежное		14-15	290	300	200	100
В оболочковые формы для элементов, получаемых	в одной полуформе	11-12	40	260	160	100
	в обеих полуформах	14	40	260	160	100
	под давлением	11-12	50	-	-	100
По выплавляемым моделям		11-12	32	170	100	63

Таблица Е.3 – Качество поверхности поковок ($Rz + h$, мкм), изготавливаемых ковкой

Наибольший размер поковки, мм			Пресс		Молот	Подкладные штампы
			Точность			
			повышенная	нормальная	нормальная	нормальная
От 50 до 180			800	1000	1000	750
Св. 180 » 500			1000	1500	1500	1250
» 500 » 1250			1500	2000	2000	1500
» 1250 » 3150			2000	2500	2500	—
» 3150 » 6300			2500	3000	3000	—
» 6300 » 10000			—	3500	3500	—

Таблица Е.4 – Точность и качество поверхности после механической обработки отливок точением, фрезерованием, строганием и шлифованием

Обработка	Квалитет	Rz , мкм	h , мкм
Точение, фрезерование, строгание			
Литье в песчаные формы			
Отливка I класса точности			
Однократная	11-12	32	32
Черновая	12	50	50
Отливки II класса точности			
Черновая	14	100	100
Получистовая	12	50	50
Отливки II класса точности			
Обдирочная	16-17	320	320
Черновая	14-15	250	240
Получистовая	11-12	100	100
Отливки I, II, III классов точности			
Чистовая	10-11	25	25
Тонкая	7-9	5	5
Литье в кокиль и центробежное			
Однократная	11	25	25
Черновая	12	50	50
Чистовая	10	20	20
Тонкая	7-9	5	5
Литье в оболочковые формы			
Однократная	10-11	25	25
Черновая	11	20	20
Чистовая	10	10	10
Тонкая	7-9	5	5
Литье по выплавляемым моделям			
Однократная	10	15	20
Тонкая	7-9	2,5	5
Шлифование отливок, получаемых различными способами			
Однократная	7	5	10
Черновая	8-9	10	20
Чистовая	6-8	5	15
Тонкая	5-6	0,63	-

Таблица Е.5 – Качество поверхности (мкм) сортового проката

Диаметр проката, мм	Точность прокатки					
	высокая		повышенная		обычная	
	Rz	h	Rz	h	Rz	h
До 30	63	50	80	100	125	150
Св. 30 до 80	100	75	125	150	160	250
» 80 » 180	125	100	160	200	200	300
» 180 » 250	200	200	250	300	320	400

Таблица Е.6 – Качество поверхности поковок, изготавливаемых штамповкой

Масса поковки, кг	Rz	h
	мкм	
До 0,25	80	150
Св. 0,25 » 4	160	200
» 4 » 25	200	250
» 25 » 40	250	300
» 40 » 100	320	350
» 100 » 200	400	400

Примечание. Точность поковок, изготавливаемых штамповкой, регламентируется ГОСТ 7505-74. Значения Rz в таблице даны после пескоструйной обработки поверхностей поковки или травления; при дробеструйной или дробеметной обработке Rz принимать равным 400 мкм независимо от массы поковки

Таблица Е.7 – Точность и качество поверхности поковок после механической обработки, получаемых ковкой на прессах, молотах и в подкладных штампах

Способ обработки		Квалитет	Rz, мкм	К мкм
Точение резцами, фрезерование	обдирочное	17	1250	350
	черновое	15-16	250	240
	получистовое	12-14	125	120
	чистовое	10-11	40	40
	тонкое	6-7	5	5
Шлифование	обдирочное	14-15	20	20
	черновое	10	15	15
	чистовое	6-7	5	5
	тонкое	5-6	2,5	5

Таблица Е.8 – Точность и качество поверхности после отрезки сортового проката

Способ отрезки	Квалитет	$Rz + h$, мкм
На ножницах 1	17	300
Приводными ножовками, дисковыми фрезами на фрезерных станках	14	200
Отрезными резцами на токарных станках	13	200
Отрубка на прессах 1	17	$Rz = 150 - 300$ $h = 1000 - 1600$

Примечание. При отрезке на ножницах и отрубке на прессах получается вмятина в направлении, перпендикулярном к поверхности среза, достигающая $0,2D$, и скос по торцу до 3° , которые необходимо учитывать при последующей обработке заготовок как по торцу, так и по диаметру.

Таблица Е.9 – Точность и качество поверхности штампованных поковок после механической обработки

Способ обработки	Квалитет	Rz, мкм	h, мкм
Валы ступенчатые			
Обтачивание наружных поверхностей			
Однократное	11-12	32	30
Черновое	12	50	50
Чистовое	11	25	25
Тонкое	7-9	5	5
Подрезание торцовых поверхностей			
Черновое	12	50	50
Чистовое	11	32	30
Фрезерование			
Однократное	14	100	100
Диски			
Обтачивание наружных поверхностей			
Однократное	10-12	32	30
Черновое	14	100	100
Получистовое	12	50	50
Чистовое	10-11	25	25
Подрезание торцовых поверхностей			
Однократное	10-12	32	30
Черновое	14	100	100
Получистовое	12	50	50
Чистовое	10-11	25	25
Рычаги (плоскости, параллельные оси детали, и плоскости разъема головок)			
Фрезерование			
Черновое	12	32	50
Чистовое	11	10	15
Протягивание			
Однократное	10	5	10
Обтачивание стержня			
Черновое	12	50	50
Чистовое	11	25	25
Шлифование валов, дисков, рычагов			
Однократное	7-9	5	10
Черновое	8-9	10	20
Чистовое	6-7	5	15
Тонкое	5-6	2,5	5

Таблица Е.10 – Качество поверхности (мкм) поперечно-винтового проката

Диаметр проката, мм	Rz при точности прокатки		h
	повышенной	нормальной	
До 10	63	100	100
Св. 10» 18	100	200	180
» 18» 30	160	320	300
» 30» 50	320	500	500
» 50» 80	500	800	800
» 80» 120	800	1250	1200
120» 180	1250	1600	2000

Примечание. Качество поверхности поперечно-винтового проката указано после термической обработки (нормализации или улучшения).

Таблица Е.11 – Точность и качество поверхности заготовок из проката после механической обработки

Способ обработки	Переход	Квалитет	Rz, мкм	h, мкм
Обработка наружных поверхностей				
Обтачивание резцами проката повышенной и обычной точности прокатки	Обдирка	14	125	120
	Черновое	12	63	60
	Чистовое и однократное	10-11	32-20	30
	Тонкое	7-9	6,3-3,2	-
Шлифование в центрах проката обычной точности прокатки	Черновое	8-9	10	20
	Чистовое и однократное	7-8	6,3	12
Бесцентровое шлифование проката повышенной и высокой точности прокатки	Тонкое	5-6	3,2-0,8	6-2
Обработка торцовых поверхностей				
Подрезание резцом на токарных станках	Черновое	12	50	50
	Чистовое	11	32	30
Шлифование на кругло- и торцешлифовальных станках	Однократное	6	5-10	-

Таблица Е.12 – Качество поверхностей отверстий после обработки

Способ обработки		Диаметр отверстий d, мм	Квалитет	<i>Rz</i>	<i>h</i>
				мкм	
Сверление спиральными сверлами		От 3 до 6	12	20	40
		Св. 6 » 10		32	50
		» 10 » 18		40	60
		» 18 » 50		50	70
		» 50 » 80		63	80
Глубокое сверление специальными сверлами		От 3 до 10	12	16	25
		Св. 10 » 18		20	30
		» 18 » 30		32	40
		» 30 » 50		50	50
Зенкерование	однократное	До 80	10	32	40
	черновое	От 18 до 30		40	40
		Св. 30 до 80	11	50	50
	чистовое	До 30		32	30
		Св. 30 до 80		40	40
Растачивание	черновое	От 50 до 260	12	40	50
	чистовое		10	20	20
Развертывание	нормальное	От 6 до 30	10	10	20
	точное		8	5	10
	тонкое		7	3,2	5
Отделочные методы	шлифование	До 80	7-9	5	10
	протягивание	От 10 до 80	8	4	6
	калибрование шариком	» 6 » 80	7	0,63	—
	хонингование	До 80	6-7	0,16	—

Приложение Ж

Допуски для размеров до 10 000 мм

Номинальные размеры, мм	Квалитеты									
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Обозначения допусков									
	IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8
	Допуски, мкм									
До 3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14
Св. 3 до 6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	13	18
Св. 6 до 10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22
Св. 10 до 18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27
Св. 18 до 30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33
Св. 30 до 50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39
Св. 50 до 80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46
Св. 80 до 120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54
Св. 120 до 180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63
Св. 180 до 250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72
Св. 250 до 315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81
Св. 315 до 400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89
Св. 400 до 500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97
Св. 500 до 630	4,5	6	9	11	16	22	30	44	70	110
Св. 630 до 800	5	7	10	13	18	25	35	50	80	125
Св. 800 до 1000	5,5	8	11	15	21	29	40	56	90	140
Св. 1000 до 1250	6,5	9	13	18	24	34	46	66	105	165
Св. 1250 до 1600	8	11	15	21	29	40	54	78	125	195
Св. 1600 до 2000	9	13	18	25	35	48	65	92	150	230
Св. 2000 до 2500	11	15	22	30	41	57	77	110	175	280
Св. 2500 до 3150	13	18	26	36	50	69	93	135	210	330
Св. 3150 до 4000	16	23	33	45	60	84	115	165	260	410
Св. 4000 до 5000	20	28	40	55	74	100	140	200	320	500
Св. 5000 до 6300	25	35	49	67	92	125	170	250	400	620
Св. 6300 до 8000	31	43	62	84	115	155	215	310	490	760
Св. 8000 до 10 000	38	53	76	105	140	195	270	380	600	940
Количество единиц допуска в допуске данного квалитета										
	1	1,4	2	2,7	3,7	5,1	7	10	16	25

Окончание таблицы

Номинальные размеры, мм	Квалитеты									
	9	10	11	12	13	14**	15**	10 **	17 **	18
	Обозначения допусков									
	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
	Допуски, мкм			Допуски, мм						
До 3	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1,0	1,4
Св. 3 до 6	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
Св. 6 до 10	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
Св. 10 до 18	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
Св. 18 до 30	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
Св. 30 до 50	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1,0	1,6	2,5	3,9
Св. 50 до 80	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3,0	4,6
Св. 80 до 120	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
Св. 120 до 180	100	160	250	0,4	0,63	1,0	1,6	2,5	4,0	6,3
Св. 180 до 250	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
Св. 250 до 315	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
Св. 315 до 400	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
Св. 400 до 500	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4,0	6,3	9,7
Св. 500 до 630	175	280	440	0,7	1,1	1,75	2,8	4,4	7,0	11,0
Св. 630 до 800	200	320	500	0,8	1,25	2	3,2	5,0	8,0	12,5
Св. 800 до 1000	230	360	560	0,9	1,4	2,3	3,6	5,6	9,0	14,0
Св. 1000 до 1250	260	420	660	1,05	1,65	2,5	4,2	6,6	10,5	16,5
Св. 1250 до 1600	310	500	780	1,25	1,95	3,1	5,0	7,8	12,5	19,5
Св. 1600 до 2000	370	600	920	1,5	2,3	3,7	6,0	9,2	15,0	23,0
Св. 2000 до 2500	440	700	1100	1,75	2,8	4,4	7,0	11,0	17,5	28,0
Св. 2500 до 3150	540	860	1350	2,1	3,3	5,4	8,6	13,5	21,0	33,0
Св. 3150 до 4000	660	1050	1650	2,6	4,1	6,6	10,5	16,5	26,0	41,0
Св. 4000 до 5000	800	1300	2000	3,2	5,0	8,0	13,0	20,0	32,0	50,0
Св. 5000 до 6300	980	1550	2500	4,0	6,2	9,8	15,5	25,0	40,0	62,0
Св. 6300 до 8000	1200	1950	3100	4,9	7,6	12,0	19,5	31,0	49,0	76,0
Св. 8000 до 10000	1500	2400	3800	6,0	9,4	15	24	38	60	94
Количество единиц в допуске данного квалитета										
	40	64	100	160	150	400	640	1000	1600	2500
** Квалитеты 14–17 для размеров менее 1 мм не предусмотрены										

Учебное издание

Беляков Николай Владимирович
Горохов Вадим Андреевич
Махаринский Юрий Ефимович
Ольшанский Валерий Иосифович

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

В двух частях

Часть 2

Корректор *Т.А. Осипова*
Редактор *Т.А. Осипова*
Компьютерная верстка *Н.В. Беляков*

Подписано к печати 31.05.2021. Формат 60x90¹/₁₆. Усл. печ. листов 22,9.
Уч.-изд. листов 29,0. Тираж 9 экз. Заказ № 118.

Учреждение образования «Витебский государственный
технологический университет»

210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет»

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.