

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

В трех томах
Том 2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ



ВИТЕБСК
2024

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

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

В трех томах

Том 2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Рекомендовано

*Учебно-методическим объединением по образованию в области
машиностроительного оборудования и технологий
в качестве учебно-методического пособия для студентов
специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения»
(6-05-0714-02 «Технология машиностроения, металлорежущие
станки и инструменты»)*

Витебск
2024

УДК 621
ББК 34.4
Ш 42

Рецензенты:

кафедра «Технологии металлов» учреждения образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет»
(зав. кафедрой, д.т.н., проф. В. М. Капцевич);

профессор кафедры «Стандартизация, метрология и информационные
системы» Белорусского национального технического университета,
д.т.н., проф. В. Л. Соломахо.

Одобрено кафедрой технологии машиностроения,
протокол № 12 от 16.03.2023.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским
советом УО «ВГТУ», протокол № 3 от 27.11.2023.

Ш42 Управление качеством в машиностроении : учебное пособие.
В 3 т. Т. 2. Технологические основы / В. К. Шелег, Н. Н. Попок,
Н. В. Беляков; УО «ВГТУ». – Витебск, 2024. – 375 с.
ISBN 978-985-481-756-9 (Т. 2)
ISBN 978-985-481-754-5

Описаны такие основные характеристики качества деталей машин, как эксплуатационные свойства, свойства материалов, параметры точности и качества поверхностного слоя. Описаны методы обеспечения точности при обработке и сборке. Раскрыты механизмы формирования показателей качества поверхности, влияние способов и условий обработки на шероховатость поверхности и состояние подповерхностного слоя, а также влияние вибраций на процесс и результаты обработки. Изложены основы технологического обеспечения и повышения эксплуатационных свойств деталей машин и соединений.

Издание предназначено для студентов машиностроительных специальностей вузов. Может быть полезным инженерно-техническим и научным работникам предприятий. Может использоваться также в системе повышения квалификации и переподготовки кадров машиностроительного профиля.

УДК 621
ББК 34.4

ISBN 978-985-481-756-9 (Т. 2)
ISBN 978-985-481-754-5

© УО «ВГТУ», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Характеристики качества деталей машин	7
1.1 Эксплуатационные свойства деталей	7
1.2 Свойства материалов	11
1.3 Размеры деталей и их точность	15
1.4 Параметры качества поверхностного слоя деталей	21
1.5 Вопросы для самоконтроля	29
2 Технологическое обеспечение точности изделий машиностроения	31
2.1 Современное понятие о точности в машиностроении	31
2.2 Теория базирования	33
2.2.1 Подходы к теории базирования.....	33
2.2.2 Система классификации баз	38
2.2.3 Термины и определения	43
2.3 Размерная настройка	58
2.4 Размерные цепи при сборке и механической обработке	65
2.5 Синтез маршрута обработки заготовки в субтрактивном производстве	78
2.5.1 Общие положения	78
2.5.2 Построение геометрической модели заготовки	79
2.5.3 Определение порядка обработки и смены баз	100
2.5.4 Синтез теоретических схем базирования.....	112
2.5.5 Синтез теоретических схем установки.....	119
2.6 Аддитивный синтез и базирование	124
2.7 Размерный анализ технологического процесса.....	137
2.7.1 Определение припусков и допусков на технологические размеры	137
2.7.2 Формирование размерных схем технологического процесса.....	145
2.7.3 Построение исходного и производного графов, формирование уравнений размерных цепей.....	146
2.7.4 Расчет технологических размеров и размеров заготовки	150
2.8 Жёсткость машин и технологических систем механической обработки	151
2.9 Погрешности сборки и механической обработки.....	158
2.10 Погрешности, не зависящие от режима резания	163
2.11 Погрешности, зависящие от режима резания	179
2.12 Прочие погрешности при механической обработке.....	182
2.13 Обеспечение точности обработки	186
2.13.1 Характеристики точности и стабильности технологического перехода	186
2.13.2 Статистическое регулирование точности обработки	189

2.13.3 Автоматическое управление точностью обработки по выходным данным	192
2.13.4 Автоматическое управление точностью обработки по рассогласованию	197
2.14 Обеспечение точностных характеристик при формировании соединений.....	200
2.15 Вопросы для самоконтроля.....	206
3 Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин.....	213
3.1 Механизмы формирования показателей качества поверхностей деталей машин	213
3.2 Влияние способов и условий обработки на шероховатость поверхности	215
3.3 Влияние способов и условий обработки на состояние подповерхностного слоя материала	222
3.4 Управление качеством поверхности при шлифовании	226
3.5 Влияние вибрации на процесс и результаты обработки	235
3.5.1 Источники вибрации при лезвийной обработке резанием и шлифовании	235
3.5.2 Борьба с вибрацией при обработке на станках	239
3.5.3 Использование вибрации при обработке на станках	250
3.6 Вопросы для самоконтроля	258
4 Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений	262
4.1 Изменение качества поверхностного слоя деталей при эксплуатации	262
4.2 Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений.....	271
4.3 Технологическое повышение долговечности изделий машиностроения.....	278
4.3.1 Обработка поверхностным пластическим деформированием.....	278
4.3.1.1 Общая характеристика	278
4.3.1.2 Отделочно-упрочняющая обработка	281
4.3.1.3 Формообразующая обработка фасонных поверхностей	284
4.3.1.4 Упрочняющая обработка	286
4.3.2 Ионная имплантация и лазерная обработка	291
4.3.2.1 Ионная имплантация	291
4.3.2.2 Лазерная обработка	305
4.3.3 Нанесение покрытий	308
4.3.3.1 Гальваническое хромирование	308
4.3.3.2 Твердое никелирование	314
4.3.3.3 Борирование	315
4.3.3.4 Оксидирование и фосфатирование	316
4.3.3.5 Химические способы нанесения никелевых, хромовых, ко-	

бальтовых, никель-кобальтовых покрытий	318
4.3.3.6 Наплавка материала	320
4.3.3.7 Напыление материала	323
4.3.3.8 Покрытие деталей пластмассами	325
4.3.3.9 Лакокрасочные покрытия	327
4.4 Вопросы для самоконтроля	329
Список использованных источников	332
Приложения	342
Приложение А. Таблицы однозначности задания ориентации поверхностей	342
Приложение Б. Числовые значения неуказанных допусков перпендикулярности, соосности и симметричности	346
Приложение В. Установочные элементы	348
Приложение Г. Правила назначения вида компонента комплекта технологических баз	352
Приложение Д. Таблица сокращения вариантов технических решений	361
Приложение Е. Пример проектирования универсально-сборного приспособления для оригинальной корпусной детали	363
Приложение Ж. Качество поверхностей заготовок	367
Приложение И. Допуски для размеров до 10000 мм	373

ВВЕДЕНИЕ

Современный научный этап развития технологии машиностроения заключается в объединении технологий проектирования, изготовления и эксплуатации машин, позволяющих обеспечить необходимые эксплуатационные свойства деталей машин. Технологии в машиностроении должны служить инструментом для обеспечения качества изделий при наименьшей себестоимости их изготовления.

Цель издания – формирование системы научных знаний о современных методах технологического обеспечения эксплуатационных свойств изделий машиностроения, необходимых для решения теоретических и практических задач повышения эффективности производства и качества продукции.

Основной задачей настоящего издания является помощь в овладении знаниями и умениями использования взаимосвязей эксплуатационных свойств изделий с показателями качества деталей машин, а также принятии научно обоснованных решений о выборе, создании и совершенствовании эффективных технологических методов и процессов изготовления, упрочнения и восстановления деталей и сборки машин в условиях конкретного производства.

В издании приводятся знания о: влиянии различных факторов на эксплуатационные свойства деталей машин; механизмах формирования параметров точности размеров и допусков взаимного расположения, а также качества поверхностей деталей машин при различных методах их обработки; основах совершенствования и создания новых технологических методов обработки деталей машин и повышения качества деталей; тенденциях развития теории базирования.

С помощью учебно-методического пособия возможно научиться: производить оценку необходимой и достижимой в данных условиях точности обработки деталей машин; выбирать требования к характеристикам качества поверхностей деталей машин с учетом условий их эксплуатации и технических требований, а также технологические методы обеспечения этих требований на производстве; назначать рациональный маршрут обработки заготовок, проектировать задания на разработку станочных приспособлений в субтрактивном производстве и модели ориентации деталей при их печати с помощью 3D-принтеров в аддитивном производстве.

1 ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

1.1 Эксплуатационные свойства деталей

Безотказность и долговечность исполнения своих функций изделием машиностроения определяется рядом эксплуатационных свойств деталей и их соединений: статической и усталостной прочностью, поверхностной контактной статической и динамической прочностью, коррозионной стойкостью, контактной жесткостью, герметичностью, износостойкостью и др. Все эти эксплуатационные свойства в значительной мере зависят от качества поверхностного слоя деталей, так как все разрушения (статические, усталостные, контактные, коррозионные и др.) начинаются с поверхности [1–18].

Под *статической и усталостной прочностью деталей* понимают их способность сопротивляться разрушению при воздействии соответственно статической и динамической нагрузки.

Качество поверхностного слоя оказывает влияние на статическую и усталостную прочность деталей через коэффициент концентрации напряжений, который рассчитывается по формуле

$$\alpha_0 = 1 + \frac{0,2}{tmSm} [2\gamma R_{max}(R_{max} - R_p)]^{0,5},$$

где tm – относительная длина опорной линии профиля шероховатости на уровне средней линии, %; Sm – средний шаг неровностей профиля шероховатости, мм; γ – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений на прочность детали

$$\gamma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma - \sigma_{ост}},$$

где σ_{-1} – предел прочности материала детали; $\sigma_{ост}$ – поверхностные остаточные напряжения; σ – напряжение от нагрузки; R_{max} – максимальная высота профиля шероховатости, мкм; R_p – высота сглаживания профиля шероховатости (расстояние от линии выступа до средней линии), мкм.

Поверхностная контактная статическая и динамическая прочность определяется способностью поверхностного слоя детали сопротивляться разрушению при контакте с другой деталью под воздействием соответственно статических и динамических нагрузок.

При статической нагрузке начало поверхностных контактных разрушений определяется ее величиной, которая рассчитывается по формуле

$$P_{max} = \frac{1,34mv_0^2}{\gamma_{пл}}$$

где m – масса контактирующей детали; v_0 – скорость приложения нагрузки; $\gamma_{пл}$ – пластические контактные деформации детали.

При действии статической ($P_{ст}$) и динамической ($P_{д}$) нагрузок контактные разрушения определяются величиной накапливаемой контактной деформации, которая определяется по формуле

$$\gamma_t = \left[\frac{2\pi(P_{ст}+P_{д})R_a W_z H_{max}}{A H_{\mu_0}} \right]^{1/3} \left(\frac{t}{t_{HB}} \right)^{m_{1/3}},$$

где R_a – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости; W_z – средняя высота волн; H_{max} – максимальное макроотклонение; A – геометрическая площадь контакта; H_{μ_0} – поверхностная микротвердость; t – время действия сил; t_{HB} – время испытания на твердость по Бринеллю; m_1 – показатель роста деформаций при действии динамической нагрузки; μ – коэффициент Пуассона.

Под *коррозионной стойкостью деталей* понимают способность поверхностных слоев сопротивляться разрушению под действием внешней среды. Скорость коррозии поверхностного слоя рассчитывается по формуле

$$v_k = v_{k_0} \left(1,1U_H^4 + 4U_H^3 - 4,1U_H^2 \right) \left(28 \cdot 10^6 \frac{(R_{max}-Rp)}{tm^2Sm^2} \right)^{2/3},$$

где v_{k_0} – скорость коррозии материала детали; U_H – степень наклепа поверхностного слоя ($U_H = 1,00 \dots 1,75$).

Контактная жесткость определяет способность слоев деталей, находящихся в контакте, сопротивляться действию сил, стремящихся их деформировать

$$j = \frac{p}{y_k},$$

где p – давление на площадь контакта, определяемое ее геометрическими размерами; y_k – контактные перемещения (деформации).

Контактные перемещения составляют значительную часть в балансе упругих перемещений машин и сборочных единиц. Например, в суппортах токарных станков контактные деформации составляют 80–90 % общих перемещений, в одностоечных координатно-расточных

и вертикально-фрезерных станках – до 70 %, в двухстоечных карусельных станках – до 40 % и т. д.

Контактная жесткость сказывается на точности работы приборов, на точности обработки и сборки, т. е. на качестве машиностроительных изделий. Так, значение нормальных контактных сближений двух деталей при первом приложении нагрузки может быть рассчитано по формуле

$$y_k = (y_{пл1} + y_{пл2}) + (y_{уп1} + y_{уп2}),$$

где $y_{пл1}, y_{пл2}$ – пластические контактные деформации соответственно первой и второй контактирующих деталей при первом приложении нагрузки; $y_{уп1}, y_{уп2}$ – упругие контактные деформации соответственно первой и второй контактирующих деталей.

В общем случае при действии силы P эти составляющие контактных деформаций можно рассчитать по формулам:

$$y_{пл} = \pi \left(\frac{2\pi P R a W_z H_{max}}{A H_{\mu_0}} \right)^{1/3},$$

$$y_{уп} = 2\pi \frac{1-\mu^2}{E} H_{\mu_0} S m \frac{y_{пл}}{R a},$$

где E – модуль упругости материала.

При повторных нагрузках (без их увеличения) контактные перемещения определяются упругими деформациями.

Контактные сближения деталей при скольжении можно рассчитать по формуле

$$y_{ск} = y_k \left(2\sqrt{1 + f^2} - 1 \right),$$

где f – коэффициент трения скольжения.

Касательные контактные деформации рассчитывают по формуле

$$x_k = \frac{\pi S m}{16 R p^2} \left[1 - \left(1 - \frac{P_k}{f_p} \right)^{2/3} \right] (y_{ск}^2 - y_k^2),$$

где P_k – касательные нагрузки; f – коэффициент трения покоя.

Герметичность соединений определяет их способность удерживать утечку газа или жидкости. С учетом геометрии и контактных де-

формаций сопрягаемых поверхностей величина утечки в общем случае может быть определена по формуле

$$Q = k \frac{\pi d \Delta p u [0,5(H_{max1} + H_{max2} + W_{z1} + W_{z2}) + R_{p1} + R_{p2} - y_k]^3}{\mu' l},$$

где k – коэффициент формы контакта, в частности, для кольцевой $A = 0,0066$; d и l – размеры соединения; Δp – перепад давления; $u = 0,2 \dots 0,22$ – константа Кармана; μ' – динамический коэффициент вязкости газа или жидкости; H_{max1} и H_{max2} – макроотклонения сопрягаемых поверхностей; W_{z1} и W_{z2} – средняя высота волн сопрягаемых поверхностей; R_{p1} и R_{p2} – высота сглаживания профиля шероховатости сопрягаемых поверхностей; y_k – контактные деформации сопрягаемых поверхностей, определяемые по формулам контактной жесткости.

При работе пар трения происходит *изнашивание* (разрушение) поверхностных слоев, которое приводит к уменьшению размеров контактирующих деталей, т. е. их износу. Размерное изнашивание поверхностей трения характеризуется его интенсивностью, которую рассчитывают по формулам:

– в период приработки

$$I_h = \frac{1,2Ra^{2/3}}{n\lambda Smtm^{3/2}} \left(\frac{p}{H_{\mu_0}}\right)^{7/6} \sqrt{15\pi(2\pi WzH_{max})^{1/3} \left[1 + \frac{2\pi H_{\mu_0}(1-\mu^2)}{E}\right]},$$

– в период нормального изнашивания

$$I_h = \frac{1,2\pi p^{2/3}}{n\lambda t m^{3/2} H_{\mu_0}^{2/3}} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi Ra Wz H_{max})^{1/3}}{ESm}},$$

где n – число циклов воздействия, которое приводит к разрушению материала; p – номинальное давление на поверхности трения; λ – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений на изнашивание,

$$\lambda = \left[\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_a}\right]^{t_y},$$

где σ_a – действующее значение амплитудного напряжения в поверхностном слое; t_y – параметр фрикционной усталости материала детали.

Под *прочностью посадок с натягом* понимают их способность передавать крутящий момент ($M_{кр}$) и осевые нагрузки (P) без взаимного проскальзывания сопрягаемых деталей. Формулы для расчета прочно-

сти посадок с натягом с учетом качества сопрягаемых поверхностей имеют следующий вид:

$$M_{кр} = \frac{\pi d^2 l f_{кр} [\Delta - 0,5(H_{max1} + H_{max2} + W_{z1} + W_{z2}) - Rp_1 - Rp_2]}{2 \cdot 10^3 \left[\frac{\left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} \right) + \mu_1}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right]},$$

$$P = \frac{\pi d l f_{ос} [\Delta - 0,5(H_{max1} + H_{max2} + W_{z1} + W_{z2}) - Rp_1 - Rp_2]}{2 \cdot 10^3 \left[\frac{\left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} \right) + \mu_1}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right]},$$

где d и l – диаметр и длина сопряжения; D – наружный диаметр сопрягаемой втулки; $f_{кр}$ и $f_{ос}$ – коэффициенты трения при кручении и осевом перемещении сопрягаемых поверхностей, зависящие от материалов деталей и метода сборки.

Таким образом, выполнение функционального назначения изделиями машиностроения в значительной мере определяется их качеством.

1.2 Свойства материалов

Качество деталей машин характеризуется свойствами материалов, размерами, точностью и качеством поверхностных слоев. *Свойства материалов* разделяют на *механические, технологические, физические, структурные и эксплуатационные* (или *служебные*) [7–18].

Механические свойства определяются поведением материалов под действием приложенных внешних механических сил. К механическим свойствам обычно относят сопротивление материалов деформированию (прочность, твердость) и сопротивление разрушению (пластичность, вязкость, способность не разрушаться при наличии трещин).

Основные *механические свойства* определяются при испытаниях на растяжение, ударный изгиб, сжатие, кручение и твердость.

При испытаниях на растяжение определяют временное сопротивление (предел прочности при растяжении) σ_s , предел текучести физический σ_m или условный $\sigma_{0,2}$, предел пропорциональности σ_{nc} , предел упругости $\sigma_{0,05}$, относительное удлинение образца после разрыва δ_5 или δ_{10} , относительное сужение ψ , модуль продольной упругости (модуль Юнга) E . Характеристики σ_s , σ_m , $\sigma_{0,2}$, σ_{nc} , $\sigma_{0,05}$, а также модуль Юнга E измеряются в МПа, характеристики пластичности δ и ψ – в %.

Основной характеристикой *ударного изгиба* является *ударная вязкость КС* с различной формой надреза на образце (*KCU, KCV* или *KCT*), измеряемая в Дж/см² или в кДж/м².

Наиболее важными характеристиками, определяемыми при других методах испытаний, являются *предел выносливости* в МПа, *условный предел ползучести*, например, $\sigma_{0,2/100}^{700}$ в МПа (напряжение, которое за время испытания 100 ч при температуре 700 °С вызывает удлинение образца на 0,2 %), *предел прочности при сжатии* σ_a в МПа, *прочностные характеристики при кручении* (условный предел прочности τ_{nc} , истинный предел прочности τ_k , предел пропорциональности τ_{nc} , предел упругости τ_{yn} , условный предел текучести $\tau_{0,3}$) в МПа, *сдвиг при кручении* (скручивание) γ в %, *модуль упругости* при сдвиге кручением G в МПа, а также *модуль сжатия* K в МПа и *коэффициент на ν* (безразмерная величина).

Твердость H (безразмерная величина) определяют методами Бриелля (НВ), Роквелла (HRCэ, HRB, HRA), Виккерса (HV). Твердость в МПа тонких слоев оценивают по микротвердости с разной формой отпечатка.

Для полимерных материалов характерны некоторые особые свойства. При испытании полимеров на ползучесть определяют *показатель ползучести* β_t в %, *модуль ползучести* ε_t , в Н и *податливость*. Модуль ползучести характеризует относительное изменение удлинения образца при постоянной нагрузке и температуре в задаваемом временном интервале. Модуль ползучести вычисляют по формуле $\varepsilon_t = \sigma * \frac{100}{\sigma_t}$, где σ – напряжение при испытании, МПа; σ_t – относительная деформация в момент времени t , %. Податливость $Пт$ является величиной, обратной модулю ползучести ($Пт = 1 / \varepsilon_t$), и измеряется в см²/Н.

Технологические свойства – часть общих, присущих данному материалу физико-химических свойств, знание которых позволяет обоснованно проектировать и осуществлять технологический процесс и получать изделия с наилучшими, потенциально возможными для данного материала служебными свойствами. Технологические свойства проявляются в процессе получения отливок (литейные свойства), поковок и других деформируемых заготовок (деформируемость или технологическая пластичность), сварных конструкций (свариваемость), термообрабатываемых изделий (закаливаемость, прокаливаемость) и изделий, получаемых обработкой резанием (обрабатываемость резанием).

Жидкотекучесть – способность расплавленного металла заполнять полость литейной формы. Различают следующие разновидности жидкотекучести: *истинную*, определяемую при постоянном превышении температуры по сравнению с температурой нулевой жидкотекучести (ТНЖ); *практическую*, определяемую при постоянной температуре заливки; *условно-истинную*, определяемую при постоянном превыше-

нии температуры по сравнению с температурой ликвидуса (ТЛ). Разницу между ТЛ и ТНЖ называют *эффективным интервалом кристаллизации* ($\Delta t_{эф}$).

В процессе кристаллизации сплавов происходит их усадка, т. е. уменьшение линейных размеров и объема отливки. Общая усадка распределяется между раковинной и порами. Максимум развития пористости фиксируется при составах сплавов вблизи точки C_p .

Технологическая пластичность характеризует способность материалов подвергаться обработке методами пластического деформирования. Количественно пластичность оценивают по характеристикам пластических свойств материалов (относительному удлинению и относительному сужению образцов), специальным характеристикам, определяемым при испытании на скручивание, развальцовку и т. д. Критерием высокой деформируемости сплавов является отношение $\sigma_{0,2} / \sigma_g$. Например, для сталей высокой штампуемости $\sigma_{0,2} / \sigma_g = 0,50 \dots 0,65$.

Обрабатываемость сплавами резанием зависит от их химического состава и механических свойств (в частности, от твердости и прочности). Коэффициент обрабатываемости $K_v = v/v_g$, где v – скорость резания материала при заданных условиях обработки; v_g – скорость резания материала-эталона при тех же условиях резания. Заданные условия обработки: толщина срезаемого слоя $t = 1,5$ мм, подача $s = 0,2$ мм/об, стойкость резцов – 60 мин, эталон – сталь 45 ($\sigma_g = 650$ МПа, НВ 179). Все материалы в соответствии с их назначением и свойствами разбиты на группы, каждая из которых разделена на подгруппы.

Обрабатываемость резанием серого чугуна (СЧ) обратно пропорциональна его твердости. Она улучшается по мере увеличения количества феррита в структуре и повышения однородности структуры, при отсутствии в ней твердых включений фосфидной эвтектики и карбидов. При наличии графита стружка получается ломкой, и давление на инструмент уменьшается. При обработке высокопрочного чугуна (ВЧ) сила резания на 50...60 % выше, чем при обработке СЧ той же твердости, но при эквивалентных значениях σ_g обрабатываемость ВЧ лучше, чем СЧ. Обрабатываемость КЧ примерно такая же, как и ВЧ.

Свариваемость – свойство металлов и сплавов образовывать сварное неразъемное соединение, соответствующее качеству основного металла, подвергнутого сварке. По технологической свариваемости условно различают следующие группы сталей: свариваемые без ограничений (без подогрева и термообработки); ограниченно свариваемые (предварительный подогрев, проковка швов, термообработка); трудно-свариваемые (используется комплекс дополнительных операций); не применяемые для изготовления сварных конструкций.

Чугуны свариваются значительно хуже углеродистых сталей, поэтому газовая и дуговая сварка, а также и заварка дефектов (особенно крупных) на отливках выполняется по особой технологии.

Важной технологической характеристикой является способность сплава менять свои свойства при термической обработке. Для сталей используют две такие характеристики: *закаливаемость* и *прокаливаемость*. Под *закаливаемостью* понимают способность стали повышать твердость в результате закалки. Закаливаемость стали определяется, в первую очередь, содержанием в ней углерода. Легирующие элементы в незначительной степени влияют на закаливаемость.

Под *прокаливаемостью* понимают способность стали образовывать закаленный слой с мартенситной или троостито-мартенситной структурой и высокой твердостью на определенную глубину.

Обычно прокаливаемость P (мм) характеризуют параметром прокаливаемости и критическим диаметром прокаливаемости. Параметр P прокаливаемости – это расстояние от торцевой охлаждаемой поверхности до зоны с полумартенситной структурой (50 % мартенсита и 50 % троостита), определяемое на стандартных образцах методом торцевой закалки. Параметр P зависит от химического состава стали.

К основным *физическим свойствам* материалов относятся плотность, теплофизические свойства (теплоемкость, теплопроводность, термическое расширение), электрические и магнитные свойства (электрическое сопротивление, магнитная проницаемость, коэрцитивная сила), хладноломкость и жаростойкость.

Химические свойства материалов определяют степень их химической активности или инертности по отношению к внешним средам и контактирующим телам. Важнейшая химическая характеристика материалов – их химический состав. От химического состава и строения материалов в первую очередь зависит их сопротивление внешним химическим воздействиям – их коррозионная стойкость. Химическая активность компонентов, входящих в состав материала, зависит от электронного строения атомов, положения элементов в ряду электроотрицательности, валентности и потенциалов ионизации атомов.

Структурные свойства определяются строением материалов. Различают макроструктуру, видимую невооруженным глазом или через лупу на изломах, или на соответствующим образом подготовленных образцах (макрошлифах), и микроструктуру, видимую на микрошлифах при больших увеличениях с помощью оптических, рентгеновских или электронных микроскопов.

Эксплуатационные, или служебные свойства материалов проявляются в процессе работы изделий при их взаимодействии с другими изделиями или внешней средой. Наиболее часто оценивают работоспособность материалов в условиях трения и изнашивания (коэффициент трения, износостойкость), повышенных и высоких температур (теплостойкость, ползучесть, жаропрочность, жаростойкость), а также в химически активных средах (коррозионная стойкость).

1.3 Размеры деталей и их точность

Размеры деталей определяются исходя из их функционального назначения и действующих рабочих нагрузок [1–29].

Размеры деталей на рабочих чертежах по своему назначению могут быть разделены на группы.

Координирующие размеры используют для определения взаимного положения поверхностей деталей, а также осей. Это, как правило, размеры ответственных поверхностей, которые определяют служебное назначение детали. Например, у корпусных деталей ответственными являются плоские поверхности и отверстия для размещения валов, подшипников. Координирующие размеры увязывают плоские и цилиндрические поверхности корпуса.

Сборочные размеры используют для определения положения узлов относительно других элементов машины. Это, прежде всего, размеры присоединительных поверхностей. У корпусных деталей присоединительными чаще всего бывают плоские поверхности.

Кроме того, применяют технологические размеры, которые необходимы при изготовлении и контроле деталей.

Ни один размер, как и все остальные параметры качества деталей, нельзя получить абсолютно точно. Под точностью понимается степень приближения истинного значения параметра к его номинальному значению. Точность деталей машин характеризуется точностью размеров элементов деталей, т. е. отдельных поверхностей, и точностью относительного положения поверхностей.

Для того чтобы характеризовать точность размеров, их разделяют на номинальные, действительные и предельные. Относительно номинального размера определяют предельные размеры.

Номинальный размер определяет конструктор исходя из служебного назначения детали. Полученные расчетом размеры округляют до значений, соответствующих ближайшим достаточным значениям рядов предпочтительных чисел.

В реальном производстве нельзя абсолютно точно выполнить номинальный размер, а также измерить его без погрешности. Поэтому существует понятие «действительный размер» – это размер, измеренный с допустимой погрешностью.

Действительный размер для оценки качества продукции особо важен. В ходе изготовления детали в каждый момент времени этот размер имеет разные значения. Это объясняется тем, что используемые в машиностроении технологические системы вносят свои погрешности в изготавливаемые детали, так как они работают в условиях постоянного изнашивания инструмента и, следовательно, постоянно изменяющихся силовых факторов, воспринимают действие нестационарного теплового

поля, переменной жесткости систем. Кроме этого, на точность деталей оказывают влияние погрешности настройки инструмента, установки обрабатываемой заготовки и ряд других факторов.

Допуском называют разность между наибольшим и наименьшим допустимыми значениями параметра, в данном случае – размера. Допуски размеров регламентируются ГОСТ 25346. Изготовление деталей с соблюдением допусков способствует созданию высококачественной машины, несмотря на то, что каждая деталь ограничивается поверхностями, размеры и форма которых отличаются от номинальных [7, 19–28].

Метод выбора допусков размеров имеет принципиальное значение. Метод *аналогов* заключается в том, что конструктор отыскивает среди ранее сконструированных и находящихся в эксплуатации машин и узлов такие, в которых имеются детали, аналогичные конструируемым.

Развитием метода аналогов является *метод подобия*. Для назначения допусков этим методом отыскивают подобие конструктивных признаков и условий эксплуатации. Однако иногда бывает сложно установить собственно подобие, что ограничивает применение метода.

Наиболее обоснованным является *расчетный метод*. Пользуясь этим методом, назначают качества (классы, степени точности) различных поверхностей деталей на основе физических явлений при эксплуатации, связанных чаще всего с контактированием деталей в собранной машине.

Каждая деталь характеризуется бесконечно большим числом размеров. Детали лишь на чертежах характеризуются номинальными (идеальными) поверхностями, а фактически ограничены реальными поверхностями. Детали всегда имеют отклонения формы. Обеспечение допустимого отклонения формы в производственных условиях всегда затруднено. В частности, в производственных условиях возникают отклонения от круглости. Они непосредственно сказываются на качестве соединений, имеющих цилиндрические поверхности потому, что по таким поверхностям устанавливаются ответственные детали и узлы машин и, прежде всего, подшипники качения, которые вследствие отклонения формы колец могут утратить свои первоначальные характеристики.

Условия формообразования деталей настолько сложны, что одновременно возникает ряд отклонений: от цилиндричности, от перпендикулярности, от параллельности и др. Технологическое обеспечение допустимых параметров является одним из условий повышения качества машин. Так, у пары «вал – корпус» вал при поступательном движении не может перемещаться прямолинейно, если он имеет отклонения от цилиндричности, или если такие отклонения имеют отверстие. Таким образом, отклонения параметров деталей в этом случае не обеспечива-

ют заданного качества (например, не соблюдается форма траектории перемещения).

При решении проблемы качества деталей необходимо опираться на количественные показатели. На рисунке 1.1 утрированно представлена деталь типа двухступенчатого вала. В любом поперечном сечении размеры вала определяются переменным радиусом R , отсчитываемым от центра O номинального сечения диаметром D_n . Радиус R , именуемый текущим размером, зависит от угловой координаты φ . Текущий размер также меняется по координате z . Начальное значение радиуса оговаривается. Так, им может быть радиус R_1 с угловой координатой φ_1 . Любой контур поперечного сечения удовлетворяет условию замкнутости, т. е. $f(\varphi) = f(\varphi + 2\pi)$.

Период функции равен 2π .

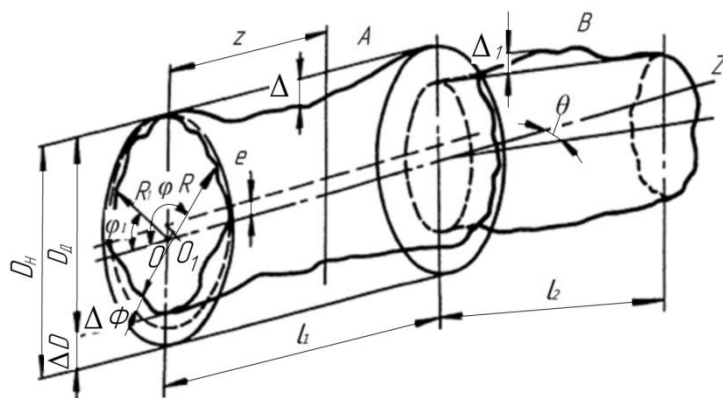


Рисунок 1.1 – Схема отклонения параметров двухстороннего вала

Реальный контур на левом торце вала ограничивается прилегающей окружностью (штриховая линия) диаметром D_d . Отклонение от круглости, характерное для каждого сечения, обозначено $\Delta\Phi$. Для каждого сечения можно определить отклонение ΔD размера. Прилегающая окружность имеет центр в точке O_1 . Поэтому действительный контур детали отличается от номинального (идеального), а их оси смещены на расстояние, равное эксцентриситету e . Можно убедиться, что ось действительного контура в общем виде не является прямой линией. Это характерно для любого сечения ступени вала A длиной l_1 .

Для оценки качества детали ее форма имеет первостепенное значение. Отклонения и допуски формы оговорены ГОСТ 24642. Отклонения формы удобно описывать с помощью рядов Фурье. Зависимость $f(\varphi)$ погрешности действительного профиля от угла поворота рассматривается в полярной системе координат:

$$f(\varphi) = a_0/2 + \sum_{k=1}^{k=\infty} (a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi),$$

где $a_0/2$ – нулевой член разложения; k – порядковый номер соответствующей гармоники; a_k, b_k – коэффициент ряда Фурье.

Вместо рядов для фактических целей удобно пользоваться тригонометрическим полиномом

$$f(\varphi) = c_0/2 + \sum_{k=1}^{k=n} c_k (\cos k\varphi + \varphi_k),$$

где n – порядковый номер высшей гармоники полинома.

Величина $c_0/2$ может быть принята за среднее значение функции $f(\varphi)$ в течение периода $T = 2\pi$ и определяется расстоянием от базового значения текущего размера до средней линии отклонений профиля. Поэтому значение $c_0/2$ представляет собой отклонение размера.

Первый член разложения $c_1 \cos(\varphi + \varphi_1)$ характеризует расстояние между центром вращения O_1 и геометрическим центром O , т. е. эксцентриситет e . Он указывает на отклонение расположения поверхности и выражает его количественно. Последующие члены полинома, начиная со второго, характеризуют спектр отклонений формы детали в поперечном сечении.

Второй член $c_2 \cos(2\varphi + \varphi_2)$ характеризует овальность сечения, а третий член $c_3 \cos(3\varphi + \varphi_3)$ – огранку с трехвершинным профилем и т. д. Поэтому сечение детали следует представлять очерченным контуром, имеющим отклонение размера с центром, смещенным от геометрического центра. Контур имеет овальную форму, на которую наложены огранки с различным числом вершин. Остальные члены ряда характеризуют соответствующие волнистость и шероховатость.

Приведенные рассуждения справедливы и для ступени B вала длиной l_2 . Однако у этой ступени может оказаться своя ось, повернутая на угол θ в любой из плоскостей относительно оси z , а также могут возникнуть свои собственные погрешности. Отклонения профилей цилиндрических поверхностей целесообразно представлять и в продольных сечениях. Условие замкнутости контуров здесь не соблюдается.

Тригонометрический полином для описания продольного сечения можно применить, используя цилиндрическую систему координат (координатами являются R, φ, z). Условно принимаем, что период $T = 2l$ (где l – длина участка цилиндрической поверхности).

Полином

$$f(z) = c_0/2 + \sum_{k=1}^{k=p} c_k \sin(k\pi z)/2l,$$

где k – порядковый номер члена разложения.

Первый член разложения показывает, что при $z = 0 - f(z) = 0$, а при $z = l - f_l(z) = c_1$. Следовательно, этот член характеризует конусообразность, так как образующая профиля имеет соответствующий наклон. Второй член разложения $f_2(z) = c_2 \sin(\pi z)/l$ характеризует выпуклость

контура, а при сдвиге фазы $f_2(z) = c_2 \sin(\pi z / l - \pi/2) = c_2 \cos \pi z / l$, т. е. он характеризует вогнутость контура. Так, на ступени A вала возникла седлообразность величиной Δ , а на ступени B – бочкообразность Δ_1 .

Профиль детали в продольном направлении также представляет собой сложное сочетание конических поверхностей с наложенными на них седлообразными, бочкообразными, волнистыми профилями.

Отклонения профилей деталей определяют с помощью соответствующих анализаторов. Описание профилей оказывается исключительно важным, поскольку с его помощью можно установить характер контактирования деталей при сборке, условия смазывания, прогнозировать изнашивание и пр. Однако более важно для решения проблемы повышения качества машин установить причины возникновения погрешностей, указать соответствующую операцию технологического процесса, при выполнении которой возникла данная погрешность, и принять меры к ее ликвидации.

Так, например, с помощью гармонического анализа обнаружено, что на овальный профиль поперечного сечения детали налагается трехгранный профиль. Поскольку указанные отклонения формы ухудшают качество детали, рассматривают результаты предшествующих операций и устанавливают, что, например, овальность детали вызвана овальной формой заготовки. В результате принимают меры по ликвидации или уменьшению отклонений формы еще на предшествующих технологических операциях.

Для установления указанных зависимостей применяют учение о технологической наследственности. *Технологической наследственностью* можно назвать явление переноса свойств объектов от предшествующих технологических операций к последующим. Сохранение этих свойств у деталей машин называют *технологическим наследованием*. Носителями наследственной информации является собственно материал детали, а также ее поверхности с различными параметрами, описывающими состояние этих поверхностей. В первую очередь это относится к размерам, форме и взаимному расположению элементов детали. Носители информации активно участвуют в технологическом процессе, проходя через различные операции, в ходе которых они могут изменяться частично или полностью. Гармонический анализ позволяет количественно описать всю картину трансформирования геометрических показателей изготавливаемых деталей.

Качество деталей оценивается также отклонениями расположения поверхностей, т. е. отклонениями реального положения поверхности от ее номинального положения. При такой оценке отклонения формы поверхностей деталей из рассмотрения исключаются, а реальные профили заменяются прилегающими. Реальные оси, центры реальных поверхностей, поверхности симметрии и т. д. заменяются *прилегающими элементами*. Каждое из отклонений расположения поверхностей имеет свое

точное определение и методику производственной оценки. Прилегающими элементами могут быть прямые, окружности, плоскости, цилиндры.

Качество деталей по отклонению от параллельности оценивают по положению двух прилегающих к реальным поверхностям плоскостей, измеряя расстояние между этими плоскостями в различных местах нормируемого участка. Отклонения расстояния поверхностей могут определяться с помощью осей. Ступени вала практически имеют криволинейные оси. Однако они условно представлены прямыми. Взаимное расположение цилиндрических ступеней определяется положением их осей. В общем случае оси могут иметь отклонения от параллельности, а также перекос или отклонение от пересечения. Типичным для деталей, имеющих отверстия (например, корпусных), является отклонение от соосности. Такое отклонение решающим образом влияет на долговечность подшипников, установленных в отверстиях корпусов.

С помощью прилегающих элементов определяют отклонение от перпендикулярности. Оно, например, оценивается углом между двумя плоскостями, прилегающими к реальным поверхностям конкретной детали. При оценке отклонения от симметричности относительно базовой плоскости определяют положение последней и от него измеряют расстояние до плоскости симметрии реального профиля.

Все отклонения формы и расположения поверхностей должны быть ранжированы применительно к конкретным деталям исходя из их служебного назначения. Так, в одном случае решающее влияние на качество детали оказывает отклонение от круглости, а в другом – перекос осей и т. д. Значения отклонений формы и расположения оговорены в ГОСТ 24643, в котором предусмотрено 16 степеней точности. Значения допусков от одной степени к другой увеличиваются в 1,6 раза. Установлены также уровни относительной точности, которая зависит от соотношения между допуском размера и допусками формы и расположения. Таких уровней три: А – нормальная относительная точность, В – повышенная относительная точность и С – высокая относительная точность. Для этих уровней допуск формы или расположения в среднем составляет соответственно 60, 40 и 25 % допуска размера. Для цилиндричности, круглости и профиля продольного сечения относительная геометрическая точность для А, В и С составляет соответственно 30, 20 и 12 % допуска размера [7,19–28].

Указанные соотношения оказываются весьма полезными для практических целей. Допуск размера, установленный конструктором на основе расчетов, экспериментов или практических наблюдений, уже предполагает определенные допустимые отклонения формы и расположения поверхностей. В особых случаях допуски формы и расположения оговариваются дополнительно в технических условиях на изготовление детали. Изготовление деталей с допустимыми отклонениями парамет-

ров является основной задачей в сфере производства. Она решается на основе разработки оптимальных технологических процессов. При этом каждому методу обработки соответствует определенная допустимая точность, что оговаривается в справочной литературе. Так, с одной стороны, для каждого номинального размера и качества его допуска (А, В, С) в таблицах оговариваются соответствующие допуски на любые геометрические параметры, с другой стороны, имеются табличные данные, указывающие, каким именно технологическим методом можно достичь заданной точности. Табличные данные постоянно обновляются, числовые значения уточняются, а также конкретизируются условия обработки (обработка заготовок из различных материалов, учет жесткости технологических систем и др.).

Вид допуска формы и расположения обозначаются в соответствии с ГОСТ 24643. Вид допуска представляется знаком, а сам допуск – числовым значением. Эти данные заносятся в рамку, имеющую, как правило, три секции. Вначале в рамке указывают знак, затем допуск, и, наконец, базу, относительно которой определяют допуск.

1.4 Параметры качества поверхностного слоя деталей

Наружный слой детали, имеющий макро и микроотклонения от идеальной геометрической формы и измененные физико-химические свойства по сравнению со свойствами основного материала, называют поверхностным слоем [7, 19–28]. Он формируется при изготовлении и эксплуатации и по глубине может составлять от десятых долей микрометра до нескольких миллиметров. Поверхностный слой определяется геометрическими характеристиками и физико-химическими свойствами (рис. 1.2).

Под геометрическими характеристиками понимают макроотклонение, волнистость, шероховатость и субшероховатость.

Макроотклонение 1 поверхности – это неровность высотой 10^{-2} – 10^3 мкм на всей ее длине или ширине.

Волнистость 2 поверхности – совокупность неровностей высотой примерно 10^{-2} – 10^3 мкм с шагом, большим, чем базовая длина l , используемая для измерения параметров шероховатости.

Под шероховатостью 3 поверхности понимают совокупность неровностей высотой около 10^{-2} – 10^3 мкм с шагом, меньшим, чем базовая длина, используемая для ее измерения.

Субшероховатость 4 – это субмикронеровности высотой примерно 10^{-3} – 10^{-2} мкм, накладываемые на шероховатость поверхности.

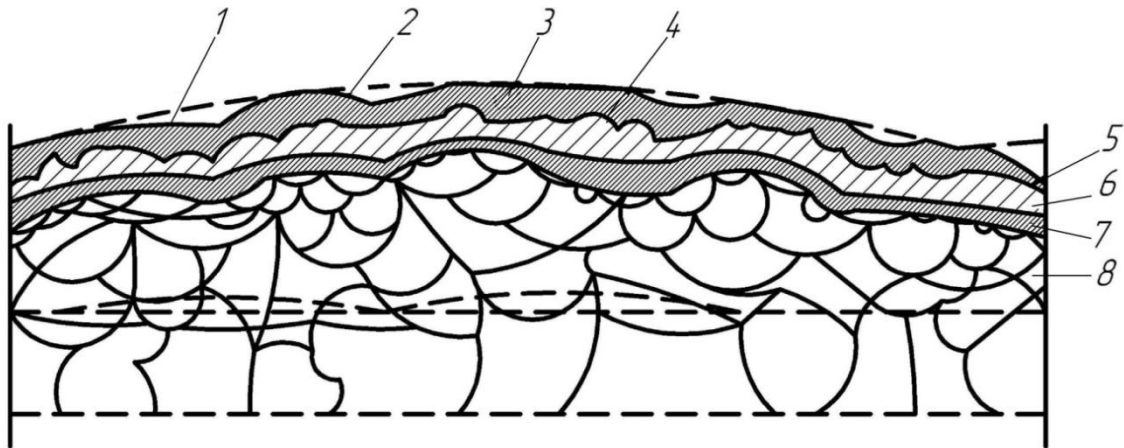


Рисунок 1.2 – Схема поверхностного слоя детали:

- 1 – макроотклонение; 2 – волнистость; 3 – шероховатость; 4 – субшероховатость; 5 – адсорбированная зона; 6 – зона оксидов; 7 – граничная зона материала; 8 – зона материала с измененными физико-химическими свойствами

Верхняя зона 5 толщиной около 10–100 мкм – это адсорбированный из окружающей среды слой молекул и атомов органических и неорганических веществ (например, воды, СОЖ, растворителей, промывочных жидкостей).

Промежуточная зона 6 толщиной примерно 10^{-3} –1 мкм представляет собой продукты химического взаимодействия металла с окружающей средой (обычно оксидов).

Граничная зона 7 имеет толщину, равную нескольким межатомным расстояниям со значительно измененными кристаллической и электронной структурами и химическим составом.

Зона 8 имеет толщину примерно 10^{-4} –10 мм с измененными физико-химическими свойствами по сравнению со свойствами основного материала. Под физико-химическими свойствами поверхностного слоя понимают остаточные напряжения, наклеп и структуру. Оценка геометрических характеристик и физико-химических свойств может быть непараметрической и параметрической.

Непараметрическая оценка заключается в графическом изображении макроотклонения, волнистости, шероховатости, субшероховатости, структуры, распределения остаточных напряжений и наклепа поверхностного слоя для визуального сравнения. В частности, для непараметрической оценки шероховатости используют профилограммы, кривые опорных длин профиля, кривые распределения ординат или вершин профиля, спектрограммы профиля, топограммы и т. п.

При *параметрической оценке* характеристик поверхностного слоя деталей машин используются приводимые ниже параметры.

Макроотклонение (отклонение формы) характеризуется: максимальным макроотклонением и высотой сглаживания макроотклонения (расстояние от средней линии профиля до огибающей). Отклонение формы нормируется значением допуска формы поверхности, и рекомендована ее взаимосвязь с допуском на размер.

Волнистость (рис. 1.3) характеризуется:

1) W_a – средним арифметическим отклонением профиля волн, мкм

$$W_a = (1/l_w) \int_0^{l_w} |y_i| dx \text{ или } W_a = \sum_{i=1}^N |y_i|/N,$$

где l_w – базовая длина; y_i – текущее значение ординаты профиля волн (расстояние от точки профиля до средней линии); dx – приращение абсциссы; N – число ординат профиля;

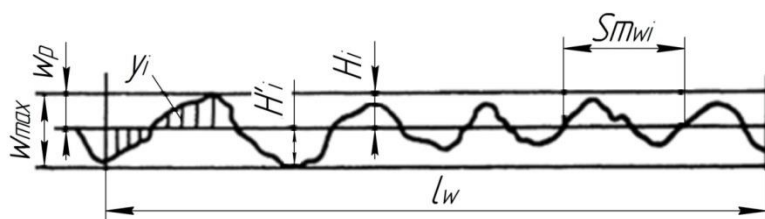


Рисунок 1.3 – Волнограмма поверхности

2) W_z – средней высотой волн, мкм

$$W_z = \left(\sum_{i=1}^5 H_i + \sum_{i=1}^5 H_i' \right) / 5,$$

где H_i – текущее расстояние от средней линии до вершины волны; H_i' – текущее расстояние от средней линии до впадины волны; W_{max} – наибольшая высота профиля волн, мкм; W_p – высота сглаживания волнистости;

3) t_{pw} – относительная опорная длина профиля волн, %

$$t_{pw} = \sum_{i=1}^n \eta_{pw} / l_w = \eta_{pw} / l_w,$$

где μ_{pw} – опорная длина профиля волн на уровне сечения профиля p ; Sm_w – средний шаг волн, мм

$$Sm_w = \sum_{i=1}^n Sm_{wi}/n,$$

где Sm_{wi} – текущее значение шага волн; n – число шагов; R_{wcp} – средний радиус выступов волн, мм

$$R_{wcp} = \sum_{i=1}^n R_{wi}/n,$$

где R_{wi} – текущее значение радиуса выступа; n – число выступов волн.

Волнистость поверхности до настоящего времени не стандартизована, поэтому на практике используют различные отраслевые нормы и рекомендации. Так, в подшипниковой промышленности при шлифовании колец (диаметр 18–120 мм) класса Н (класса 0) волнистость по высоте составляет 40–110 % шероховатости, а по классу С (4–5-й классы) – 15–60 %.

В соответствии с рекомендациями Института машиноведения РАН волнистость в зависимости от ее высоты подразделяют на девять классов:

Высота волны, мкм	1	2	4	8	16	32	64	125	250
Класс волнистости	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX

За рубежом стандартизованы параметры волнистости (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Стандартизованные параметры волнистости

Страна	Высота волнистости	Средняя высота волнистости	Максимальная высота волнистости	Средний шаг волнистости	Глубина нивелирования волнистости	Среднее арифметическое отклонение волнистости
Франция	W_t	W	W_{max}	A_w	W_p	W_0
Германия					-	-
Австрия					-	-
Япония					-	-
Великобритания					H_z	-

Шероховатость (рис. 1.4) характеризуют следующие параметры.

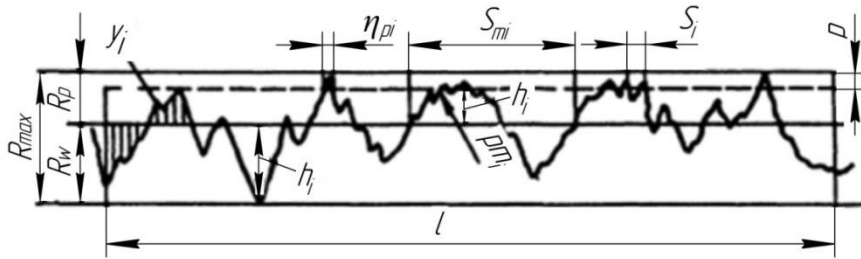


Рисунок 1.4 – Профилограмма шероховатости поверхности

Параметры по ГОСТ 2789 [19–28]:

– среднее арифметическое отклонение профиля, мкм

$$Ra = (1/l) \int_0^l |y_i| dx \text{ или } Ra = \sum_{i=1}^N |y_i|/N$$

где l – базовая длина; y_i – текущая величина ординаты профиля шероховатости; N – число рассматриваемых ординат профиля шероховатости;

– высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм

$$Rz = \left(\sum_{i=1}^5 h_i + \sum_{i=1}^5 h'_i \right) / 5$$

где h_i – высота i -го наибольшего выступа профиля; h'_i – глубина i -й наибольшей впадины профиля;

– наибольшая высота профиля R_{\max} , мкм;

– средний шаг неровностей профиля, мм

$$Sm = \sum_{i=1}^N Sm_i/n,$$

где Sm_i – значение i -го шага неровностей по средней линии в пределах базовой длины;

– средний шаг местных выступов профиля, мм

$$S = \sum_{i=1}^N S_i/N,$$

где S_i – значение i -го шага по вершинам местных выступов;

– относительная опорная длина профиля, %

$$t_p = \sum_{i=1}^n \eta_{pi}/l = \eta_{pi}/l,$$

где μ_{pi} – опорная длина профиля на уровне p .

Нестандартизованные параметры шероховатости:

Rq – среднее квадратичное отклонение профиля

$$Rq = \sqrt{(1/l) \int_0^l y_i^2 dx} \quad \text{или} \quad Rq = \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 / n},$$

Rp – высота сглаживания профиля шероховатости, мкм;

Rw – глубина сглаживания профиля шероховатости, мкм;

Kp – коэффициент заполнения профиля;

v и b – параметры начального участка кривой относительных опорных длин профиля;

ρ_m – средний радиус выступов профиля шероховатости, мкм;

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n \rho_{mi} / n$$

где ρ_{mi} – радиус i -го выступа профиля шероховатости (рис. 1.5);

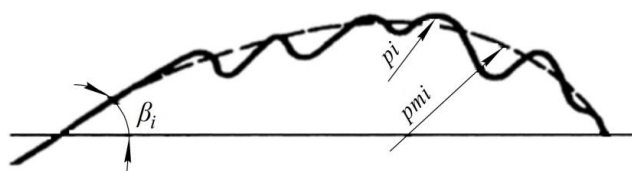


Рисунок 1.5 – Выступ профиля шероховатости

ρ – средний радиус местного выступа профиля;

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i / n,$$

где ρ_i – радиус i -го местного выступа профиля;

β – средний угол профиля шероховатости (см. рис. 1.5), где β_i – угол наклона i -го выступа профиля.

$$\beta = \sum_{i=1}^n \beta_i/n,$$

В таблице 1.2 приведены шероховатости, стандартизованные в различных странах [7].

Таблица 1.2 – Стандартизованные параметры шероховатости в различных странах

Страна	Параметры шероховатости														Число параметров
	Ra	Rp	Rm	RMS	Rz	R _{max}	R	I _t	t _p	A _r	Sm	S	Kp	K	
Россия	+				+	+									6
Австрия	+		+	Rs		Rt		Lt						+	7
Болгария	+				+	+									3
Великобритания	CLA						H ₁								2
Венгрия	+	Rt	Rf	hq	+	+			+				kp	kh	9
Дания	+	Ru	+	+	+	+	+	Bb	Kb					+	10
Испания	hm			h _{rms}			H						kv		4
Италия	+	Rc	Ri	Raq			+							kp	6
Нидерланды	+														1
Польша	+														3
Румыния	+						+								3
Сербия	+				+	+	+	In	Pn	k					6
США	AA			+											2
Финляндия	+														3
Франция	+	+		Rq			Rv	Lc	Tc	Av			+	kv	10
ФРГ	+	+			+	Rt		+	+						6
Чехия	+				+	+									3
Швеция	+	G		Rq			H								3
Швейцария	+	+				+	Rv,Rs	t	tc				+	kv	9
Япония															0
ISO	+				+	+									3

*Знак «+» означает стандартизованные, пустые графы – нестандартизованные параметры

Для оценки шероховатости поверхности с регулярным микроотражением с успехом могут быть использованы приведенные выше параметры или в ГОСТ 24773. Наряду с профильной оценкой шероховатости в научных исследованиях применяется топографическая оценка. В настоящее время предложены следующие микротопографические параметры: Ra – среднее арифметическое отклонение микроповерхности от средней плоскости; N_γ – число выступов на уровне γ; M_в – число вершин выступов; h_в – высота вершин выступов; H_{max} – высота наибольшего выступа; h_t – относительная опорная площадь; Δh – градиент поверхности; K_{ср}(γ) – средняя кривизна выступов на уровне γ.

Для субшероховатости: R_{maxc} – максимальная высота неровностей субшероховатости, мкм; S_{mi} – средний шаг неровностей субшероховатости.

Для оценки наклепа материала используются:

$H_{\mu 0}$ – поверхностная микротвердость;
 ε – степень деформирования, %;
 h_n – глубина наклепа, мкм;
 U_u – степень наклепа, %

$$U_H = [(H_{\mu 0} - H_{\mu_{исх}}) / H_{\mu_{исх}}] 100,$$

где $H_{\mu_{исх}}$ – исходная микротвердость материала.

Для оценки *поверхностных остаточных напряжений* рекомендуются следующие параметры:

$\sigma'_{ост}$ – макронапряжения (напряжения 1-го рода), МПа;
 $\sigma''_{ост}$ – макронапряжения (напряжения 2-го рода), МПа; $\sigma'''_{ост}$ – статические искажения решетки (напряжения 3-го рода), МПа.

Для оценки *структуры* материала применяют:

l_z – размер зерен, мм;
 ρD – плотность дислокаций, см⁻²;
 c_v – концентрацию вакансий;
 l_b – размер блоков, нм;
 α_b – угол разориентации блоков;
 $\langle D \rangle$ – размер областей когерентного рассеяния, нм;
 $\langle u^2 \rangle$ – среднеквадратичное смещение атомов, вызванное статическими искажениями решетки, нм²;
 $\langle u_t^2 \rangle$ – среднеквадратичное смещение атомов, вызванное их тепловыми колебаниями, нм².

Для оценки *фазового состава* материала используются:

M_s – тип кристаллической структуры;
 a, b, c (мм) и α, β, γ (°) – параметры решетки фаз.

Для оценки *химического состава* применяются:

$c(x)$ – профиль концентрации элементов в поверхностном слое, %;
 c_{ϕ} – концентрация элементов в фазах, %.

Для оценки *экзоэлектронной эмиссии* поверхности используют:

I – интенсивность эмиссии, импульс;
 ϕ – работу выхода электронов, ЭВ;
 λ – глубину выхода электронов, нм.

В научных исследованиях для оценки состояния поверхностного слоя деталей все шире применяются комплексные параметры.

Комплексная оценка качества поверхностного слоя. Для комплексной оценки качества поверхностного слоя могут быть использованы сразу несколько параметров.

Так, для оценки несущей способности контактирующей поверхности могут быть использованы параметры: шероховатости – Ra и t_p или R_p ;

волнистости – W_p , макроотклонения – H_p . Непараметрический подход также позволяет комплексно оценить несущую способность шероховатости или волнистости поверхности.

В последние годы все активнее начинают применяться так называемые комплексные параметры, математически или физически объединяющие сразу несколько отдельных параметров.

1.5 Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите известные Вам эксплуатационные свойства деталей и их соединений.
2. Как определяется коэффициент концентрации напряжений?
3. Как определяется поверхностная контактная статическая и динамическая прочность?
4. Как определяется контактная жесткость?
5. Как определяется размерное изнашивание поверхностей?
6. Как определяется прочность посадок с натягом?
7. Перечислите свойства материалов.
8. Какие испытания проводят при определении механических свойств материалов?
9. Перечислите механические свойства материалов.
10. Перечислите эксплуатационные свойства материалов.
11. Приведите примеры эксплуатационных свойств материалов.
12. Перечислите технологические свойства материалов.
23. На какие группы подразделяются размеры деталей?
14. Дайте определение понятию «допуск размера».
15. Перечислите методы назначения допусков размеров.
16. Как на качество деталей влияют допуски формы и взаимного расположения поверхностей?
17. Назовите геометрические характеристики параметров качества поверхностного слоя деталей.
18. Из каких зон состоит поверхностный слой детали?
19. Что характеризует физико-механические свойства поверхностного слоя детали?
20. В чем суть непараметрической и параметрической оценок поверхностного слоя детали?
21. Дайте определение понятию «волнистость поверхности».
22. Перечислите параметры шероховатости поверхности.
23. Назовите известные Вам стандартизованные параметры шероховатости в различных странах.
24. Перечислите параметры оценки наклепа поверхностного слоя.

25. Какие параметры используются для оценки поверхностных остаточных напряжений поверхностного слоя?

26. Какие параметры используются для оценки структуры?

27. Какие параметры используются для оценки фазового состава поверхностного слоя?

28. Какие параметры используются для оценки химического состава поверхностного слоя?

29. Какие параметры используются для оценки экзоэлектронной эмиссии поверхностного слоя?

30. Как осуществляется комплексная оценка качества поверхностного слоя?

2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

2.1 Современное понятие о точности в машиностроении

Под точностью в машиностроении понимают степень соответствия изготавливаемых изделий (деталей, узлов, машин, приборов) заранее установленным параметрам, задаваемым чертежом, техническими условиями, стандартами [1–50].

Поскольку характеристик каждого изготовленного изделия, как правило, много, то из большого их количества отбирают те показатели точности, которые играют решающую роль в оценке качества изделия. Так, точностные показатели изделий могут относиться к массе изделия, напряжениям, шероховатости поверхности, отражательной способности поверхности и др. Однако в технологии машиностроения наибольшее распространение имеют геометрические показатели точности (точность линейных размеров, взаимного расположения поверхностей (параллельность, симметричность, перпендикулярность, угол и т. д.), формы поверхности (прямолинейность, цилиндричность и т. д.), шероховатость, волнистость и др.), так как именно они играют главную роль в выполнении служебного назначения машины или узла.

При проектировании конструкции изделия и технологического процесса его изготовления устанавливают допустимые отклонения значений характеристик. Эти отклонения формируют допуск. Допуск представляет собой разность между двумя предельными допустимыми значениями характеристик.

Различают функциональные и технологические допуски. В функциональный допуск входят эксплуатационный и конструкторский допуски. Эксплуатационный допуск связан с возможными изменениями, происходящими в машине за период длительной эксплуатации. Конструкторский допуск регламентирует изменение различных параметров изделия, в том числе технических.

Назначение технологических допусков в технологии машиностроения находится на стадии формирования. Если функциональный или конструкторский допуск имеют вполне определенное единственное значение, устанавливаемое на рабочих чертежах в виде чисел (количественное представление), то технологические допуски формируются исходя из точности выполнения операции и зависят от множества факторов (точность металлорежущего станка, вспомогательного инструмента, станочного приспособления и режущего инструмента, внешних воздействий и др.). Поскольку после каждого технологического перехода или операции возникают свои геометрические (и иные) параметры, они должны иметь свои технологические размеры и допуски. Промежу-

точные размеры необходимы для конструирования технологической оснастки, применяемой в ходе изготовления детали. В машиностроении находит применение практика назначения допусков на технологические размеры исходя из экономической точности переходов, которые можно найти в ряде технологических справочников [19–27].

Важнейшее значение в обеспечении допусков линейных размеров и допусков взаимного расположения играет базирование. Базирование – это такой инструмент, который позволяет уже на стадии проектирования технологии обеспечить взаимное расположение комплекса обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей, равномерность снятия припуска с поверхностей, требуемые показатели точности чертёжных размеров, а также требуемые допуски взаимного расположения поверхностей. Однако в настоящее время у исследователей имеются разногласия в вопросах терминологии базирования, методик разработки схем базирования и др. [29–73].

На всех этапах технологического процесса изготовления деталей и сборки узлов и машин неизбежны погрешности, поэтому достижение абсолютной точности невозможно [74–83 и др.]. Оценка точности достижения чертёжных размеров при изготовлении деталей может проводиться с помощью размерного анализа технологического процесса. Размерный анализ технологического процесса – это такой инструмент в проектировании технологического процесса, который позволяет до реализации технологического процесса аналитическим путём проверить возможность достижения точности чертёжных размеров и рассчитать технологические размеры и размеры заготовки [2–5, 84–91]. Важное значение имеет анализ точности и стабильности процессов и их статистический учет [2–5, 92–94].

Ещё одна особенность технологических допусков относится к сборке. На этапе конструирования изделия и проектирования технологии необходимо определить метод достижения точности замыкающего звена сборочной размерной цепи (полная, неполная или групповая взаимозаменяемость, регулировка пригонка). Далее в зависимости от метода определяются допуски на составляющие звенья размерной цепи. Сборку нельзя себе представить без силового взаимодействия сопрягаемых деталей. Силы и моменты сил, возникающие на операциях сборки, непременно деформируют детали. Эти деформации могут быть как малыми, так и такими, которые выводят деталь за пределы допусков. Необходима оценка возникающих деформаций, т. е. погрешностей. Деформированная деталь предстаёт в совершенно новом свете, поскольку нарушаются поверхности контактов, возникают кромочные явления и целая серия отклонений от геометрических образцов, представленных на рабочих чертежах деталей. Так возникает ещё одна серия технологических допусков. Методика оценки таких допусков, их зависимость от технологических факторов и регламентирование значений факторов на

многих машиностроительных фирмах содержатся в секрете. Решение же рассмотренной проблемы в последнее время связано с компьютерной поддержкой принимаемых технологических решений. Собственно технологические решения позволяют при правильном осмыслении физической картины явлений повысить точность по многим параметрам, не прибегая к дополнительным материальным затратам. Важное значение при проектировании технологических процессов сборки играет определение условий собираемости изделий [95–97].

Причины, вызывающие отклонения различного характера в ходе изготовления деталей, практически действуют одновременно. Все эти погрешности как бы аккумулируются на детали. Годность же самой детали проверяют соответствием параметров реальных поверхностей и параметров материала, которые к моменту контроля сформировались в результате технологических взаимодействий.

Особого внимания требует метрологический аспект проблемы точности. При выборе средств измерения следует учитывать то, что измерительные приборы и устройства характеризуются ценой деления и точностью измерения, что не всегда одно и то же. Точность средства измерения должна выбираться соответственно точности измеряемого параметра. Необоснованное повышение точности средства измерения приводит к повышению себестоимости изготовления изделия [22–27].

2.2 Теория базирования

2.2.1 Подходы к теории базирования

Несмотря на многочисленные работы отечественных и зарубежных ученых, посвященные теории базирования в машиностроении, и введение ГОСТ 21495-77 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения» (далее ГОСТ), до сих пор по этому вопросу ведутся дискуссии.

Теорией базирования в машиностроении занималось много крупных исследователей. В работах исследователей К.М. Гладкова, Д.П. Маслова, Е.И. Глущенко, А.М. Каратыгина, Е.Г. Анненкова и других не наблюдался единый подход к классификации баз и формированию основных понятий и определений теории. Выбор комплекта технологических баз рекомендовалось осуществлять на основе положений общего характера, пригодных для некоторых типов деталей (М.О. Якобсон, А.В. Эттель, Б.Л. Беспалов, Л.А. Глейзер и др.) [29–39].

К 1976 году под руководством Б.С. Балакшина была разработана иерархическая классификация основных понятий и определений теории базирования, отраженная в ГОСТе. Последователи и ученики Б.С. Балакшина (Л.Н. Воробьев, А.А. Гусев, Ю.М. Соломенцев, И.М. Колесов

и др.) в своих исследованиях часто использовали основные положения ГОСТа [40–49].

Но после издания ГОСТа появились работы, авторы которых не согласны с некоторыми его положениями. В работе [50, 51] говорится о том, что в зависимости от технологической задачи, решаемой при обработке заготовки, при ее базировании в приспособлении или на станке может быть использована одна, две или три базы, несущие на себе, в общей сложности, три, четыре, пять или шесть опорных точек. Это же утверждение поддерживается и в работе [52]. Введено понятие настроечной базы, под которой понимается поверхность заготовки, по отношению к которой ориентируются обрабатываемые поверхности, связанная с этими поверхностями непосредственными размерами и образуемая при одном установе с рассматриваемыми обрабатываемыми поверхностями заготовки (на рисунке 2.1 а – это поверхность А для поверхности А1, на рисунке 2.1 б – поверхность В для поверхностей С, Д, Е).

В работах [53, 54] утверждается, что схема базирования является одним из разделов задания для проектирования приспособления, а также, что схеме базирования может соответствовать несколько схем установки. Приводится классификация базовых поверхностей, согласно которой все базовые поверхности разделены всего на четыре вида: установочная база лишает деталь трех степеней свободы; направляющая база – двух; опорная – одной (линейного перемещения); вспомогательно-опорная – одной (вращения). Перечислено 10 видов поверхностей, которые могут выполнять функции базирования: наружные и внутренние цилиндрические, наружные и внутренние конические поверхности, плоскости линейчатые, сферические, шлицевые и зубчатые, резьбовые наружные и внутренние поверхности.

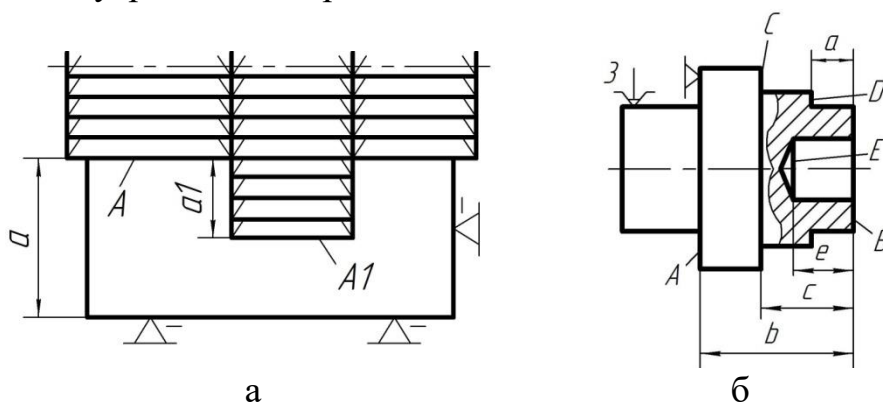


Рисунок 2.1 – Примеры настроечных баз:

а – обработка заготовки набором фрез; б – обработка тела вращения

Утверждается то, что в общем случае для полной и однозначной ориентации оснащаемого объекта в пространстве (т. е. для лишения его всех шести степеней свободы) требуется присутствие в схеме базирова-

ния одного, двух или трех «функциональных видов» базовых поверхностей: установочных, направляющих и опорных баз. Приводится формула для подсчета максимального числа теоретически возможных «схем базирования» (сумма всевозможных сочетаний из десяти элементов по 1,2,3). Под «схемой базирования» понимается сочетание поверхностей, например: два цилиндрических отверстия и плоскость, наружная цилиндрическая поверхность и плоскость и т. д. Какие-либо алгоритмы проектирования схем базирования не приводятся. Не показано ни одной «схемы» базирования или установки.

В работе [55] отмечается то, что количество опорных точек (точек соприкосновения с установочными компонентами) на схеме базирования может быть и больше, и меньше шести. Приводятся примеры «схем базирования» с тремя, семью и даже девятью опорными точками (рис. 2.2). По сути, автор этой работы понятия реального базирования (когда на количество реальных точек сопряжения влияют погрешности технологических баз и установочных элементов) смешал с проектированием схемы базирования (когда рассматривается деталь с некоторыми допускаемыми упрощениями).

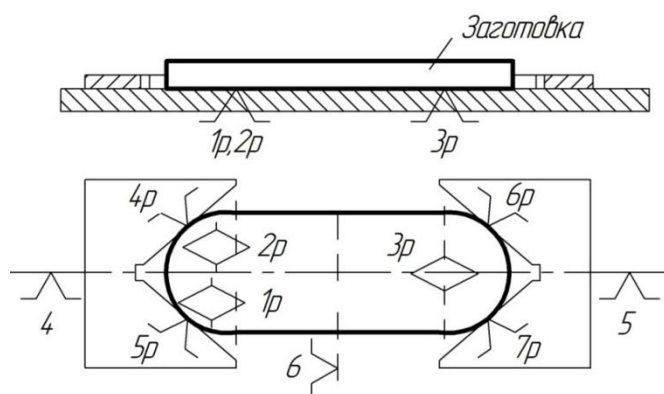


Рисунок 2.2 – Схема базирования по Б.Н. Байору

базовая система координат (причем неясно, из каких соображений она строится) и конструктивные элементы приспособления (рис. 2.3).

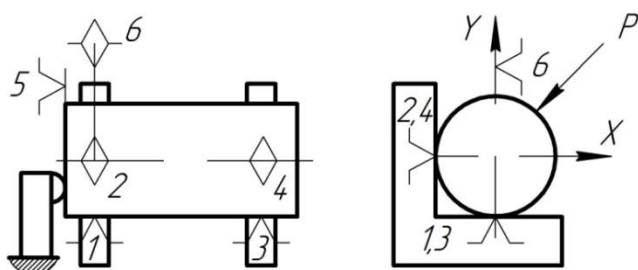


Рисунок 2.3 – Схема базирования по В.Н. Емельянову

В работе [56] поддерживается идея о разграничении понятий реального и проектного базирования, но в ней не определена цель разработки теоретической схемы базирования и отсутствует понятие теоретической схемы установки. В связи с этим у автора на одной и той же схеме при помощи значков указывается

В работах [57–59] вообще отсутствуют значки баз, а приводятся либо схемы установки некоторых классов деталей, либо конструктивное оформление приспособления, называемое «схемой базирования» [59].

В работе [60] приводится классификация схем базирования «с замыканием по силе и по моменту». Осеопорная база с замыканием по моменту имеет вид, приведенный на рисунке 2.4, однако

какого-либо обоснования такой классификации с точки зрения реального использования не приводится.

Особенно жесткой критике подвергся ГОСТ в работах [61, 62] Ф.Н. Абрамова. Но и в предлагаемых им новых терминах не учитывается, что понятие «базирование» используется в двух совершенно различных ситуациях. К первой относится *решение задач эксплуатации* специальной, специализированной и универсальной оснастки для изготовления деталей, для сборки машин и для контроля. Ко второй – *решение задач проектирования* указанной оснастки. В первой ситуации рассматривается пространственное взаимодействие *реальных объектов*, а во второй – их *моделей*.

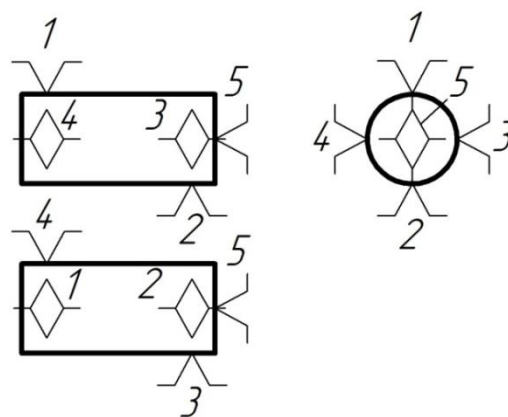


Рисунок 2.4 – Осеопорная база

Кроме того, особо следует отметить, что если на схеме базирования не указываются выдерживаемые размеры [55–62], то процесс ее разработки вовсе теряет всякий смысл.

В работе [63] высказывается идея о том, что в некоторых случаях механической обработки функцию базирующей подсистемы полностью или частично может выполнять инструмент. Идея о материализации баз на инструменте является основой для определения критерия сложности базирующей подсистемы: чем больше баз, не имеющих структурных связей с инструментом, тем базирующая подсистема сложнее [63].

В работе [64] теория базирования рассматривается с системных позиций. В виде тезисов утверждается то, что использование теории базирования затруднено из-за отсутствия разграничения реального процесса установки и его проектной модели. В работе [64] рассматривается проектное базирование для механической обработки деталей любых классов, которое сводится к «размещению шести «реперных» точек базовой системы координат на номинальных поверхностях геометрической модели заготовки». Под номинальными понимаются идеализированные поверхности, от которых принято откладывать размеры и допустимые отклонения. Однако до каких элементов их принято откладывать – не говорится, как следствие – неясно, как определить эти номинальные поверхности, каков их состав, что такое геометрическая модель заготовки. Отсутствует классификация баз (по видам, числу налагаемых связей и др.). Расположение «реперных» точек в базовой системе координат сводится всего к двум вариантам. Уточнения понятий схемы базирования и схемы установки крайне неудачны. Так, под схемой базирования понимается «результат выполнения проектного базирования и выявление номинальных поверхностей, получаемых на текущей опера-

ции, с указанием всех необходимых показателей геометрической модели заготовки». Очевидно, «схема» не может быть процессом «выявления». Неясно, что подразумевается под необходимыми показателями геометрической модели. Не излагаются цели и задачи базирования, не приводятся каких-либо примеров. Предлагаемые в работе понятия не позволили предложить каких-либо правил, алгоритмов проектирования схем базирования, установки, порядка смены баз, заданий на проектирование приспособлений. В конечном итоге положений, разграничивающих реальное и проектное базирование, не приводится.

В работах [65 и 66] под схемой базирования понимается распределение координат трёх точек по координатным плоскостям по схеме 3-2-1. Двойная опорная база может лишать заготовку двух поворотов или одного перемещения и одного поворота. Приводятся новые обозначения опорных точек. Утверждается, что всего возможно 6 вариантов комплектов баз. Предлагаемые изменения, по мнению автора, «позволяют снять многие вопросы, возникающие при решении задач базирования». Однако какие именно вопросы и каким образом снимают – неясно. В работах также не предложено каких-либо правил, алгоритмов проектирования схем базирования, установки, порядка смены баз, заданий на проектирование приспособлений.

Одним из ключевых понятий теории является понятие погрешности базирования и погрешности установки. Под погрешностью базирования согласно ГОСТу понимается отклонение фактически достигнутого положения заготовки или изделия при базировании от заданного, а под погрешностью установки – отклонение фактически достигнутого положения заготовки или изделия при установке от требуемого. Под установкой понимается процесс базирования и закрепления заготовки. Однако в работах [67 и 68] под погрешностью установки понимается неточность положения заготовки, режущего инструмента и приспособления относительно баз станка. За базы станка принимают вспомогательные базы (как правило, направляющие), по которым перемещаются сборочные единицы, несущие исполнительные поверхности. Базы станка называются базами установки. Эта идея поддерживается в работах [69 и 70]. Здесь же приводится методика расчета погрешности базирования, под которой понимается несовпадение измерительных и технологических баз, с помощью матриц влияния. В работе [64] под погрешностью схемы базирования понимается «мера несовпадения базовой системы координат с номинальными поверхностями геометрической модели заготовки, от которых заданы размеры, получаемые на текущей операции». Погрешность схемы установки – «мера несовпадения базовой и опорной систем координат». Утверждается, что расчет погрешности схемы установки аналогичен расчету погрешности схемы базирования и производится по известным (неясно каким) правилам. Дополнительно введено понятие «погрешность установки».

Появление такого множества трактовок, концепций и подходов к проблеме базирования, очевидно, является следствием несовершенства положений указанного ГОСТа, а именно:

- в один уровень классификации, согласно которой все базы подразделяются на конструкторские (основные и вспомогательные), технологические и измерительные, выделены понятия по разным признакам, относящимся к детали и к поверхностям детали;

- понятие «базирование» относится исключительно к заготовке или изделию целиком, а не к поверхностям или элементам конструкции;

- недостаточно явно или вовсе не разграничиваются понятия проектного и реального базирования, теоретической схемы базирования и установки *для каждого из этапов «жизни» объекта производства*; так, при иллюстрации технологической базы (под которой понимается база, используемая для определения положения заготовки или изделия в процессе изготовления или ремонта) приводятся примеры реальной установки *заготовки* в приспособлении при механической обработке;

- в определении технологической базы ничего не говорится о *цели проектирования схемы базирования и комплекта баз* при механической обработке, сборке и контроле; при проектировании схемы базирования механической обработки относительно комплекта технологических баз (под которыми понимается совокупность поверхностей заготовки) ориентируется *обрабатываемая поверхность* или конструктивный элемент; на этапе проектирования схемы установки – *заготовка* ориентируется относительно проектных установочных компонентов, а на этапе реальной установки заготовки на станке происходит ориентация ее относительно приспособления;

- аддитивные технологии нашли широкое применение после издания ГОСТа; при аддитивном синтезе приспособления, аналогичные механической обработке или сборке, не используются вовсе; здесь речь идет об ориентации заготовки в рабочей зоне 3D-принтера.

2.2.2 Система классификации баз

Базирование в машиностроении на самом высоком уровне классификации следует делить на реальное и проектное.

Под *реальным технологическим базированием* будем понимать процессы:

- ориентации заготовки (или элементов заготовки) и формообразующих элементов инструмента в заданной зоне станка при обработке (реальное базирование при механической обработке);

– ориентации слоев заготовки и слоеобразующих элементов (лазер, экструдер и т. д.) в заданной зоне 3D-принтера (реальное базирование при аддитивном синтезе);

– взаимной ориентации деталей, сборочных единиц или их элементов при сборке изделия (реальное базирование при сборке);

– ориентации средств измерения по отношению к измеряемому объекту в процессе измерения (реальное базирование при измерении).

При механической обработке поверхности заготовки и формообразующие поверхности инструмента следует ориентировать так, чтобы направляющая и образующая будущих поверхностей были верно сориентированы относительно подачи станка. В принципе, можно обрабатывать поверхности и на станке, даже если они не сориентированы относительно подачи. Для этого необходимы дополнительное управление и измерения, которые бы соответствующим образом связывали перемещения. При такой обработке снижаются производительность и качество (форма поверхности), а также значительно повышается себестоимость.

В технологии машиностроения используются три метода реального базирования при механической обработке: 1) выверкой по разметке; 2) выверкой по реальной технологической базе; 3) сопряжением.

При базировании заготовки, показанной на рисунке 2.5 а, на столе станка контроль положения линий разметки осуществляется штангенрейсмусом, а также с помощью чертилки 1, закрепленной в оправке 2.

При базировании выверкой по реальной технологической базе правильность положения объекта контролируется точными средствами (индикатором, микроскопом и т. д.). При механической обработке выверяется параллельность технологической базы направлению подачи, положение оси отверстия относительно оси шпинделя станка, биение заготовки.

Базирование сопряжением осуществляется при соприкосновении поверхностей заготовки с установочными (установочно-зажимными) элементами (в том числе станочного приспособления) и(или) поверхностями стола станка. Пример базирования сопряжением при механической обработке показан на рисунке 2.5 б. Данный метод обеспечивает как высокую производительность, так и достаточно высокую точность базирования.

Для сборочных приспособлений необходимо такое ориентирование *сопрягаемых поверхностей* соединяемых деталей, которое обеспечит известные условия собираемости.

Для контрольных приспособлений и комплексных калибров необходимо такое ориентирование *контролирующих компонентов* относительно компонентов проверяемой детали, служащих началом отсчета, которое обеспечит надежное обнаружение годных и негодных (брак) деталей.

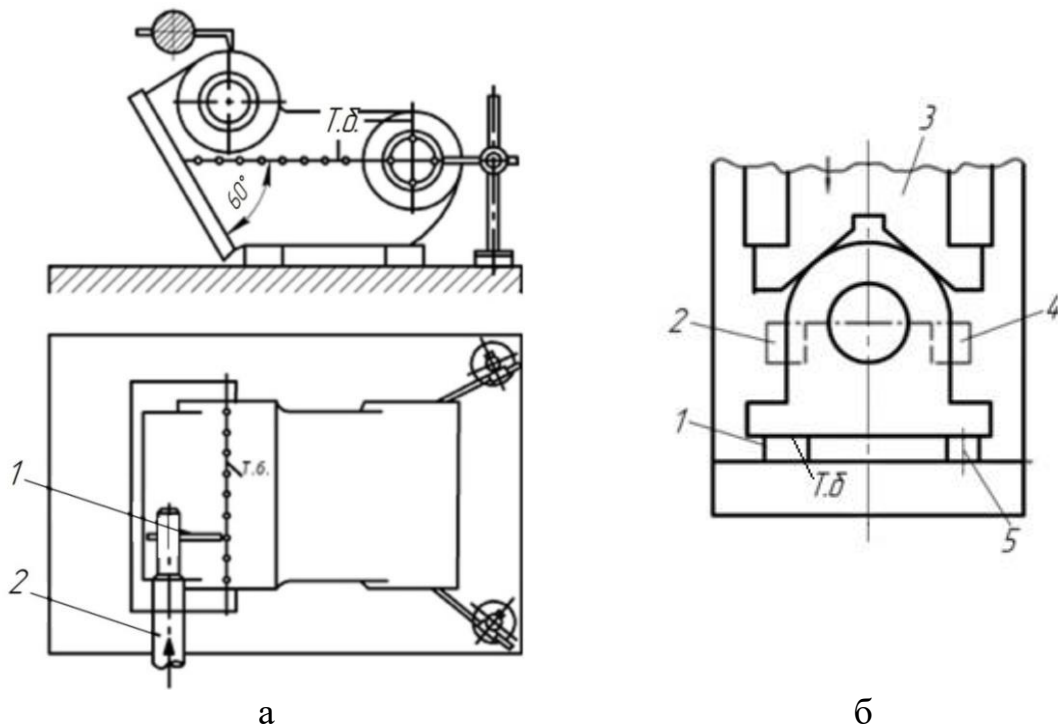


Рисунок 2.5 – Реальное базирование заготовки выверкой по разметке (а) и сопряжением (б, 1 и 5 – опорные планки; 2 и 4 – упоры; 3 – подвижная призма)

В аддитивном производстве при 3D-печати приспособления для установки заготовок аналогичные станочным и сборочным приспособлениям не используются вовсе. Точность получаемых при печати деталей обуславливается рядом факторов, таких как:

- 1) вид печати (SLA, SLS, FDM, DLP и др.);
- 2) применяемый для печати материал;
- 3) толщина слоя печати (разрешение);
- 4) конструкция поддержек;
- 5) температурные деформации материала в процессе затверде-
ния;
- 6) компоновочная схема принтера;
- 7) жесткость и точность изготовления деталей принтера;
- 8) качество сборки и калибровки принтера;
- 9) конструкция и точность механических передач и приводов
(точность перемещения слоеформирующих элементов);
- 10) конструкция и ориентация направляющих;
- 11) ориентация модели детали в рабочей зоне принтера.

Факторы 6–11 оказывают особое влияние на взаимное расположе-
ние слоев при печати и, как следствие, на обеспечение точности допус-
ков взаимного расположения поверхностей (рис. 2.6). Если допуски вза-
имного расположения не обеспечены, то деталь неизбежно перейдет в
неустраиваемый брак. Задачи обеспечения точности допусков взаимного

расположения поверхностей деталей машин в аддитивном производстве должны решаться уже на этапе базирования (ориентации) модели детали в рабочей зоне принтера с помощью программ-слайсеров за счет правильного выбора баз с учетом регламентированной (измеренной) точности принтера.

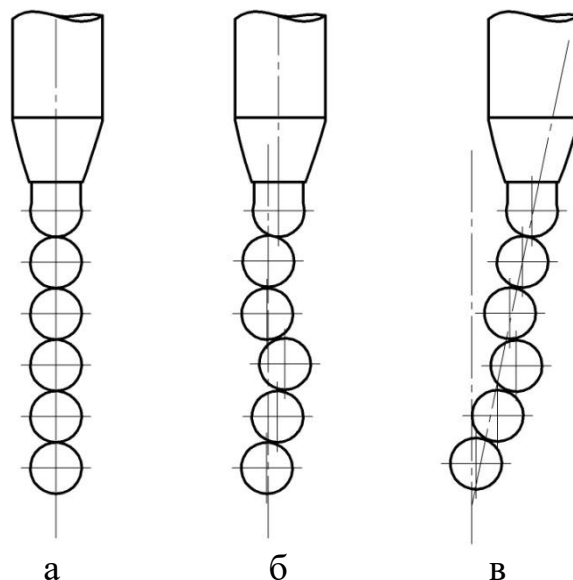


Рисунок 2.6 – Влияние положения экструдера при FDM-печати на ее качество: а – идеальное расположение слоев; б – погрешность позиционирования по длине; в – погрешность расположения направляющих

Процессу реального базирования должен *предшествовать* процесс *проектного базирования* – разработки моделей указанных выше процессов.

Проектное технологическое базирование при механической обработке должно использоваться при проектировании технологического процесса обработки заготовки детали и станочных приспособлений.

Проектное технологическое базирование при аддитивном синтезе используется при проектировании технологического процесса 3D-печати детали для определения ориентации её модели в рабочей зоне 3D-принтера.

Проектное технологическое базирование при сборке используется при проектировании технологии сборки и сборочных приспособлений.

Проектное технологическое базирование при измерении используется при проектировании технологии измерения и самих средств измерений.

На рисунке 2.7 приведена классификационная схема базирования заготовок оригинальных деталей в машиностроении.

Далее речь идет именно о процессах проектного базирования при механической обработке и аддитивном синтезе. Вопросы базирования при сборке и контроле не рассматриваются.

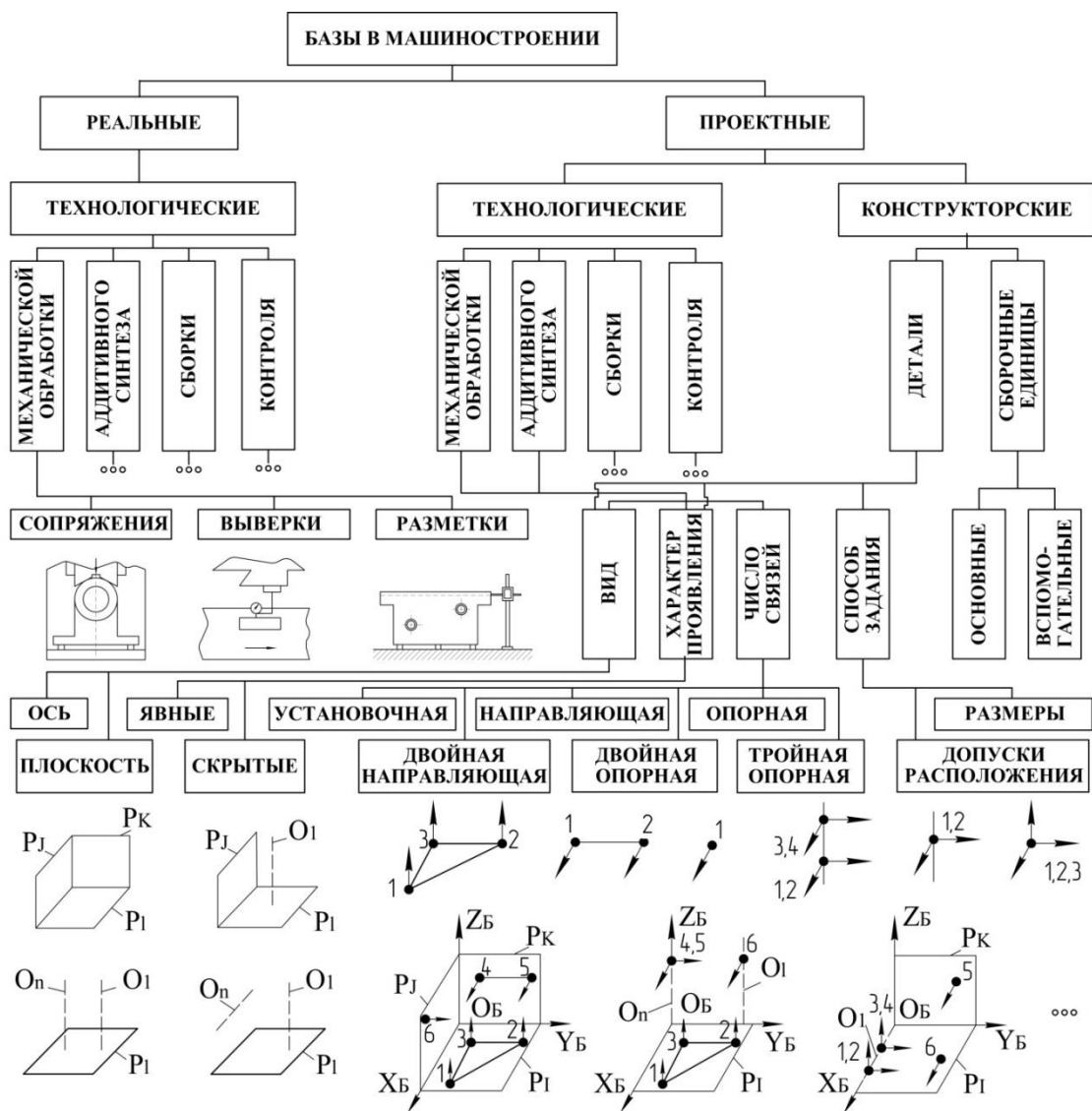


Рисунок 2.7 – Классификация баз в машиностроении

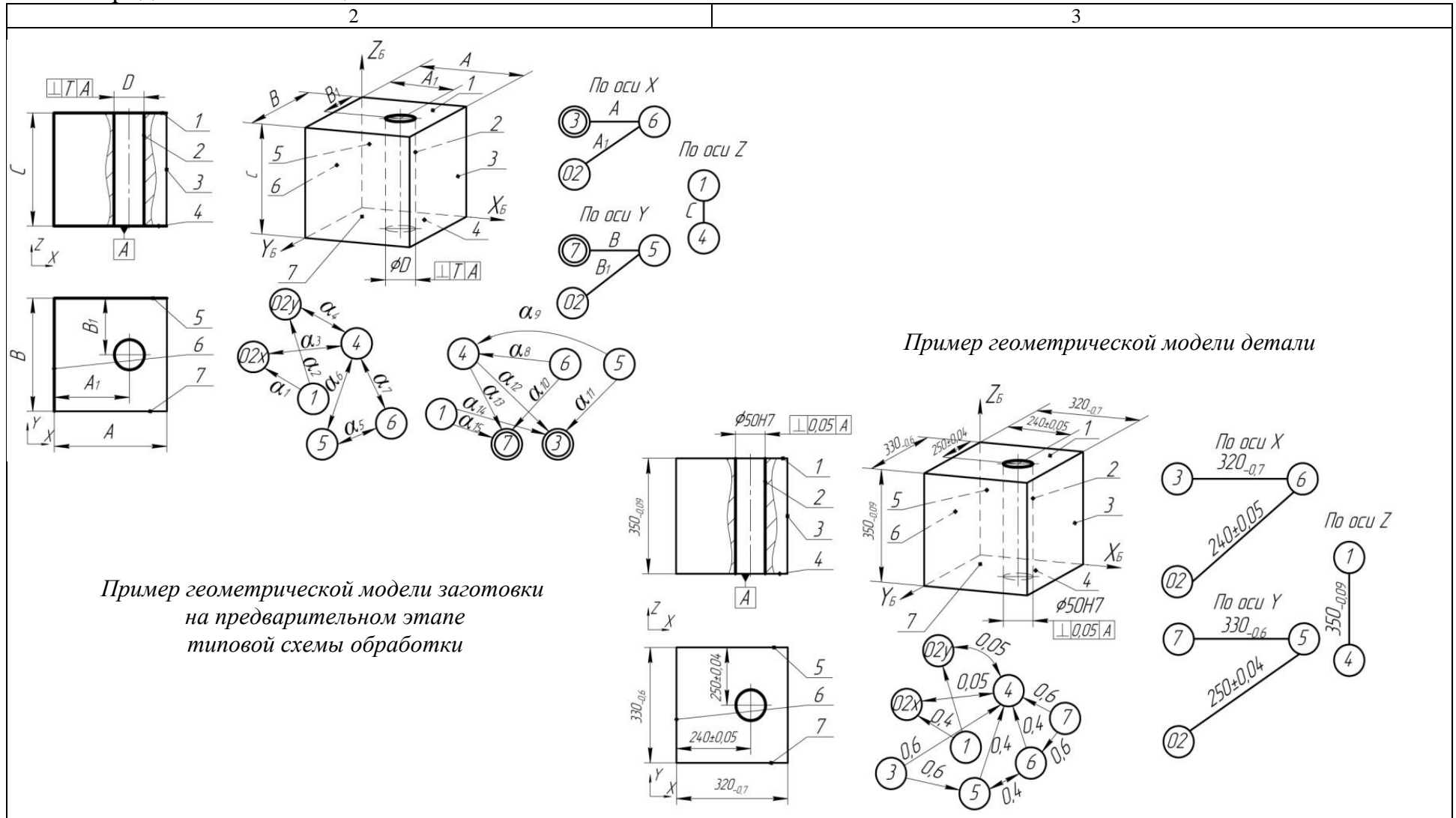
2.2.3 Термины и определения

В таблице 2.1 приведена система терминов и определений проектного базирования для традиционного и аддитивного машиностроительных производств.

Таблица 2.1 – Термины и определения проектного базирования

Термины	Определения	
	Механическая обработка	Аддитивный синтез
1	2	3
Деталь	Объект производства из однородного по наименованию и марке материала после выполнения последнего перехода технологического процесса	
Заготовка детали	Объект производства из однородного по наименованию и марке материала, из которого изменением формы, размеров, свойств поверхности и(или) материала изготавливают деталь (по ГОСТ 3.1109)	
Исходная заготовка	Заготовка перед первой технологической операцией обработки (по ГОСТ 3.1109)	
Чертеж детали	Документ, содержащий контурное изображение детали (исходной заготовки), и другие данные (размеры и их предельные отклонения, допуски формы и расположения поверхностей, требования к шероховатости поверхностей, сведения о материале, термической обработке и другие), необходимые для её изготовления, контроля, идентификации и операций с самим документом.	
Чертеж исходной заготовки	Чертежи детали и исходной заготовки – основа создания геометрических моделей деталей, исходных заготовок и заготовок (на этапах и(или) операциях)	
Геометрическая модель заготовки детали (ГМЗ). Геометрическая модель детали (ГМД). Геометрическая модель исходной заготовки (ГМИЗ)	<p>ГМЗ – модель, отражающая обрабатываемые на рассматриваемом этапе (операции) и обработанные на предыдущем этапе (операции) поверхности (в том числе плоскости, оси и точки симметрии) и их расположение с помощью обозначений размерных связей (линейных и угловых) и допусков расположения (графов обозначений линейных размерных связей и угловых расположений).</p> <p>Модель представляет собой абсолютно твердое тело, в котором все поверхности идеальны (не имеют погрешностей формы и микронеровностей)</p>	<p>ГМД (ГМИЗ) – модель, отражающая поверхности (в том числе плоскости, оси и точки симметрии) и их расположение с помощью размерных связей (линейных и угловых) и допусков расположения согласно чертежу (графов линейных размерных связей (по трем осям) и угловых расположений).</p> <p>Модель представляет собой абсолютно твердое тело, в котором все поверхности идеальны (не имеют погрешностей формы и микронеровностей)</p>
Граф обозначений линейных размерных связей. Граф линейных размерных связей	Граф обозначений линейных размерных связей – граф типа «дерево», вершинами которого являются пронумерованные поверхности (плоскости и оси поверхностей вращения) ГМЗ, а ребрами – обозначения линейных размеров	Граф линейных размерных связей – граф типа «дерево», вершинами которого являются пронумерованные поверхности (плоскости и оси поверхностей вращения) ГМД (ГМИЗ), а ребрами – связывающие их размеры с допусками

Продолжение таблицы 2.1



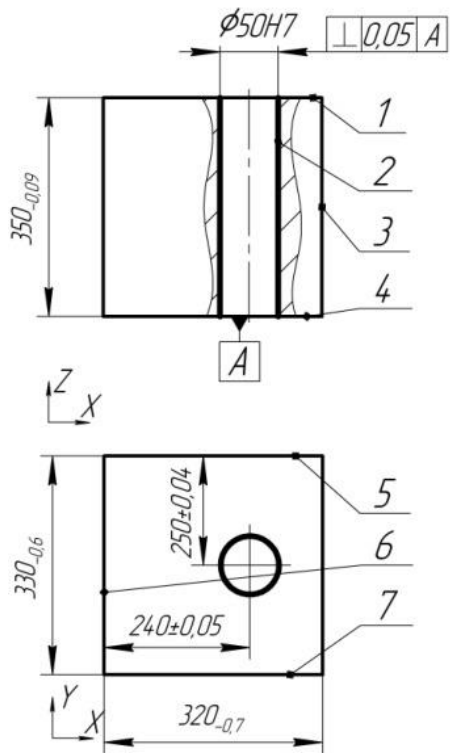
Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
<p>Граф обозначений угловых расположений.</p> <p>Граф угловых расположений</p>	<p>Граф обозначений угловых расположений – ориентированный граф, вершинами которого являются пронумерованные поверхности (плоскости и оси поверхностей вращения) ГМЗ, а ребрами – обозначения угловых размеров</p>	<p>Граф угловых расположений – ориентированный граф, вершинами которого являются пронумерованные поверхности (плоскости и оси поверхностей вращения) ГМД (ГМИЗ), а ребрами – угловые размеры, заданные в явном виде (угловые размеры и допуски перпендикулярности и угла), а также по умолчанию (согласно ГОСТ 25069)</p>
<p>Обозначение размерных связей и допусков расположения на ГМЗ</p>	<p>Буквенное наименование размерных связей и допусков расположения обрабатываемых на рассматриваемом этапе (операции) и сформированных (обработанных) на предыдущем этапе (операции) поверхностей на ГМЗ сообразно их простановке на чертеже.</p> <p>Обозначение производится для обеспечения принципа единства конструкторских и технологических баз</p>	<p>Размерные связи ГМД (ГМИЗ) – размерные связи с чертежа детали (исходной заготовки)</p>
<p>Базирование</p>	<p>Ориентация рассматриваемого объекта (поверхности, ГМЗ, ГМД, ГМИД и т. д.) относительно системы координат другого объекта</p>	
<p>База</p>	<p>Поверхность или сочетание поверхностей используемых для базирования</p>	
<p>Скрытая база</p>	<p>Условная поверхность ГМД, ГМЗ или ГМИД (например, плоскость, ось, точка симметрии)</p>	
<p>Явная база</p>	<p>База отличная от скрытой. При реальном базировании речь может идти только о явных базах, при проектном – явных и скрытых</p>	
<p>Конструкторская база</p>	<p>Поверхность (или сочетание поверхностей) на чертеже или ГМД (ГМИЗ) по отношению к которой(ым) задается ориентация <i>рассматриваемой</i> поверхности (совокупности поверхностей) и определяющая компонент (компоненты) <i>состава баз ориентации</i>. Ориентация задается с размерными связями (линейными и угловыми) и допусками расположения</p>	
<p>Состав баз ориентации</p>	<p>Совокупность поверхностей (в общем случае плоскостей и(или) осей) ГМД (ГМИЗ) или ГМЗ, по отношению к которой однозначно и корректно может быть задана ориентация рассматриваемой поверхности (совокупности поверхностей) и проведена система координат. Возможны четыре варианта (см. ниже). <i>P</i> – плоскость, <i>O</i> – ось</p>	

Продолжение таблицы 2.1

2

3

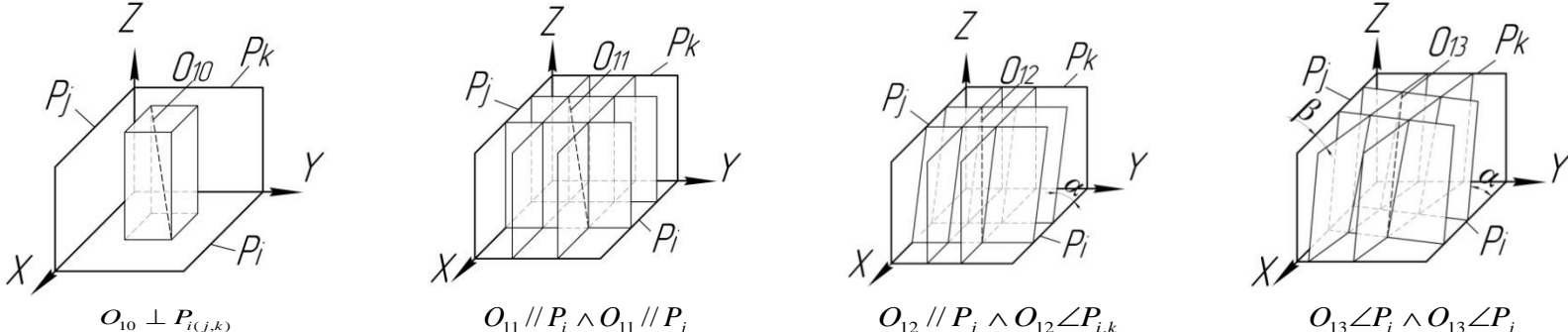
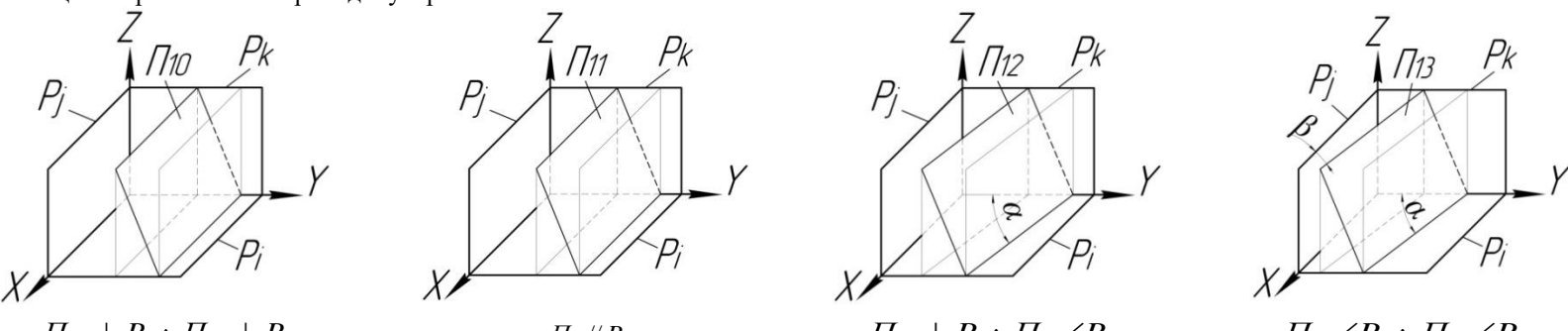


Для поверхности 6:
 по оси Z: база – поверхность 4 (согласно ГОСТ 25069);
 по оси X: база – поверхность 3 или O2 (ориентация задана размером $320_{-0,7}$ или $240_{\pm 0,05}$);
 по оси Y: база – поверхность 5 (по ГОСТ 25069).
 Составы баз ориентации или три плоскости 4, 3, 5 или две плоскости и ось 4, O2, 5.

Для поверхности 2:
 по оси Z: база – поверхность 4 (ориентация задана допуском перпендикулярности);
 по оси X: база – поверхность 6 (ориентация задана размером $240_{\pm 0,005}$);
 по оси Y: база – поверхность 5 (ориентация задана обозначением размера $250_{\pm 0,04}$).
 Состав баз ориентации – три плоскости 4, 6 и 5 и т. д.

Пример определения конструкторских баз и составов баз ориентации

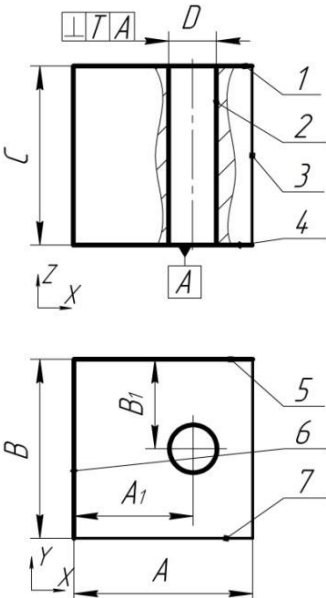
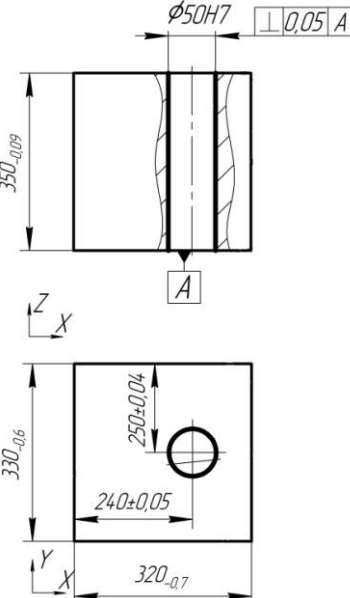
Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
<p>Однозначное и корректное задание ориентации оси</p>	<p>Задание допусков расположения <i>оси</i> осесимметричного элемента конструкции (поверхности вращения) на ГМД (ГМИЗ) или оси, рассматриваемой обрабатываемой поверхности на ГМЗ <i>необходимым и достаточным числом показателей</i>. Так, ось может быть: перпендикулярна только одной плоскости или параллельна двум пересекающимся плоскостям, или параллельна одной плоскости и составлять некоторый угол с плоскостью, которая перпендикулярна первой и т. д. (см. приложение А).</p> <p>Ниже приводятся иллюстрации расположений полей допусков и символьные модели задания ориентации оси относительно состава баз ориентации – три взаимно перпендикулярные плоскости</p>  <p style="text-align: center;"> $O_{10} \perp P_{i(j,k)}$ $O_{11} // P_i \wedge O_{11} // P_j$ $O_{12} // P_j \wedge O_{12} \angle P_{i,k}$ $O_{13} \angle P_i \wedge O_{13} \angle P_j$ </p>	
<p>Однозначное и корректное задание ориентации плоскости</p>	<p>Задание допусков расположения плоского конструктивного элемента (плоскости) на ГМД (ГМИЗ) или рассматриваемой обрабатываемой плоскости на ГМЗ <i>необходимым и достаточным числом показателей</i>. Так плоскость может быть: перпендикулярна к двум пересекающимся плоскостям или к оси или перпендикулярна к одной плоскости и составлять некоторый угол с другой, которая перпендикулярна к первой и т. д. (см. приложение А).</p> <p>Ниже приводятся иллюстрации расположений полей допусков и символьные модели задания ориентации плоскости относительно состава баз ориентации – три взаимно перпендикулярные плоскости</p>  <p style="text-align: center;"> $\Pi_{10} \perp P_i \wedge \Pi_{10} \perp P_j$ $\Pi_{11} // P_i$ $\Pi_{12} \perp P_i \wedge \Pi_{12} \angle P_{k,j}$ $\Pi_{13} \angle P_i \wedge \Pi_{13} \angle P_{k,j}$ </p>	

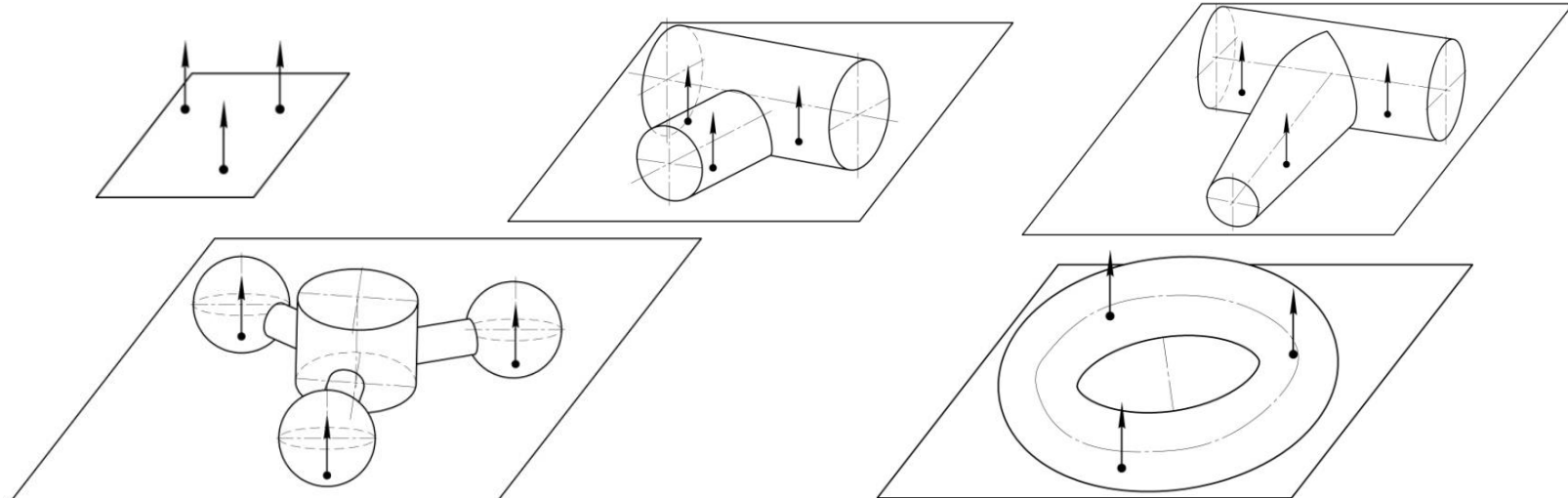
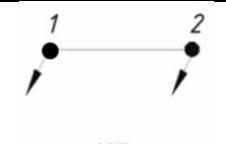
Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
<p>Корректное и некорректное указание допуска расположения</p>	<p>Корректным будем считать указание допуска согласно моделям однозначного и корректного задания ориентации оси или плоскости. Иначе – некорректным.</p> <p>На рисунке допуски расположения оси указаны некорректно (см. модель O_{10}). Допуск параллельности оси к базе Б, указанный на чертеже детали, избыточен, так как допуск перпендикулярности относительно базы А однозначно задает относительное положение оси.</p> <p>Допуск плоскости задан корректно (см. модель Π_{10})</p>	
<p>Технологическое базирование</p>	<p>Определение ориентации обрабатываемой поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском расположения относительно базовой (собственной) системы координат ГМЗ, построенной на поверхностях составов баз ориентации путем наложения на них <i>шести геометрических связей</i></p>	<p>Определение ориентации поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском расположения относительно базовой (собственной) системы координат ГМД (ГМИЗ), построенной на поверхностях составов баз ориентации путем наложения на них <i>шести геометрических связей</i></p>
	<p>Цель технологического базирования – обеспечение (уже на стадии проектирования) требуемых показателей допусков расположения поверхностей</p>	
<p>Приоритетный допуск расположения</p>	<p>Минимальный допуск расположения, определенный ранжированием численных значений допусков по поверхностям составов баз и их приведением к одной базовой длине</p>	
<p>Базовая система координат</p>	<p>Система координат (как правило, декартова), построенная на поверхностях ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) путем наложения на поверхности баз ориентации <i>шести геометрических связей</i></p>	

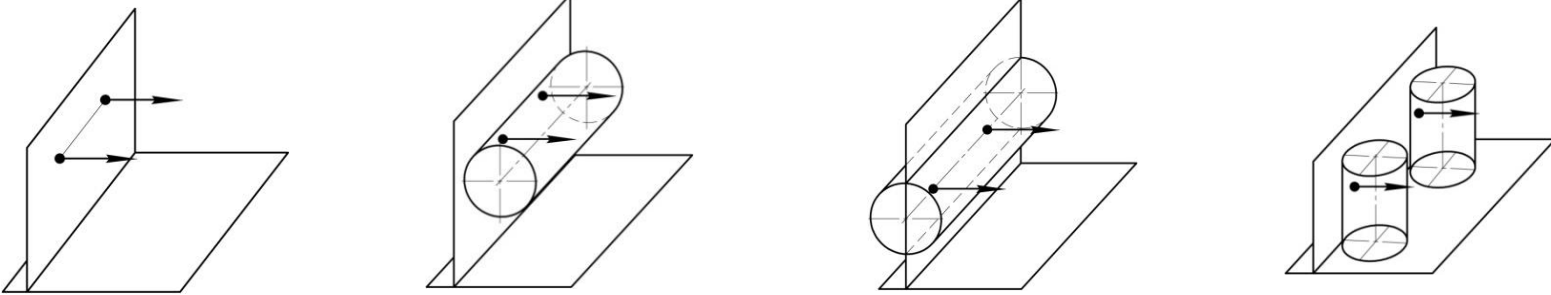

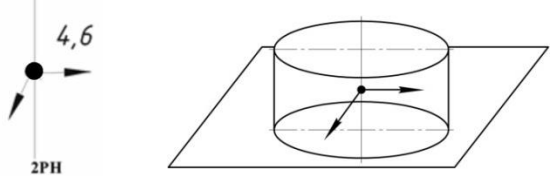
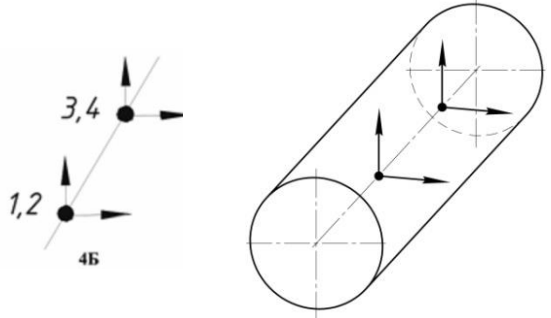
Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
<p>Технологическая база</p>	<p>Поверхность (или сочетание поверхностей) ГМЗ по отношению к которой(ому) задается ориентация <i>рассматриваемой обрабатываемой поверхности (совокупности поверхностей)</i>, накладывающая на ГМЗ определенные геометрические связи и идентифицирующая(ее) одну из плоскостей или(и) осей базовой (собственной) системы координат. Ориентация задается с помощью обозначений размерных связей и допусков расположения</p>  <p>Для поверхности 6: по оси Z: база – поверхность 4 (согласно ГОСТ 25069); по оси X: база – поверхность 3 или O2 (ориентация задана обозначением размера A или A1); по оси Y: база – поверхность 5 (по ГОСТу).</p> <p>Состав технологических баз ориентации или три плоскости 4, 3, 5, или две плоскости и ось 4, 5, O2.</p> <p>Для поверхности 2: по оси Z: база – поверхность 4 (ориентация задана допуском перпендикулярности); по оси X: база – поверхность 6 (ориентация задана обозначением размера A1); по оси Y: база – поверхность 5 (ориентация задана обозначением размера B1).</p> <p>Состав технологических баз ориентации – три плоскости 4, 6 и 5 и т. д.</p>	<p>Поверхность (или сочетание поверхностей) ГМД (ГМИЗ) по отношению к которой(ому) задается ориентация <i>поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском расположения</i>, накладывающая на ГМД (ГМИЗ) определенные геометрические связи и идентифицирующая(ее) одну из плоскостей или(и) осей базовой (собственной) системы координат. Ориентация задается с помощью размерных связей и допусков расположения</p>  <p>Для оси с приоритетным допуском расположения:</p> <p>по оси Z: база – поверхность 4 (ориентация задана указанным допуском перпендикулярности);</p> <p>по оси X: база – поверхность 6 (ориентация задана размером $240 \pm 0,005$);</p> <p>по оси Y: база – поверхность 5 (ориентация задана размером $250 \pm 0,04$).</p> <p>Состав технологических баз ориентации – три плоскости 4, 6 и 5</p>
<p>Технологическая настроечная база</p>	<p>Поверхность из совокупности обрабатываемых за один установ поверхностей, не имеющая непосредственной размерной связи с базовой (собственной) системой координат</p>	<p>–</p>
<p>Геометрическая связь</p>	<p>Связь, отражающая отсутствие неопределенности линейного (3 связи) и углового (3 связи) положения рассматриваемой поверхности (совокупности поверхностей) относительно осей базовой системы координат и определяющая положение точки сопряжения (соприкосновения) поверхностей ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ) с базовой системой координат</p>	
<p>Точка сопряжения</p>	<p>Условная точка, отражающая наличие геометрической связи, расположенная одновременно на поверхности ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ) и плоскости базовой системы координат</p>	

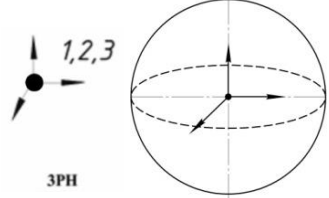
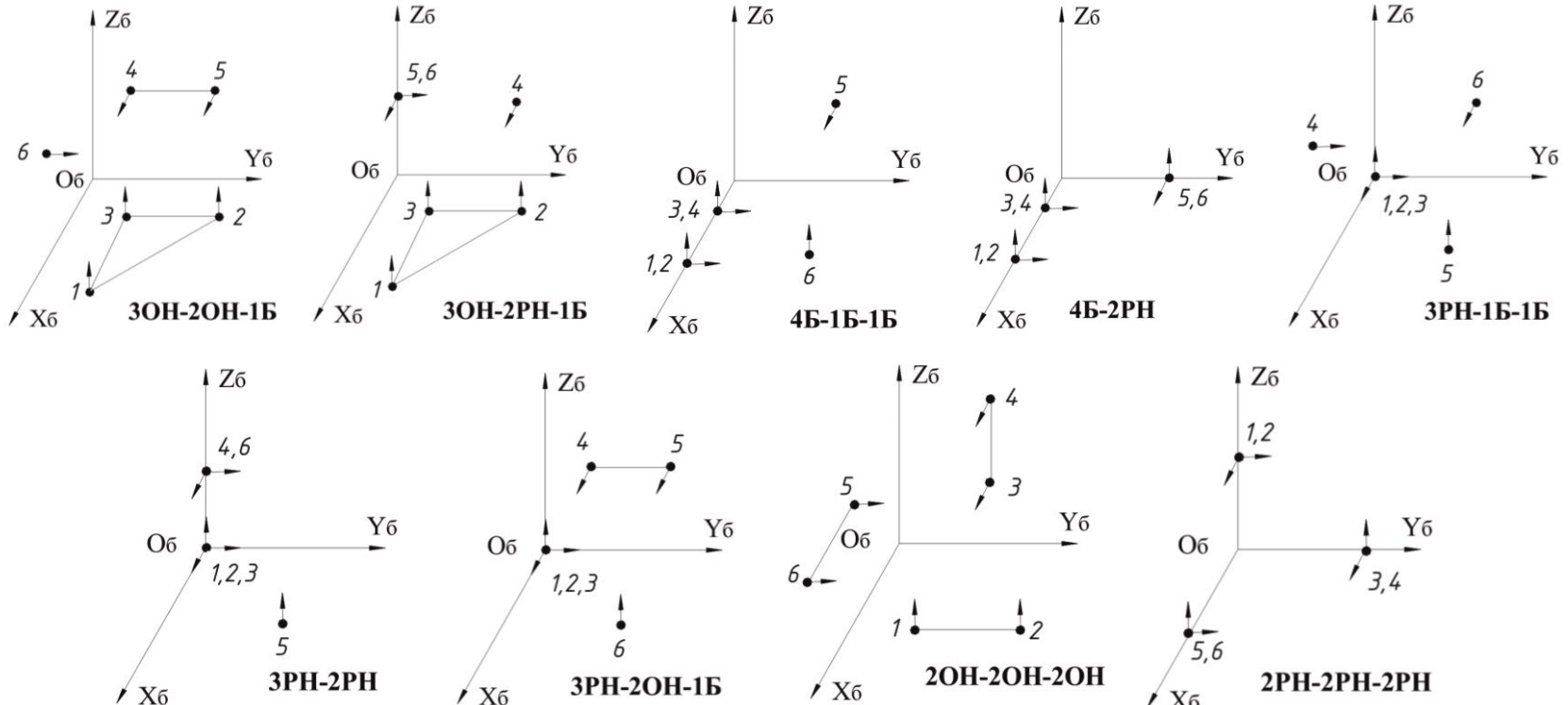
Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
<p>Направляющий вектор</p>	<p>Единичный вектор с началом в точке сопряжения перпендикулярный, соответствующей плоскости базовой системы координат и имеющий одинаковое направление с осью базовой системы координат. Направляющий вектор определяет ориентацию оси базовой системы координат. Поэтому формирование базовой системы координат осуществляется одновременно с заданием направляющих векторов</p>	
<p>Тройная однонаправленная (установочная) база</p>	<p>База, накладывающая на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) три связи (одну линейную и две угловые), условно представляющая собой три точки сопряжения, не лежащие на одной прямой, имеющие одинаковое направление направляющих векторов и идентифицирующая плоскость в составе баз ориентации</p> <p>На ГМЗ (или ГМД (ГМЗ)) может быть реализована: плоской поверхностью; двумя образующими, которые принадлежат пересекающимся или параллельным цилиндрам и лежат в одной плоскости; образующими цилиндр и конус; направляющей окружностью тора; наружными точками трех сфер, лежащих в одной соприкасающейся с ними плоскости; двумя пересекающимися (или параллельными) осями цилиндров и т. д.</p> 	
<p>Двойная однонаправленная (направляющая) база</p>	<p>База, накладывающая на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) две связи (одну линейную и одну угловую), условно представляющая собой две точки сопряжения, лежащие на одной прямой, имеющие одинаковое перпендикулярное этой прямой направление направляющих векторов и идентифицирующая плоскость в составе баз ориентации</p> 	

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
	<p>На ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) может быть реализована: плоской поверхностью; осью цилиндра; образующей цилиндра; точками, которые лежат на общей касательной к двум наружным цилиндрам; линией пересечения двух плоскостей и т. д.</p> 	
<p>Одиночная (опорная) база</p>	<p>База, накладывающая на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) одну линейную связь, условно представляющая собой одну точку сопряжения и идентифицирующая плоскость или(и) ось в составе баз ориентации.</p> <p>На ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) может быть реализована: плоской поверхностью; осью цилиндра; образующей цилиндра; линией пересечения двух плоскостей и т. д.</p>	
<p>Двойная разнонаправленная (двойная опорная) база</p>	<p>База, накладывающая на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) две линейные связи, условно представляющая собой две слившиеся точки сопряжения, имеющие взаимно перпендикулярные направления направляющих векторов и идентифицирующая ось (ось и плоскость) в составе баз ориентации.</p> <p>На ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) может быть реализована осью «короткого» цилиндра или конуса</p>	
<p>Четверная (двойная направляющая) база</p>	<p>База, накладывающая на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) четыре связи (две линейные и две угловые), условно представляющая собой четыре лежащие на одной прямой попарно слившиеся точки сопряжения, а направляющие векторы, выходящие из каждой пары слившихся точек сопряжения, взаимно перпендикулярны и идентифицирующая ось в составе баз ориентации.</p> <p>На ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) может быть реализована осью «длинного» цилиндра</p>	

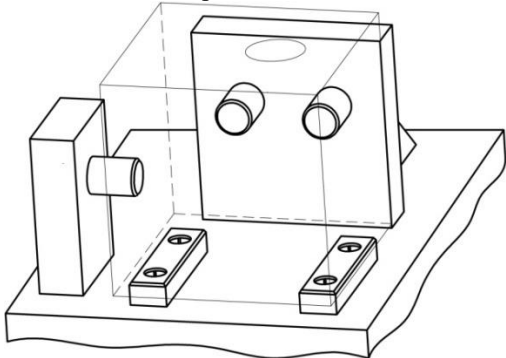
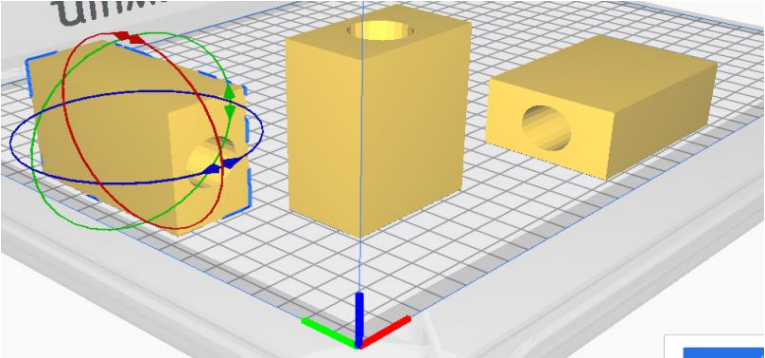
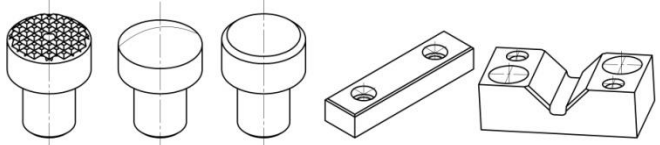

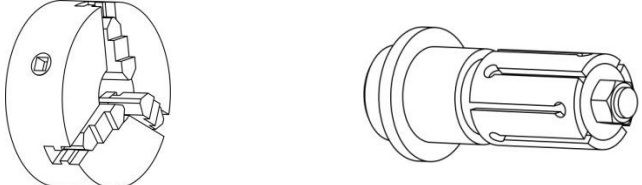
Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
<p>Тройная разнонаправленная (тройная опорная) база</p>	<p>База, накладывающая на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) три линейных связи, условно представляющая собой три слившиеся точки сопряжения, имеющие взаимно перпендикулярные направления направляющих векторов и идентифицирующая плоскость или(и) ось в составе баз ориентации. На ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) может быть реализована центром сферы</p>	 <p style="text-align: center;">ЗРН</p>
<p>Комплект технологических баз</p>	<p>Совокупность технологических баз полностью идентифицирующих состав баз ориентации и накладывающих на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) 6 геометрических связей относительно осей базовой (собственной) системы координат. Технологические базы могут <i>сочетаться</i> между собой в комплект девятью различными способами</p>	








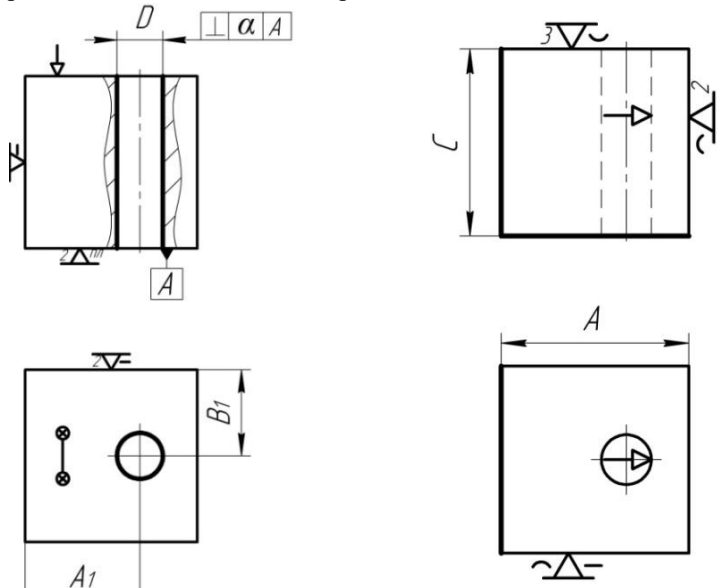
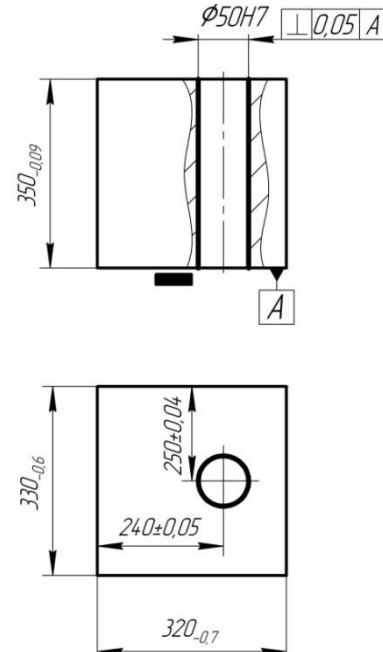
Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
<p>Обозначение технологических баз</p>	<p>Нанесение на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) условных значков, интерпретирующих точки сопряжения и направляющие векторы. При этом ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) считается прозрачной</p>	
<p>53</p> <p>Схема базирования</p>	<p>Графическое изображение ГМЗ в состоянии после обработки поверхности (совокупности поверхностей) за один установ на рассматриваемой операции, на котором: 1) выделены обработанные поверхности; 2) проставлены условные обозначения выдерживаемых размерных связей и допусков расположения; 3) обозначен комплект технологических баз; 4) проведена базовая (собственная) система координат</p>  <p>Схема базирования для обработки отверстия 2</p> <p>Схема базирования для обработки плоскостей 5 и 6</p>	<p>Графическое изображение ГМД (ГМИЗ) на которой: 1) выделены поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском расположения; 2) проставлены размерные связи и допуски расположения; 3) обозначен комплект технологических баз; 4) проведена базовая (собственная) система координат</p>  <p>Схема базирования</p>  <p>Модель расположения направляющих векторов</p>

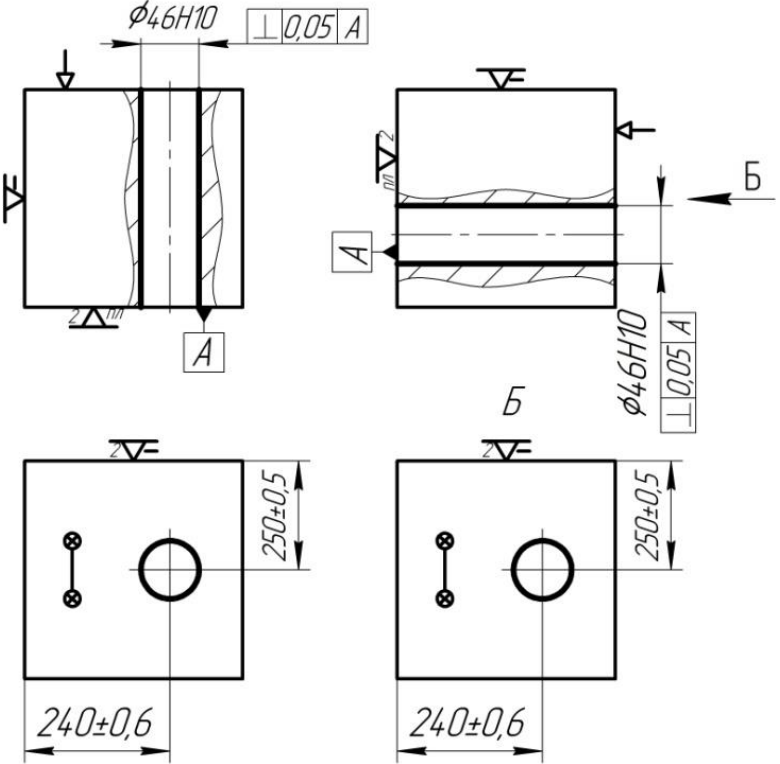
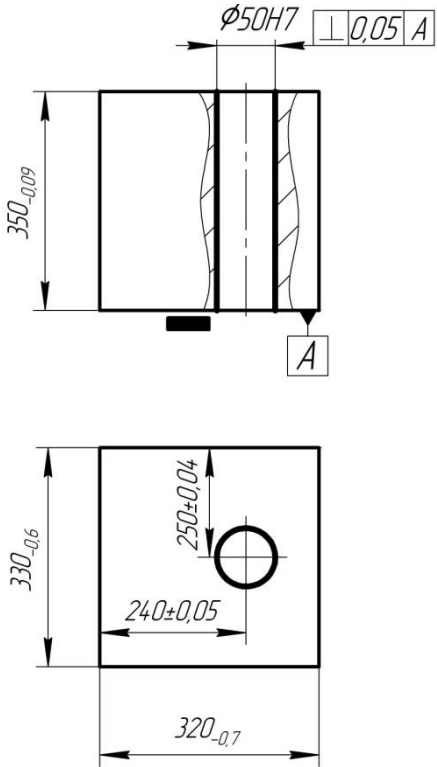
Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
<p>Установка</p>	<p>Взаимная ориентация поверхностей технологических баз ГМЗ и установочных и(или) установочно-зажимных элементов (в том числе станочного приспособления) и(или) стола станка. При этом формируется установочная система координат</p> 	<p>Взаимная ориентация поверхностей технологических баз ГМД (ГМИЗ) и установочных элементов 3D-принтера в программеслайсере</p> 
<p>Установочный элемент</p>	<p>Детали, обеспечивающие ориентацию обрабатываемых заготовок (синтезируемых деталей) в рабочей зоне станка: опоры точечные (с рифленой, сферической, плоской поверхностями), пластины опорные, опоры призматические, пальцы цилиндрические и т. д.</p> 	<p>Детали для ориентации синтезируемых деталей (исходных заготовок) в рабочей зоне 3D-принтера (чаще всего поверхность стола)</p> 
<p>Установочно-зажимный элемент</p>	<p>Детали и механизмы, обеспечивающие ориентацию и закрепление обрабатываемых заготовок в рабочей зоне (трехкулачковый патрон, цанговая оправка и т. д.)</p> 	<p>—</p>

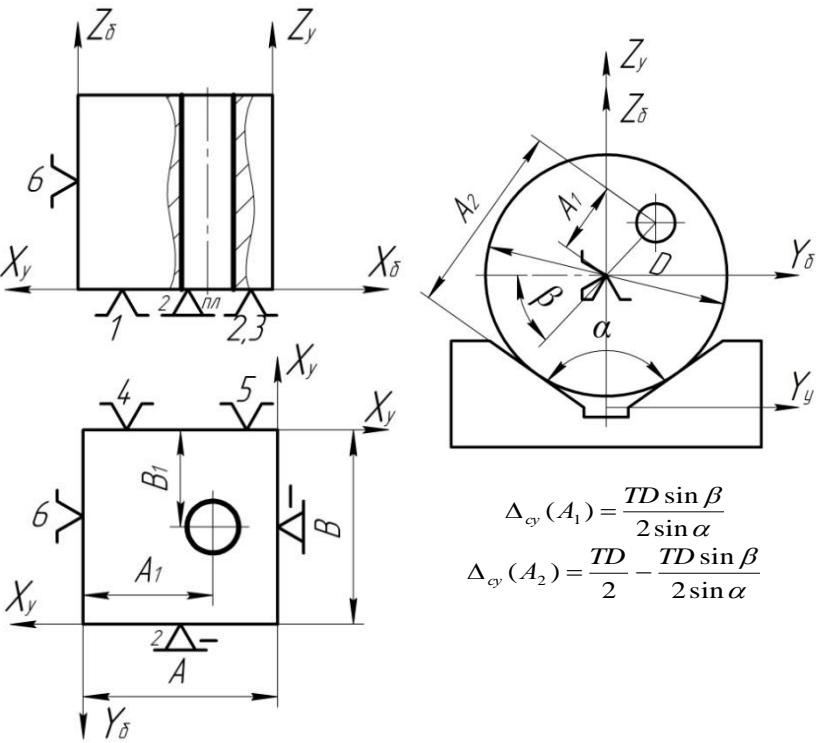
Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
<p>Условные обозначения установочных и установочно-зажимных элементов</p>	<p>Обозначение установочных, установочно-зажимных элементов согласно ГОСТ 3.1107-81 «Опоры, зажимы, и установочные устройства. Графические обозначения» (приложение В).  – опора точечная с плоской поверхностью;  – опора точечная со сферической поверхностью;  – пластина опорная;  – опора призматическая;  – трехкулачковый патрон;  – оправка цанговая;  – плоская поверхность корпуса и т. д.</p>	
<p>55</p> <p>Схема установки</p>	<p>Графическое изображение ГМЗ в состоянии после обработки поверхности (совокупности поверхностей) за один установ, на котором: 1) выделены обработанные поверхности; 2) проставлены условные обозначения выдерживаемых размерных связей и допусков расположения; 3) нанесены условные обозначения установочных и(или) установочно-зажимных элементов, а также точки приложения и направления силы закрепления (при необходимости).</p> <p>Схема установки – основа задания на выбор существующего или проектирование нового станочного приспособления</p> 	<p>Графическое изображение ГМД (ГМИЗ) на котором: 1) выделены поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском расположения; 2) проставлены размерные связи и допуски расположения; 3) нанесены условные обозначения установочных элементов.</p> <p>Схема установки – задание пользователю программы слайсера для ориентации ГМД (ГМИЗ) в рабочей зоне 3D-принтера</p> 

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
<p>Операционный эскиз</p>	<p>Схема установки с изображением фронтальной проекции ГМЗ, если смотреть на нее со стороны рабочего места у станка, на которой указаны численные значения выдерживаемых размеров и допусков расположения</p>  <p>Сверлильная Расточная</p>	<p>Схема установки с изображением фронтальной проекции ГМД (ГМИЗ), если смотреть на нее со стороны рабочего места у 3D-принтера</p> 
<p>Установочная система координат</p>	<p>Система координат, сформированная за счет контакта технологических баз с моделями установочными и установочно-зажимных элементов</p>	<p>—</p>

Окончание таблицы 2.1

1	2	3
<p>Погрешность схемы установки</p>	<p>Мера несовпадения базовой (собственной) и установочной систем координат. Причиной возникновения погрешности схемы установки являются погрешности размеров объекта производства, которые получены на этапах обработки, предшествующих рассматриваемому</p>  $\Delta_{cy}(A_1) = TA$ $\Delta_{cy}(B_1) = TB$ $\Delta_{cy}(A_1) = \frac{TD \sin \beta}{2 \sin \alpha}$ $\Delta_{cy}(A_2) = \frac{TD}{2} - \frac{TD \sin \beta}{2 \sin \alpha}$	<p>—</p>

2.3 Размерная настройка

Под размерной настройкой будем понимать ориентацию формообразующих элементов режущей кромки инструмента относительно технологических баз обрабатываемой заготовки и ограничение длины рабочего хода. Если базирование заготовки осуществляется методом сопряжения, то режуще-формообразующая кромка ориентируется относительно установочных элементов приспособления (рис. 2.8).

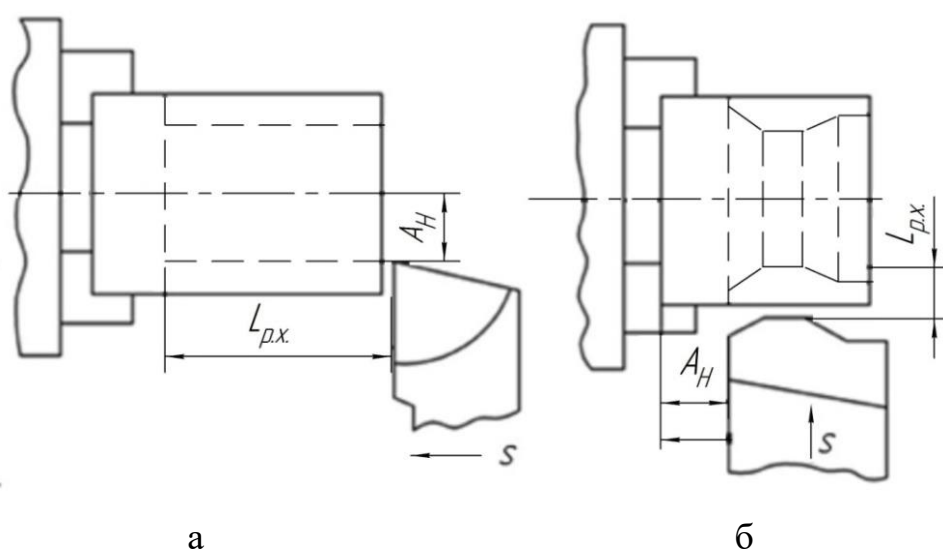


Рисунок 2.8 – Схема размерной настройки при токарной обработке:
а – с продольной подачей, б – с поперечной подачей,
 $L_{р.х.}$ – длина рабочего хода, A_H – размер настройки

Наиболее простым методом размерной настройки является настройка по эталону (рис. 2.9). Чтобы повысить точность настройки и не повредить режущую кромку инструмента 3 при его подводе к эталону 2, применяют промежуточный элемент щуп 4 заданной толщины. Тогда размер эталона (расстояние от установочного элемента) определяется из выражения

$$A_{эт} = A_H - b,$$

где $A_{эт}$ – размер (высота) эталона, A_H – размер настройки, b – толщина щупа.

В некоторых случаях в качестве начала отсчета при размерной настройке используется технологическая база. Пример такой настройки показан на рисунке 2.10. Заготовка 1 предварительно базируется и закрепляется на столе 2. При помощи щупа 3 калиброванная оправка 4, установленная в шпиндель станка, фиксируется в начальной позиции. Затем при помощи механизмов ручной подачи стола и бабки шпинделя осуществляется перемещение на расстояния x и y для совмещения осей шпинделя (O) с осью будущего (расточиваемого) отверстия (O_1), где

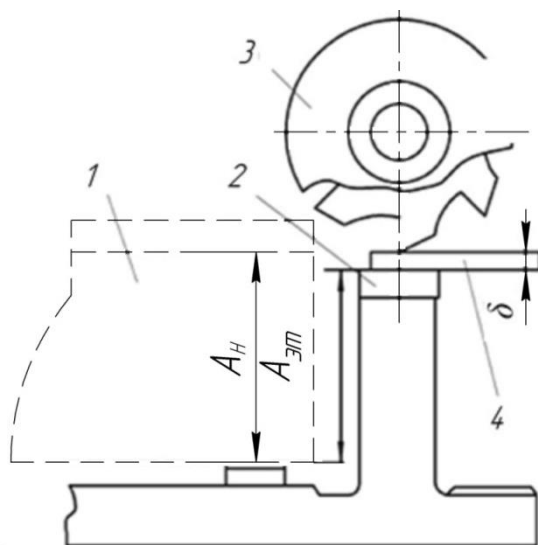


Рисунок 2.9 – Схема размерной настройки по эталону

$$x = A + b + d/2;$$

$$y = B - b - d/2.$$

Отсчет перемещений осуществляется при помощи лимба или набора концевых мер с индикатором.

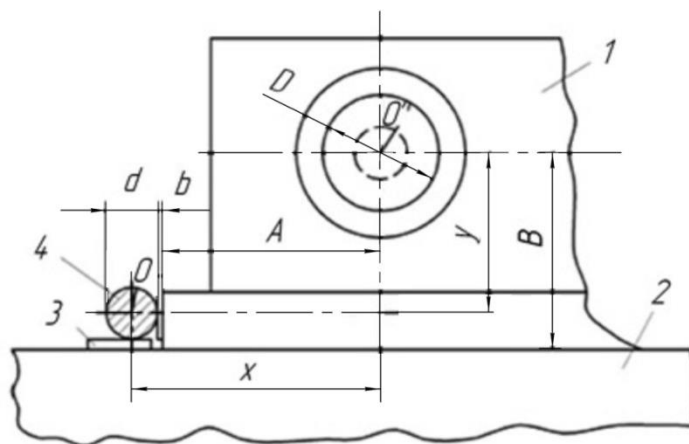


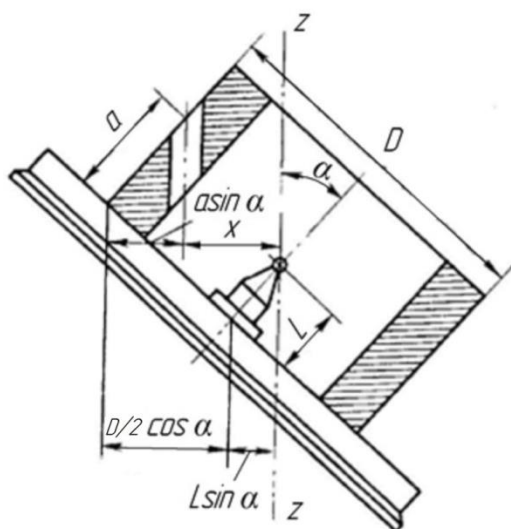
Рисунок 2.10 – Схема настройки на размеры A и B от технологических баз с помощью шкал и лимбов приводов перемещений горизонтально-расточного станка для растачивания отверстия

Пример настройки при обработке отверстия, расположенного под углом к оси другого отверстия, показан на рисунке 2.11. Заготовка с помощью индикатора базируется и фиксируется на столе координатно-расточного станка таким образом, чтобы ось оправки с шариком и ось заготовки совпали. Далее осуществляется поворот стола на заданный угол α по отношению к оси шпинделя. Ось шпинделя (при помощи ин-

дикатора) устанавливается в нуль относительно шарика оправки. Затем осуществляется отвод стола на расстояние x , где

$$x = \frac{D}{2} \cos \alpha + (L - a) \sin \alpha$$

При размерной настройке резцов в расточных борштангах применяют эталоны или приборы типа «наездник» (рис. 2.12). Прибор 1,



оснащенный индикатором 3 часового типа, настраивается предварительно по изготовленной для этой цели втулке с наружным диаметром $d = 2 \cdot A_n$. Эта втулка по скользящей посадке устанавливается на борштангу. Иногда призма прибора 1 снабжается магнитом, который при необходимости можно выключить. Такой прибор удобнее простого (без магнита). Точность установки резцов по прибору 0,005...0,015 мм. Предварительная размерная настройка инструментов для станков с ЧПУ осуществляется вне станка при помощи оптико-механических приборов.

Рисунок 2.11 – Схема настройки для обработки под углом α на расстоянии a

жены измерительными преобразователями 2 (рис. 2.13), которые позволяют осуществить размерную настройку. Для этого каждый из инструментов 1 подводится к измерительному преобразователю 2, который устанавливается на столе станка или на приспособлении с известной высотой V_n . Система ЧПУ переводится в режим измерения. При отводе шпиндельной бабки в исходное положение системой определяется расстояние S_n , а следовательно, и A_n от стола до инструмента.

Некоторые станки с ЧПУ снаб-

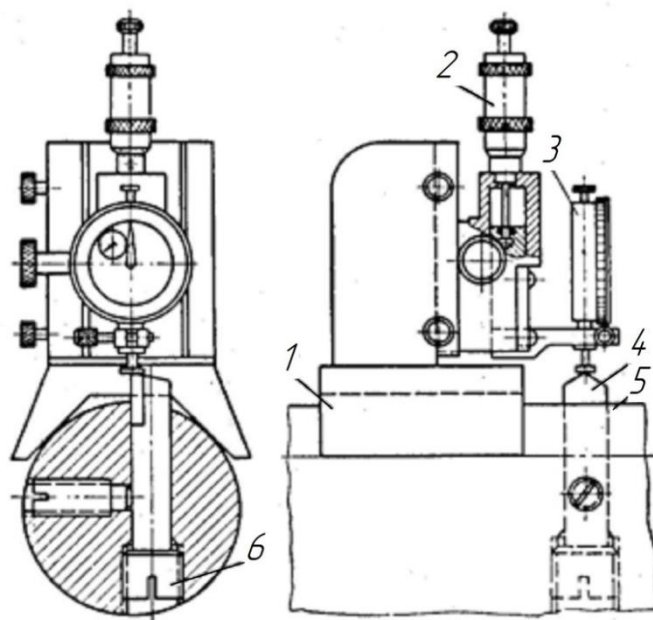


Рисунок 2.12 – Схема настройки резца на размер растачиваемого отверстия

Таким образом, в памяти УЧПУ формируется необходимое перемещение $z = A_u - A_n$ для выхода на размер настройки A_n .

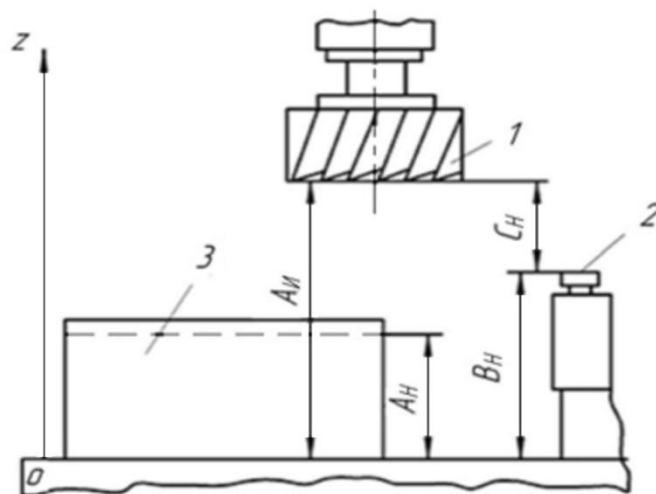


Рисунок 2.13 – Схема размерной настройки инструментов многоцелевого станка с ЧПУ по оси Z

Все описанные выше методы статической размерной настройки имеют общий недостаток – не учитывают действующие в процессе обработки силы и соответствующие им упругие деформации, вследствие которых фактический размер обработки $A_{\text{факт}}$ никогда не равен размеру настройки A_n . Последнее обстоятельство во многих случаях имеет существенное значение. Поэтому статическая настройка дополняется динамической, при которой регулирование положения инструментов и упоров, ограничивающих длину рабочего хода, осуществляется на основании результатов замера первых обработанных заготовок. Во многих случаях сразу осуществляется динамическая размерная настройка без статической.

Различают два вида динамической размерной настройки: *единичная*, когда процедура настройки повторяется при обработке каждой заготовки, и *настройка на партию заготовок*, когда настроенным на размер инструментом обрабатывается партия заготовок, соответствующая периоду его стойкости. Единичная динамическая размерная настройка осуществляется методами «*пробной стружки*» и «*пробных проходов*». Пример первого метода, реализуемого на токарном станке, показан на рисунке 2.14.

После включения вращения шпинделя вершина резца переводится из исходного положения (точка 0) до касания с заготовкой (в точке 1). Затем резец отводится вправо (в точку 2), лимб поперечной подачи устанавливается на нуль и осуществляется переход в точку 3 поперечной подачей на расстояние равное $(D - d_1) / 2$. Значение d_1 выбирается согласно неравенству $d_1 > d$, где d – требуемый размер детали. Включа-

ется продольная подача, заготовка протачивается на небольшой длине L_1 (переход в точку 4) и резец ускоренно отводится вправо (в точку 5, которая может совпадать с точкой 3). Вращение шпинделя выключается и осуществляется измерение полученного диаметра d_1 . Снова включается вращение шпинделя, вершина резца перемещается в точку 6 на расстояние $(d_1 - d) / 2$ и заготовка обрабатывается на полную длину L .

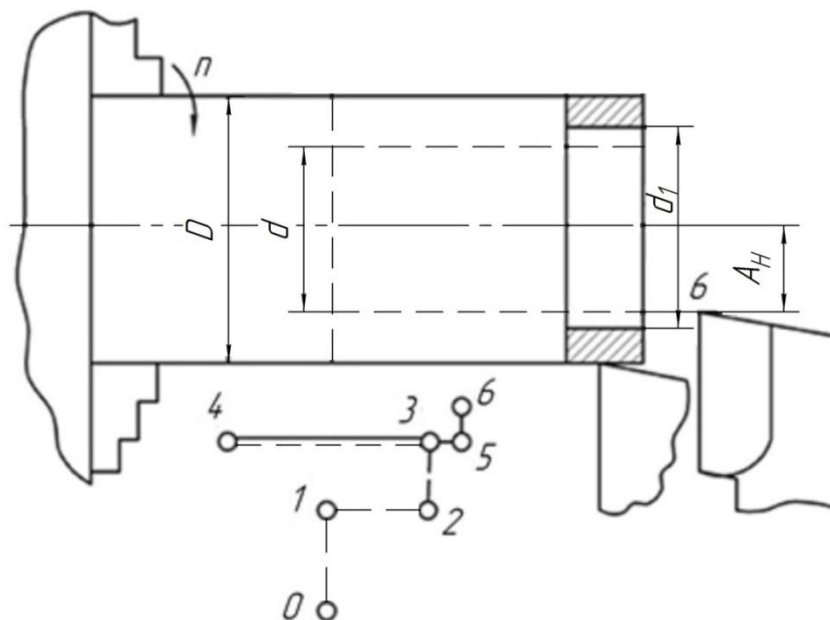


Рисунок 2.14 – Схема размерной настройки методом «пробной стружки»

Недостатком данного метода является относительно низкая точность. Кроме того, окончательно на участке длиной L_1 получается уменьшенный размер, так как этот участок обрабатывается с меньшей глубиной резания, чем вся остальная заготовка.

Метод «пробных проходов» отличается от метода «пробной стружки» тем, что предварительно обрабатывается не малый участок заготовки, а вся заготовка. Далее, после отвода в точку 5, проводится коррекция размерной настройки (перевод в точку 6) и повторная обработка на всей длине. Последнюю процедуру можно повторять несколько раз, пока не будет достигнут заданный размер. Данный метод обеспечивает высокую точность, ограничиваемую только точностью измерения, точностью регулировки (по лимбу винта подачи или по индикатору часового типа) и минимальной глубиной резания, с которой может работать данный инструмент. Однако при обработке методом «пробных проходов» существенно теряется производительность.

При динамической размерной настройке на партию заготовок необходимо обеспечить не только заданную точность, но и максимальную долговечность работы инструмента между коррекциями размерной настройки, которые производятся несколько раз за период его стойко-

сти. Основной причиной, вызывающей необходимость этой коррекции, является износ инструмента, из-за которого размер обработки может систематически увеличиваться (для наружной поверхности) или уменьшаться (для внутренней).

Размерная настройка осуществляется в три этапа: индивидуальная настройка по первой заготовке; обработка пробной партии из $m = 5...10$ заготовок; анализ результатов измерения деталей пробной партии и первая коррекция размерной настройки с целью так расположить в пределах поля допуска TA мгновенное поле рассеивания ωA размера A , чтобы получать максимальный запас h_{in} на изнашивание инструмента.

На рисунке 2.15 приведена схема выполнения процедур размерной настройки на партию.

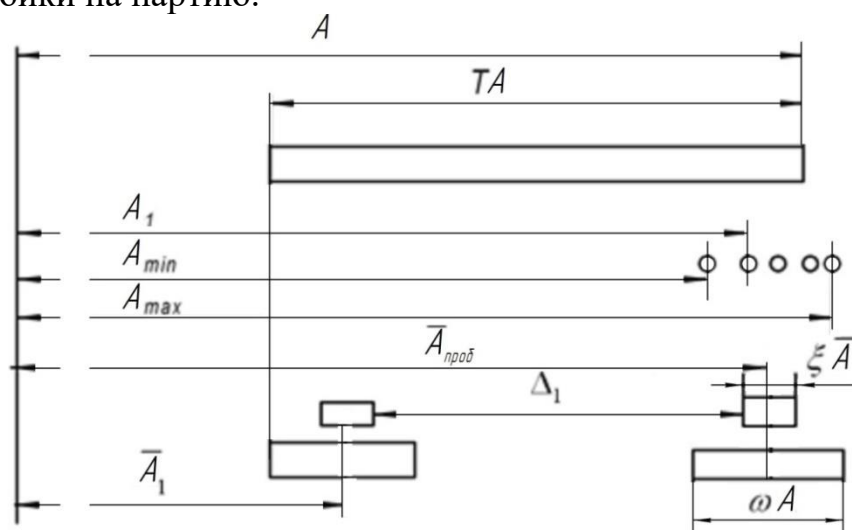


Рисунок 2.15 – Схема определения и смещения мгновенного поля рассеивания при размерной настройке на партию

После первой индивидуальной размерной настройки получен размер A_1 , а размеры после обработки m заготовок пробной партии (включая первую) распределены в пределах от A_{min} до A_{max} . Тогда средний настраиваемый размер в пробной партии

$$A_{cp} = \left(\sum_{i=1}^m A_i \right) / m$$

а мгновенное поле рассеивания определяется выражением

$$\omega A = K \cdot (A_{max} - A_{min}),$$

где K зависит от числа заготовок в пробной партии. С вероятностью 95 % можно утверждать, что K зависит от m следующим образом:

m , шт....	5	6	7	8	9	10
K	1,408	1,296	1,215	1,152	1,104	1,066

Доверительный интервал $\xi \bar{A}$ для оценки $A_{\text{проб}}$ определяется выражением

$$\xi \bar{A} = K_1 \cdot \omega A / \sqrt{m'} , \quad (4.1)$$

где с вероятностью 95 % K_1 зависит от m' следующим образом:

m' , шт....	5	6	7	8	9	10
K_1	1,789	1,590	1,434	1,331	1,252	1,191

В соответствии со схемой на рисунке 2.15 необходимая коррекция, при условии, что по мере изнашивания инструмента размер обработки увеличивается, определяется из следующего выражения:

$$\Delta_1 = \bar{A}_{\text{проб}} - A + TA - 0,5\omega A - \xi \bar{A} .$$

Полученный уровень настройки характеризуется параметром \bar{A}_1 , то есть средним значением размера A в партии из m деталей, обработанных сразу после осуществления первой коррекции. Относительная точность размерной настройки на партию характеризуется показателем уровня настройки K_H :

$$K_H = (\bar{A}_{1\text{зд}} - \bar{A}_1) / TA ,$$

где $\bar{A}_{1\text{зд}}$ – заданный размер настройки.

По мере изнашивания инструмента уровень настройки будет смещаться от \bar{A}_1 до предельного значения $\bar{A}_{\text{пред}}$ (рис. 2.16). С учетом допуска T_H на размерную настройку запас допуска h_H на изнашивание определяется следующим выражением

$$h_H = TA - T_H - \omega A - \xi \bar{A} .$$

При увеличении допуска T_H на размерную настройку затраты времени t_H на промежуточные коррекции будут сокращаться (согласно экспериментальным данным) в соответствии с выражением

$$\tau_H = B_0 T_H^{-b} ,$$

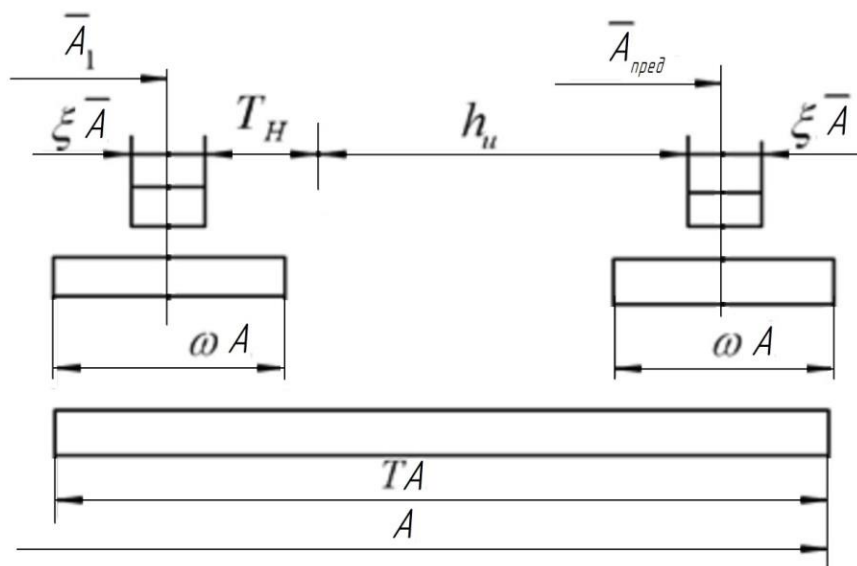


Рисунок 2.16 – Схема смещения мгновенного поля рассеяния при износе инструмента

где B_0 – коэффициент; $b = 0,65...0,75$. Однако при этом увеличение T_H ведет к уменьшению запаса на износ h_u . Следовательно, придется чаще проводить промежуточные коррекции. Очевидно, что существует оптимальная точность размерной настройки, при которой суммарное время $t_{сум}$ на промежуточные коррекции будет минимальным.

2.4 Размерные цепи при сборке и механической обработке

Размерные связи между исполнительными поверхностями машины и ее механизмов образуются с помощью размеров, принадлежащих сборочным единицам и деталям, которые сопрягаются по основным и вспомогательным базам. То же можно сказать об относительных поворотах [2–5, 84–86]. На рисунке 2.17 показана схема формирования расстояния A_Δ между осью шпинделя силовой головки 1 и установочной поверхностью приспособления 2. Это расстояние формируется с помощью размеров $A_1...A_4$. Аналогично формируется параллельность оси шпинделя силовой головки 3 по отношению к другой установочной поверхности приспособления (α_Δ зависит от углов $\alpha_1... \alpha_5$).

В общем случае расположенные последовательно по замкнутому контуру размеры (относительные повороты) принято называть *размерной цепью*. Под *сборочной размерной цепью* понимают замкнутую последовательность векторов, выражающих размеры сопрягаемых деталей (сборочных единиц), входящих в состав проектируемой машины (сборочной единицы) и оказывающих влияние на ее функционирование.

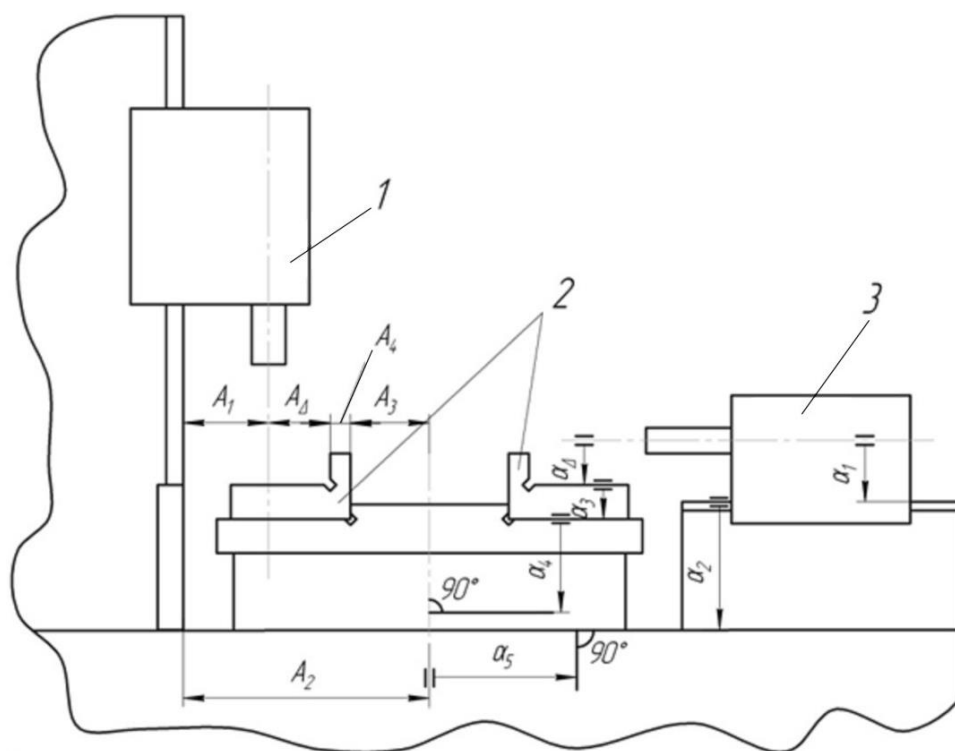


Рисунок 2.17 – Схема размерных связей агрегатного станка

Сборочная размерная цепь состоит из составляющих звеньев и замыкающего (исходного) звена. *Составляющие звенья* размерной цепи – это размеры (относительные повороты), принадлежащие элементам машины (сборочной единицы). *Замыкающее звено* – это размер (угол относительного поворота), который принадлежит не элементу машины (сборочной единицы), а машине (сборочной единице) в целом. Этот размер (угол относительного поворота) является основной геометрической характеристикой машины (сборочной единицы), позволяющей оценивать точность и надежность ее функционирования. Сказанное относится к параметрам A_{Δ} и α_{Δ} на рисунке 2.17.

Любая размерная цепь расстояний может быть отнесена к одному из следующих видов: линейные, плоские и пространственные. У *линейной размерной цепи* все звенья выражены в линейных единицах и параллельны. У *плоской размерной цепи* одно или несколько составляющих звеньев не параллельны замыкающему звену. Звенья *пространственной размерной цепи* расположены в пространстве. Но путем проецирования на координатные оси можно плоскую размерную цепь привести к одной или двум линейным, а пространственную – к нескольким связанным между собой плоским. Рассмотренные размерные цепи (расстояний) показаны на рисунке 2.18. Уравнение линейной цепи с учетом направлений векторов в данном случае имеет вид

$$A_{\Delta} = A_1 + A_2 + A_3 - A_4$$

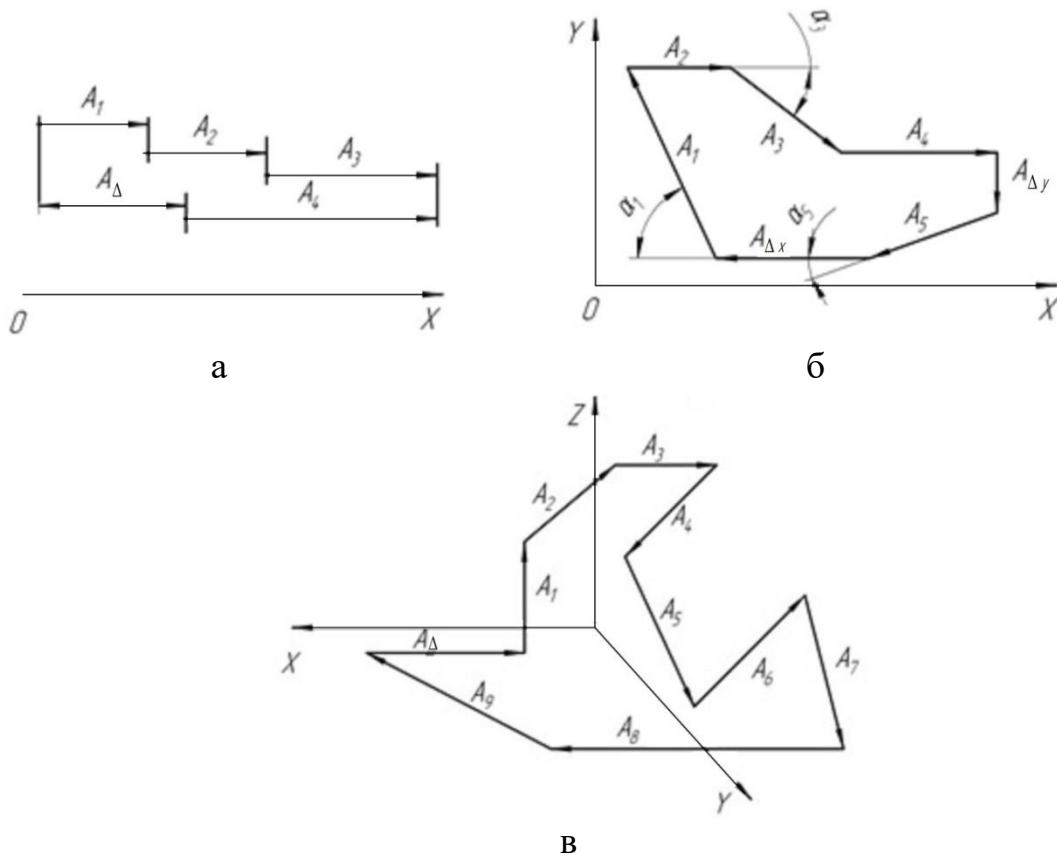


Рисунок 2.18 – Схемы размерных цепей:
а – линейной, б – плоской, в – пространственной

Обход контура при построении размерной цепи лучше начинать с замыкающего звена, выбирая его направление противоположным направлению оси X. Максимальное поле рассеяния ω_{Δ} замыкающего звена A_{Δ} можно легко определить, придав составляющим звеньям максимальные и минимальные значения. Тогда

$$\omega_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n-1} \omega_i \quad ,$$

где n – количество звеньев размерной цепи; ω_i – поле рассеяния i -го составляющего звена.

Уравнения плоской размерной цепи, показанной на рисунке 2.18 б, имеют вид:

$$A_{\Delta x} = A_1 \cos \alpha_1 + A_2 + A_3 \cos \alpha_3 + A_4 - A_5 \cos \alpha_5,$$

$$A_{\Delta y} = A_1 \sin \alpha_1 - A_3 \sin \alpha_3 - A_5 \sin \alpha_5.$$

Эти уравнения не являются линейными, и максимальные значения полей рассеяния зависят не только от погрешностей линейных звеньев, но и от погрешности углов.

Линейная цепь относительных поворотов, показанная на рисунке 2.19, связывает между собой отклонения от параллельности. Поскольку эти параметры характеризуются соответствующими полями рассеяния, то уравнение размерной цепи можно записать по аналогии с предыдущим уравнением.

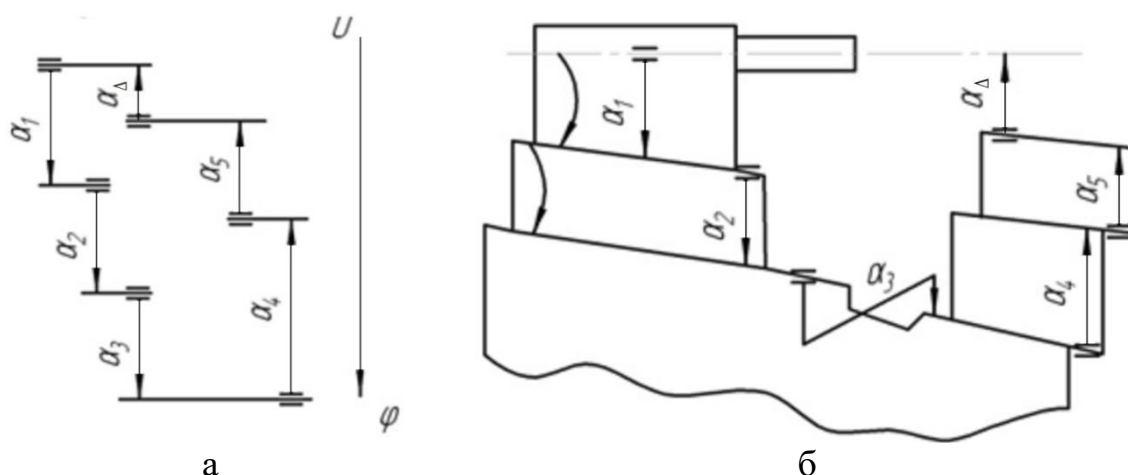


Рисунок 2.19 – Схемы линейной цепи и соответствующая ей схема сборочной единицы машины

Вероятность появления максимального (или минимального) отклонения замыкающего звена очень мала, так как это возможно лишь при условии, что все составляющие звенья одновременно примут соответствующие крайние значения. Например, вероятность того, что в сборочной единице из пяти деталей размеры всех примут крайние (в пределах 5 % поля допуска) значения, будет равна 0,0000003.

Из математической статистики известно, что при заданной доверительной вероятности P поле рассеяния случайной величины (в нашем случае погрешность звена размерной цепи ω_i) связано со стандартным отклонением σ_i , а следовательно, и с дисперсией D_i следующим равенством: $\omega_i = \lambda_i \sigma_i$, где λ_i – коэффициент, зависящий от закона распределения; $\sigma_i^2 = D_i$. С другой стороны, если некоторая случайная величина является суммой других случайных величин, то дисперсия суммы равна сумме дисперсий. На этом основании можно записать для линейной размерной цепи:

$$\omega_{\Delta} = \lambda_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\omega_i}{\lambda_i} \right)^2}.$$

Конструкторские размерные цепи применяются при проектировании машин и технологической оснастки к металлообрабатывающему оборудованию. *Технологические размерные цепи* связывают размеры обрабатываемой заготовки на разных стадиях технологического процесса и размеры готовой детали. Пример формирования технологической размерной цепи приведен на рисунке 2.20. На этом рисунке показаны: заготовка (б), готовая деталь (а) с размерами, параллельными оси Y , операционные эскизы со схемой базирования и размерная цепь, включающая размеры заготовки ($З$), детали (A) и технологические (операционные) размеры (C). На первой операции выполняют сверление и зенкование фаски, затем после термической обработки (операция 2) последовательно шлифуют основание (операция 3) и верхнюю плоскость (операция 4) заготовки. Технологические размеры откладываются только от соответствующей базы. Замыкающим звеном в данном случае является размер A_2 , а уравнение размерной цепи имеет вид (обход цепи начинается с точки m)

$$-C_2 + C_3 - A_2 - C_1 + C = 0$$

или

$$A_2 = C + C_3 - C_1 - C_2$$

Уравнение для определения максимального поля рассеяния замыкающего звена имеет вид

$$\omega A_2 = \omega C + \omega C_3 - \omega C_1 - \omega C_2$$

Высокой точности замыкающего звена в данном случае достигнуть нельзя, так как ωA_2 зависит от погрешности заготовки и суммы погрешностей технологических размеров.

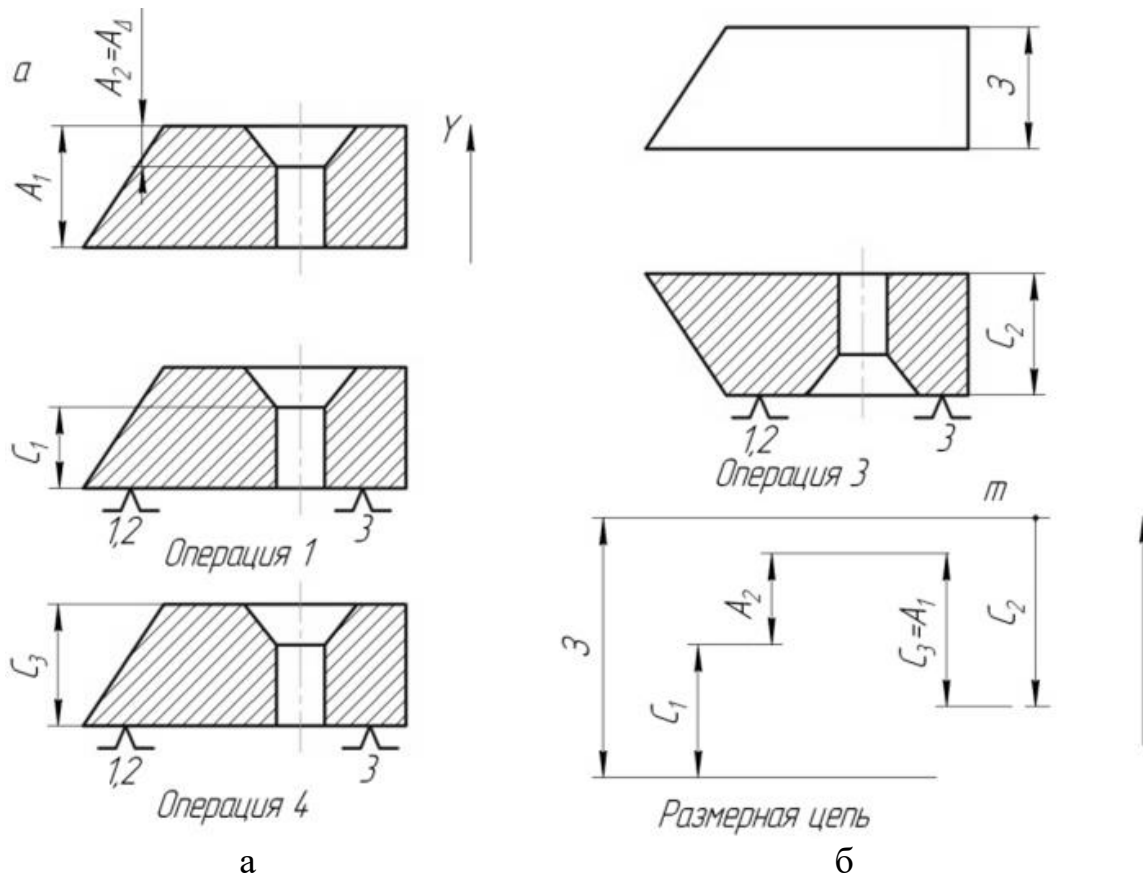


Рисунок 2.20 – Формирование технологической размерной цепи

Повысить точность замыкающего звена технологической цепи можно, сократив число ее звеньев. Для этого следует поменять порядок шлифования поверхностей (рис. 2.21). В данном случае размеры 3 и C_3 не входят в размерную цепь и $\omega A_2 = \omega C_1 + \omega C_2$.

В технологии машиностроения используются следующие методы обеспечения заданной точности замыкающего звена размерной цепи: метод полной взаимозаменяемости; метод неполной (частичной) взаимозаменяемости; методы технологической компенсации; методы конструкторской компенсации (имеются в виду методы компенсации погрешностей составляющих звеньев размерной цепи).

Выбор того или иного метода обусловлен требованиями к точности замыкающего звена, особенностями конструкции сборочной единицы (машины), технологией сборки и механической обработки, типом производства. Критерий выбора – минимизация суммарных затрат на изготовление деталей и сборку машины.

При сборке *методом полной взаимозаменяемости* детали, входящие в комплект сборочной единицы, отбираются из соответствующих совокупностей случайным образом. Замена в комплекте детали данного наименования любой другой того же наименования не должна приводить к выходу замыкающего звена за пределы допуска.

Чтобы такое было возможно, необходимо выполнять следующее неравенство:

$$\omega_{\Delta} > \sum_{i=1}^{n-1} \omega_i$$

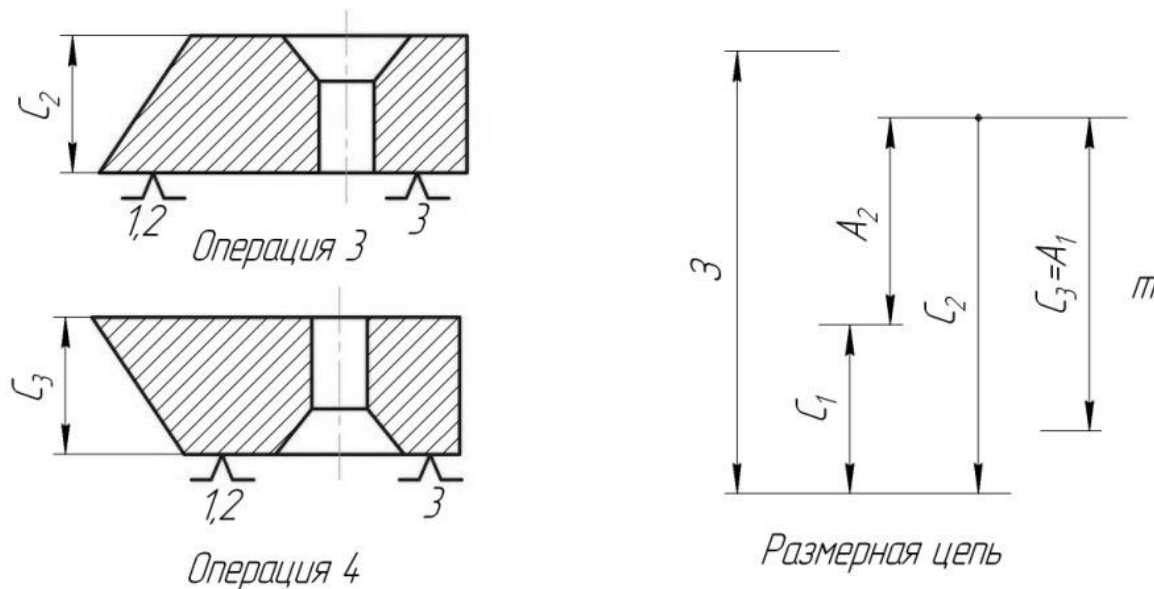


Рисунок 2.21 – Схема сокращения числа звеньев технологической размерной цепи

Если в пределе считать, что максимальное поле рассеяния равно полю допуска, то для линейной цепи

$$TA_{\Delta} > \sum_{i=1}^{n-1} TA_i$$

Недостатком данного метода является необходимость высокой точности обработки деталей по тем размерам, которые являются составляющими звеньями размерной цепи. Это требование ужесточается при увеличении числа звеньев размерной цепи. Поэтому метод полной взаимозаменяемости применяется в массовом производстве при сборке изделий средней точности.

При механической обработке метод полной взаимозаменяемости имеет смысл в том случае, когда требуемый размер обработки обеспечивается за счет формообразующего размера режущего инструмента, например, сверл, зенкеров, разверток, протяжек, дисковых фрез и т. д.

Комплектование деталей для сборки *методом неполной взаимозаменяемости* осуществляется так же, как при использовании метода полной взаимозаменяемости. Однако поскольку вероятность макси-

мального отклонения размера замыкающего звена мала, то ограничивающее неравенство следует получать с учетом допустимого процента риска сборки единиц, в которых размер замыкающего звена вышел за пределы допуска:

$$TA_{\Delta} > t(\alpha) \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{TA_i^2}{\lambda_i^2}},$$

где $t(a)$ зависит от допустимого процента риска следующим образом:

$a, \% \dots\dots\dots$	0,1	0,27	1	2	3	4
$t(\alpha) \dots\dots\dots$	3,290	3,0	2,576	2,326	2,170	2,054,

а λ_i – статистические коэффициенты, зависящие от закона распределения погрешности i -го звена; для закона нормального распределения $\lambda_i^2 = 9$, для закона равной вероятности $\lambda_i^2 = 3$.

Приведенное неравенство можно использовать, если $n \geq 4$ (погрешности составляющих звеньев распределены по нормальному закону) или $n \geq 7$ (погрешности составляющих звеньев распределены по закону, близкому к равной вероятности). Это неравенство показывает, что использование метода неполной взаимозаменяемости позволяет расширять поле допусков на составляющие звенья по сравнению с требованиями метода полной взаимозаменяемости.

Методы технологической компенсации включают: метод групповой взаимозаменяемости, метод подбора и метод пригонки.

В случаях сборки *методом групповой взаимозаменяемости* детали перед комплектованием в сборочную единицу сортируют на группы по размерам, а само комплектование проводят в соответствии с определенным правилом. Чаще всего номера комплектов совпадают с номерами групп размеров. Это обычное, но не обязательное правило. Метод применяется в условиях массового производства, когда невозможно технически и технологически обеспечить условия полной и неполной взаимозаменяемости. Он дает возможность существенно расширить допуски на составляющие звенья и таким образом значительно снизить затраты на изготовление деталей. Однако при этом эффективность метода несколько снижается в связи с необходимостью ужесточать требования к точности формы сопрягаемых поверхностей и вместо уровня А (нормальная геометрическая точность) использовать уровень В или С (повышенная или высокая геометрической точности). В первом случае (уровень А) погрешность формы может составлять 30 % допуска на размер, а при уровнях В и С – соответственно 20 и 12 %.

Кроме того, использование метода групповой взаимозаменяемости ведет к существенному увеличению незавершенного производства. Причиной этого являются погрешности уровня настройки и неодинаковость параметров закона распределения размеров деталей разных наименований, приводящие к образованию совокупности деталей, из которых невозможно составить комплект. Количество комплектов будет соответствовать минимальному количеству деталей данного наименования, попавших при сортировке в данную группу. С учетом незавершенного производства приходится регулировать уровень размерной настройки.

Рассмотрим задачу сортировки деталей для случая трехзвенной размерной цепи. Это наиболее распространенный случай, когда необходимо обеспечить заданную посадку в соединении (рис. 2.22), где A – размер отверстия, B – размер вала, TA и TB – соответственно допуски на эти размеры. Для решения задачи нужно определить количество N групп, на которые будут разбиты допуски TA и TB , чтобы при сборке деталей с одинаковыми номерами групп был обеспечен средний зазор (натяг) \bar{z} с допуском $Tz = z_{\max} - z_{\min}$. Кроме того, необходимо определить номинальный (наибольший) размер вала. В соответствии со схемой построена размерная цепь (рис. 2.22), уравнение которой имеет вид

$$TA + z_{\min} + TB_i - TB + TB_i - z = 0.$$

Подставив в это уравнение $TB_i = \frac{TB}{N}$ и $z_{\min} - z_{\max} = TB_z$, получим

$$N = \frac{2TB}{T_z - (TA - TB)}.$$

Из данного выражения следует, что метод групповой взаимозаменяемости возможен, если $T_z > (TA - TB)$, а минимальное число групп получается при $TA = TB$.

В соответствии с размерной цепью, показанной на рисунке 2.23, имеем

$$B = A - \bar{z} + 0,5(TA + TB).$$

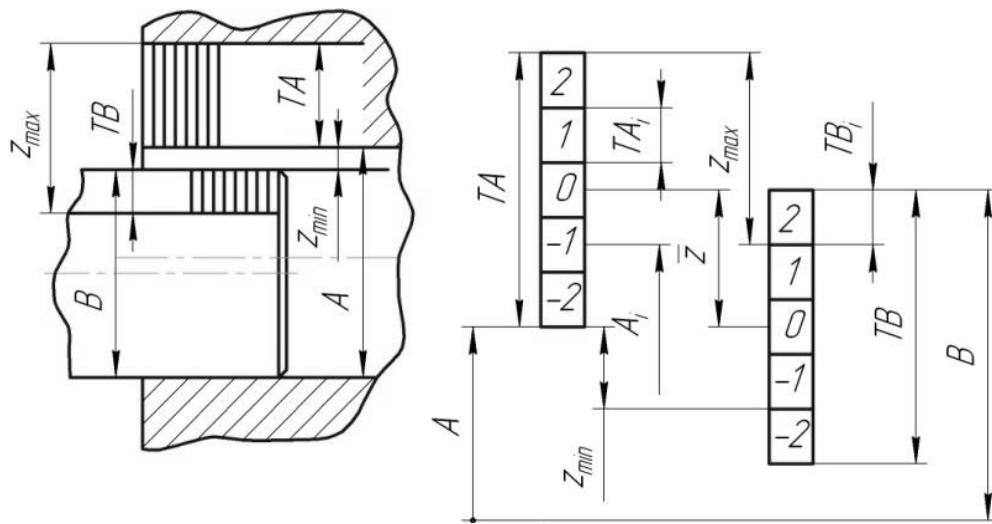


Рисунок 2.22 – Схемы соединения вала с втулкой и разбивки допусков размеров на группы

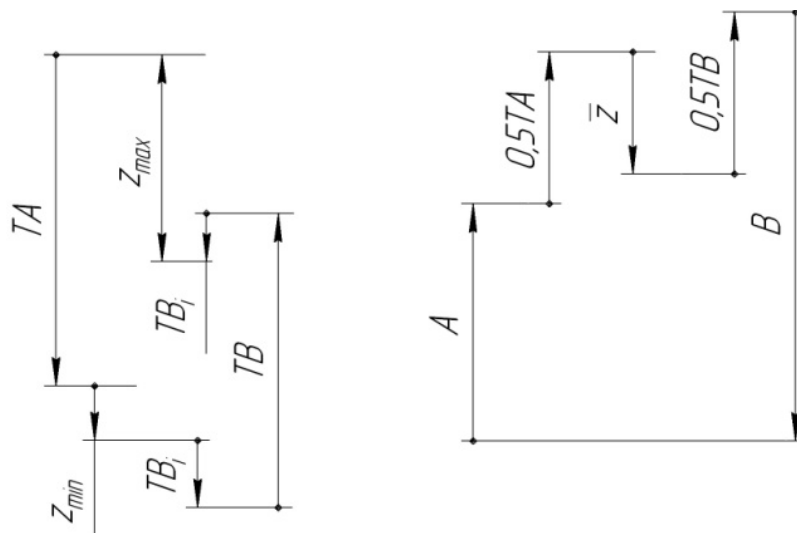


Рисунок 2.23 – Размерные цепи для решения задачи сортировки

Более наглядное и рациональное решение данной задачи обеспечивает графический метод, суть которого состоит в следующем. Проводим горизонтальную ось размеров вала и вертикальную ось размеров отверстия (рис. 2.24).

Точка O в этой системе координат соответствует номинальному размеру соединения. На оси a откладываем в выбранном масштабе TA , делим это расстояние пополам и проводим через полученные точки горизонтальные линии. На этой же оси откладываем значение \bar{z} и через полученную точку проводим прямую под углом 45° . Полученная на пересечении данной прямой со средней линией допуска TA точка h будет центром прямоугольника допусков, для построения которого проводим через точку h вертикальную линию и откладываем от нее вправо и влево по $0,5TB$. От точки h вверх и вниз откладываем по $0,5T_z$ и через полу-

ченные точки i и j проводим под углом 45° прямые. В результате получается многоугольник $cdemnk$, выделенный штриховкой. Любая точка в системе координат aOb соответствует паре значений размеров B и A . Если точка попала внутрь многоугольника $cdemnk$ (например, M), то из данной пары деталей можно получить соединение с заданными характеристиками. Если точка E находится вне указанного многоугольника, то данная пара не позволяет получить заданное соединение.

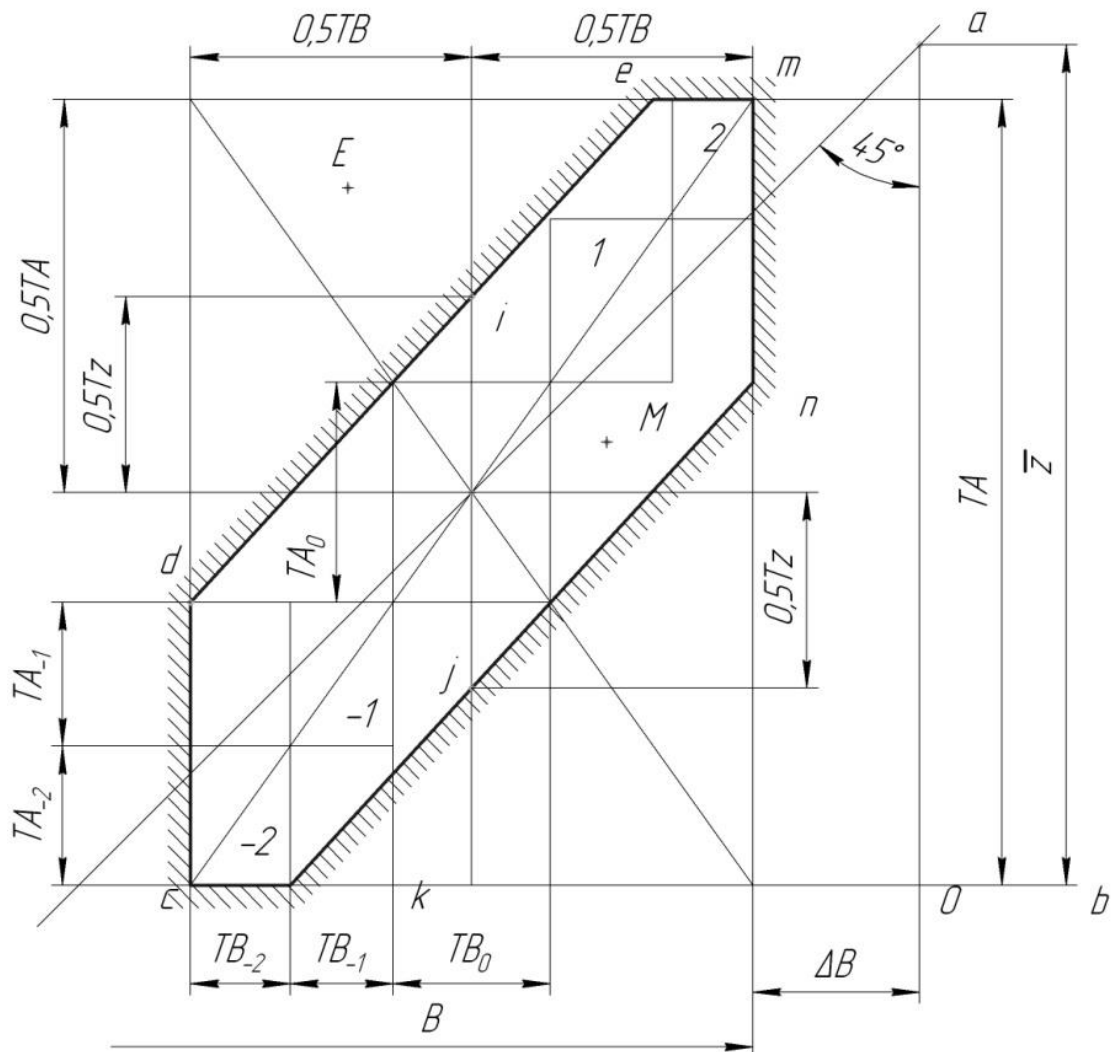


Рисунок 2.24 – Графическое решение задачи определения групповых допусков

Следовательно, внутри многоугольника $cdemnk$ можно расположить связанные прямоугольники групповых допусков, подобные основному прямоугольнику допусков. Для этого в нем проводим две диагонали. Начинать построение можно от центра или от верхней (нижней) части em (kc) многоугольника $cdemnk$. В первом случае строим на диагоналях прямоугольник, который касается границ допустимой области, и получаем значения TA_0 и TB_0 . Затем продолжаем вертикальные стороны

полученного прямоугольника до встречи с границами допустимой области. Из точек встречи проводим горизонтальные линии до пересечения с диагональю st и получаем, таким образом, значения групповых допусков $T_{B_{-1}} = TB_1$ и $TA_{-1} = TA_1$. Аналогично проводим построение остальных прямоугольников групповых допусков.

Если начать построение прямоугольников групповых допусков от центра h , то возможны ситуации, показанные на рисунке 2.25 а, т. е. групповые допуски T_{B_2} и TA_2 получаются излишне жесткими. В таких случаях лучше начинать построение от верхней и нижней частей многоугольника $cdemnk$ (рис. 2.25 б). При этом не обязательно, чтобы прямоугольники групповых допусков касались границ допустимой области. Преимущество графического метода определения групповых допусков состоит в том, что он позволяет в определенных случаях уменьшить необходимое число групп размеров. Так, например, изображенный на рисунке 2.25 случай соответствует следующим исходным данным: $TA = 0,08$ мм, $TB = 0,06$ мм, $T_z = 0,04$ мм. Тогда $N = 6$, а графический метод показал, что достаточно пяти групп.

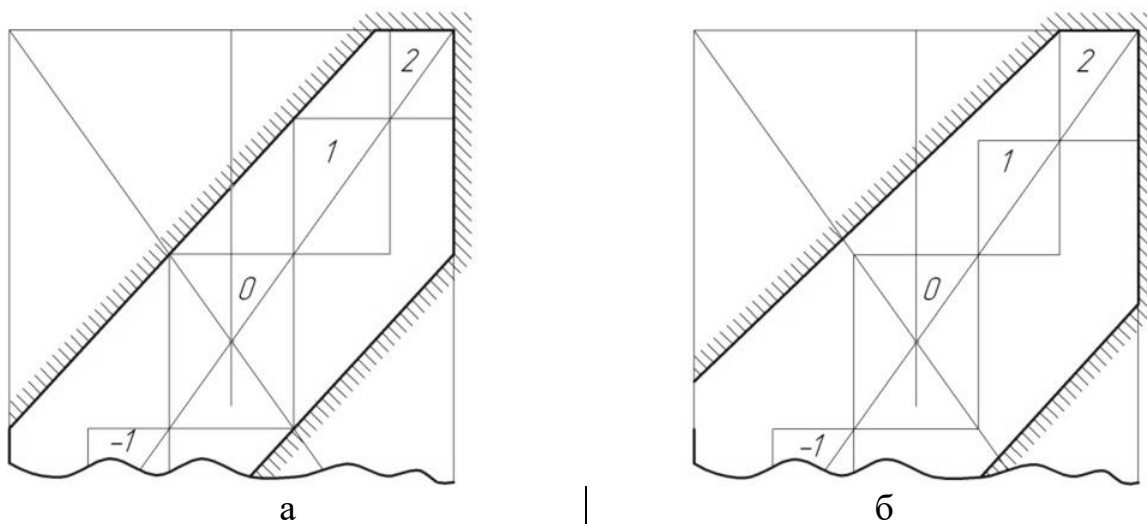


Рисунок 2.25 – Варианты построения прямоугольников групповых допусков

Если число звеньев размерной цепи больше трех, то задача сортировки и комплектования усложняется и не имеет единственного рационального решения.

Метод подбора заключается в том, что детали, подаваемые на сборку партиями, изготовлены с экономически и технически приемлемой точностью, при которой

$$TA_{\Delta} > \sum_{j=1}^{n-1} TA_j.$$

В таком случае сборщик, согласно измеренным значениям размеров, подбирает детали так, чтобы

$$TA_{\Delta} > \sum_{j=1}^{n-1} TA_j \Delta_j,$$

где Δ_j – реальное отклонение размера j -й детали. Однако в таком случае могут остаться детали, из которых невозможно будет подобрать комплект.

Для повышения эффективности данного метода выделяется специально предусмотренная конструктором компенсационная деталь размером $A_{\text{комп}}$, необходимый разброс которого $\Delta A_{\text{комп}}$ можно найти на основании анализа соответствующей цепи:

$$\Delta A_{\text{комп}} = TA_{\Delta} + \sum_{j=1}^{n-2} TA_j.$$

Компенсационная деталь обычно проще всех остальных, и ее легче выполнить с достаточно высокой точностью. Сборщик сначала производит предварительную сборку со взятой наугад или эталонной компенсационной деталью, измеряет фактический размер замыкающего звена A_{Δ} . По результатам замера подбирается компенсационная деталь с нужным размером $A_{\text{комп}}$, который обеспечивает требования к точности замыкающего звена.

Метод пригонки применяется в условиях серийного и мелкосерийного производства при высоких требованиях к точности замыкающего звена. В данном случае компенсационная деталь после предварительной сборки и измерения фактического размера замыкающего звена обрабатывается на станке или опиливается так, чтобы получить заданную точность замыкающего звена. Технологический размер компенсационной детали $A_{\text{комп.т}}$ определяется из выражения

$$A_{\text{комп.т}} = A_{\text{комп.макс}} + TA_{\text{комп}}$$

Максимальный припуск, который может быть удален с компенсационной детали

$$P_{\max} = \Delta A_{\text{комп}} + TA_{\text{комп}}$$

Конструкторским компенсатором называется одна из штатных деталей сборочной единицы, допускающая изменение (регулирование) ее составляющего или структурного размера в процессе сборки либо в процессе эксплуатации машины для достижения заданной (обычно высокой) точности замыкающего звена. Рационально встроенный в сборочную единицу конструкторский компенсатор может способствовать повышению надежности машины, так как позволяет поддерживать в процессе эксплуатации необходимую точность замыкающего звена.

Применение конструкторской компенсации наиболее целесообразно для уменьшения последствий влияния таких погрешностей формы и положения, как некруглость, неплоскостность, непараллельность и неперпендикулярность.

2.5 Синтез маршрута обработки заготовки в субтрактивном производстве

2.5.1 Общие положения

На стадии проектирования технологии задача обеспечения взаимного расположения комплекса обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей, равномерности снятия припуска с поверхностей, требуемых показателей точности чертёжных размеров, а также требуемых допусков взаимного расположения (перпендикулярность, параллельность, угол и т. д.) поверхностей решается на этапе синтеза маршрута обработки заготовки. Назначение маршрута обработки заготовки включает в себя решение задач выбора оборудования, определения порядка обработки и смены баз [2–5].

Изложенные выше термины и определения позволяют предложить следующую последовательность процедур назначения маршрута обработки для обеспечения заданных чертежом допусков взаимного расположения и размеров:

- 1) построение ГМЗ на этапах типовой схемы обработки;
- 2) определение составов баз ориентации и формирование структуры операции;
- 3) идентификация состава баз ориентации;
- 4) определение приоритета в обеспечении допуска взаимного расположения на операции;
- 5) синтез схемы базирования;
- 6) синтез схемы установки и операционного эскиза;

- 7) синтез функциональной модели приспособления (список основных, вспомогательных и дополнительных функций);
- 8) определение характеристик окружающей среды (элементы станка для использования приспособления);
- 9) анализ допустимости выбранной схемы установки (оценка погрешности схемы установки);
- 10) разработка конструктивной схемы (компоновки) приспособления;
- 11) параметрический синтез приспособления (силовой расчет и расчет на точность);
- 12) разработка рабочих чертежей приспособления.

При переходе от первой процедуры проектирования к последней происходит наращивание объема информации о процессе реального базирования. Однако никогда модель базирования не может быть тождественна реальному процессу, да это и не требуется.

Процедуры 1–6 играют особую роль в процессе проектирования технологического процесса и приспособления. Именно с их помощью на стадии проектирования решаются задачи обеспечения заданных чертежом требований к точности взаимного расположения элементов конструкции. После их реализации формируется задание на выбор стандартного или проектирование специального станочного приспособления (или состава установочных элементов и ориентации заготовки при установке на стол станка).

Процедуры 7–12 реализуются при проектировании нового станочного приспособления и являются хорошо формализованными и алгоритмизированными и в настоящей работе не рассматриваются.

Определение порядка обработки и смены баз можно производить *двумя методами*:

- с помощью определения всех возможных комплектов баз ориентации поверхностей и последующего их анализа;
- с помощью «отсеченных» графов на этапах типовой схемы.

Первый метод является более формализованным. Второй удобен для «ручного» применения.

2.5.2 Построение геометрической модели заготовки

Каждый предыдущий этап типовой схемы обработки детали (табл. 2.2) является подготовительным для последующего. Поэтому *для каждого этапа* необходимо определить базы для обработки на первой и на последующих операциях, порядок обработки и смены баз.

Для решения первой задачи рассматривается модель состояния заготовки на этапах типовой схемы обработки. Модель формируется с ис-

пользованием информации о функциональных модулях (ФМ) и технологических маршрутах, а также обозначений линейных и угловых связей главных поверхностей ФМ (графов линейных и угловых связей).

Таблица 2.2 – Типовая схема обработки корпусных деталей

№	Наименование этапа	Содержание этапа	IT
0	Заготовительный	Изготовление заготовки и ее подготовка к обработке	18-20
1	Предварительный	Удаление напусков и части припусков из основных и вспомогательных баз, крупных плоскостей и отверстий	14-15
2	Термический	Старение искусственное	15-16
3	Малярный 1	Грунтование исходных поверхностей	–
4	Чистовой 1	Обработка основных и вспомогательных баз, плоскостей, фасок и канавок для выхода инструмента	12-14
5	Чистовой 2	Обработка крепежных отверстий, мелких плоских поверхностей, пазов	9-12
6	Отделочный	Окончательная обработка конструкторских баз	5-8
7	Малярный 2	Нанесение лакокрасочных покрытий	–

Исходными данными являются $\Phi M_j; TM_j; R(x, y, z); U$.

Под множеством ΦM_j подразумевается комплексный ФМ, под которым понимается структурно максимально сложный модуль, имеющий наивысшие показатели качества

$$\Phi M_j = (n_1, n_2, \dots, \bar{n}_m, \dots, n_{i-1}, \dots, n_i),$$

где $n_i \in \Phi M_j$, \bar{n}_i – главные поверхности модуля.

Определение состояния ФМ ΦM_j^3 , ΦM_j^II , $\Phi M_j^Ч$, ΦM_j^O и маршрута его обработки на этапах типовой схемы обработки предлагается осуществлять двумя способами: 1) с помощью стандартных маршрутов, применяемых на том или ином предприятии для ФМ различного служебного назначения; 2) с помощью синтеза возможных вариантов маршрута ФМ низкого ранга на основе моделирования состояния показателей его качества.

Для формализации назначения маршрута по первому методу предлагается использовать понятие типового технологического маршрута

рута обработки ФМ – совокупности упорядоченной технологической информации о ФМ:

$$\Phi M_j \rightarrow TM_j = \{n_i^{nco}, \text{пер}_{y,i}, Pu, Un, \text{Э}\},$$

где n_i^{nco} – совокупность обрабатываемых ФМ нулевого ранга; $\text{пер}_{y,i}$ – переходы обработки и их точность; Pu – виды режущего инструмента и их размерные характеристики; Un – фрагменты управляющей программы для станков с числовым программным управлением; Э – этап типовой схемы обработки, в который распределяется переход.

Для структурирования информации о ФМ по служебному назначению предлагается их характеризовать показателями двух видов: внутренними и внешними. *Внутренние* – определяют форму, размеры, взаимное расположение и качества компонентов ФМ на этапе.

Хранение информации о внутренних параметрах ФМ внутри этапов типовой схемы обработки предлагается осуществлять в виде базы данных, формат которой можно представить в следующем виде

$$\begin{array}{c} \Phi M_j^3 = (n_1^3, n_2^3 \dots n_{i-1}^3, n_i^3) \\ \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \\ \qquad \qquad \qquad \text{ПК}n_i^3 = \{Xp_i^3, \Phi n_i^3, \Gamma br_i^3, Kch_i^3, Dn_i^3, Op_i^3\} \\ \qquad \qquad \qquad \text{ПК}n_2^3 = \{Xp_2^3, \Phi n_2^3, \Gamma br_2^3, Kch_2^3, Dn_2^3, Op_2^3\} \\ \text{ПК}n_1^3 = \{Xp_1^3, \Phi n_1^3, \Gamma br_1^3, Kch_1^3, Dn_1^3, Op_1^3\} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \Phi M_j^{\Pi} = (n_1^{\Pi}, n_2^{\Pi} \dots n_{i-1}^{\Pi}, n_i^{\Pi}) \\ \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \\ \qquad \qquad \qquad \text{ПК}n_1^{\Pi} = \{Xp_1^{\Pi}, \Phi n_1^{\Pi}, \Gamma br_1^{\Pi}, Kch_1^{\Pi}, Dn_1^{\Pi}, Op_1^{\Pi}\} \\ \qquad \qquad \qquad \text{ПК}n_2^{\Pi} = \{Xp_2^{\Pi}, \Phi n_2^{\Pi}, \Gamma br_2^{\Pi}, Kch_2^{\Pi}, Dn_2^{\Pi}, Op_2^{\Pi}\} \\ \text{ПК}n_i^{\Pi} = \{Xp_i^{\Pi}, \Phi n_i^{\Pi}, \Gamma br_i^{\Pi}, Kch_i^{\Pi}, Dn_i^{\Pi}, Op_i^{\Pi}\} \end{array}$$

$$\Phi M_j^{\text{Ч}} \dots\dots\dots$$

где Xp – характер поверхности (ось – O, плоскость – P); Φn – функциональная принадлежность (функциональная, технологическая поверхность); Γbr – габарит поверхности (длина и ширина для плоской поверхности, диаметр и длина); Kch – качество (калитет IT и шероховатость Ra); Dn – доступность для обработки в координатном направлении; Op – ориентация поверхности (координаты единичного вектора).

Оперирование с внешними параметрами в задаче синтеза маршрута обработки и схем базирования предлагается осуществлять с помощью *графов линейных размерных связей $R(x,y,z)$ главных поверхностей ФМ в трех координатных направлениях и графов угловых связей U обрабатываемых главных поверхностей ФМ по отношению к обрабатываемым и необрабатываемым на этапе типовой схемы обработки поверхностей*.

Множество линейных размерных связей $R(x,y,z)$ представляется в виде неориентированного графа типа дерева

$$R_{(x,y,z)} = (\bar{N}, V),$$

где $\bar{N} = \{\bar{n}_1, \bar{n}_2, \dots, \bar{n}_m\}$, $|\bar{N}| = m$ – множество вершин (главных поверхностей модуля); $V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$, $|V| = k$ – множество линейных размеров, соединяющих любые пары вершин, $(\bar{n}_i, \bar{n}_j) \in \bar{N}$, то есть множество ребер.

В рассмотренном графе множество ребер является неориентированными линиями, для которых не существует порядок соединения вершин: $v_i = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)$ или $v_i = (\bar{n}_j, \bar{n}_i)$.

Задачи внутримашинного представления информации предполагают использование матричного представления графов. Графы $R_{(x,y,z)}$ представляются с помощью матрицы смежности $R_{(x,y,z)}^{cm} = \|v_{i,j}\|_{m \times m}$, элементы которой образуются по правилу:

$$v_{i,j} = \begin{cases} A(T), \text{ если вершина } \bar{n}_i \text{ соединена с } \bar{n}_j \text{ ребром;} \\ 0 \text{ в противном случае,} \end{cases}$$

где $A(T)$ – соответствующий линейный размер и численное значение допуска на него; может в свою очередь иметь метку 1 или 2.

Таким образом, в общем виде матрица смежности поверхностей имеет вид

$$R_{(x,y,z)}^{cm} = \begin{array}{c} \bar{n}_1 \\ \bar{n}_2 \\ \dots \\ \bar{n}_i \\ \bar{n}_m \end{array} \left| \begin{array}{cccccc} \bar{n}_1 & \bar{n}_2 & \dots & \bar{n}_j & \bar{n}_m \\ 0 & A_{12} & \dots & 0 & A_{1m} \\ A_{21} & 0 & \dots & 0 & A_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{i1} & A_{i2} & \dots & A_{ij} & A_{im} \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{mj} & 0 \end{array} \right|$$

Строки и столбцы матрицы $R_{(x,y,z)}^{cm}$ соответствуют вершинам графа. На пересечении i -й строки и j -го столбца ставится элемент $r_{i,j}$, соответствующий численному значению допуска на размер, соединяющий вершины \bar{n}_i и \bar{n}_j . Метка 1 присваивается элементу матрицы в том случае, если между собой соединяются обрабатываемые вершины. Метка 2 присваивается элементу матрицы в том случае, если между собой соединяются вершины, обозначающие необрабатываемые поверхности и если ребро соединяет вершины, обозначающие обрабатываемую и необрабатываемую поверхности.

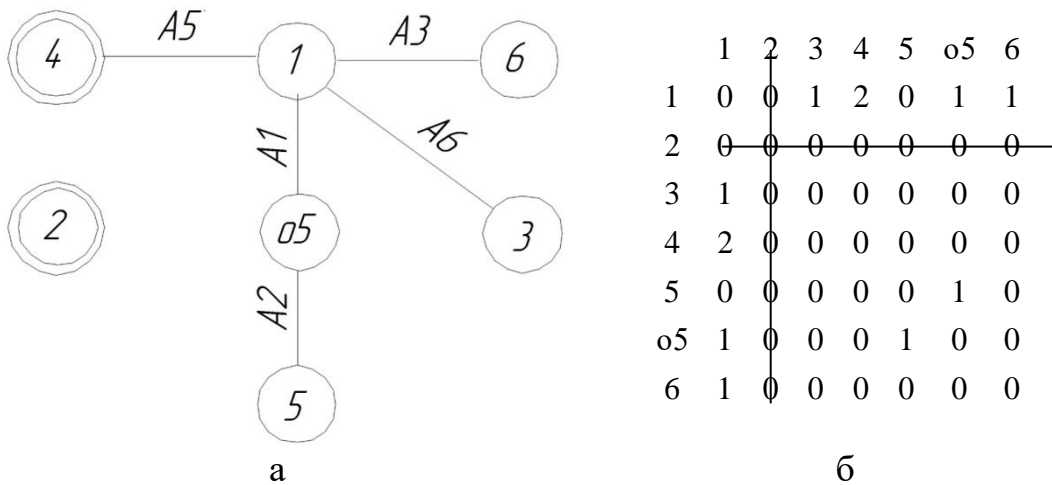
Эффективная работа САПР ТП возможна только при корректном вводе исходной конструкторской информации, в том числе и размерных связей. Для оценки правильности простановки линейных размеров с помощью матриц смежности предлагается проверять следующие условия:

- число вершин на графе должно быть на 1 больше числа ребер, т. е. должно выполняться условие $KI/2 = m - 1$, где KI – сумма строк и столбцов, не равных 0; если $KI/2 < m - 1$, то на чертеже недостаточно линейных размеров; если $KI/2 > m - 1$, то на чертеже $KI/2 - m + 1$ лишних размеров;

- на графе не должно быть оторванных вершин, т. е. в матрице не должно быть нулевой строки (столбца) (рис. 2.26, строка (столбец) 2);

- на графе должна быть одна линейная связь между комплексом обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей, т. е. строки (столбцы) матрицы, соответствующие номерам обрабатываемых вершин, должны иметь единственный элемент с меткой «2», а необрабатываемые – с меткой «1» (рис. 2.27, строки (столбцы) 1 и 05);

- на графе не должно быть замкнутых контуров; для проверки этого условия в строке (столбце) матрицы отыскиваются единственные ненулевые элементы (рис. 2.28 а, б); далее эти строки (столбцы) обнуляются (в графе отсекаются вершины) (см. рис. 2.28 в, г); в результате получится новая матрица, в которой соответствующие элементы строк (столбцов) нулевые. В новой матрице вновь выполняется обнуление конечных ветвей и т. д.; поиск прекращается при получении на двух последних шагах двух одинаковых матриц (см. рис. 2.28 д, е).



- – вершины, обозначающие обрабатываемые поверхности;
- ⊙ – вершины, обозначающие необрабатываемые поверхности.

Рисунок 2.26 – Пример проверки условия на оторванные вершины:
 а – граф линейных размеров, б – нулевая строка (столбец)
 в матрице смежности

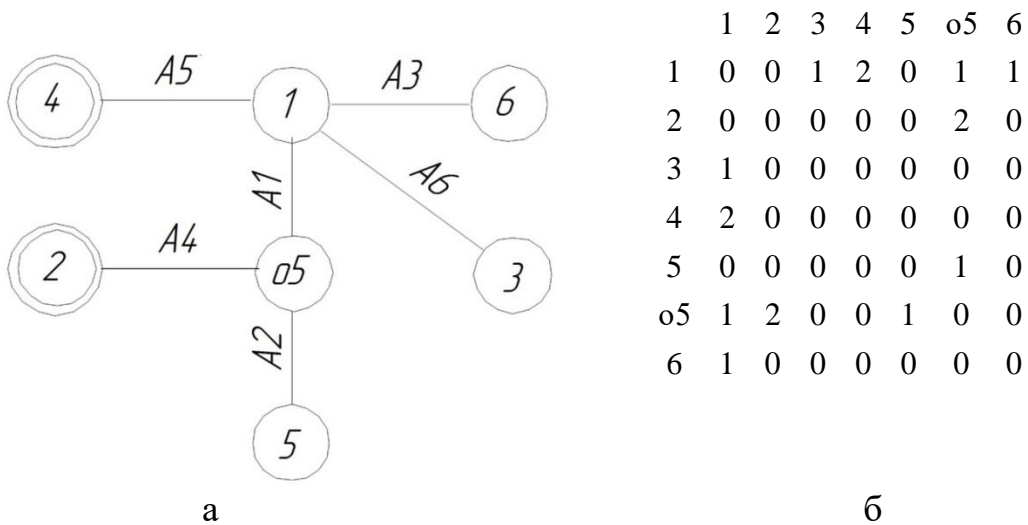
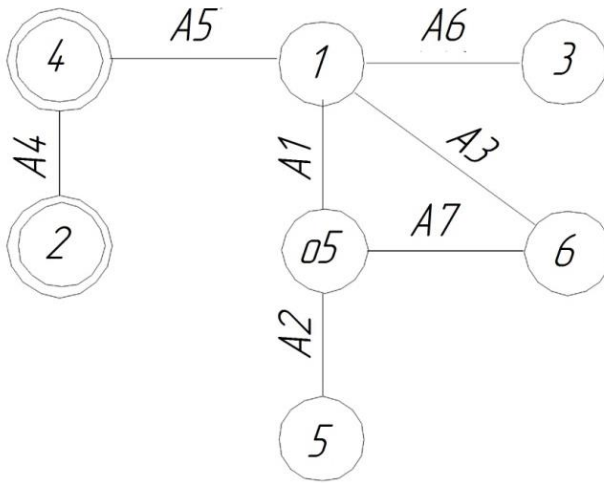


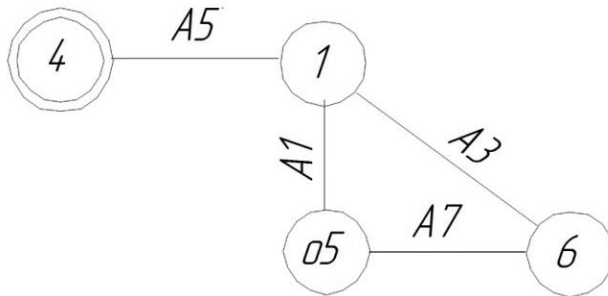
Рисунок 2.27 – Пример проверки условия на отсутствие связей между
 комплексом обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей:
 а – граф линейных размеров, б – строки (столбцы)
 в матрице смежности с меткой 2



а

	1	2	3	4	5	o5	6
1	0	0	1	2	0	1	1
2	0	0	0	2	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0
4	2	2	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0
o5	1	0	0	0	1	0	1
6	1	0	0	0	0	1	0

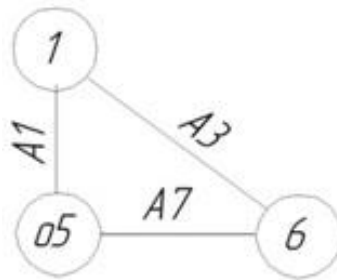
б



в

	1	2	3	4	5	o5	6
1	0	0	0	2	0	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	2	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
o5	1	0	0	0	0	0	1
6	1	0	0	0	0	1	0

г



д

	1	2	3	4	5	o5	6
1	0	0	0	0	0	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
o5	1	0	0	0	0	0	1
6	1	0	0	0	0	1	0

е

Рисунок 2.28 – Пример выявления замкнутого контура:
 а – граф линейных размеров с замкнутым контуром, б – строки (столбцы) в матрице смежности с единственным ненулевым элементом,
 в – граф с отсеченными вершинами, г – матрица смежности с обнуленными единственными ненулевыми элементами, д – замкнутый контур на графе, е – матрица смежности после обнулений, соответствующая замкнутому контуру на графе

Граф угловых связей отражает отношения перпендикулярностей и углов между главными поверхностями ФМ с учетом особенностей их технологического обеспечения. Стрелками на графе указывается отношение перпендикулярности или угла рассматриваемого ФМ к поверхности ФМ, являющейся базой ориентации. Направление стрелки указывает базовый элемент, по отношению к которому ориентируется поверхность.

Множество угловых связей можно представить в виде ориентированного графа

$$U = (\bar{N}, Y),$$

где $\bar{N} = \{\bar{n}_1, \bar{n}_2, \dots, \bar{n}_m\}$, $|\bar{N}| = m$ – множество вершин (главных поверхностей модуля); $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_l\}$, $|Y| = l$ – множество угловых размеров, соединяющих любые пары вершин, $(\bar{n}_i, \bar{n}_j) \in \bar{N}$, то есть множество дуг.

В рассмотренном графе множество дуг является ориентированными линиями, для которых существенен порядок соединения вершин. Причем каждая дуга $y_i \in Y$ определяется упорядоченной парой (кортежем длины два) вершин

$$y_i = \langle \bar{n}_i, \bar{n}_j \rangle.$$

Следует отметить, что $y_i = \langle \bar{n}_i, \bar{n}_j \rangle$ и $y_i = \langle \bar{n}_j, \bar{n}_i \rangle$ это различные дуги в графе Y .

Граф U предлагается представлять в виде матрицы инцидентности. Под матрицей инцидентности понимается прямоугольная таблица вида $U^{un} = \|y_{i,j}\|_{m \times l}$, элементы которой образуются по правилу

$$y_{i,j} = \begin{cases} T, & \text{если ребро } v_j \text{ выходит из вершины } \bar{n}_i; \\ -T, & \text{если ребро } v_j \text{ входит в вершину } \bar{n}_i; \\ 0, & \text{если } v_j \text{ и } \bar{n}_i \text{ не инцидентны,} \end{cases}$$

где T – соответствующий допуск углового расположения.

Графы угловых расположений формируются согласно принципам однозначности и корректности задания ориентации элементов конструкции относительно того или иного комплекта баз ориентации

(см. предыдущий раздел), а также исходя из следующих основных положений:

– за базу, к которой относится неуказанный допуск перпендикулярности в одном координатном направлении, принимается элемент (или его ось) из числа обрабатываемых или необрабатываемых конструктивных элементов (в зависимости от того, какой граф формируется), имеющий больший линейный размер в рассматриваемых перпендикулярных направлениях, а при одинаковых размерах – поверхность, имеющую 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 также определяются в зависимости от номинального размера и определяющего допуска размера;

– обрабатываемая главная плоскость ФМ (1) может ориентироваться в координатных направлениях относительно следующих компонентов комплекта баз ориентации:

а) двух явных плоскостей (рис. 2.29 а; плоскости 2 и 3);

б) явной плоскости и плоскости симметрии (рис. 2.29 б; плоскости 2 и 3);

в) оси и скрытой плоскости, проходящей через ось (в частности плоскости симметрии) (рис. 2.29 в; оси $o3$ и плоскости n);

г) плоскости, проходящей через оси двух отверстий и другой плоскости;

– главная ось ФМ может ориентироваться в координатных направлениях относительно следующих компонентов комплекта баз:

а) явной плоскости (рис. 2.30 а; плоскость 1);

б) оси и плоскости связанной с осью (в частности к плоскости симметрии) (рис. 2.30 б; ось $o1$ и плоскость n);

в) плоскости, проходящей через оси двух отверстий (в частности плоскости симметрии) (рис. 2.30 в; плоскость n и оси $o1$ и $o2$);

г) плоскости симметрии плоских элементов.

В связи с тем, что необходимое относительное расположение поверхностей может быть обеспечено прямым и косвенным путями граф угловых расположений может отражать угловую ориентацию не только отдельной поверхности ФМ, но и всего ФМ, у которого обычно известны внутренние локальные характеристики.

Прямое обеспечение заданных требований к расположению поверхностей может быть реализовано обработкой:

– от единой базы всех поверхностей, связанных указанными требованиями за один установ (рис. 2.31 а; поверхности 1), что характерно для обработки функционального модуля (ФМ) целиком (т. е. обеспечение внутренних параметров ФМ);

- от разных баз при использовании одной из связанных требованиями точности относительного расположения поверхностей в качестве базы (рис. 2.31 б);
- от единой базы за несколько установов (рис. 2.31 в).

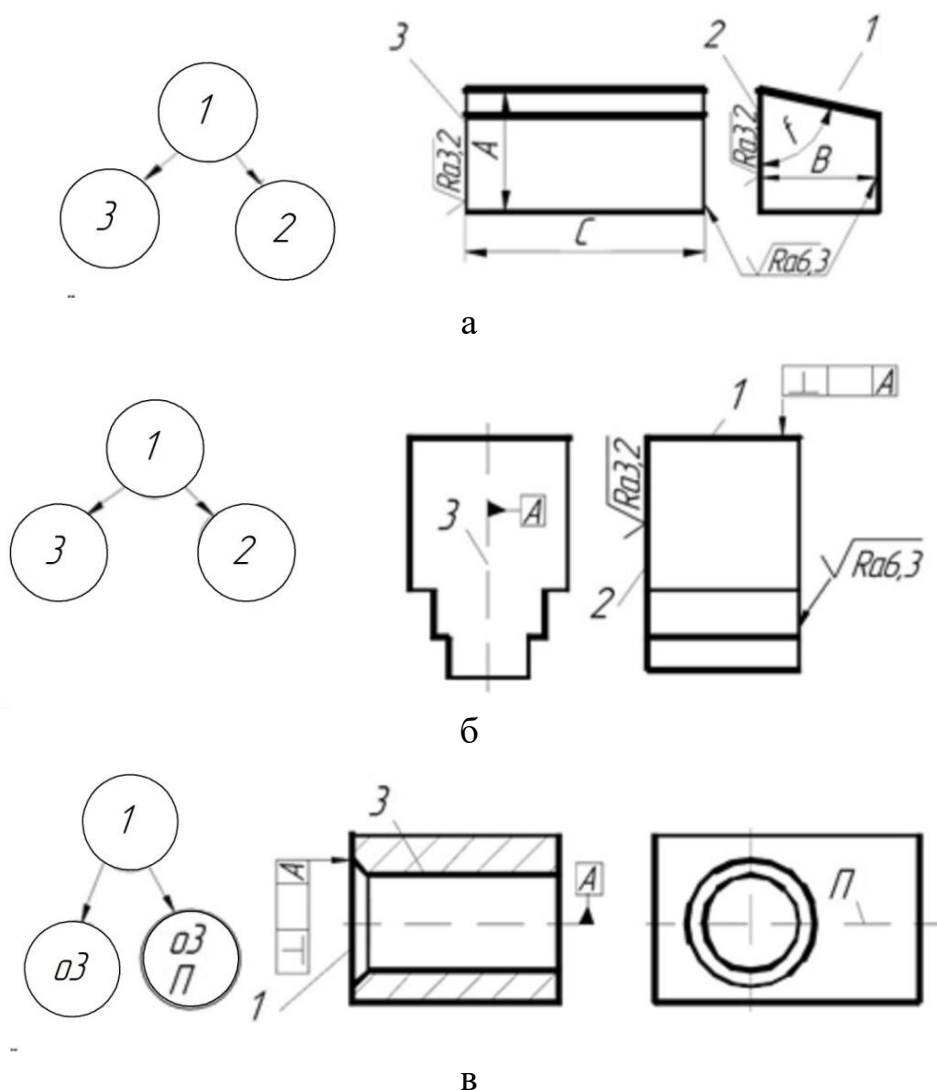


Рисунок 2.29 – Схема к определению перпендикулярности плоскости к компонентам комплекта баз ориентации:

- а – ориентация главной плоскости ФМ относительно двух явных плоскостей, б – ориентация главной плоскости ФМ относительно явной плоскости и плоскости симметрии, в – ориентация главной плоскости ФМ относительно оси и скрытой плоскости, проходящей через ось

Для случая, показанного на рисунке 2.31 а, на графе угловых расположений отражается ориентация торцевой главной поверхности модуля относительно его главной оси. Чтобы предусмотреть вариант, когда нет оборудования для одновременной обработки торца и отверстия, а заданные требования перпендикулярности можно обеспечить, используя в качестве базы ось либо торец, то на графе отражается ориентация

торцевой поверхности относительно другой «внешней» главной поверхности ФМ.

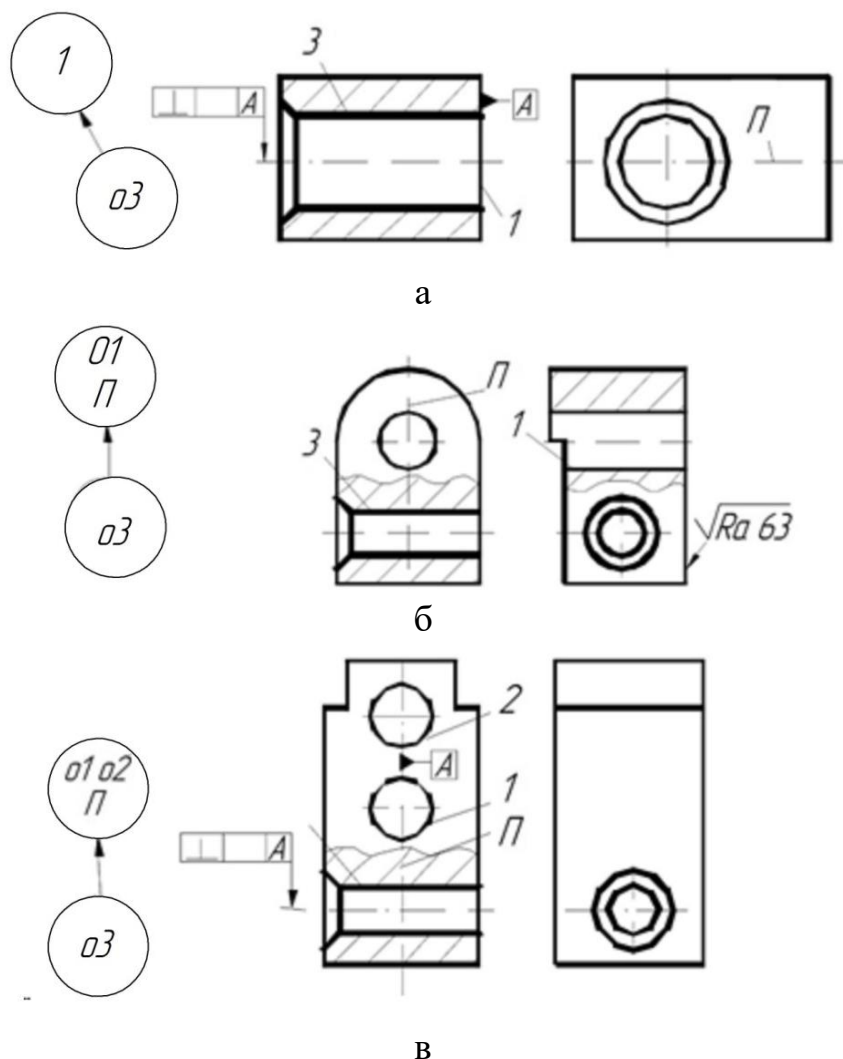


Рисунок 2.30 – Схема к определению перпендикулярности главной оси ФМ к компонентам комплекта баз ориентации:
 а – ориентация главной оси ФМ относительно явной плоскости,
 б – ориентация главной оси ФМ относительно оси и плоскости, связанной с осью, в – ориентация главной оси ФМ относительно плоскости, проходящей через оси двух отверстий

В случае, показанном на рисунок 2.31 б, при обработке выделенных поверхностей ФМ в качестве базы применяется предварительно обработанная поверхность 1. В случае, показанном на рисунке 2.31 в, невозможность обработки без специального приспособления и поворотного стола на горизонтально-расточном станке за один установ нескольких отверстий, параллельных базе А, и одного перпендикулярного к ней, вынуждает вести обработку последнего либо на другом станке, либо с установкой в другом приспособлении. Однако принимать решение о возможности обработки тех или иных функциональных модулей или

поверхностей на том или ином оборудовании необходимо на стадии проектирования операции.

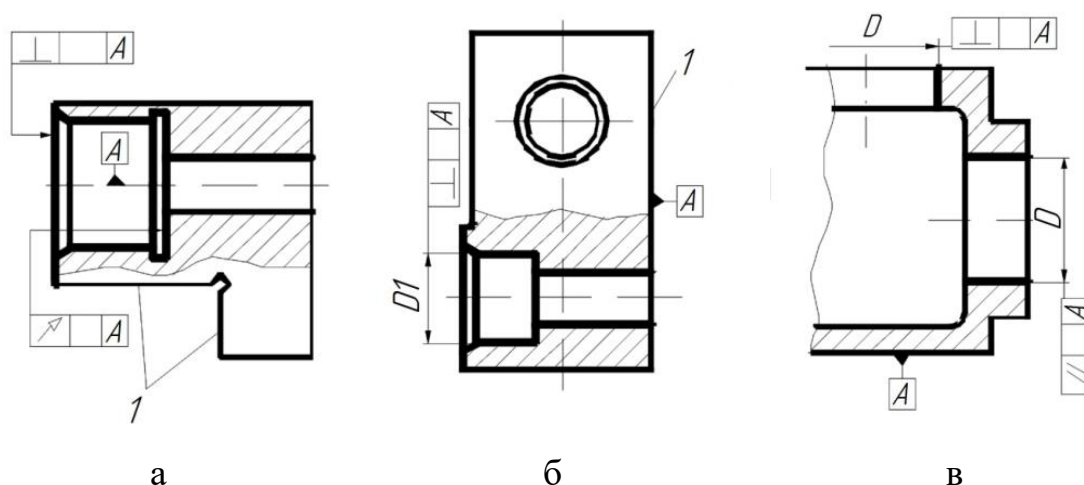


Рисунок 2.31 – Схема иллюстрации методов прямого обеспечения требований к расположению поверхностей:

а – единая база для всех поверхностей, связанных указанными требованиями за один установ, б – использование одной из связанных требованиями точности относительного расположения поверхностей в качестве базы; в – за несколько установов от единой базы

Для формального автоматического построения графов угловой ориентации главных поверхностей друг относительно друга предлагается использовать понятие единичного вектора плоскости или оси. Под единичным вектором плоскости будем понимать любой вектор единичной длины, перпендикулярный рассматриваемой плоскости и имеющий начало в нулевой точке отсчета системы координат. Под единичным вектором прямой будем понимать любой вектор единичной длины, параллельный рассматриваемой оси и имеющий начало в нулевой точке отсчета системы координат. Если определить координаты единичного вектора уравнения главной плоскости ФМ, проходящей через данную точку с заданным нормальным вектором, и единичного вектора уравнения прямой ФМ в каноническом виде (см. аналитическая геометрия), то можно определять показатели взаимного углового расположения любых пар поверхностей внутри функционального модуля и детали в целом. Определив базовые поверхности для ориентации и численные значения допусков (по протяженности поверхности в координатном направлении и ее шероховатости, см. выше), можно в автоматическом режиме сформировать графы угловых расположений (рис. 2.32).

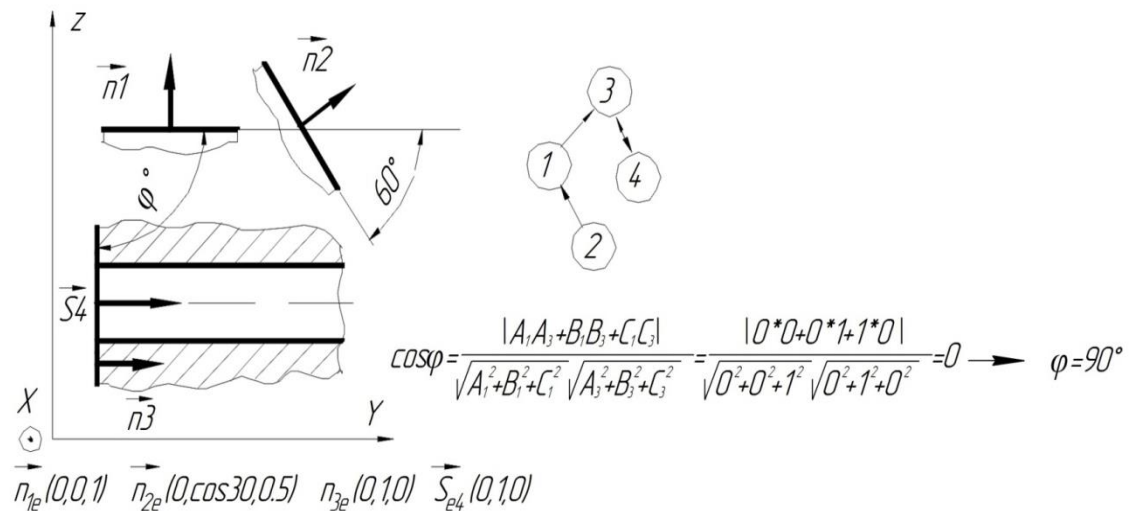


Рисунок 2.32 – Схема иллюстрации формального определения ориентации поверхностей

Угловую ориентацию ФМ относительно глобальной системы координат всей детали предлагается характеризовать углами поворота осей локальной системы координат ФМ относительно глобальной. Номинально оси локальной системы координат имеют одинаковое направление с осями глобальной системы. При повороте осей локальной системы координат относительно глобальной, значения ориентации единичных векторов можно легко пересчитать. Поворот оси локальной системы координат считается положительным, если осуществляется против часовой стрелки.

Исходными данными для проектирования является чертеж (эскиз) детали. На рисунках 2.33 и 2.34 приведены чертеж несложной по конфигурации детали и эскиз довольно сложного корпуса.

Для построения ГМЗ на этапе необходимо:

1. Используя ΦM_j и $T M_j$, сформировать модели модулей $\Phi M_j^P; \Phi M_j^C; \Phi M_j^O$ и детали $K D_j^P; K D_j^C; K D_j^O$ после выполнения этапа типовой схемы обработки (рисунки 2.35–2.37).

2. Задаются внутренние показатели ФМ $ПК n_i^P; ПК n_i^C; ПК n_i^O$.

3. Используя $ПК n_i$, $R(x,y,z)$ и U чертежа детали, формируются модели линейных и угловых связей (для первого метода) или линейных связей (для второго метода) на этапах.

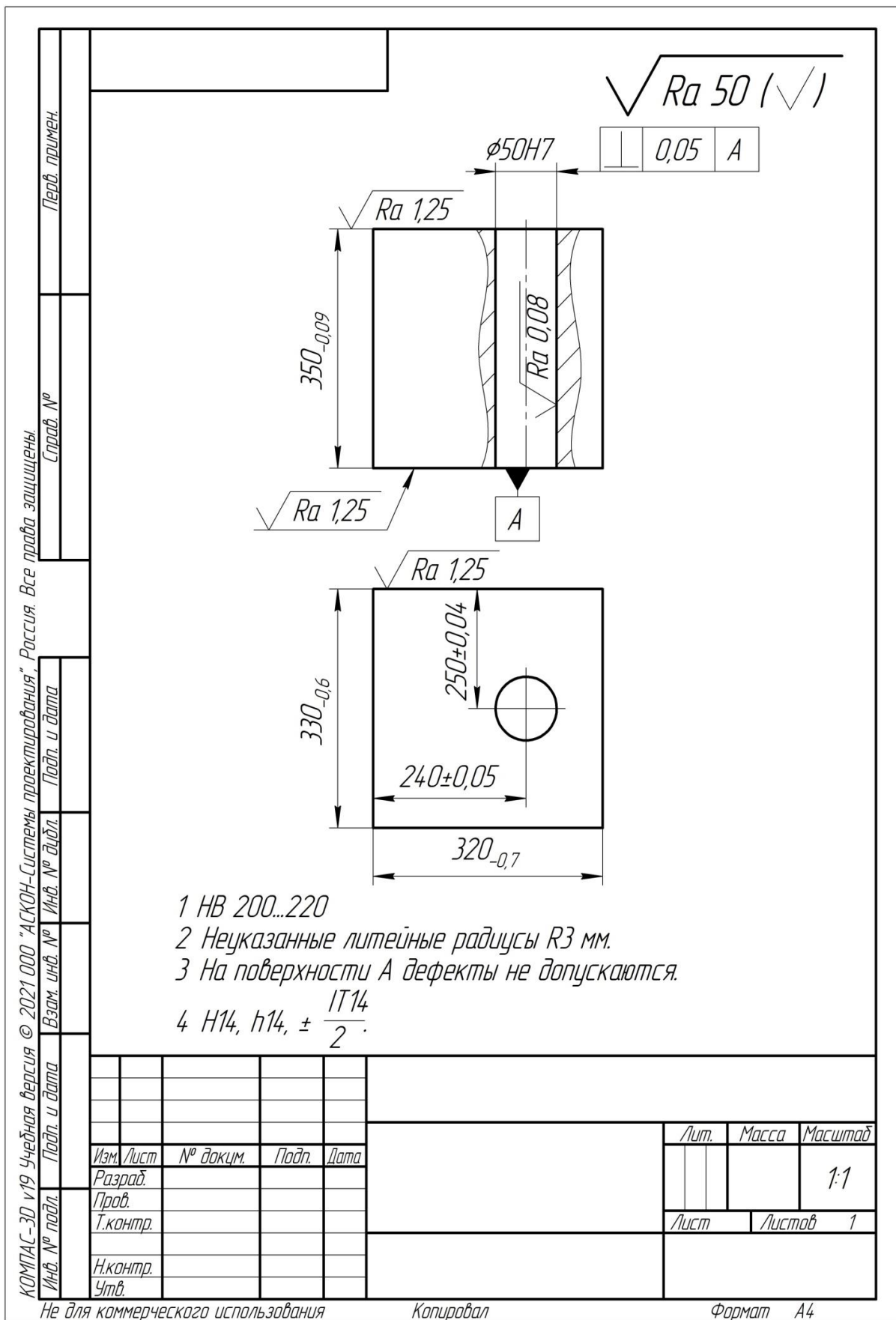


Рисунок 2.33 – Пример чертежа детали

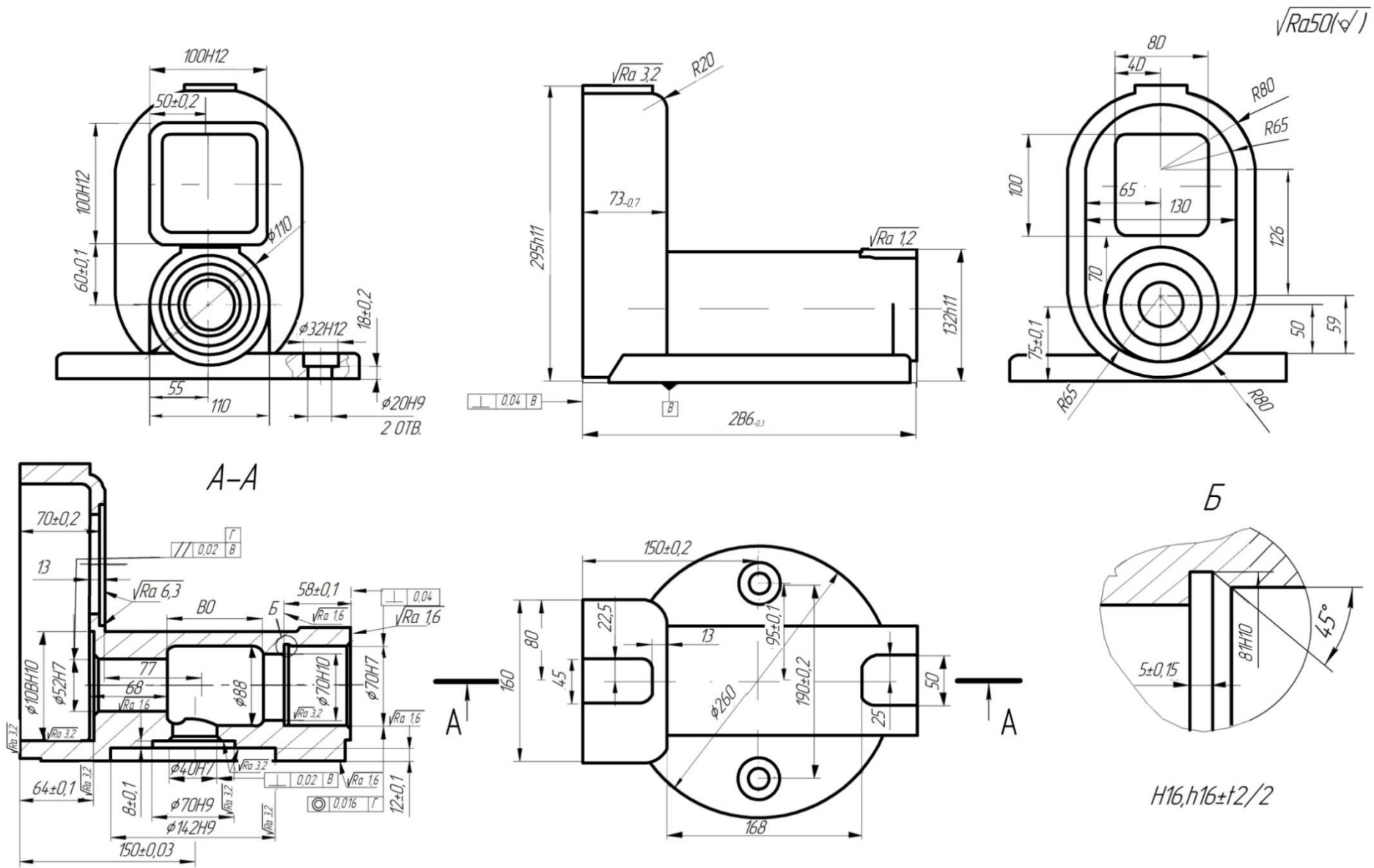


Рисунок 2.34 – Эскиз детали

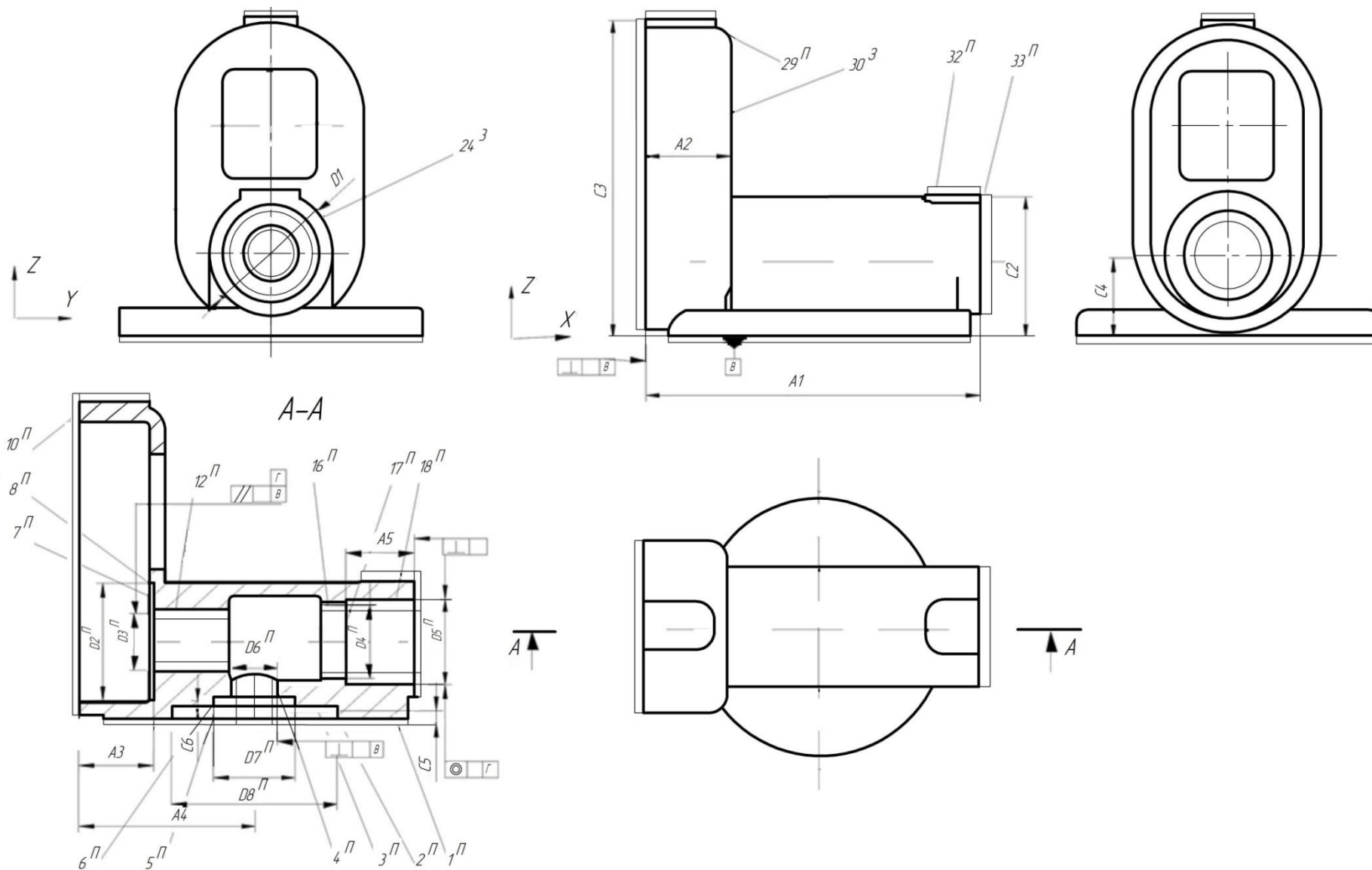


Рисунок 2.35 – Модель состояния объекта производства после предварительного этапа

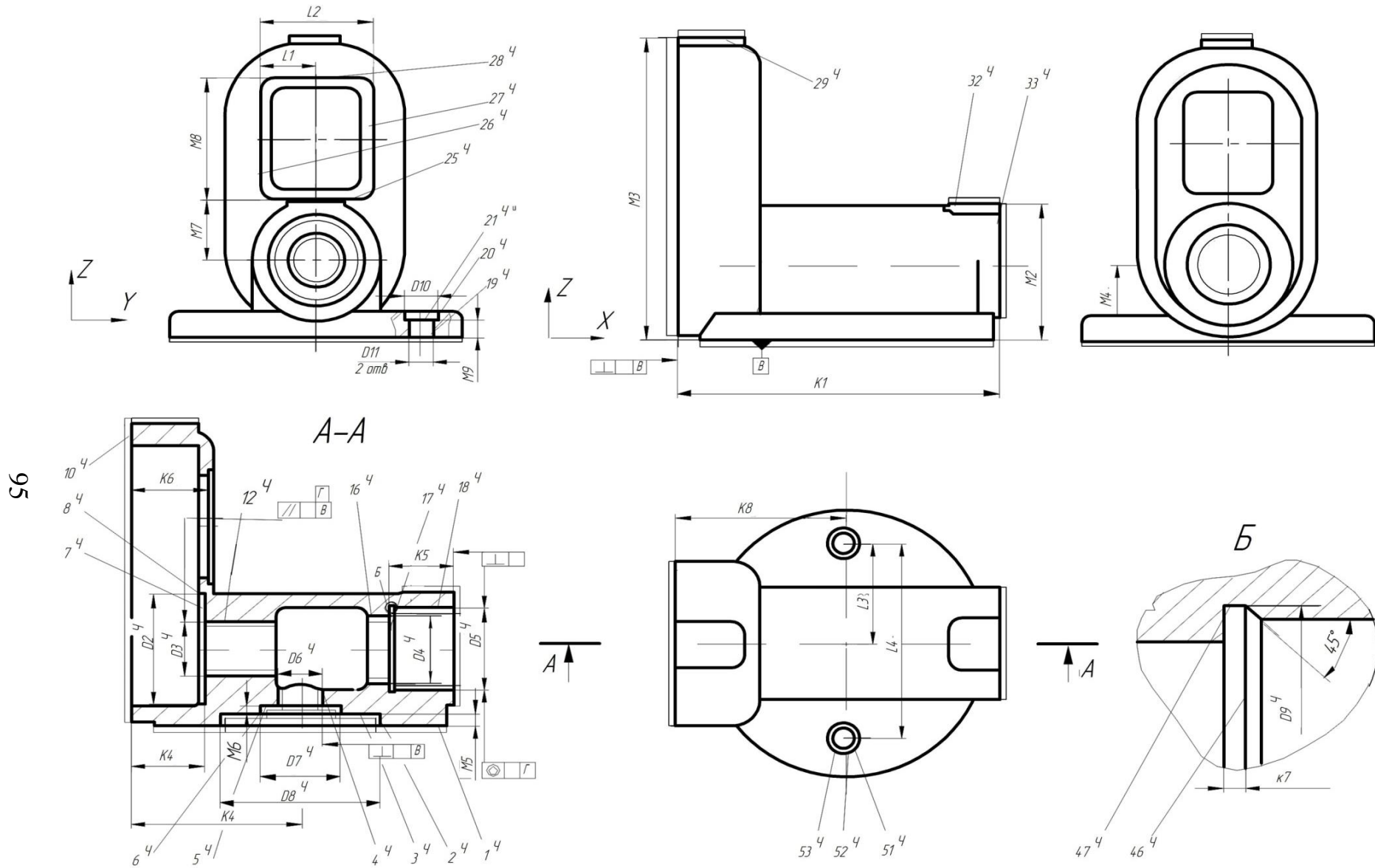


Рисунок 2.36 – Модель состояния объекта производства после чистового этапа

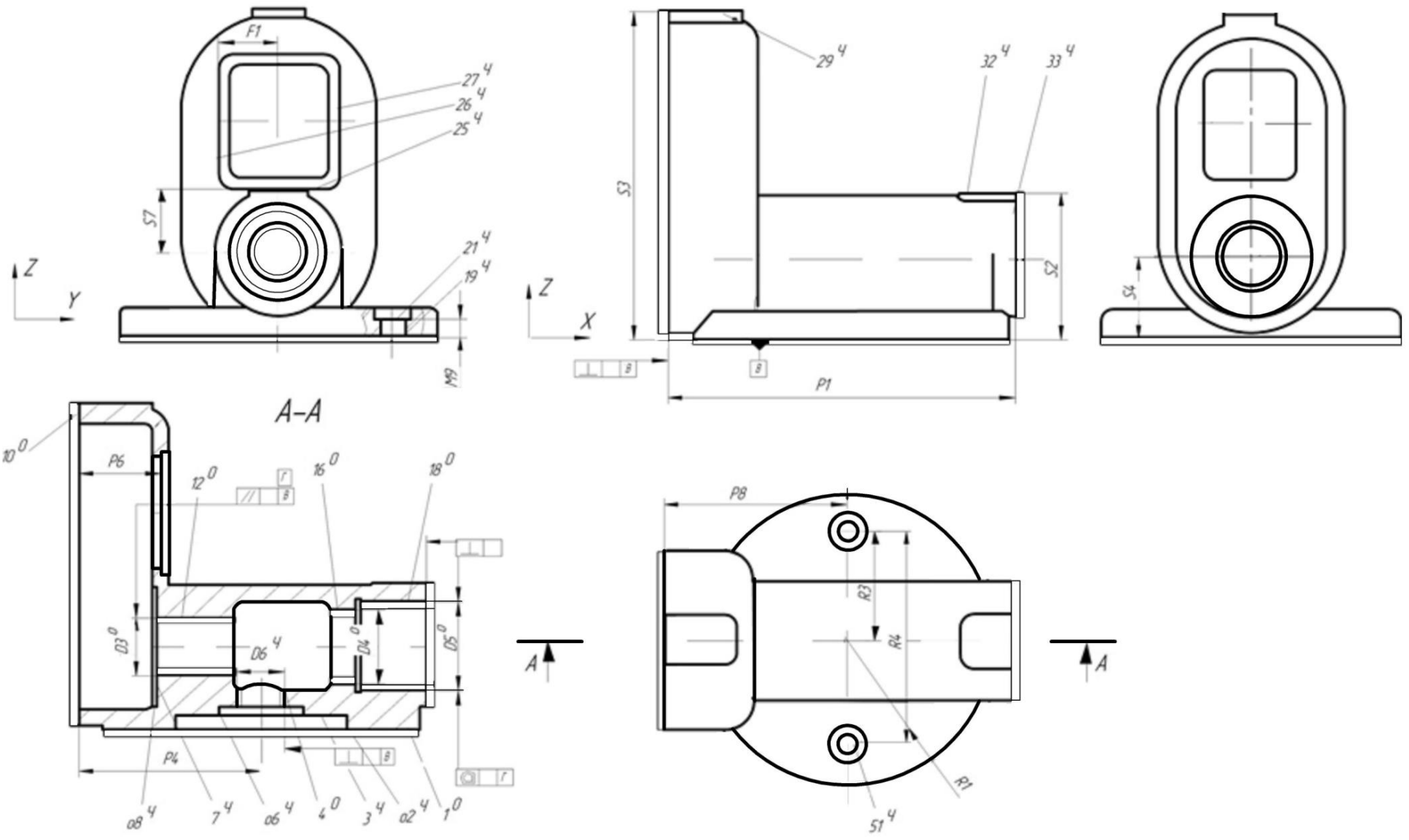
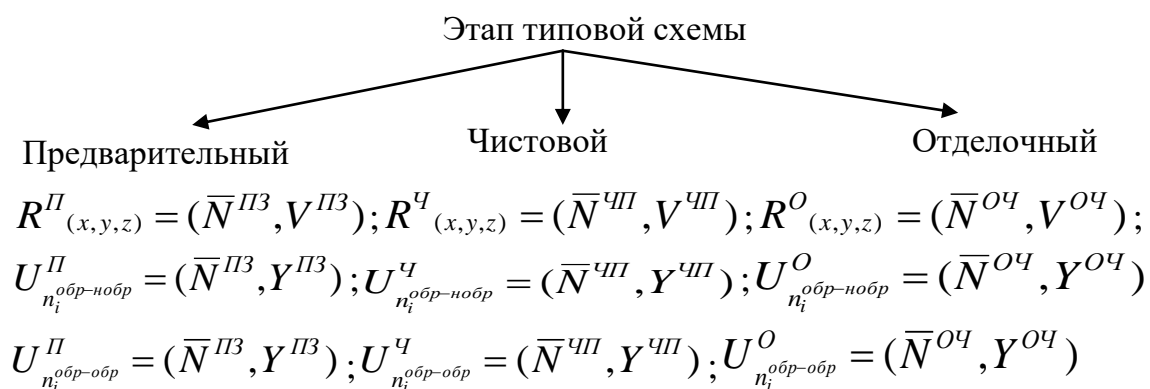


Рисунок 2.37 – Модель состояния объекта производства после отделочного этапа



где $З, П, Ч, О$ – индексы, обозначающие заготовительный, предварительный, чистовой и отделочный этапы; *обр-нобр* – индекс, обозначающий отношение между обрабатываемыми и необрабатываемыми поверхностями; *обр-обр* – индекс, обозначающий отношение между обрабатываемыми поверхностями.

Для уменьшения наследования погрешности обработки и сокращения числа звеньев технологических размерных цепей графы на этапах строятся по обозначениям размерных связей и допусков взаимного расположения с чертежа детали. Тем самым обеспечивается *принцип единства конструкторских и технологических баз*.

Линейные и угловые связи ориентируют поверхности как рассматриваемого этапа, так и поверхности предыдущего этапа, то есть поверхности, получаемые после завершения этапа, и поверхности, удаляемые на этапе. Поверхности, удаляемые на этапе, могут являться базами для обработки. Поэтому поверхностям присваиваются индексы этапов. Так, для предварительного этапа – это индексы Π и $З$, чистового – Ч и Π , отделочного – О и Ч . $\bar{N}^{\Pi 3}, \bar{N}^{\text{ЧП}}, \bar{N}^{\text{ОЧ}}$ – это *шесть* различных поверхностей (по две на каждом этапе). Под необрабатываемой поверхностью понимается поверхность, формообразование которой завершилось на предыдущем этапе изготовления.

В утилитарном плане это значит, что для построения ГМЗ на этапе (операции) обработки необходимо (рис. 2.38):

- построить контурное изображение (или трехмерную модель) ГМЗ на этапе (операции);
- произвести нумерацию поверхностей;
- разделить все поверхности на обрабатываемые на этапе (операции) и те, формообразование (обработка) которых было завершено на предыдущем этапе (операции), и произвести их выделение различной толщиной линий (цветом);
- произвести *обозначение размерных связей и допусков взаимного расположения*, обрабатываемых на рассматриваемом этапе (операции) и сформированных (обработанных) на предыдущем этапе (операции) поверхностей;

– построить графы обозначений линейных размерных связей $R_{(x,y,z)}$ и графы обозначений угловых расположений U обрабатываемых поверхностей к обрабатываемым и обрабатываемых поверхностей к необрабатываемым.

На рисунке 2.38 показана модель состояния заготовки детали (приведенной на рисунке 2.33) после предварительного этапа и соответствующие графы, а на рисунках 2.35–2.37 приведены графические модели состояния заготовки для предварительного, чистового и отделочного этапов со всеми необходимыми обозначениями.

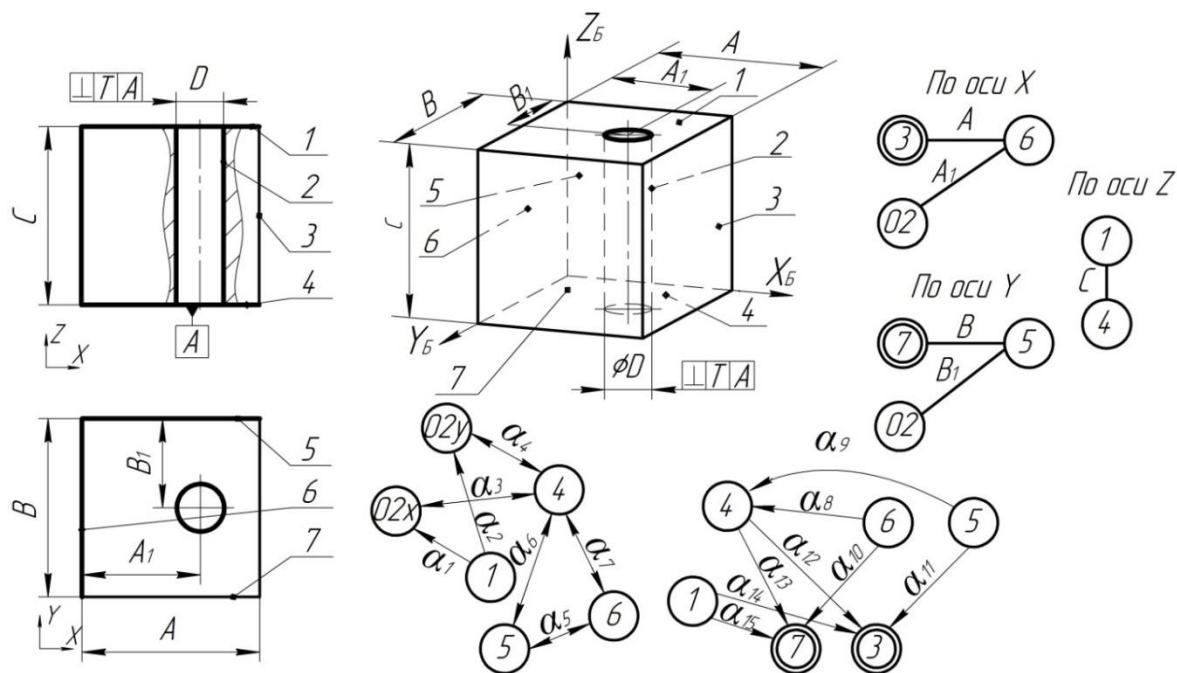


Рисунок 2.38 – ГМЗ на предварительном этапе обработки

Графы размерных связей для предварительного этапа (см. рис. 2.35) показаны на рисунке 2.39. На графах двойной окружностью обозначаются поверхности, формообразование которых завершилось на предыдущем этапе, одной – поверхности, получаемые на рассматриваемой операции и операции ее обработки на предыдущем этапе. Причем на графах для предварительного этапа достаточно отразить лишь одну поверхность, формообразование которой завершилось на заготовительном этапе и имеющую единственную размерную связь с комплексом обрабатываемых на этапе поверхностей. Внутренние и наружные главные поверхности ФМ вращения на графах представлены только своими осями, так как именно они участвуют в образовании комплектов технологических баз.

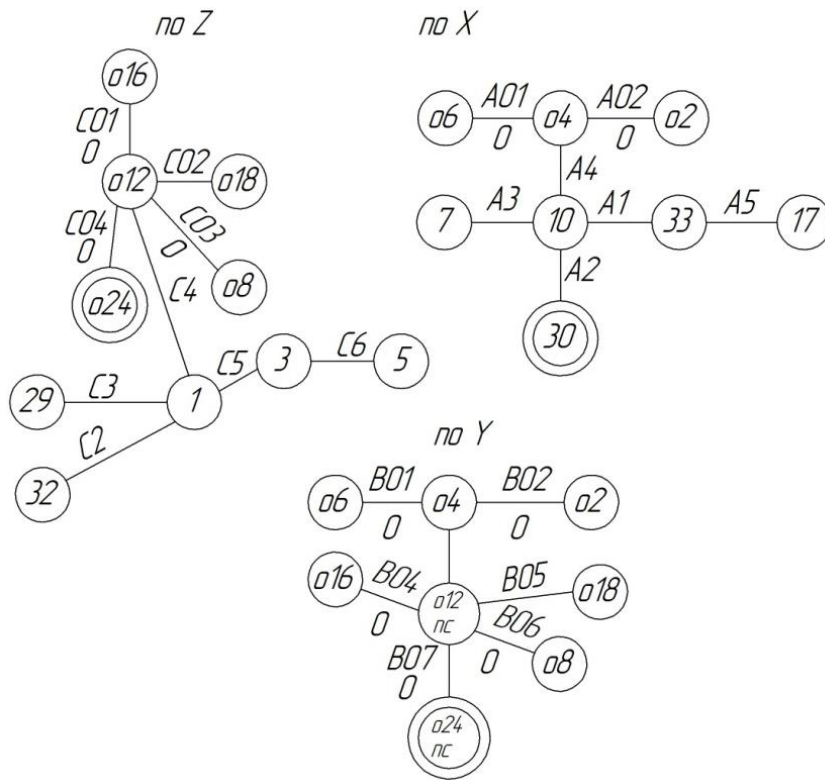


Рисунок 2.39 – Графы размерных связей для предварительного этапа обработки (исходные укороченные)

Графы угловых расположений обрабатываемых поверхностей к необрабатываемым и угловых расположений обрабатываемых поверхностей к обрабатываемым для рассматриваемой детали на предварительном этапе показаны на рисунке 2.40.

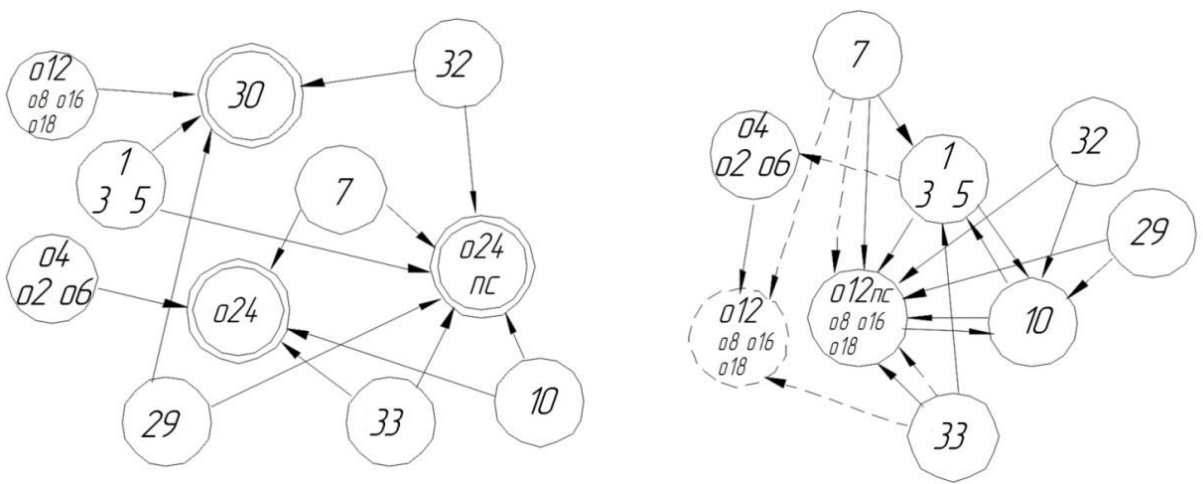


Рисунок 2.40 – Графы угловых расположений обрабатываемых поверхностей к необрабатываемым и угловых расположений обрабатываемых поверхностей к обрабатываемым для рассматриваемой детали на предварительном этапе

2.5.3 Определение порядка обработки и смены баз

Далее для реализации *первого метода* необходимо выполнить следующие шаги.

Шаг 1. Совместно анализируя графы для этапа, определяют комплекты баз для всех обрабатываемых на этапе главных осей (O) согласно алгоритму

$$\bar{n}_i(O) \rightarrow (R_X \wedge R_Y) \vee (R_Y \wedge R_Z) \vee (R_X \wedge R_Z);$$

$$\{v_{iX} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_X\} \wedge \{v_{iY} = (\bar{n}_i, \bar{n}_p)_Y\} \Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p;$$

$$\{v_{iX} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_X\} \wedge \{v_{iZ} = (\bar{n}_i, \bar{n}_p)_Z\} \Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p;$$

$$\{v_{iY} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_Y\} \wedge \{v_{iZ} = (\bar{n}_i, \bar{n}_p)_Z\} \Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p;$$

$$\bar{n}_i(O) \rightarrow U_{n_i^{обр-юбр}} \vee U_{n_i^{обр-обр}} \rightarrow y_i \Leftarrow \bar{n}_i, \bar{n}_l \Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p - \bar{n}_l.$$

Шаг 2. Совместно анализируя графы для этапа, определяют комплекты баз для всех обрабатываемых на этапе главных плоскостей (P) согласно алгоритму

$$\bar{n}_i(P) \rightarrow R_X \vee R_Y \vee R_Z;$$

$$\{v_{iX} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_X\} \Rightarrow \bar{n}_j \vee$$

$$\{v_{iY} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_Y\} \Rightarrow \bar{n}_j \vee \{v_{iX} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_X\} \Rightarrow \bar{n}_j;$$

$$\bar{n}_i(P) \rightarrow U_{n_i^{обр-юбр}} \vee U_{n_i^{обр-обр}} \rightarrow$$

$$\{y_i \Leftarrow \bar{n}_i, \bar{n}_p\} \wedge \{y_i \Leftarrow \bar{n}_i, \bar{n}_l\} \Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p - \bar{n}_l.$$

На рисунке 2.41 показана иллюстрация работы алгоритма формирования комплекта баз для поверхности вращения (оси), а на рисунке 2.42 – для плоскости.

То есть номер обрабатываемой поверхности (или оси обрабатываемой поверхности) отыскивается на графе (по одной оси для плоской поверхности, по двум координатным осям для оси) размерных связей. Определяется связь или связи с другими ближайшими поверхностями на графах размерных связей (кратчайшие пути на графе от рассматриваемой поверхности до других поверхностей). Далее для плоских поверхностей на графах угловых расположений обрабатываемых поверхностей комплект дополняется двумя поверхностями, для оси комплект дополняется одной поверхностью.

Так для плоскости 1 для модели заготовки на этапе (рис. 2.38) из графа линейных связей по Z отбирается поверхность 4, а с помощью графа угловых расположений состав формируется с помощью поверхностей 3 и 7. Для оси o2 из графов линейных связей по X и Y отбираются поверхности 5 и 6, а с помощью графа угловых расположений состав

формируется с помощью поверхности 4. В таблице 2.3 представлены составы баз ориентации для ГМЗ на предварительном этапе.

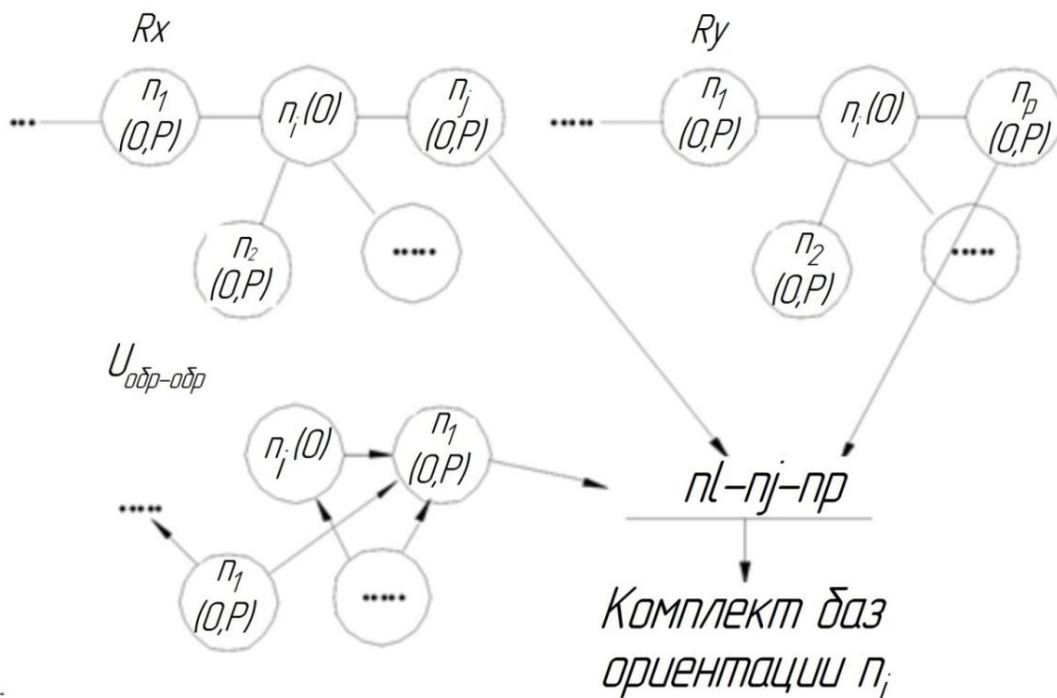


Рисунок 2.41 – Схема работы алгоритма определения комплекта баз ориентации для поверхности вращения (оси)

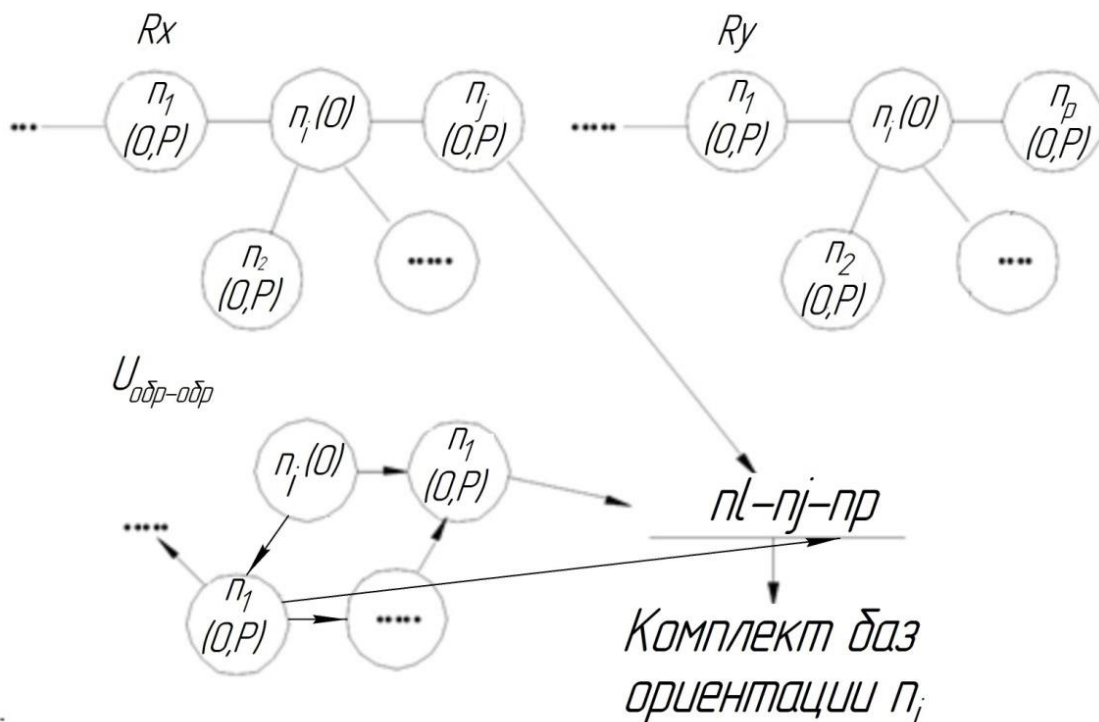


Рисунок 2.42 – Схема работы алгоритма определения комплекта баз ориентации для плоскости

Таблица 2.3 – Составы баз ориентации для рассматриваемой детали на предварительном этапе обработки

1	o2	4	5	6
4-3-7 4-o2_x-o2_y	5-6-4	1-o2_x-o2_y 1-5-6 1-3-7	o2_y-4-6 7-4-6 o2_y-4-3 7-4-3	o2_x-4-5 3-4-5 o2_x-4-7 3-4-7

Анализ составов баз ориентации для различных поверхностей и их трансформация по мере формирования операций дает возможность сформировать маршрут обработки и структуры операций. При анализе необходимо учитывать:

– аналогичность составов для обработки различных поверхностей (например для поверхностей 1, 5 и 6 идентичные составы **3-4-7**);

– возможность использования настроечной базы (при замене поверхности состава на предполагаемую в качестве настроечной должен сформироваться аналогичный состав; например, при замене поверхности 1 в составе **1-5-6** на поверхность 4 формируется состав **5-6-4**, аналогичный составу поверхности o2. При замене поверхности **o2_x** в составе **o2_x-4-5** на поверхность 6 формируется состав **6-4-5**, аналогичный составу поверхности o2);

– особенности выбора баз на первой операции (для решения задачи обеспечения взаимного расположения обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей в качестве базы на первой операции выбираются составы из максимального числа необрабатываемых поверхностей (на графах выделены двойным кружком, на ГМЗ – тонкими линиями, а в составах – не жирным цифрами);

– технологические возможности станка (выполняемые переходы, вектор доступности для обработки и др.).

Фрагмент таблицы возможных комплектов баз ориентации для детали (рис. 2.34) представлен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Комплекты баз ориентации рассматриваемой детали для предварительного этапа

<i>012 (08 016 018)</i>	<i>32</i>	<i>29</i>	<i>7</i>	<i>33</i>	<i>10</i>
<i>30-o24-o24nc</i>	<i>30-o24nc-1</i>	<i>30-o24nc-1</i>	<i>o24-o24nc-10</i>	<i>o24-o24nc-10</i>	<i>30-o24-o24nc</i>
<i>30-1-o24nc</i>	<i>o12nc-10-1</i>	<i>o12nc-10-1</i>	<i>1-o12nc-10</i>	<i>o24-o24nc-7</i>	<i>7-o24-o24nc</i>
<i>30-1-o4</i>			<i>o12-o12nc-10</i>	<i>1-o12nc-10</i>	<i>33-o24-o24nc</i>
<i>10- o24-o24nc</i>				<i>1-o12nc-7</i>	<i>33-1-o24nc</i>
<i>10-1-o24nc</i>				<i>1-o12nc-o12</i>	...
<i>10-1-o4</i>					
...					

Шаг 3. Распределение переходов по типоразмерам станков. Формирование массива выбора оборудования.

На рисунке 2.43 показан алгоритм распределения переходов по типоразмерам станков.

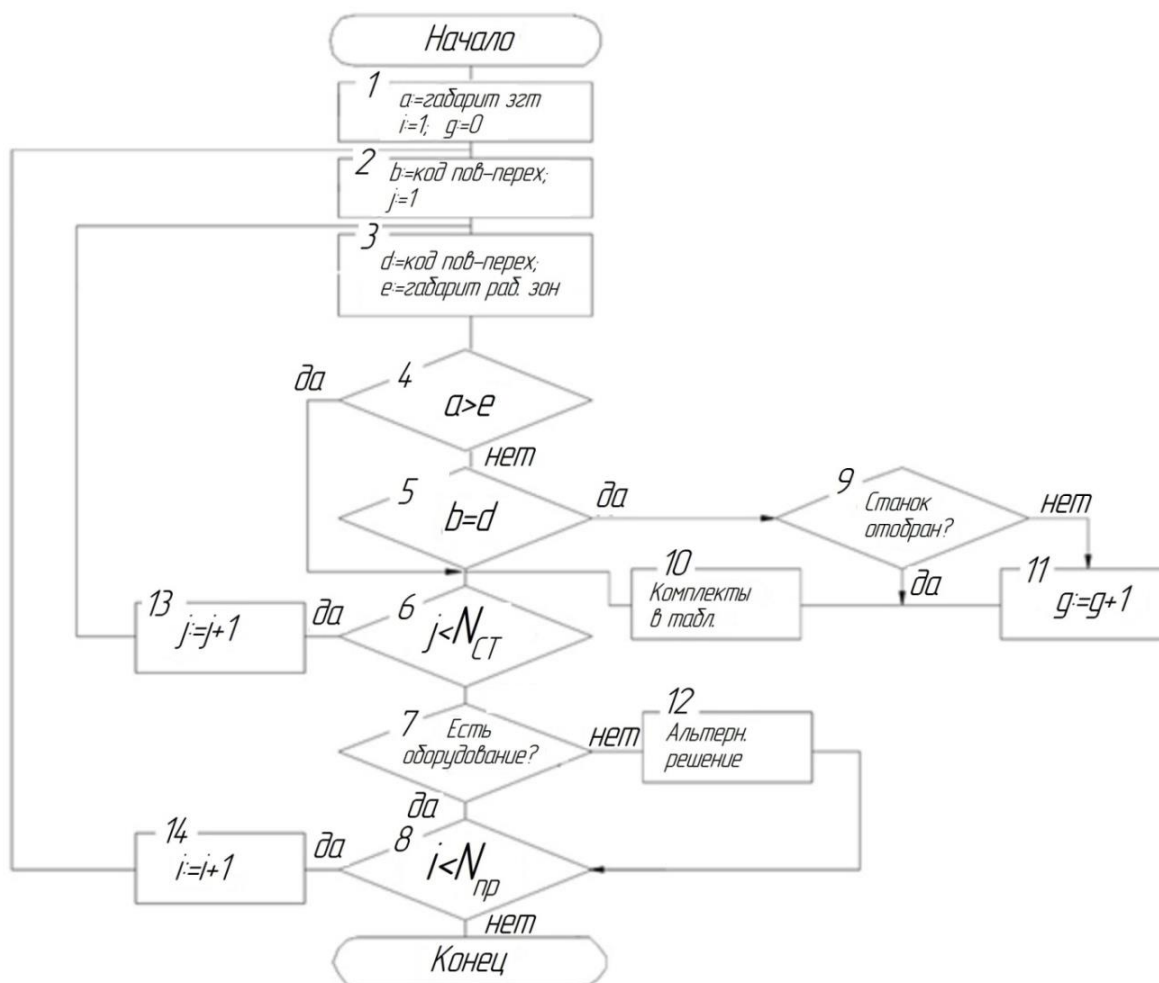


Рисунок 2.43 – Блок-схема распределения переходов по типоразмерам станков: i – порядковый номер перехода в этапе; $N_{пр}$ – количество переходов в этапе; j – номер станка в массиве; $N_{ст}$ – количество станков в массиве; q – номер отобранного станка

Характеристика очередного перехода (b) формируется в блоке 2 для сравнения с возможностями j -го станка (блок 3). Если габариты заготовки (a) меньше или равны габаритам рабочей зоны станка (e) (блок 4), в массиве переходов j -го станка есть соответствующий переход (d) (блок 5), а данный станок уже ранее был отобран для другого перехода (блок 9), то в таблицу выбора оборудования (табл. 2.5) записываются **комплекты баз ориентации** для обработки поверхности (блок 10) и рассматривается следующий станок. Если j -й станок ранее не отбирался (блок 9), то ему присваивается очередной номер q , который заносится в таблицу 2.5.

Так, для i -го перехода рассматриваются все станки из массива (блоки 6, 13). Если для выполнения данного перехода нет соответствующего оборудования (блок 7), то этот переход записывается в отдельный список для принятия альтернативного решения (блок 12). Альтернативным решением может быть: приобретение необходимого оборудования, модернизация одного из имеющихся станков, замена данного перехода другим.

Шаг 4. Выбор комплекта баз и станка для обработки на первой операции этапа.

Как было отмечено ранее, правильный выбор баз на первой операции этапа позволяет обеспечить заданное чертежом относительное расположение обрабатываемых и исходных поверхностей этапа, а также обеспечить равномерность снятия припуска на поверхности. Для решения задачи обеспечения равномерности припуска в качестве комплекта баз на первой операции этапа принимаются именно те поверхности, на которых необходимо обеспечить равномерное распределение припуска. Для решения задачи обеспечения заданного относительного расположения обрабатываемых и исходных поверхностей комплект баз на первой операции этапа должен состоять из поверхностей, обработанных на предыдущем этапе (или необрабатываемых вовсе для первой операции обработки) и необрабатываемых на данном этапе (в таблице выделяются жирным).

Таблица 2.5 – Формат таблицы выбора оборудования

Поверхность-переход i	Номер станка q			
	1	2	q	$N_{ст}$
1	$nl_{11}-nj_{11}-np_{11}$...	$nl_{11}-nj_{11}-np_{11}$ ...	...	...
2	$nl_{21}-nj_{21}-np_{21}$...	$nl_{21}-nj_{21}-np_{21}$ ...	...	...
i	$nl_{i1}-nj_{i1}-np_{i1}$...	$nl_{i1}-nj_{i1}-np_{i1}$ ...	...	...
$N_{пр}$	...	...	...	...

Для формального решения задачи определения комплектов баз на первой операции и выбора станка в столбцах таблицы выбора оборудования отыскиваются ячейки с идентичными комплектами, состоящими из исходных (необрабатываемых) поверхностей. За решение

принимается столбец (станок), в котором наибольшее количество ячеек (переходов) с идентичными комплектами.

Переходы с одинаковыми типоразмерами станков и технологических баз объединяются в группу, предварительно формируя тем самым первую операцию этапа.

Так, например, на предварительном этапе (табл. 2.6) на станке 1 необходимо сгруппировать поверхности o_{12} (o_8 o_{16} o_{18}) 10 (рис. 2.35), т. к. для этого станка в таблице выбора имеется наибольшее количество строк (переходов) с одинаковыми комплектами баз 30- o_{24} - $o_{24}пс$, состоящими только из исходных поверхностей.

Если для модели этапа нет комплектов, состоящих только из исходных поверхностей, то принимается комплект, состоящий из максимального их количества.

Если исходных (необрабатываемых) поверхностей на этапе нет, то в качестве комплекта баз на первой операции этапа следует использовать комплект для выполнения максимального количества переходов.

Если на поверхности при обработке необходимо равномерно распределить припуск (например, если поверхность подверглась цементации), то именно поверхности, на которых это надо сделать, должны входить в комплект баз на первой операции.

Таблица 2.6 – Пример фрагмента таблицы выбора оборудования на первой операции для предварительного этапа

Поверхность – переход	Номер станка q			
	1	2	3	...
<i>o12</i> <i>o8 o16 o18</i>	<i>30-o24-o24nc</i> <i>30-1-o24nc</i> <i>30-1-o4</i> <i>10- o24-o24nc</i> <i>10-1-o24nc</i> <i>10-1-o4</i> ...	-	<i>30-o24-o24nc</i> <i>30-1-o24nc</i> <i>30-1-o4</i> <i>10- o24-o24nc</i> <i>10-1-o24nc</i> <i>10-1-o4</i>...	...
32	<i>30-o24nc-1</i> <i>o12nc-10-1</i>	<i>30-o24nc-1</i> <i>o12nc-10-1</i>	-	...
29	-	<i>30-o24nc-1</i> <i>o12nc-10-1</i>	-	...
7	<i>o24-o24nc-10</i> <i>1-o12nc-10</i> <i>o12-o12nc-10</i>	-	<i>o24-o24nc-10</i> <i>1-o12nc-10</i> <i>o12-o12nc-10</i>	...
33	-	<i>o24-o24nc-10</i> <i>o24-o24nc-7</i> <i>1-o12nc-10</i> <i>1-o12nc-7</i> <i>1-o12nc-o12</i>	-	...
10	<i>30-o24-o24nc</i> <i>7-o24-o24nc</i> <i>33-o24-o24nc</i> <i>33-1-o24nc</i> ...	-	-	...

При определении комплектов баз необходимо определять поверхности, которые можно обработать от *настроечных* баз. Формально, это такие обрабатываемые поверхности в столбце «поверхность-переход» таблицы выбора оборудования, для которых имеется комплект баз, отличающийся одним (для плоской или двумя для оси) компонентом от комплекта другой поверхности и при подстановке этой поверхности в собственный комплект получается комплект баз, идентичный другому комплекту. Настроечной базой будет являться замененная поверхность.

Так, например, комплект *o24-o24nc-10* отличается от комплекта *o24-o24nc-30* для поверхностей *o12 (o8 o16 o18) 10* только одной поверхностью – *10*. Если в комплект *o24-o24nc-30* вместо поверхности *30*

подставить поверхность 10, то получится комплект, идентичный комплекту для поверхности 7. Поверхность 10 может являться настроечной базой.

Шаг 5. *Анализ возможности совмещения и последовательности выполнения переходов, отобранных для данного типоразмера станка.*

Анализ заключается в:

а) сравнении векторов доступности обрабатываемых функциональных модулей и координат доступности формообразующих элементов в пространстве рабочей зоны (т. е. анализ технологических возможностей станка с учетом оснащенности поворотным столом);

б) проверке наличия необходимого количества гнезд в револьверной головке или магазине станка;

в) ограничении по последовательности обработки.

Если установлено, что несколько переходов нельзя выполнить при использовании одного комплекта баз или за один установ, то в таких случаях уменьшается число переходов в операции вплоть до одного. Также предусматривается возможность рекомендации применения комбинированного инструмента.

Шаг 6. *Выбор станка и комплекта баз для второй операции.*

Для этого в столбцах «отсеченной» таблицы выбора оборудования отыскивается максимальное количество ячеек в столбце «поверхность-переходов» с идентичными комплектами, состоящими из обработанных на предыдущих операции поверхностей. Проверяется возможность использования настроечных баз.

«Отсеченная» таблица получается отбрасыванием от предыдущей таблицы строк, соответствующих обработанным поверхностям.

Переходы с одинаковыми типоразмерами станков и технологических баз объединяются в группу, формируя тем самым вторую операцию.

Если внутри этапа нельзя определить комплект технологических баз для обработки той или иной поверхности, состоящий только из обработанных на первой операции поверхностей, то используется комплект с максимальным их количеством.

Шаг 7. *Выбор станка и комплекта баз для последующих операций.*

Повторяется шаг 6.

Для реализации **второго метода** необходимо выполнить следующие действия.

Шаг 1. Формируется таблица возможности обработки групп поверхностей. Признаками группирования поверхностей являются вектор доступности поверхности для обработки, а также возможность обработки ряда поверхностей с одного установа на одном виде оборудования.

Пусть в исходных данных проекта имеются следующие станки: многооперационные станки с ЧПУ, вертикально-фрезерный, расточной,

карусельный, сверлильный. Если в задании имеются многооперационные станки с ЧПУ, оснащенные поворотным столом, тогда в одну группу могут включаться поверхности, расположенные с разных сторон детали. Группы для рассматриваемого этапа приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Возможность обработки групп поверхностей на станках

Станки	Группы поверхностей			
1. Многоцелевой с ЧПУ	o12,10,7,о8	1,3,5 o2,о4,о6	33,о16,о18,17	32,29
2. Карусельный	1,3,5 o2,о4,о6	33,о16,о18,17		
3. Горизонтально-расточной	1,3,5,о2,о4,о6	33,о16,о18,17	о12,7,о8,10	
4. Вертикально-фрезерный	32 29	10	1	33
5. Сверлильный	о12	о4	о16	
6. Многоцелевой с поворотным столом	o12,10,7,о8	1,3,5 o2,о4,о6	33,о16,о18,17	32,29
	o12,10,7,о8	o12,10,7,о8	o12,10,7,о8	1,3,5 o2,о4,о6
	1,3,5 o2,о4,о6	33,о16,о18,17	32,29	33,о16,о18,17
	1,3,5 o2,о4,о6 32,29	33,о16,о18,17 32,29		
	1,3,5 o2,о4,о6 33,о16,о18,17 32,29	o12,10,7,о8 33,о16,о18,17 32,29	o12,10,7,о8, 1,3,5 o2,о4,о6 32,29	o12,10,7,о8 33,о16,о18,17 1,3,5 o2,о4,о6

Шаг 2. Определение комплекта баз на первой операции. Графы, представленные на рисунке 2.39, указывают, что в качестве комплекта исходных баз ориентации следует назначить три исходные плоскости: 30, o24nc и o24 (o24nc, o24 – плоскость симметрии и плоскость, проходящая через поверхности вращения).

При определении возможности обработки поверхностей группы следует использовать понятие *настроечная база*. Настроечная база используется в случаях, когда с одного установка требуется обработать несколько поверхностей, связанных размерами и(или) относительными поворотами. Одна из них связана размером (относительным поворотом) с технологической базой ориентации. Именно эта поверхность будет для другой обрабатываемой поверхности *настроечной базой*.

Таким образом, на первой операции могут обрабатываться группы поверхностей: o12,10,7,о8 на многоцелевом станке № 1 (поверхность 10 является настроечной базой для поверхности 7, а o12 – для о8); 10 на фрезерном № 4; o12 на сверлильном № 5. При выборе варианта следует использовать *принцип концентрации* обработки. В данном случае от комплекта баз 30, o24nc и o24n следует обрабатывать поверхности o12, 10, 7, о8 на многоцелевом станке № 1 или расточном станке № 3. При прочих равных условиях формируется 2-3 конкурирующих варианта операций.

Шаг 3. Строятся «отсеченные» графы, удалив из начальных исходные поверхности, которые имеют связь с обработанными на первой

операции и не имеют таковой с еще не обработанными. Исключение делается для соосных поверхностей. Вид графов будет зависеть от того, какая из групп поверхностей обработана на первой операции.

При помощи «отсеченных» графов, используя правила определения комплектов технологических баз для первой операции, назначаются комплекты баз для последующих операций.

Указанные графы показаны на рисунке 2.44 вверху. Здесь обработанные на первой операции и оставленные в качестве возможных технологических баз поверхности отражаются «разорванной» окружностью.

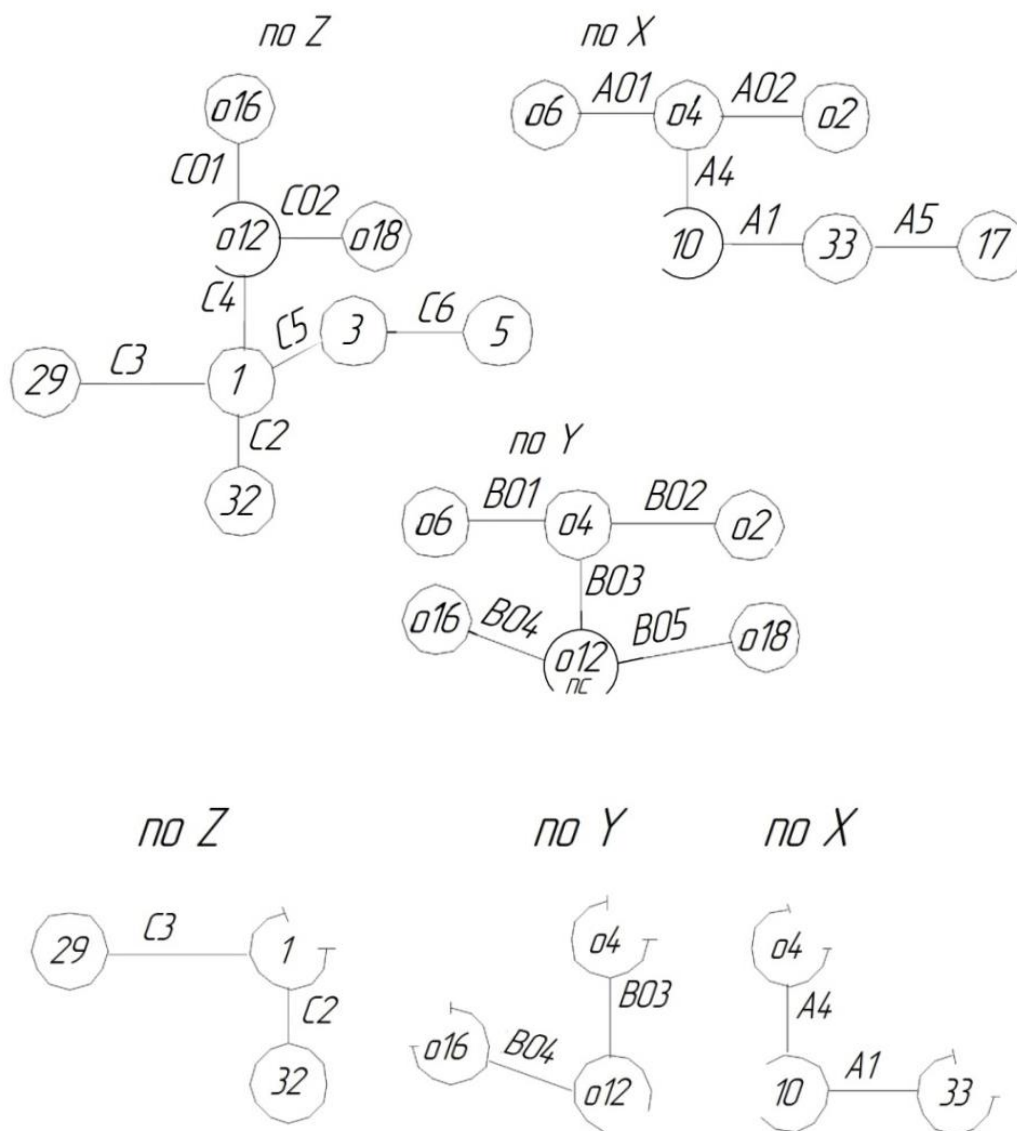


Рисунок 2.44 – Графы размерных связей для предварительного этапа обработки (первое и второе отсечения)

На второй операции от комплекта баз *o12nc*, *o12*, *10* могут обрабатываться группы поверхностей: *1*, *3*, *5*, *o2*, *o4*, *o6* – на многоцелевом станке № 1 либо на карусельном станке; *33*, *o16*, *o18*, *17* – на многоцелевом станке № 1 либо на расточном; *33* – на фрезерном; *1* – на фрезерном; *3 o4*, *o16* – на сверлильном.

Таким образом, от комплекта баз *o12nc*, *o12*, *10* нужно обрабатывать группы поверхностей *1*, *3*, *5*, *o2*, *o4*, *o6* и *33*, *o16*, *o18*, *17*, либо на различных станках, либо на одном, но за две операции. Пусть поверхности *1*, *3*, *5*, *o2*, *o4*, *o6* обрабатываются на карусельном станке, а поверхности *33*, *o16*, *o18*, *17* на многоцелевом станке.

В том случае, если был бы задан многоцелевой станок с поворотным столом, то рассмотренные группы поверхностей легко можно было бы обработать на одной операции.

Необработанными остаются поверхности *29*, *20*. Графы после последнего удаления «лишних» поверхностей показаны на рисунке 2.44 (внизу). Их особенность состоит в том, что на графе в каком-то координатном направлении может не остаться необработанных поверхностей. Тогда на соответствующих графах отражаются базы для предыдущей операции, а также главные поверхности, обработанные на предыдущем этапе. Именно эти поверхности и могут быть базами для рассматриваемой операции.

В рассматриваемом случае это поверхности *o16*, *o4*, *o12* (на графе по оси *Y*) и *o4*, *33*, *10* (на графе по оси *X*). Анализ графов показывает, что для обработки поверхностей *29*, *32* можно назначить комплектами технологических баз следующие группы поверхностей: *1*, *o4* и *o4* или *1*, *33* и *o4* и др.

Аналогичный анализ производится для чистового и отделочного этапов, причем следует учитывать ряд особенностей.

Так, если на рассматриваемом этапе (или по одной из осей этапа) нет исходных поверхностей, то на первой операции рекомендуется обрабатывать те поверхности, у которых на графах размерных связей больше всего связей с другими поверхностями. А в качестве технологических баз ориентации для первой операции выбирать поверхности, связанные с ними ребром. Примером такой ситуации является чистовой этап обработки детали, показанной на рисунке 2.36. Начальные графы размерных связей для этого этапа показаны на рисунке 2.45. Штриховой линией отмечены поверхности, которые отсутствуют в начале этапа и появятся в результате его реализации этапа.

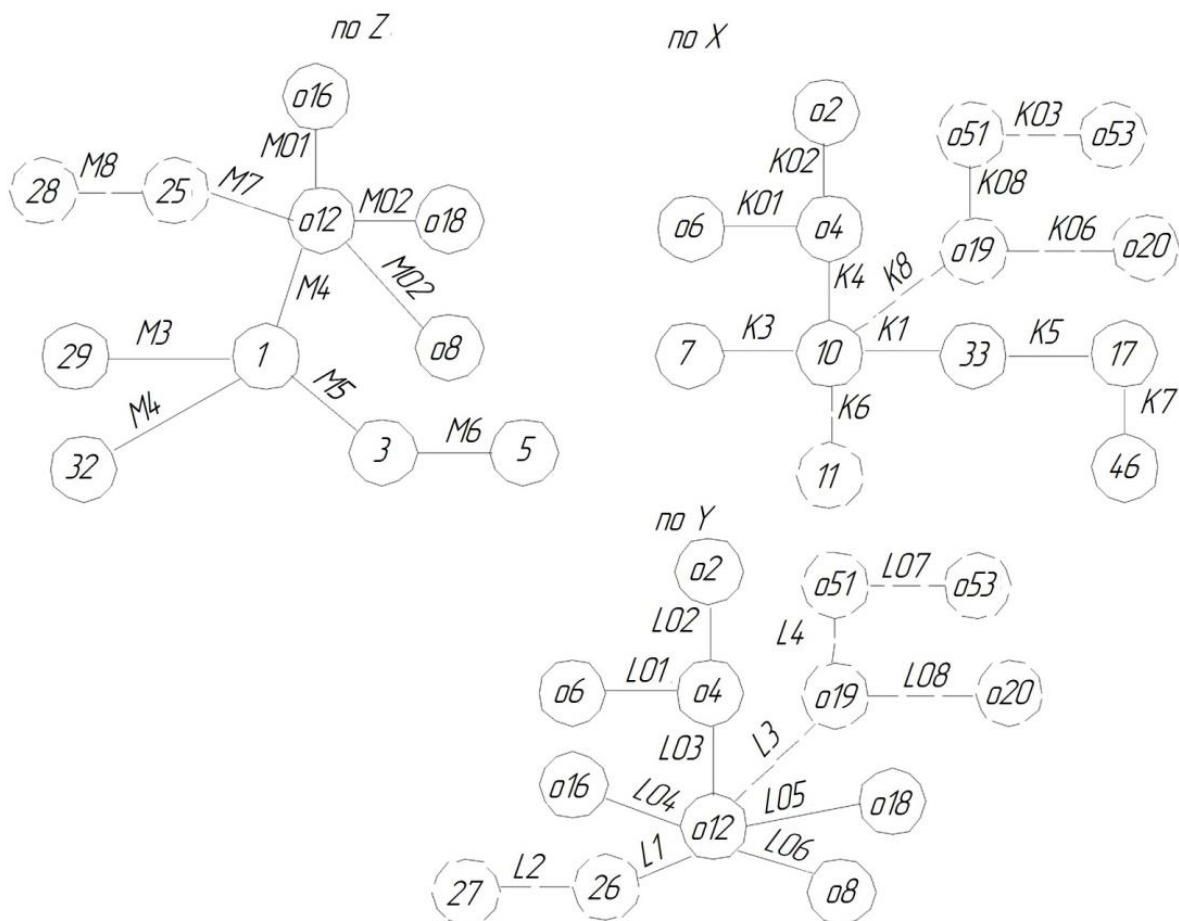


Рисунок 2.45 – Графы размерных связей для чистового этапа обработки (исходные)

Анализ графов показывает, что в первую очередь следует обрабатывать поверхности оси Z – 1 либо 012; по оси X – 10 либо 04; по оси Y – 04 либо 012. Группа поверхностей 012, 10, 08, 7 может быть обработана на станках № 1 и № 3, а базовыми поверхностями для их обработки могут быть выбраны поверхности по оси Z – 1, 018, 016, по оси X – 04, 7, 33, по оси Y – 08, 04, 016, 018. Пусть в качестве базы на первой операции используется комплект 1, 04, 04n. Дальнейшее назначение комплектов технологических баз осуществляется так же, как для предварительного этапа. Причем следует учитывать, что если размер на графе связывает две обрабатываемые поверхности и одна поверхность вначале является базой для другой, а на следующей операции от этой поверхности обрабатывается базовая, то на обозначении размера при формировании схем базирования и размерном анализе технологического процесса (см. далее операции 025, 035) ставятся индексы 1 и 2.

На чистовом и отделочном этапах правило единственной связи между комплексом обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей не выполняется. На графе по оси Z отделочного этапа (рис. 2.46) существует пять связей между комплексом обрабатываемых и необрабатыва-

емых на этапе поверхностей. В таких случаях после использования одной исходной поверхности в качестве базы из дальнейшего рассмотрения исключаются все исходные поверхности этапа (т. е. на графах отсекаются соответствующие им вершины).

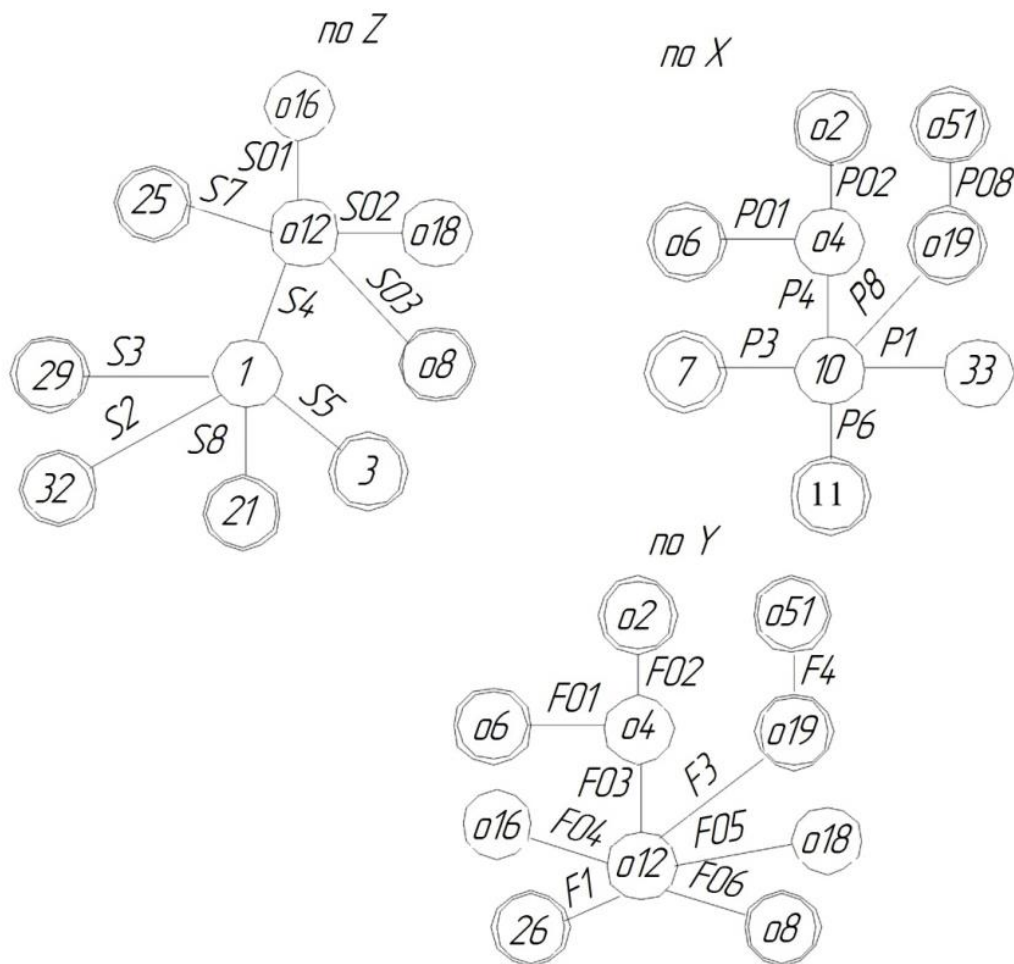


Рисунок 2.46 – Графы размерных связей для отделочного этапа обработки (исходные)

При выборе базы на первой операции следует также учитывать то, что если поверхность по оси является неудобной для базирования, то может быть принято решение об использовании одной из обрабатываемых на этапе поверхностей в качестве базы. Однако при определении вида компонента комплекта следует стремиться к тому, чтобы эта поверхность не использовалась в качестве установочной, двойной направляющей или направляющей баз.

По оси Z для первой операции отделочного этапа (рис. 2.46) целесообразно выбрать в качестве базы на первой операции поверхность 1, т. к. исходные для этапа главные поверхности 25, 29, 32, 21, 3, 08 модулей являются неразвитыми и затруднят процесс установки заготовки.

В результате работы методик формируется несколько вариантов маршрута обработки (табл. 2.8) с различными структурами операций. Окончательный выбор варианта последовательности обработки, содержания и структур, входящих в технологический процесс операций, можно осуществить на основе результатов технико-экономических расчетов.

Таблица 2.8 – Структура выходных параметров работы алгоритма

Обрабатываемые поверхности	i i-1 i-3	i-2 i-4	i+1 i+2	...
Комплект баз	nl_{i1}-nj_{i1}-np_{i1}	nl_{i-13}-nj_{i-13}-np_{i-13}	nl_{i+12}-nj_{i+12}-np_{i+12}	...
Станок	q	q+1	q-1	...

В таблице 2.9 представлена возможная последовательность обработки и смены баз для рассматриваемой детали.

Таблица 2.9 – Возможная последовательность обработки и смены баз для рассматриваемой детали

Этап	Операция	Станок	Комплект баз ориентации	Обрабатываемые поверхности
Предварительный	005	№ 1	№ 2 о24пс(O ₁ P _i), о24(O ₁),30(P _i)	о12,10,7,о8
	010	№ 2	№ 2 о12пс(O ₁ P _i),о12(O ₁),10(P _i)	1,3,5 о2,о4,о6
	015	№ 1	№ 2 о12пс(O ₁ P _i),о12(O ₁),10(P _i)	33,о16,о18,17
	020	№ 4	№ 2 1(P _i), о4 (O ₁),о4(O ₁ P _i)	32,29
Чистовой	030	№ 1	№ 2 1(P _i), о4 (O ₁),о4(O ₁ P _i)	о12,10,7,о8
	035	...	...	...
Отделочный	...	...	...	...

2.5.4 Синтез теоретических схем базирования

Первым шагом решения задачи *синтеза схемы базирования* является *идентификация комплекта баз ориентации*. Для этого рассматриваются поверхности сформированных на предыдущем этапе комплектов баз ориентации, и определяется характер поверхности [2–5].

Всего возможно четыре варианта сочетаний поверхностей (рис. 2.47). Далее определяется принадлежность рассматриваемого комплекта к одному из четырех описанных выше. Комплект О-О-О практически не используется.

Так для поверхности 1 (рис. 2.38) сформированы составы **4-3-7** – три взаимно перпендикулярные плоскости (состав № 1) и **4-о2_x-о2_y** – три плоскости, две из которых проходят через ось (иначе две плоскости и ось (состав № 2)). Для поверхности о2 сформирован состав **5-6-4** – три взаимно перпендикулярные плоскости (состав № 1) и т. д.

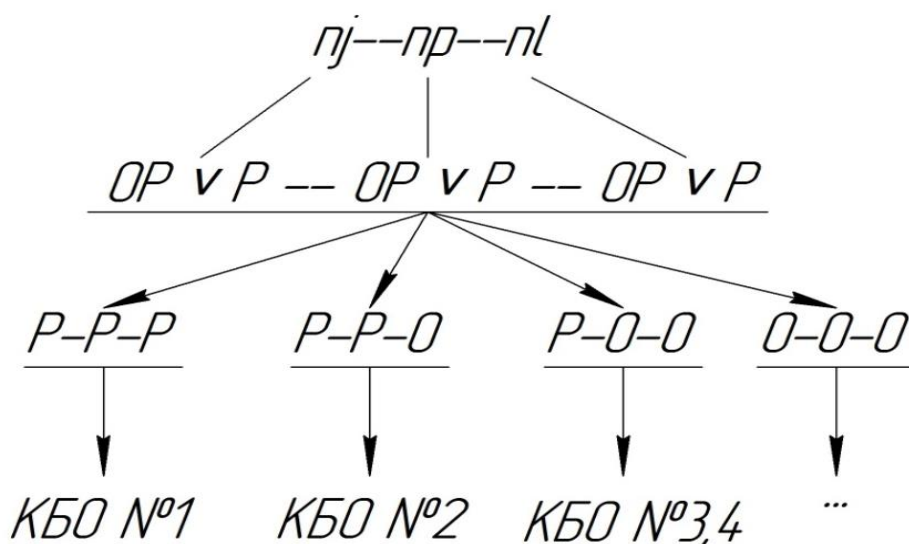


Рисунок 2.47 – Модель идентификации комплекта баз

Определение приоритета в обеспечении допуска взаимного расположения на операции осуществляется ранжированием численных значений допусков по компонентам состава баз, приведением к одной базовой длине (определение удельного допуска) и последующего определения главной базы (в зависимости от этого значения).

Например, если относительно состава баз, состоящего из трёх взаимно перпендикулярных плоскостей, ориентируется две оси и численное значение удельного допуска перпендикулярности одной оси относительно одной плоскости меньше численного значения допуска перпендикулярности второй оси относительно второй плоскости, то первая плоскость назначается главной базой (налагающей наибольшее число связей). Допуск взаимного расположения должен быть обеспечен относительно главной базы.

Для рассматриваемой заготовки поверхность о2 ориентируется относительно состава баз ориентации 5-6-4 с помощью двух линейных размеров и допуска перпендикулярности (табл. 2.3). В соответствии с ГОСТ 24643 допуск взаимного расположения не должен превышать доли допуска (25–60 %) на размер. Поэтому при обработке поверхности о2 приоритетным является допуск перпендикулярности поверхности о2 относительно поверхности 4.

Для рассматриваемого примера в случае одновременной обработки от состава 4-3-7 поверхностей 5 и 6 приоритетным является допуск перпендикулярности поверхностей 5 и 6 (заданный по умолчанию согласно ГОСТ 25069) относительно поверхности 4 (табл. 2.10).

Для поверхности о2 приоритетным является обеспечение допуска перпендикулярности.

Таблица 2.10 – Определение удельных допусков

Поверхность	Состав баз	Допуск		Длинна	Удельный допуск (на длине 1000 мм)
		Наименование	Значение		
6	4	⊥	0,4	350	1,143
	7	⊥	0,6	330	1,818
	3	Размер	0,7	350	2,000
5	4	⊥	0,4	350	1,143
	3	⊥	0,6	320	1,875
	7	Размер	0,6	350	1,714

Для определения числа налагаемых связей следует пользоваться следующими утверждениями.

Утверждение 1.

Схема базирования в первую очередь должна обеспечить заданную точность взаимного расположения, а затем точность размеров (расстояний). Если не обеспечена требуемая точность допуска взаимного расположения, то деталь неизбежно перейдет в неустранимый брак, линейные размеры можно компенсировать (подогнать).

Утверждение 2.

Технологическими базами могут быть назначены только те компоненты геометрической модели заготовки, от которых заданы расстояния (размеры) до обработанных поверхностей и по отношению к которым заданы показатели расположения (перпендикулярности, параллельности, угла) обработанной поверхности. Несоблюдение этого требования приведет к появлению погрешности схемы базирования.

Утверждение 3.

Точность взаимного (углового) расположения обеспечивают только тройная однонаправленная (установочная), двойная однонаправленная (направляющая) и четверная (двойная направляющая) базы, а также сочетания двойной разнонаправленной) двойной опорной и одиночной (опорной) баз и тройной разнонаправленной (тройной опорной) и одиночной (опорной) баз.

Например, на рисунке 2.48 поверхность, к которой указан допуск перпендикулярности обрабатываемой плоскости, взята в качестве одиночной базы. Одиночная база определяет точку, относительно которой под действием силы резания часть детали может поворачиваться. Тройная однонаправленная база определяет плоскость. В этом случае поворот исключается. Тем самым обеспечивается допуск взаимного расположения.

Утверждение 4. *Та технологическая база, по отношению к которой удельный допуск взаимного расположения или расстояний более жесткий, должна накладывать больше связей. Под удельным допуском*

понимается допуск взаимного расположения, приведенный к одной базовой длине.

Например, на рисунке 2.49 базовая поверхность Б определена тремя направляющими векторами 1–3 как плоскость. Направляющая база (точки 4, 5) определяет линию. Перпендикулярность относительно

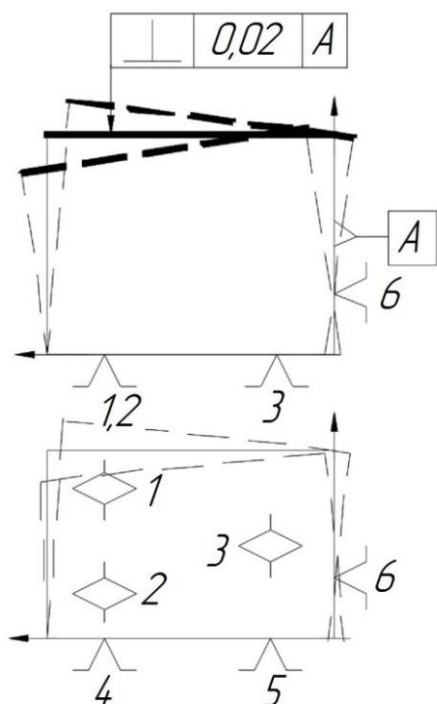


Рисунок 2.48 – Необеспечение допуска перпендикулярности

плоскости А, в отличие от плоскости Б, в полном объеме обеспечена быть не может. К плоскости Б допуск жестче, следовательно, его обеспечение является приоритетным для конструктора. Поэтому именно плоскость Б – тройная однонаправленная база.

В приложении Г приведен массив продукционных моделей для назначения вида компонентов комплекта технологических баз и массив примеров, состоящий из 62 алгоритмов. Структура массива полностью соответствует структуре схемы вариантов корректного задания допусков взаимного распо-

ложения (приложение А). Каждому варианту ставится в соответствие алгоритм определения вида компонента комплекта.

Пусть необходимо спроектировать схему базирования для операции обработки отверстия, на котором необходимо обеспечить допуск перпендикулярности оси относительно плоскости А (рис. 2.38).

Для состава баз ориентации № 1 алгоритм O_{10} гласит (приложение Г): если приоритетным является допуск перпендикулярности оси O_{10} относительно плоскости P_i , а допуск линейного размера относительно $P_{j(k)}$

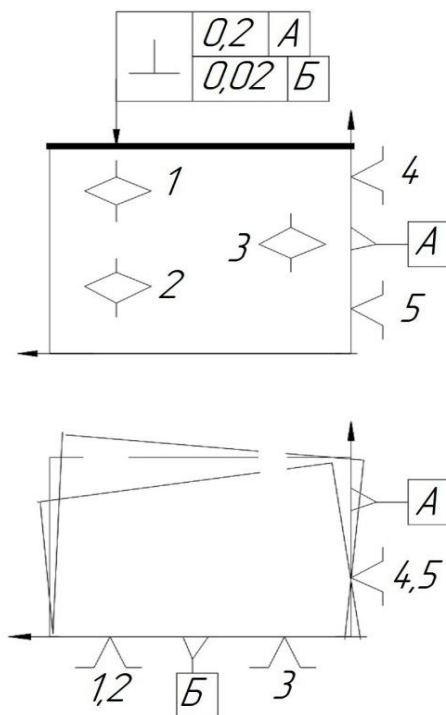


Рисунок 2.49 – Обеспечение требования к перпендикулярности плоскости

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) (рис. 2.50). Аналогично определяются компоненты комплекта, если задан допуск перпендикулярности относительно плоскости P_i либо плоскости P_k .

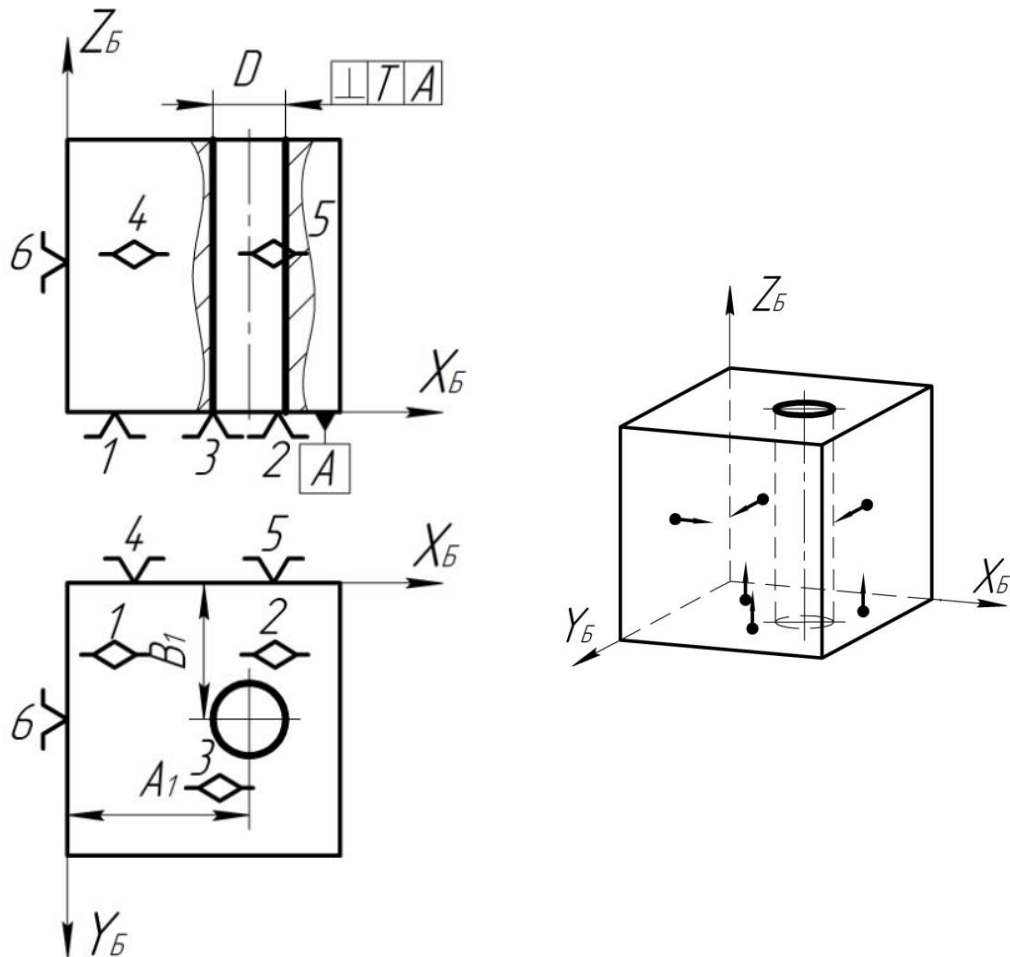


Рисунок 2.50 – Схема базирования рассматриваемой заготовки, разработанная по правилу O_{10} и модель расположения направляющих векторов

При использовании данной методики логика синтеза заменяется логикой выбора, что для человека не совсем удобно и наглядно. Поэтому неформально задачу синтеза схем базирования на операции можно решать согласно следующим шагам:

1. Построить контурное изображение ГМЗ с выделением обрабатываемых поверхностей и указанием обозначений размерных связей и допусков взаимного расположения, которые необходимо обеспечить на операции.

2. Определить состав баз ориентации.

3. Определить главную базовую поверхность.

4. Наложить на главную базовую поверхность максимальное число связей (тройная однонаправленная (установочная), четверная (двойная направляющая), тройная разнонаправленная (тройная опорная) в сочетании с направляющей).

5. Дополнить выбранную базу до комплекта.

6. Сформировать базовую систему координат.

Для рассматриваемой корпусной детали (рис. 2.34) на операции 005 от баз ориентации (O_i, P_j , протяженность 168), $30 P_i$, протяженность 270x160) обрабатываются поверхности 10 (допуск перпендикулярности (\perp) относительно $o24nc (O_i) - 0,20$, протяженность 160; допуск перпендикулярности (\perp) относительно $o24 (P_j) - 0,25$, протяженность 295; допуск на размер (p) относительно $30 (P_i) - 0,7$, протяженность 295) и $o12$ (допуск соосности (\odot) в направлении $o24nc (O_i) - 0,8$, протяженность 68; допуск соосности (\odot) в направлении $o24 (P_j) - 0,8$, протяженность 68; допуск перпендикулярности (\perp) относительно $30 (P_i) - 0,20$, протяженность 68). Для определения приведенного допуска значение допуска обрабатываемой поверхности, умноженное на 1000, делится на произведение протяженностей соответствующих обрабатываемой и базовой поверхностей. Та базовая поверхность, приведенный допуск по отношению к которой более жесткий, должна накладывать больше связей. На операции 005 приведенный допуск в направлении $o24nc (O_i)$ самый жесткий – 0,074, следовательно – эта ось является двойной направляющей базой, две другие базы ориентации – опорные базы.

Данные анализа для рассматриваемой детали представлены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Определение числа связей

Операция	База			Обрабатываемые поверхности				Приведенный допуск (к8х10000/к3хк6)	Вид компонента
	Элемент комплекта баз	Протяженность	К баз	Ориентируемые гл. пов.	Протяженность	Вид допуска	Значение		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
005	$o24nc$ (ось)	168	O_i	10 $o12$	160 68	$\perp \odot$	0,20 0,8	0,074 0,53	дв. напр. опорн.
	$o24$	168	P_j	10 $o12$	295 68	$\perp \odot$	0,25 0,8	0,05 0,53	
	30 (плоск.)	270x160	P_i	10 $o12$	295 68	$P \perp$	0,7 0,6	0,087 0,32	опорн.
010	10	295x160	P_i	1 $o4$	260 30	$\perp P$	0,04 0,06	0,0052 0,068	установочн
	$o12nc$ (ось)	68	O_i	1 $o4$	260 30	$\perp P$	0,2 0,16	0,113 0,78	дв. опорная опорная
	$o12$	68	P_j	1 $o4$	260 30	$P \perp$	0,2 0,12	0,113 0,59	
...

В таблице 2.12 представлен маршрут обработки рассматриваемой детали.

Таблица 2.12 – Маршрут обработки заготовки

Этап	Опера-ция	Теоретическая схема базирования
1	2	3
1	005	
1	010	
1	015	

Окончание таблицы 2.12

4	030		
...
4	040		
...

2.5.5 Синтез теоретических схем установки

Для синтеза схемы установки предлагается применять метод типовых технических решений, при реализации которого элементы комплекта схемы базирования заменяются соответствующими элементами схемы установки. Замена элемента схемы базирования элементом схемы установки осуществляется с помощью таблиц соответствия и сокращения вариантов технических решений (рис. 2.51, табл. 2.13, приложение В и Д). Случаи, в которых элемент схемы базирования заменяется ре-

жушим инструментом, так называемая передача функций базирующей подсистемы – инструменту (бесцентровое шлифование, протягивание отверстия короткой втулки и др.), в таблице соответствия не представлены ввиду редкого использования.

При базировании выверкой по разметке (единичное производство) установочными компонентами являются домкраты, подкладки, клинья, штангенрейсмас, универсальные измерительные средства.

Для реализации метода синтеза технических решений необходимо отобрать варианты установочных компонентов для реализации проектных баз комплекта ТБ. Выбранные компоненты заносятся в морфологическую таблицу 2.14. Здесь Ф1, Ф2, Ф3 – функции наложения определенного числа связей или вида технологических баз.



Рисунок 2.51 – Фрагмент схемы соответствия вида компонента возможным установочным элементам

Таблица 2.13 – Элементы таблицы сокращения вариантов

База	Код	Тип производства					Габариты и масса обрабатываемой детали				...
		e	mc	c	kc	м	м	с	к	ок	
3OH	Tr 1.1	x	x	x			x	x			...
	Tr 1.2	x	x	x	x	x		x	x	x	...
	Tr 1.3	x	x	x	x	x		x	x	x	...

2OH	Tr 2.1	x	x	x			x	x			...
	Tr 2.2	x	x	x	x			x	x	x	...

...

При выборе вариантов технических решений, заносимых в морфологическую таблицу, с помощью таблицы сокращения вариантов учитываются следующие ограничения: тип производства, габариты и масса обрабатываемой детали, показатели качества базы, поверхность базирования (наружная, внутренняя), тип поверхности, характер базы (явная, скрытая), вид обработки (отделочная, чистовая, предварительная).

Таблица 2.14 – Морфологическая таблица

Ф1	Ф2	Ф3
Тр 1.1.	Тр 2.1.	Тр 3.1.
Тр 1.2.	Тр 2.2.	Тр 3.2.
.....
Тр 1.i.	Тр 2.j.	Тр 3.k.

учитываются следующие ограничения: тип производства, габариты и масса обрабатываемой детали, показатели качества базы, поверхность базирования (наружная, внутренняя), тип поверхности, характер базы (явная, скрытая), вид обра-

ботки (отделочная, чистовая, предварительная).

Далее осуществляется выбор одного элемента по каждому из столбцов морфологической таблицы и определяется точка приложения и направление силы зажима. Для сокращения числа рассматриваемых вариантов путем исключения наихудших комбинаций необходимо из морфологической таблицы выбрать два столбца (из первых трех) с наименьшим количеством вариантов технических решений ($i < k < j$) и образовать из них все возможные парные комбинации (табл. 2.15).

Сравнительный анализ этих комбинаций по суммарной стоимости позволяет две-три из них (например, подчеркнутые) отнести к наилучшим и включить в дальнейшее рассмотрение, а остальные – исключить. Из исходной таблицы выбирается следующий столбец с наименьшим из оставшихся числом вариантов технических решений и составляются из них и отобранных парных комбинаций все возможные тройные комбинации. В конце концов, остается некоторое множество комбинаций, которое сокращается до одного-двух технических решений.

Таблица 2.15 – Таблица парных комбинаций

	Тр 3.1.	Тр 3.2.	...	Тр 3.k.
Тр 1.1.	<u>Тр11,31</u>	Тр11,32	Тр11,...	Тр11,3k
Тр 1.2.	Тр12,31	<u>Тр12,32</u>	Тр12,...	Тр12,3k
...	Тр...,31	Тр...,32	...	Тр...,3k
Тр 1.i.	Тр1i,31	Тр1i,32	Тр1i,...	Тр1i,3k

Направление силы зажима (в случае применения компонентов, не имеющих зажимных элементов) определяется в направлении технологической базы, накладывающей наибольшее количество связей. В случае применения призмы и компонента, реализующего опорную базу (за исключением самоцентрирующего компонента), возможно направлять силу зажима на этот компонент. Причем этот компонент располагается на максимальном удалении от оси технологической базы.

На рисунке 2.52 приведена схема установки и операционный эскиз для обработки рассматриваемой заготовки.

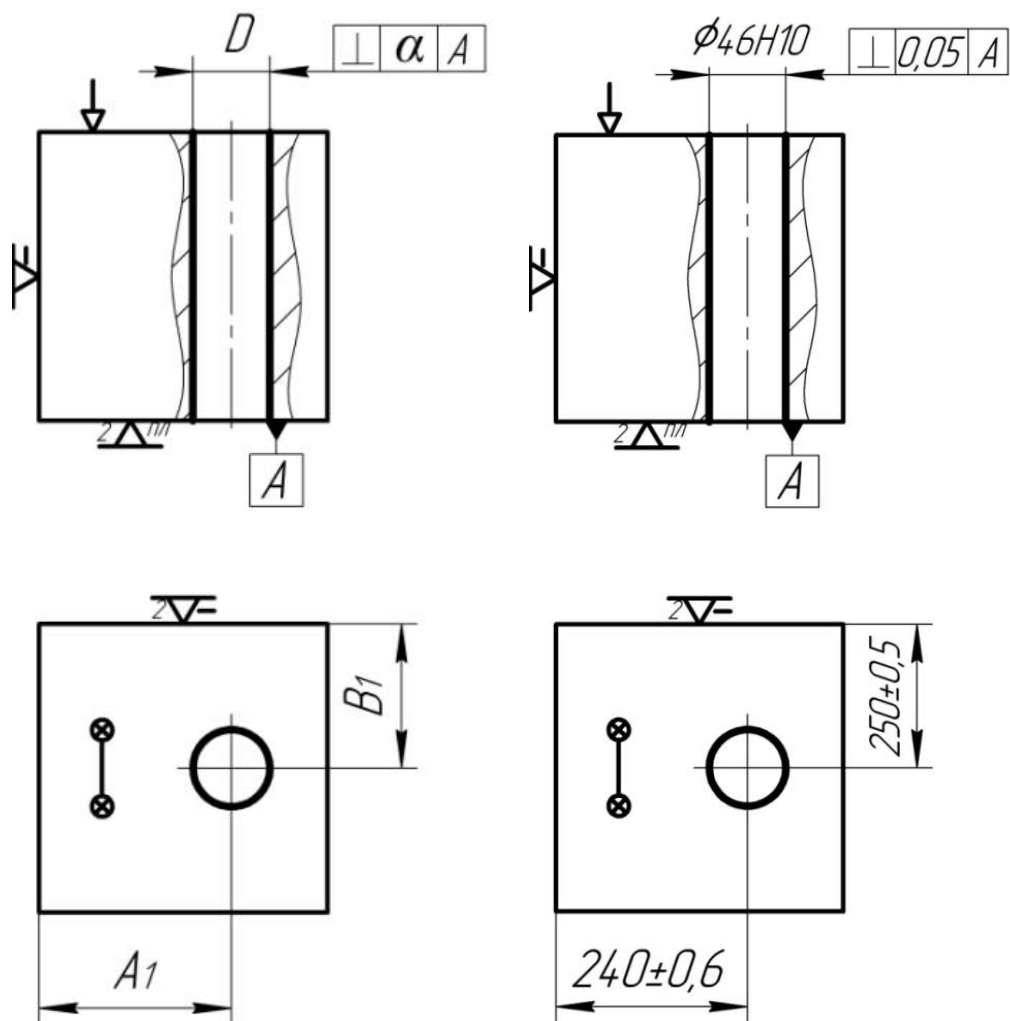


Рисунок 2.52 – Схема установки и операционный эскиз для обработки рассматриваемой заготовки

Пусть необходимо спроектировать теоретическую схему установки для обработки заготовки рассматриваемой детали на операции 005. Из приложения Д отберем приемлемые технические решения и занесем их в морфологическую таблицу (табл. 2.16).

Таблица 2.16 – Отобранные с помощью таблицы сокращения вариантов, компоненты схемы установки

База	Установочный компонент	Код
Двойная направляющая	Двойная призма	Тр 5.10.
Опорная	Опора точечная неподвижная с плоской поверхностью	Тр 3.1.
	Опора точечная неподвижная с рифленой поверхностью	Тр 3.3.
	Опора плавающая с плоской поверхностью	Тр 3.4.
	Опора плавающая с рифленой поверхностью	Тр 3.6.
Опорная	Опора точечная неподвижная с плоской поверхностью	Тр 3.1.
	Опора точечная неподвижная с рифленой поверхностью	Тр 3.3.
	Зажим самоцентрирующий	Тр 3.9.

Окончательно принимаем сочетание Тр 5.10. Тр 3.3. Тр 3.3.

Проекты схем установки оформляются в виде таблицы схем установки (табл. 2.17).

Таблица 2.17 – Теоретические схемы установки

Этап	Операция	Теоретическая схема установки
1	005	
1	010	...

Разработанные схемы установки являются заданиями на проектирование или выбор приспособления. В приложении Е приведен пример проектирования универсально-сборного приспособления с помощью описанной методики.

При базировании выверкой по разметке необходимо определить базы разметки. Однако каких-либо правил определения баз для разметки нет. Поэтому часто принятие решений о базах разметки основано на личном опыте и интуиции проектировщика. Базы для разметки на чертежах детали обозначаются в виде ромба.

Предлагается *теоретические схемы баз разметки* определять с помощью правил определения комплектов баз на первой операции этапа по методике синтеза маршрута обработки заготовки (на основании анализа графов размерных связей). «Вид компонента комплекта» определяется согласно рассмотренной выше методике определения вида компонента комплекта в зависимости от точности ориентации той или иной обрабатываемой поверхности относительно комплекта исходных баз.

Схема рисок разметки и порядок разметки поверхностей определяется по методике определения смены баз. В данном случае необходимость в определении вида компонента баз отпадает. Поверхности баз разметки являются *настроечными базами* для нанесения рисок на других поверхностях.

На этапе *установки заготовки на станке* достигается требуемая точность статической настройки системы СПИД при размерной настройке инструмента по разметочным рискам.

Предлагается считать разметку условно первой операцией механической обработки. Тогда комплект технологических баз для нанесения линий и точек разметки можно определять по описанной выше методике.

2.6 Аддитивный синтез и базирование

Изложенные выше термины и определения позволяют предложить следующую последовательность процедур для построения схем базирования и установки модели детали в рабочей зоне 3D-принтера для обеспечения заданных чертежом допусков взаимного расположения и размеров:

- 1) формирование ГМД (ГМИЗ);
- 2) определение составов баз ориентации;
- 3) идентификация состава баз ориентации;
- 4) определение приоритета в обеспечении допуска взаимного расположения;
- 5) синтез схемы базирования;
- 6) определение компоновочно-кинематической схемы и задание системы координат 3D-принтера;
- 7) определение достижимой геометрической точности 3D-принтера;
- 8) ориентация модели детали в системе координат принтера;
- 9) формирование схемы установки и операционного эскиза.

Процедура 1. Для построения ГМД (ГМИЗ) необходимо (рис. 4.1):
– построить контурное изображение (или трехмерную модель) ГМД (ГМИЗ);

- произвести нумерацию поверхностей;
- проставить размерные связи и допуски взаимного расположения поверхностей согласно чертежу;
- построить графы линейных размерных связей $R(x, y, z)$ и графы угловых расположений U поверхностей.

При построении графов используются основные принципы раздела 2.4 с учетом того, что при аддитивном синтезе техпроцесс не делится на этапы и реализуется за одну операцию, а поверхности не делятся на обрабатываемые и необрабатываемые.

Процедура 2. Алгоритм определения составов баз ориентации при аддитивном синтезе аналогичен алгоритму определения составов баз при механической обработке (см. раздел 2.4). Отличие состоит в том, что составы определяются для всех без исключения поверхностей (см. табл. 2.18).

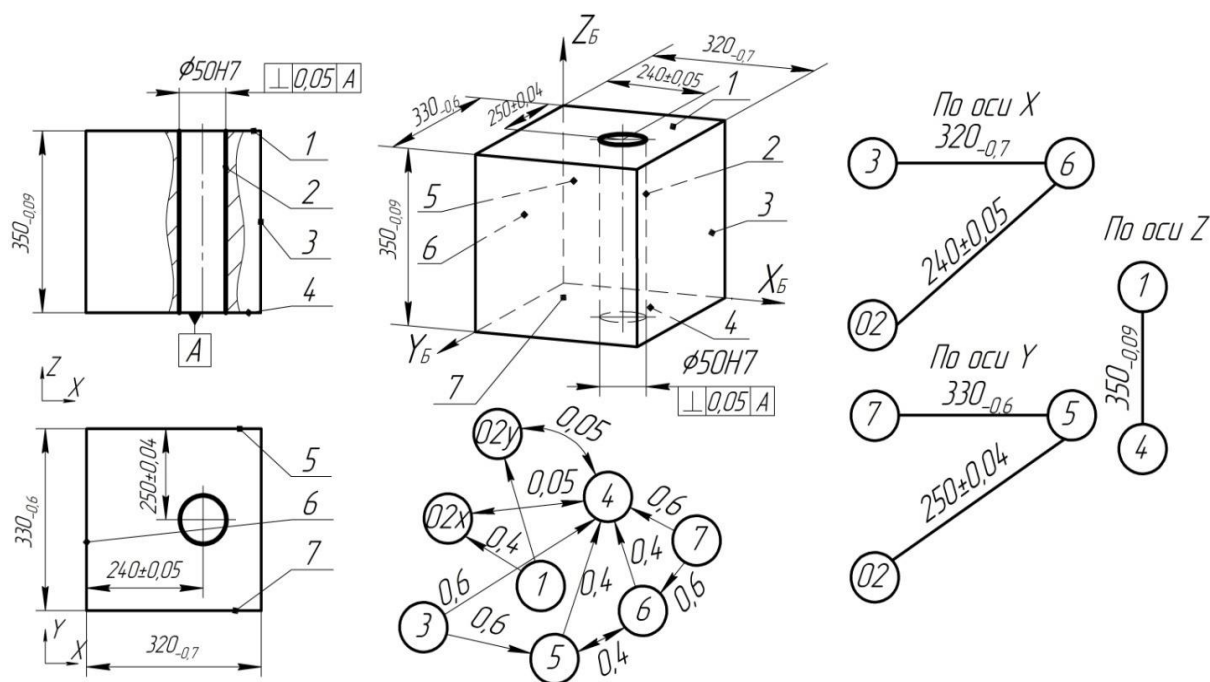


Рисунок 2.53 – Геометрическая модель детали

Таблица 2.18 – Составы баз ориентации для рассматриваемой детали на предварительном этапе обработки

1	o2	3	4	5	6	7
4-o2x-o2y	5-6-4	6-4-5	1-o2x-o2y	7-4-6 o2y-4-6	o2x-4-5 3-4-5	5-4-6

Процедура 3. Также смотреть раздел 2.4.

Процедура 4. Определение приоритета в обеспечении допуска взаимного расположения для аддитивного синтеза имеет особенность, связанную с тем, что техпроцесс 3D-печати не делится на операции. Приоритетность определяется по всем поверхностям для всех составов баз (табл. 2.19).

Таблица 2.19 – Определение удельных допусков

Поверхность	Состав баз	Допуск		Длинна	Удельный допуск (на длине 1000 мм)
		Наименование	Значение		
...
o2	5	Размер	0,08	350	0,229
	6	Размер	0,1	350	0,286
	4	⊥	0,05	350	0,143
...
5	4	⊥	0,4	350	1,143
	6	⊥	0,4	320	1,250
	7	Размер	0,6	350	1,714
...

Согласно таблице 2.19 для рассматриваемого примера приоритетным является допуск перпендикулярности поверхности $\phi 2$ относительно поверхности 4.

Процедура 5. Смотреть приложение Г. Схема базирования при аддитивном синтезе рассматриваемой детали приведена на рисунке 4.2.

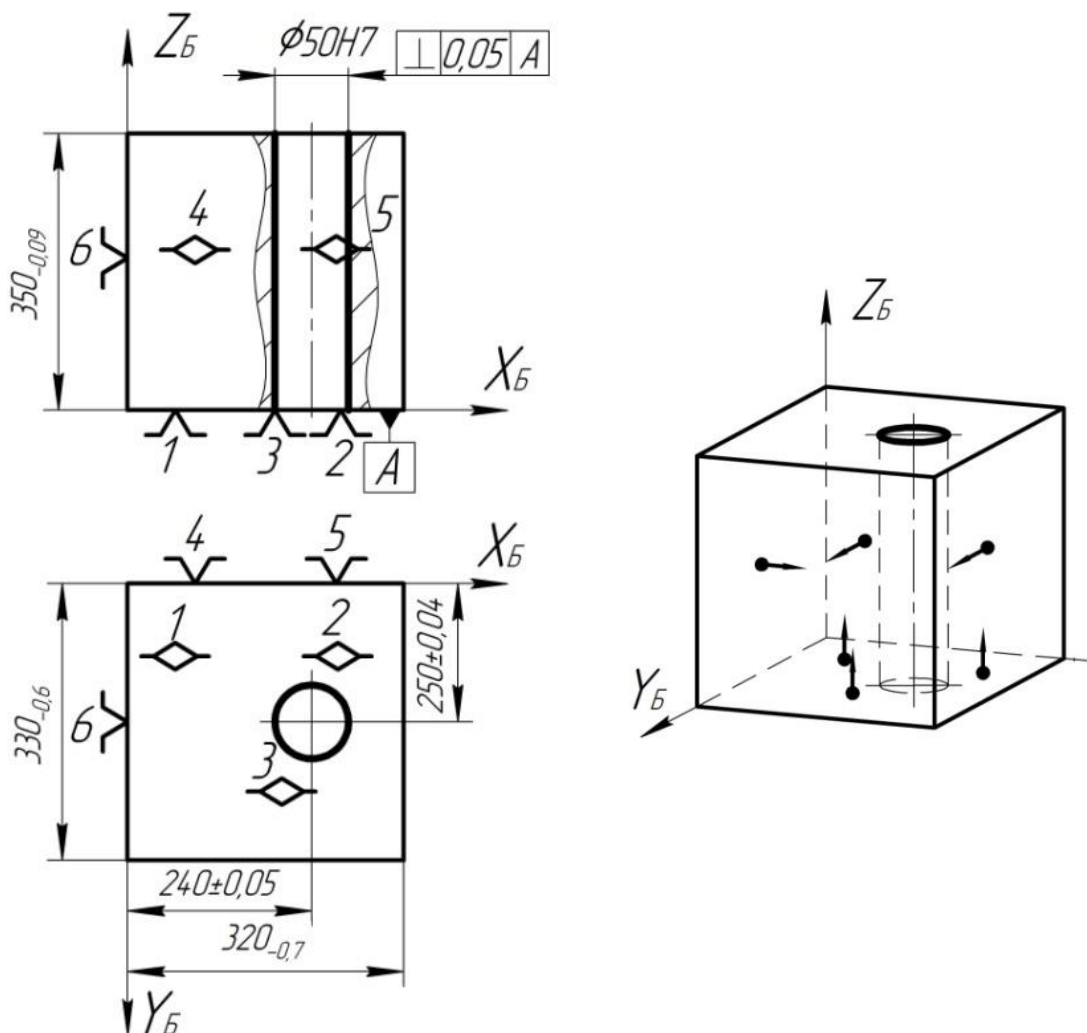
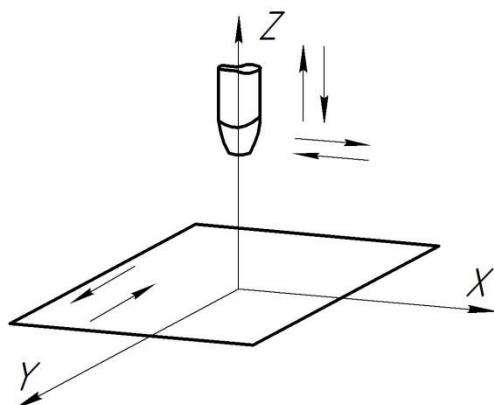


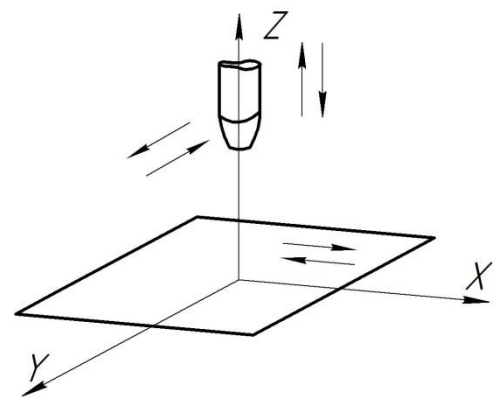
Рисунок 2.54 – Схема базирования и модель расположения направляющих векторов

Процедура 6. Компоновочно-кинематические схемы и системы координат 3D-принтера определяют методику анализа точности перемещений и ориентацию базовой системы координат в системе координат принтера.

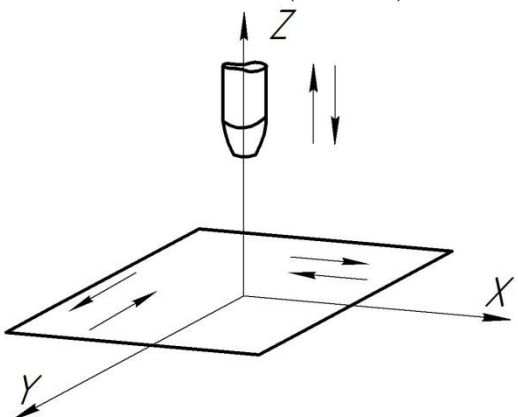
На рисунке 2.55 приведены элементы классификатора компоновочно-кинематических схем FDM-принтеров.



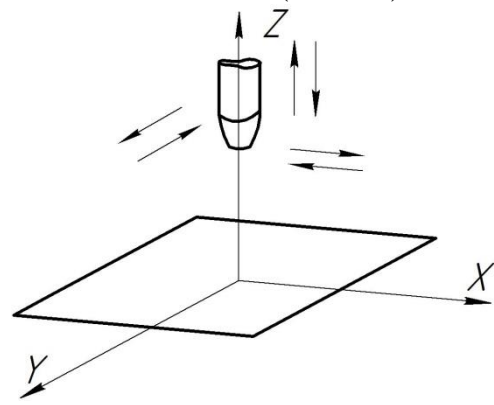
C-Y/ Γ -ZX (Prusha)



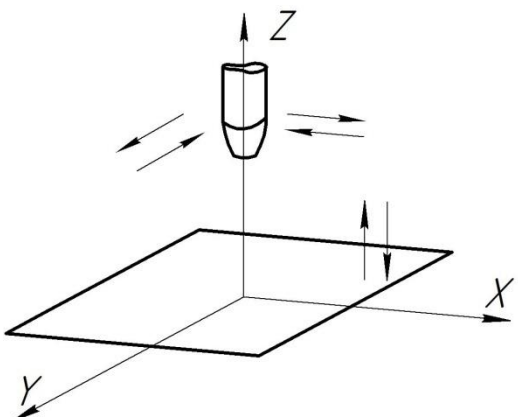
C-X/ Γ -ZY (Prusha)



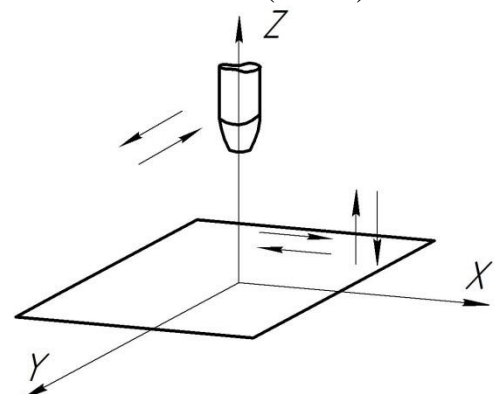
C-XY/ Γ -Z



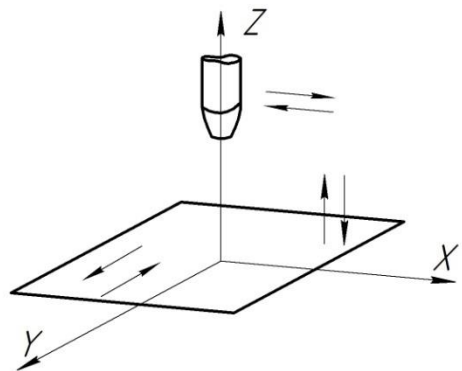
Γ -ZXY (Delta)



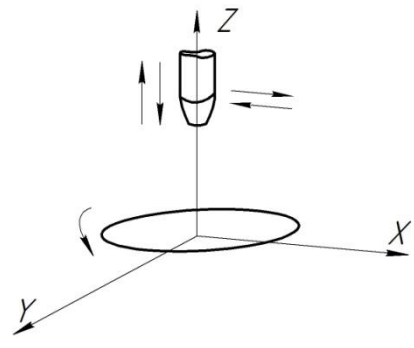
C-Z/ Γ -XY



C-XZ/ Γ -Y



C-YZ/ Γ -X



C-XY_{кр}/ Γ -ZX

...

...

Рисунок 2.55 – Элементы классификатора компоновочно-кинематических схем FDM-принтеров

Процедура 7. Для определения геометрической точности 3D-принтера в задаче базирования необходимо оценить параллельность перемещений слоеобразующего элемента по трем осям в двух направлениях для каждой оси (для оси X в плоскостях XZ и XY, для Y в плоскостях YZ и YX, для Z в плоскостях ZY и ZX).

Указанная процедура может быть реализована двумя способами:

1. Оценка по паспортным данным 3D-принтера или согласно ГОСТ 22267 «Станки металлорежущие. Схемы и способы измерения геометрических параметров» (при этом индикаторная головка устанавливается на место слоеобразующего элемента).

2. Печать на 3D-принтере опытных деталей, измерение на координатно-измерительной машине соответствующих параметров по трем осям в двух направлениях и пересчет на габариты рабочей зоны.

Недостатками первого способа является невозможность учета влияния температурных деформаций и других свойств материалов, а также (в случае отсутствия паспортных данных по геометрической точности 3D-принтера) необходимость изготовления специальной оснастки для крепления и ориентации индикатора. Недостатками второго способа является косвенность измерения, необходимость использования дорогостоящих средств измерения и расходование материалов.

Процедура 8. Ориентацию модели детали в рабочей зоне принтера предлагается осуществлять за счет ориентации базовой системы координат детали (сформированной в результате реализации процедуры 4) в системе координат принтера.

Для этого необходимо поверхность главной базы (или сочетание главной базы с другими базами обеспечивающими допуск взаимного расположения) комплекта разместить в определенной плоскости (оси) системы координат принтера.

Так, на рисунке 2.56 приведены варианты возможной ориентации тройной однонаправленной (установочной) базы детали (рис. 2.54) в системе координат 3D-принтера.

Анализ ориентаций рассматриваемых поверхностей в составах баз, а также правил определения комплектов баз позволил установить следующие главные базы и сочетания главной базы с другими базами, обеспечивающими приоритетный допуск взаимного расположения:

- 1) тройная однонаправленная (установочная);
- 2) четверная (двойная направляющая);
- 3) четверная (двойная направляющая) в сочетании с одиночной (опорной);
- 4) тройная разнонаправленная (тройная опорная) в сочетании с двойной однонаправленной (направляющей).

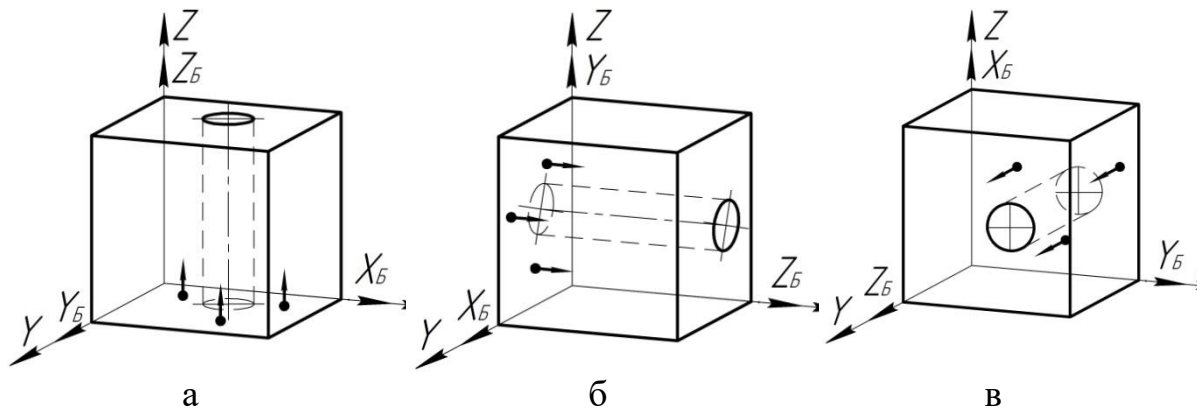


Рисунок 2.56 – Возможные варианты размещения установочной базы в системе координат принтера: а – ось параллельна оси Z, б – ось параллельна оси X, в – ось параллельна оси Y

Перечисленные главные базы и сочетания главной базы с другими базами обеспечивают следующие приоритетные допуски взаимного расположения:

- 1) перпендикулярность оси относительно плоскости;
- 2) перпендикулярность плоскости относительно плоскости;
- 3) угол оси относительно плоскости;
- 4) угол плоскости относительно плоскости;
- 5) параллельность (соосность) оси относительно оси;
- 6) параллельность плоскости относительно плоскости;
- 7) перпендикулярность оси относительно оси;
- 8) угол оси относительно оси.

Пусть необходимо найти ориентацию тройной однонаправленной (установочной) базы, обеспечивающей приоритетную перпендикулярность оси относительно плоскости (рис. 2.56) в системе координат принтера с точностью перемещений по направляющим (линейного позиционирования) по осям T_x , T_y , T_z (первый вариант).

В случае геометрической погрешности плоскости XOY (зеркала стола) в которой может размещаться тройная однонаправленная (установочная) база на угол α_x или α_y (или одновременно на углы α_x или α_y) допуск перпендикулярности T может быть обеспечен только на длине L_1 (рис. 2.57 а, б и в):

$$L_{1x} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg} \alpha_x}, L_{1y} = \frac{T - T_y}{\operatorname{tg} \alpha_y}$$

где α_x , α_y – углы наклона направляющей, которые могут быть определены по геометрической точности принтера в заданном координатном направлении (см. процедуру 7).

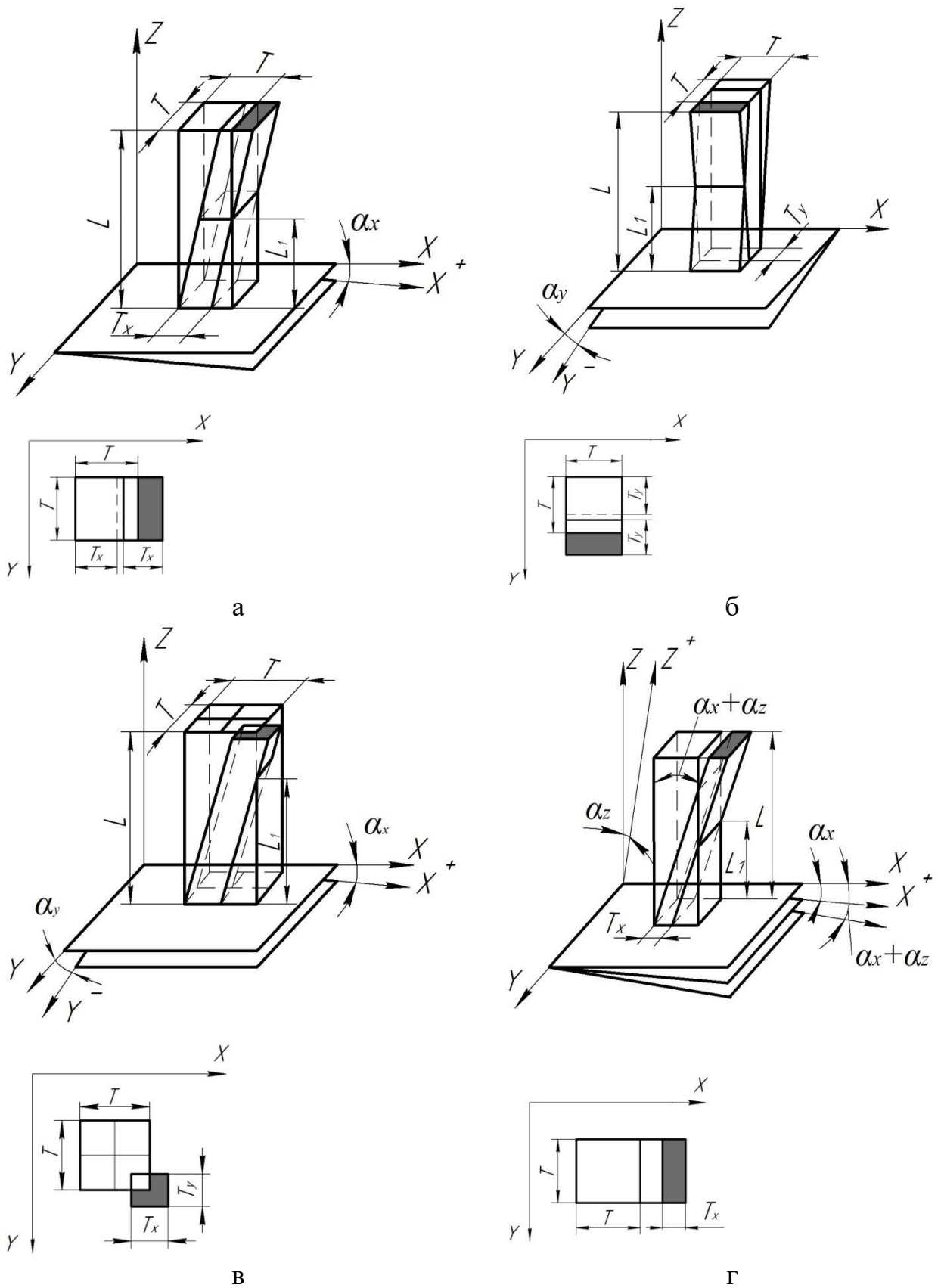


Рисунок 2.57 – Некоторые варианты размещения полей допусков T_x и T_y в поле допуска перпендикулярности оси T

Также возможен случай «наложения» геометрической погрешности расположения направляющих по осям X и Z от (рис. 2.57 г) или Y и Z , что уменьшает область обеспечения допуска перпендикулярности в заданном координатном направлении. И наоборот, возможен случай компенсации погрешностей (в том случае, если по осям X и Z (или Y и Z) имеется геометрическая погрешность направляющих в противоположных угловых направлениях.

На рисунках 2.57 а–г прямоугольниками показаны области полей допусков T и T_x в плоскости длины рассматриваемого элемента. В том случае, если квадрат поля допуска T не пересекается с прямоугольником точности позиционирования T_x , то обеспечить допуск на всей длине невозможно. В случае частичного пересечения указанных полей допусков, можно говорить о вероятности обеспечения допуска. Таким образом появляется возможность прогнозирования точности взаимного расположения на длине.

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой оси Z сводится к проверке условий

$$T \geq T_x, T \geq T_y, L \leq L_{1x^{\pm}z^{\pm}}, L \leq L_{1y^{\pm}z^{\pm}}$$

где

$$L_{1x^{\pm}z^{\pm}} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}(|\pm \alpha_x \pm \alpha_z|)}$$

$$L_{1x^+z^+} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}(\alpha_x + \alpha_z)} \quad L_{1x^+z^-} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}(|\alpha_x - \alpha_z|)}$$

$$L_{1x^-z^+} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}(|-\alpha_x + \alpha_z|)} \quad L_{1x^-z^-} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}(|-\alpha_x - \alpha_z|)}$$

$$L_{1y^{\pm}z^{\pm}} = \frac{T - T_y}{\operatorname{tg}(|\pm \alpha_y \pm \alpha_z|)}$$

$$L_{1y^+z^+} = \frac{T - T_y}{\operatorname{tg}(\alpha_y + \alpha_z)} \quad L_{1y^+z^-} = \frac{T - T_y}{\operatorname{tg}(|\alpha_y - \alpha_z|)}$$

$$L_{1y^-z^+} = \frac{T - T_y}{\operatorname{tg}(|-\alpha_y + \alpha_z|)} \quad L_{1y^-z^-} = \frac{T - T_y}{\operatorname{tg}(|-\alpha_y - \alpha_z|)}$$

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой оси X сводится к проверке условий

$$T \geq T_z, T \geq T_y, L \leq L_{1x^{\pm}z^{\pm}}, L \leq L_{1y^{\pm}x^{\pm}}$$

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой оси Y сводится к проверке условий

$$T \geq T_x, T \geq T_z, L \leq L_{1x^{\pm}y^{\pm}}, L \leq L_{1y^{\pm}z^{\pm}}$$

Пусть необходимо найти ориентацию тройной однонаправленной (установочной) базы, обеспечивающей приоритетную перпендикулярность плоскости относительно плоскости в системе координат принтера (второй вариант обеспечения приоритетного допуска взаимного расположения).

В случае поворота плоскости XOY (зеркала стола), в которой может размещаться тройная однонаправленная (установочная) база, на угол α_x допуск перпендикулярности T может быть обеспечен только на длине L_1 (рис. 2.58 а):

$$L_{1x} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg} \alpha_x},$$

Поворот плоскости XOY (зеркала стола), в которой может размещаться тройная однонаправленная (установочная) база, угол α_y никак не влияет на допуск перпендикулярности T (рис. 2.58 б).

Также возможен случай «наложения» геометрической погрешности расположения направляющих по осям X и Z , что уменьшает область обеспечения допуска перпендикулярности в заданном координатном направлении. И наоборот, возможен случай компенсации погрешностей, если по осям X и Z имеется геометрическая погрешность направляющих в противоположных угловых направлениях.

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой плоскости плоскостям ZOY или ZOX сводится к проверке соответствующих условий:

$$T \leq T_x, L \leq L_{1x^{\pm}z^{\pm}} \text{ или } T \leq T_y, L \leq L_{1y^{\pm}z^{\pm}}$$

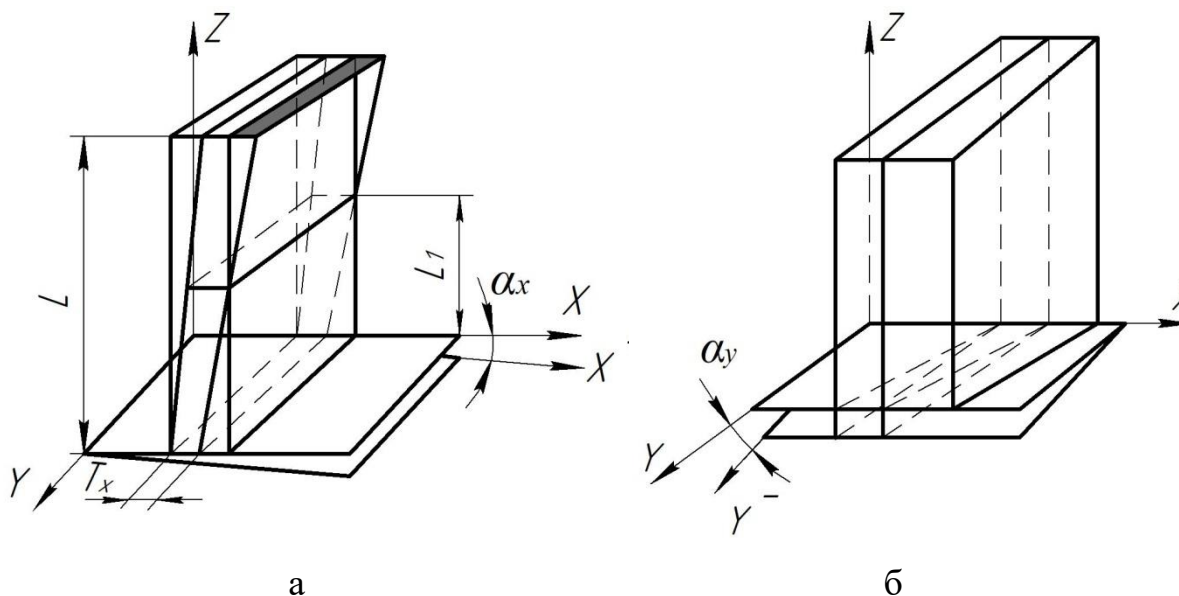


Рисунок 2.58 – Некоторые варианты размещения поля допуска T_x в поле допуска перпендикулярности плоскости T

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой плоскости плоскостям XOZ или XOY сводится к проверке соответствующих условий

$$T \leq T_y, L \leq L_{1y^{\pm}x^{\pm}} \quad \text{или} \quad T \leq T_z, L \leq L_{1x^{\pm}z^{\pm}}$$

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой плоскости плоскостям YOX или YOZ сводится к проверке соответствующих условий

$$T \leq T_z, L \leq L_{1y^{\pm}z^{\pm}} \quad \text{или} \quad T \leq T_x, L \leq L_{1x^{\pm}y^{\pm}}$$

Таким образом, задача ориентации базовой системы координат детали (ориентации модели детали в рабочей зоне 3D-принтера) сводится к определению оптимальной плоскости (оси или сочетания оси и плоскости) системы координат 3D-принтера для размещения главной базы (или сочетания главной базы и другой базы) для достижения заданного допуска расположения на заданной длине.

Определение оптимальной плоскости (оси или сочетания оси и плоскости) системы координат 3D-принтера предлагается определять с помощью матриц элементов. В таблицах 2.20–2.22 представлены соответствующие матрицы для определения ориентации тройной однонаправленной (установочной) базы при обеспечении перпендикулярности оси относительно плоскости и плоскости относительно плоскости.

Таблица 2.20 – Матрица для определения ориентации тройной однонаправленной (установочной) базы при обеспечении перпендикулярности оси относительно плоскости

		X		Y		Z	
		X+	X-	Y+	Y-	Z+	Z-
X	X+			$L_{1x^+y^+}$	$L_{1x^+y^-}$	$L_{1x^+z^+}$	$L_{1x^+z^-}$
	X-			$L_{1x^-y^+}$	$L_{1x^-y^-}$	$L_{1x^-z^+}$	$L_{1x^-z^-}$
Y	Y+	$L_{1x^+y^+}$	$L_{1x^+y^-}$			$L_{1y^+z^+}$	$L_{1y^+z^-}$
	Y-	$L_{1x^-y^+}$	$L_{1x^-y^-}$			$L_{1y^-z^+}$	$L_{1y^-z^-}$
Z	Z+	$L_{1x^+z^+}$	$L_{1x^+z^-}$	$L_{1y^+z^+}$	$L_{1y^+z^-}$		
	Z-	$L_{1x^-z^+}$	$L_{1x^-z^-}$	$L_{1y^-z^+}$	$L_{1y^-z^-}$		
Проверка условий		$L \leq L_{1x^\pm y^\pm}$ $L \leq L_{1x^\pm z^\pm}$		$L \leq L_{1x^\pm y^\pm}$ $L \leq L_{1y^\pm z^\pm}$		$L \leq L_{1x^\pm z^\pm}$ $L \leq L_{1y^\pm z^\pm}$	
Тройная однонаправленная (установочная) база		YOZ		XOZ		XOY	

Таблица 2.21 – Матрица для определения ориентации тройной однонаправленной (установочной) базы при обеспечении перпендикулярности плоскости (параллельной ZOY или XOZ, или YOX) относительно плоскости

		X		Y		Z	
		X+	X-	Y+	Y-	Z+	Z-
X	X+			$L_{1x^+y^+}$	$L_{1x^+y^-}$		
	X-			$L_{1x^-y^+}$	$L_{1x^-y^-}$		
Y	Y+					$L_{1y^+z^+}$	$L_{1y^+z^-}$
	Y-					$L_{1y^-z^+}$	$L_{1y^-z^-}$
Z	Z+	$L_{1x^+z^+}$	$L_{1x^+z^-}$				
	Z-	$L_{1x^-z^+}$	$L_{1x^-z^-}$				
Проверка условий		$L \leq L_{1x^\pm z^\pm}$		$L \leq L_{1x^\pm y^\pm}$		$L \leq L_{1y^\pm z^\pm}$	
Тройная однонаправленная (установочная) база		XOY		YOZ		XOZ	

Таблица 2.22 – Матрица для определения ориентации тройной однонаправленной (установочной) базы при обеспечении перпендикулярности плоскости (параллельной ZOХ или ХОУ, или YOZ) относительно плоскости

		X		Y		Z	
		X+	X-	Y+	Y-	Z+	Z-
X	X+					$L_{1x^+z^+}$	$L_{1x^+z^-}$
	X-					$L_{1x^-z^+}$	$L_{1x^-z^-}$
Y	Y+	$L_{1x^+y^+}$	$L_{1x^+y^-}$				
	Y-	$L_{1x^-y^+}$	$L_{1x^-y^-}$				
Z	Z+			$L_{1y^+z^+}$	$L_{1y^+z^-}$		
	Z-			$L_{1y^-z^+}$	$L_{1y^-z^-}$		
Проверка условий		$L \leq L_{1x^\pm y^\pm}$		$L \leq L_{1y^\pm z^\pm}$		$L \leq L_{1x^\pm z^\pm}$	
Тройная однонаправленная (установочная) база		ХОУ		YOZ		ХОZ	

Аналогичные рассуждения позволили составить матрицы для определения ориентации главных баз и сочетаний главной базы с другими базами в системе координат принтера в зависимости от необходимости обеспечения приоритетных допусков взаимного расположения, а также разработать программное обеспечение для определения ориентации главных баз (рис. 2.59).

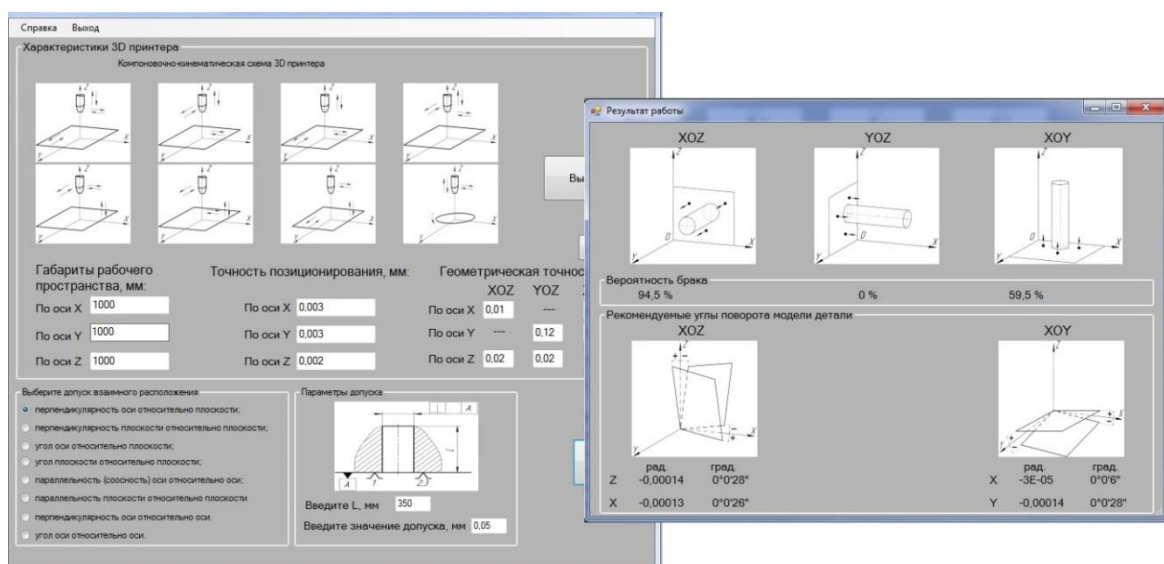


Рисунок 2.59 – Интерфейс программного обеспечения

Программное обеспечение разработано на языке C# в виртуальной среде Microsoft Visual Studio 2019 с использованием стандартных элементов и математических функций. При работе с системой пользователь последовательно вводит информацию о компоновочно-кинематической схеме принтера, его точности позиционирования и геометрической точности по осям, параметрах поверхности с приоритетным допуском. Результатом работы являются сведения о возможности обеспечения допуска взаимного расположения на заданной длине при различном базировании модели детали относительно осей системы координат принтера, а также рекомендации о возможном повороте модели для обеспечения приоритетного допуска взаимного расположения.

Программное обеспечение позволяет прогнозировать обеспечение точности допусков взаимного расположения поверхностей при 3D-печати, рекомендовать варианты базирования моделей деталей в рабочей зоне 3D-принтера на основе анализа его геометрической точности для обеспечения допусков взаимного расположения и, как следствие, снижать вероятность печати бракованных деталей.

Процедура 9. На рисунке 2.60 показана возможная схема установки для рассматриваемой операции 3D-печати. Операционный эскиз аналогичен схеме установки.

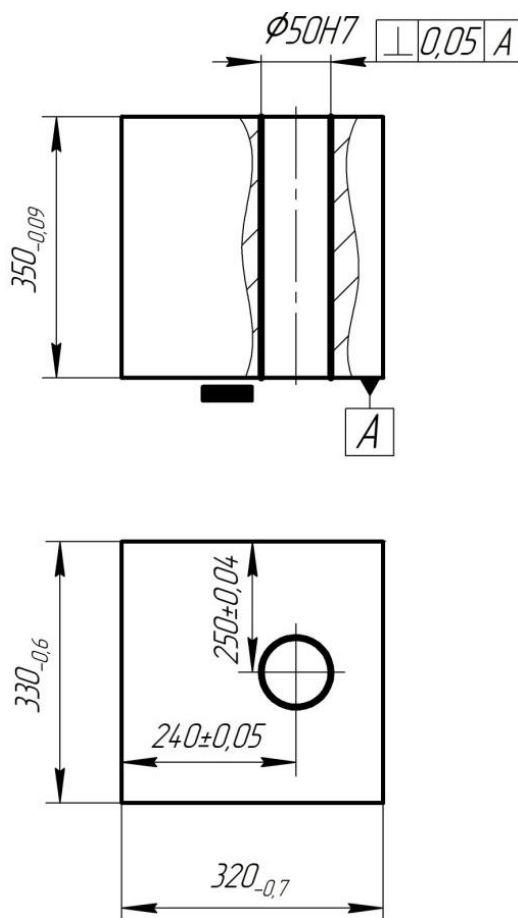


Рисунок 2.60 – Схема установки

2.7 Размерный анализ технологического процесса

2.7.1 Определение припусков и допусков на технологические размеры

Размерный анализ технологического процесса – это такой инструмент в проектировании технологического процесса, который позволяет до реализации технологического процесса аналитическим путём проверить возможность достижения точности чертёжных размеров и рассчитать технологические размеры и размеры заготовки. Для проведения размерного анализа необходимо определить минимальные припуски на обработку, допуски на технологические размеры, составить размерную схему технологического процесса, сформировать исходный и производный графы, составить уравнения размерных цепей, произвести необходимые расчёты [2–5, 84–91].

В современных рыночных условиях безразлично, каким путем получено заданное качество продукции – его следует достигать при наименьших затратах материалов, средств, времени, т. е. при наименьшей себестоимости изготовления деталей. Первое требование можно назвать техническим, второе – экономическим.

Для выполнения этих основных требований большое значение имеют вопросы расчета припусков на обработку на металлорежущих станках, операционных размеров и допусков на них. Чем эти параметры ближе к оптимальным, тем меньше расход металла на единицу продукции, затраты времени на обработку, расход электроэнергии и режущего инструмента и т. д., и тем меньше технологическая и общая себестоимость обработки деталей машин.

В процессе размерного анализа проектируемых технологических процессов следует различать напуски и припуски на обработку. *Напуском* принято называть ту часть материала заготовки, необходимость удаления которой при последующей механической обработке вызвана упрощением формы заготовки по отношению к форме готовой детали. *Припуском* называют ту часть удаляемого материала, наличие которого на заготовке вызвано необходимостью обеспечения заданных требований к точности и качеству поверхности в результате обработки резанием или другим методом со снятием слоя материала. В тех местах заготовки, где удаляемый материал выступает в роли припуска, номинальная форма поверхности заготовки, как правило, совпадает с заданной номинальной формой поверхности готовой детали. В этом случае припуск рассматривают как слой материала и оценивают расстоянием между соответствующими поверхностями.

Для расчетов припусков используются аналитический и нормативный методы. Из аналитических методов расчета припусков выделяют два основных: дифференциально-аналитический (поэлементный) и

интегрально-аналитический. Широко распространен на практике нормативный метод определения припусков. Он основан на использовании стандартов, ведомственных нормалей и справочников, содержащих таблицы значений номинальных припусков.

Дифференциально-аналитический метод определения припусков является наиболее точным, он позволяет устанавливать оптимальные значения припусков для каждого сочетания условий обработки. Сущность этого метода состоит в определении для заданных условий выполнения операции факторов, влияющих на величину операционного припуска, а затем расчетным путем или по таблицам находят элементы припуска, достаточные для компенсации влияния каждого из факторов. Суммируя эти элементы, определяют величину операционного минимального припуска.

Различают операционный и общий припуски. *Операционный (переходный) припуск* определяется разностью технологических размеров, полученных на смежных операциях (переходах). *Общий припуск* является суммой операционных припусков на данной поверхности. Различают также номинальный и минимальный операционные припуски. Составляющими *минимального операционного припуска* в общем случае будут: Rz_{i-1} – высота микронеровностей, полученная на предшествующей стадии обработки (операции или переходе); H_{i-1} – удаляемый дефектный подповерхностный слой материала, полученный на предшествующей стадии обработки; ρ_{i-1} – пространственные отклонения (сумма) обрабатываемой поверхности, не входящие в допуск на выполняемый размер; ε_i – погрешность установки на рассматриваемой стадии обработки, не входящая в допуск на выполняемый размер. Номинальный операционный припуск равен разности между номинальными значениями технологических размеров, полученных на смежных операциях (переходах), т. е. $z_i = |C_{i-1} - C_i|$.

Все сказанное выше о припуске относится к припуску на сторону (*одностороннему припуску*). При обработке поверхностей вращения допуски задаются на диаметр, поэтому и припуск принято задавать на диаметр (т. е. удваивать односторонний). Аналогично может быть задан припуск на ширину паза, выполняемого мерным инструментом.

На рисунке 2.61 показана схема односторонних припусков для случая обработки одной поверхности от одной базы. Тогда

$$z_i = C_{i-1} - C_i = z_{\min i} + TC_{i-1},$$

где $z_{\min i}$ – минимальный припуск на i -й переход; TC_{i-1} – допуск на технологический размер, выполняемый на $(i-1)$ -м переходе.

Данное выражение является верным для всех i , кроме $i-1$, так как в литых или кованных заготовках допуск на размеры является симметричным ($\pm TC_0 / 2$). В этом случае

$$z_1 = C_0 + TC_0 / 2 = z_{\min 1} + TC_0.$$

На рисунке 2.62 а показана схема определения припусков при обработке двух параллельных поверхностей с последовательной схемой баз и полным удалением поверхностей заготовки. В этом случае

– для поверхности 1

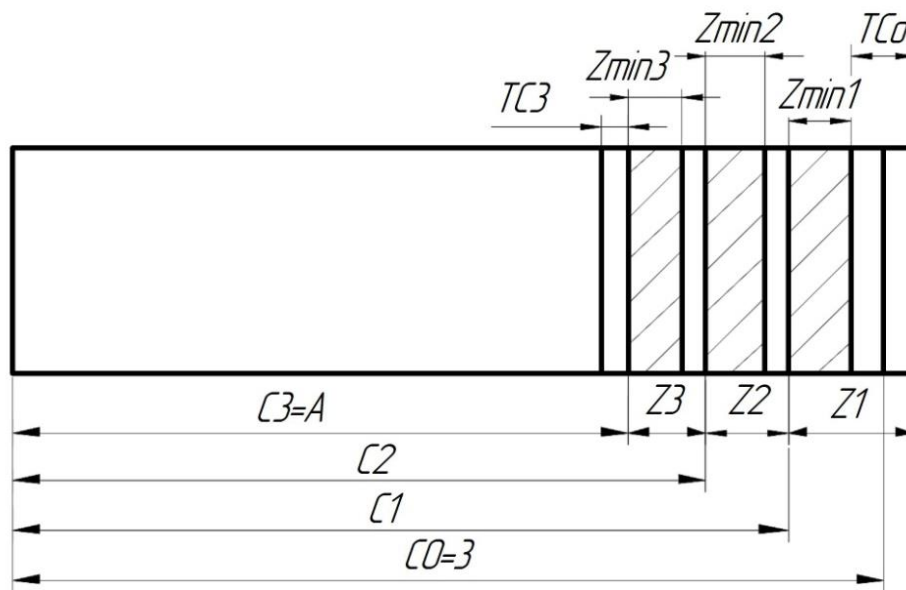


Рисунок 2.61 – Схема определения припусков при обработке одной поверхности от одной базы

$$z_{11} = C + TC / 2 - C; \quad z_{12} = C_2 - C_3;$$

– для поверхности 2

$$z_{21} = C_1 - C_2; \quad z_{22} = C_3 - C_4,$$

где z_{ei} – припуск, удаляемый на i -й операции.

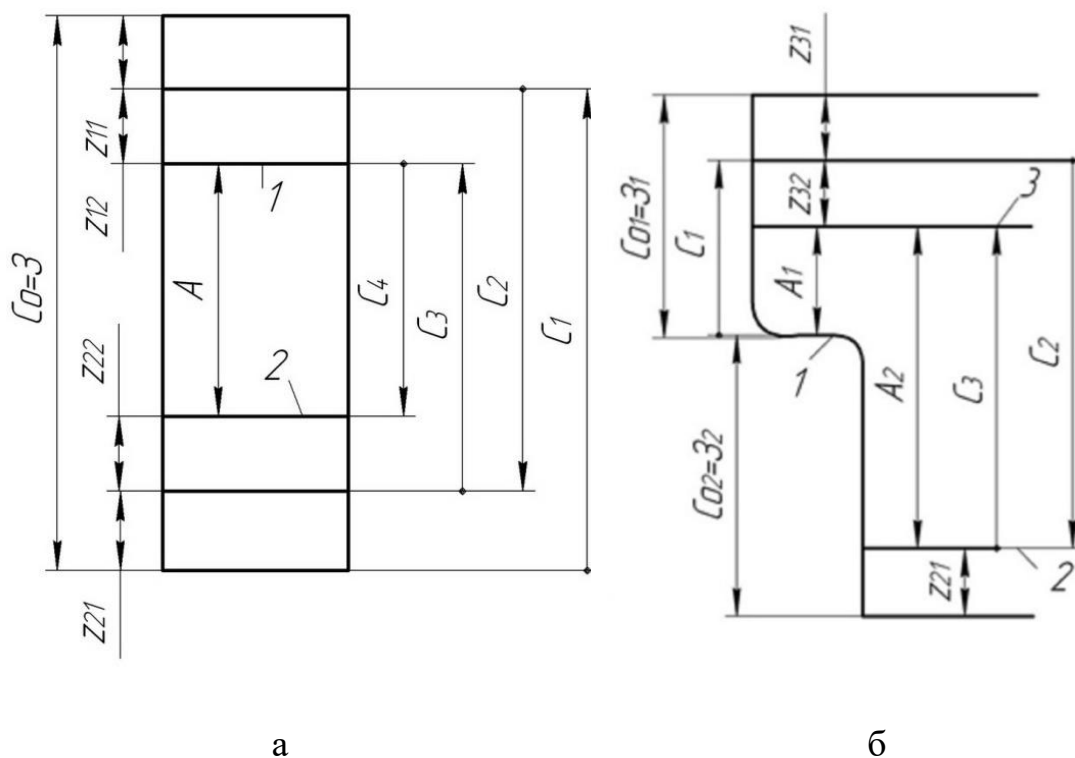


Рисунок 2.62 – Схемы определения припусков при обработке нескольких поверхностей со сменой баз

На рисунке 2.62 б показана схема определения припусков при обработке двух параллельных плоскостей, когда базой на первой операции является исходная поверхность 1. Тогда:

$$z_{31} = C_{01} + TC_{01} / 2 - C_1;$$

$$z_{21} = C_{02} + TC_{02} / 2 + C_1 - C_2; \quad z_{32} = C_2 - C_3.$$

Приведенный пример показывает, что номинальный припуск может быть результатом решения размерной цепи, содержащей более трех звеньев.

Компоненты минимального припуска не всегда полностью включаются в его состав. Так, при обработке заготовок из чугуна и цветных сплавов компонент Н (дефектный слой) включается только при определении припуска на первую обработку литой поверхности. При последующих операциях этот компонент может не учитываться. Не включаются в минимальный припуск и пространственные отклонения, если они не могут быть устранены выполняемым переходом. Например, при развертывании плавающей разверткой и свободном протягивании смещение и увод оси отверстия практически не устраняются.

Для размерного анализа рационально разделить минимальный припуск на две части:

$$z_{\min i} = z_{ai} + z_{bi},$$

где $z_{ai} = (Rz + H)_{i-1}$, $z_{bi} = \rho_{i-1} + \varepsilon_i$. Значение z_{ai} всегда является компонентом минимального припуска, включаемого в размерную цепь. Компонент ρ_{i-1} включается в минимальный припуск только как искривление оси или ее непараллельность (неперпендикулярность) относительно базы (рис. 2.63). В зависимости от схемы установки пространственное отклонение определяется так:

– для установки в центрах

$$\rho = \Delta_{кр} L;$$

– для установки в патроне

$$\rho = 2\Delta_{кр} L,$$

где $\Delta_{кр}$ – местная кривизна, мкм/мм; L – длина заготовки или ее обрабатываемого конца, выступающего из приспособления. Значение $\Delta_{кр}$ приводится в таблицах в зависимости от габаритных размеров заготовки, метода ее получения и вида механической обработки.

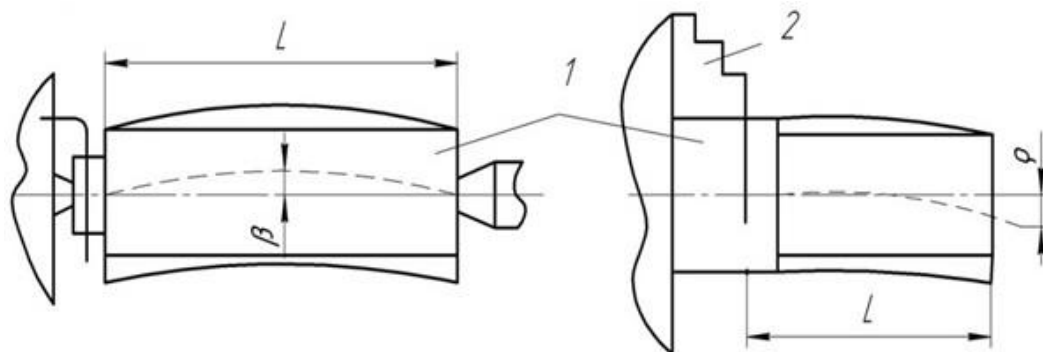


Рисунок 2.63 – Схемы влияния кривизны заготовки на минимальный припуск

Другие виды пространственных отклонений, в том числе смещения осей ρ_{oc} (рис. 2.64), в минимальный припуск при размерном анализе не включаются, т. к. являются самостоятельными звеньями размерной цепи. Аналогичная ситуация возникает и с погрешностью установки ε_i , так как все ее элементы входят в допуск на технологический размер.

Согласно схеме (рис. 2.64) на этом рисунке

$$C_0 = C_1 + z_a + \rho_{oc}.$$

Но ρ_{oc} при размерном анализе является самостоятельным звеном размерной цепи, поэтому следует принимать $z_{\min} = z_a$. Аналогичная ситуация возникает и с погрешностью установки ε_i , так как все ее элементы входят в допуск, кроме погрешности схемы установки, которая также выявляется при решении размерной цепи.

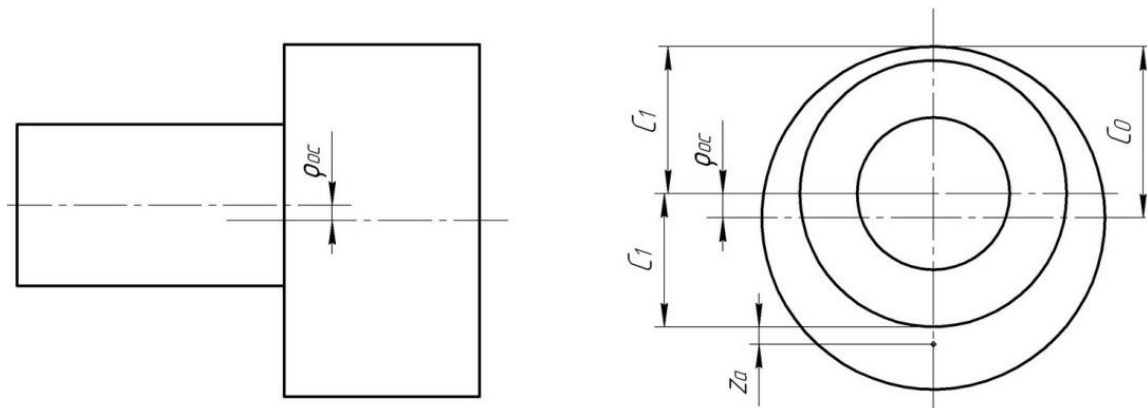


Рисунок 2.64 – Схема определения припуска при смещении осей

Таблицы с расчетными параметрами для определения величин минимальных припусков для наиболее распространенных методов обработки подробно отражены в [24–27] (приложение Ж).

Допуски на технологические размеры определяются по таблицам статистической точности [24–27] (приложение И). Таблицы для определения экономической точности составлены на основании сбора статистических данных в производственных условиях. При их составлении анализировались данные только тех операций, при выполнении которых погрешность схемы установки равна нулю, а погрешностями формы и взаимного расположения технологической и измерительной баз можно было пренебречь. Таким образом, ωC_i учитывает те компоненты, источниками которых являются: геометрические погрешности (станка, инструмента и приспособления); кинематические погрешности станка; копирование погрешности заготовки; износ инструмента; тепловые деформации технологической системы и деформации, связанные с закреплением заготовки.

При обработке на настроенных станках с автоматическим получением размера за счет неизменной (между коррекциями) размерной настройки технологические размеры должны проставляться от технологических баз (рис. 2.65).

В таких случаях допуск на технологический размер определяется выражением:

$$TC_i \geq \omega C_i + \rho_{т.б},$$

где $\rho_{т.б}$ – погрешность формы и относительного расположения технологической базы (пространственные отклонения).

Пространственные отклонения технологической базы принимаются во внимание в тех случаях, когда технологическая база является исходной или предварительно (грубо) обработанной поверхностью. В зависимости от уровня геометрической точности пространственные отклонения составляют следующую часть допуска на линейный размер:

Относительная геометрическая точность	Нормальная (А)	Повышенная (В)	Высокая (С)
Пространственные отклонения, % от допуска на размер	60	40	25

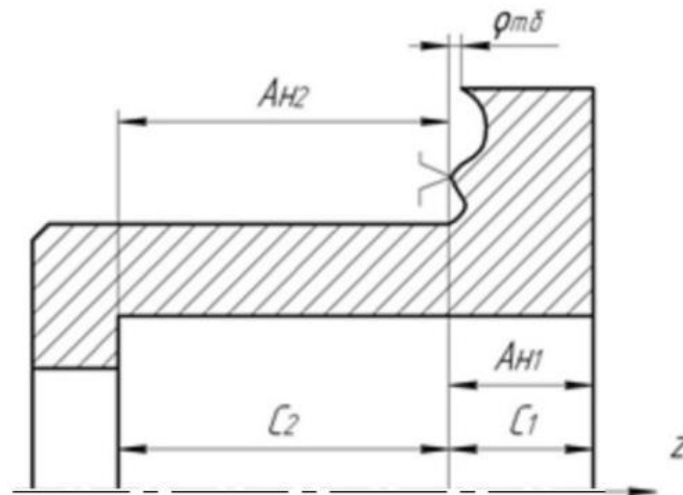


Рисунок 2.65 – Схема размерной настройки (C_i и A_i – соответственно технологические и настроечные размеры)

Если заготовка устанавливается по отверстию на цилиндрический палец (рис. 2.66), то возникает погрешность установки (см. далее). В таких случаях

$$TC_i = \omega C_i + \Delta_{с.у}(A_n).$$

Аналогично следует поступать в случаях, когда схема базирования реализуется с помощью призмы (рис. 2.67).

Когда деталь обрабатывается блоком инструментов (рис. 2.68), то только один из них, базовый (предположим, I), настраивается относительно технологической базы (т. е. соответствующего установочного

элемента приспособления). Остальные настраиваются относительно базового инструмента 1. Поэтому:

$$TC_1 = \omega C_1; \quad TC_2 = \omega A_{H2}; \quad TC_3 = \sqrt{(\omega A_{H3})^2 + (\omega A_{H4})^2}.$$

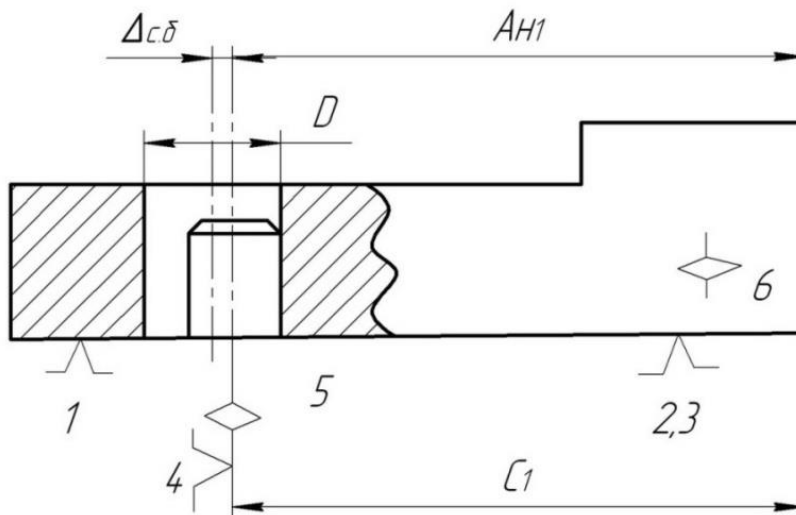


Рисунок 2.66 – Схема установки на палец (с погрешностью)

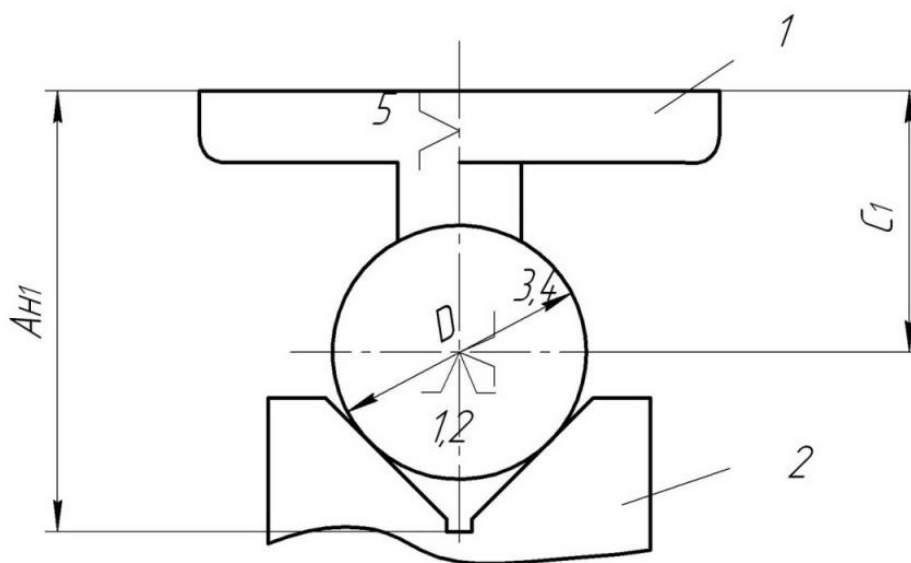


Рисунок 2.67 – Схема установки на призму (с погрешностью)

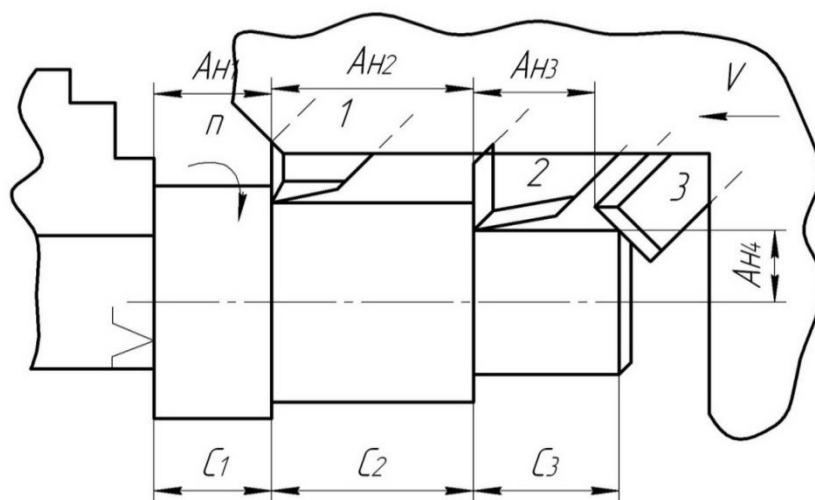


Рисунок 2.68 – Схема размерной настройки блока инструментов (C_i и A_{ni} – технологические и настроечные размеры)

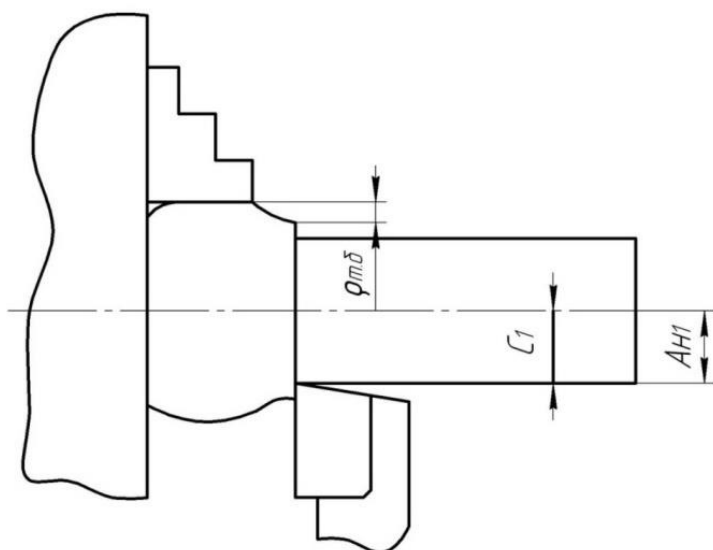


Рисунок 2.69 – Схема размерной настройки при обработке поверхности вращения

При обработке поверхности вращения размерная настройка осуществляется относительно ее оси (рис. 2.69). В таких случаях пространственные отклонения технологической базы (реальной) влияют на точность размера только через копирование погрешности заготовки, что учитывается в значении ωC_i . Поэтому

$$TC_1 = \omega C_1.$$

2.7.2 Формирование размерных схем технологического процесса

Размерная схема представляет собой технологический документ, в котором графически отражено изменение состояния заготовки на каждой операции ее обработки. Она должна строиться для всех трех осей (проекций), а при необходимости – и для отдельных сечений. Для одного из предполагаемых маршрутов обработки рассматриваемой детали на

рисунке 2.70 приведена размерная схема технологического процесса обработки заготовки по оси X.

На размерной схеме отражены все поверхности, образующиеся в процессе обработки от заготовки до готовой детали. Так, поверхность 10^0 (4) в детали возникает после трехкратной обработки основания с удалением припусков Z_1 , Z_2 и Z_3 , что ведет к исчезновению поверхностей 10^3 , 10^I , 10^4 (1, 2, 3). Аналогично возникает поверхность 4^0 (9) отверстия. Однако при каждой обработке вследствие неизбежного смещения возникает новая ось. В данном случае оси также считаются условными поверхностями. Ось $o4^3$ (16) отверстия заготовки после удаления припуска Z_6 исчезает, и возникает ось $o4^I$ (15) промежуточного состояния отверстия $o4^0$ (9). Все поверхности объекта обработки нумеруются в том порядке, в котором они расположены на схеме детали (в данном случае номерами 1...38).

Технологические размеры на размерной схеме являются векторными величинами и откладываются от соответствующих технологических и настроечных баз (обозначены кружочками). Обозначение технологических размеров должно быть аналогичным обозначению технологических размеров, указанных в таблице маршрута обработки. Если внутри этапа на одной операции с поверхности снимается несколько припусков, то идентичные по обозначению выдерживаемые размеры нумеруются индексами 1 и 2 (размер $K8$ на рисунке 2.70).

Размеры заготовки (Z_i) и детали (F_i), припуски (z_i) и смещения (p_i) осей считаются симметричными величинами и откладываются без выбора одного из направлений.

Размерная схема позволяет выделять технологические размерные цепи, где замыкающими звеньями будут размеры детали F_i , припуски z_i и смещения p_i . В одну размерную цепь может входить только одно замыкающее звено.

2.7.3 Построение исходного и производного графов, формирование уравнений размерных цепей

Выделение размерных цепей с помощью размерной схемы – относительно несложная задача, если в них имеются два или три звена. Но для более длинных цепей задача существенно усложняется. С этой точки зрения более подходящим методом будет выделение размерных цепей с помощью графов технологического процесса.

На рисунке 2.71 представлены исходный и производный графы размерных связей технологического процесса изготовления рассматриваемой детали по оси X. Исходный граф связывает поверхности замыкающими звеньями, а производный граф – технологическими размерами.

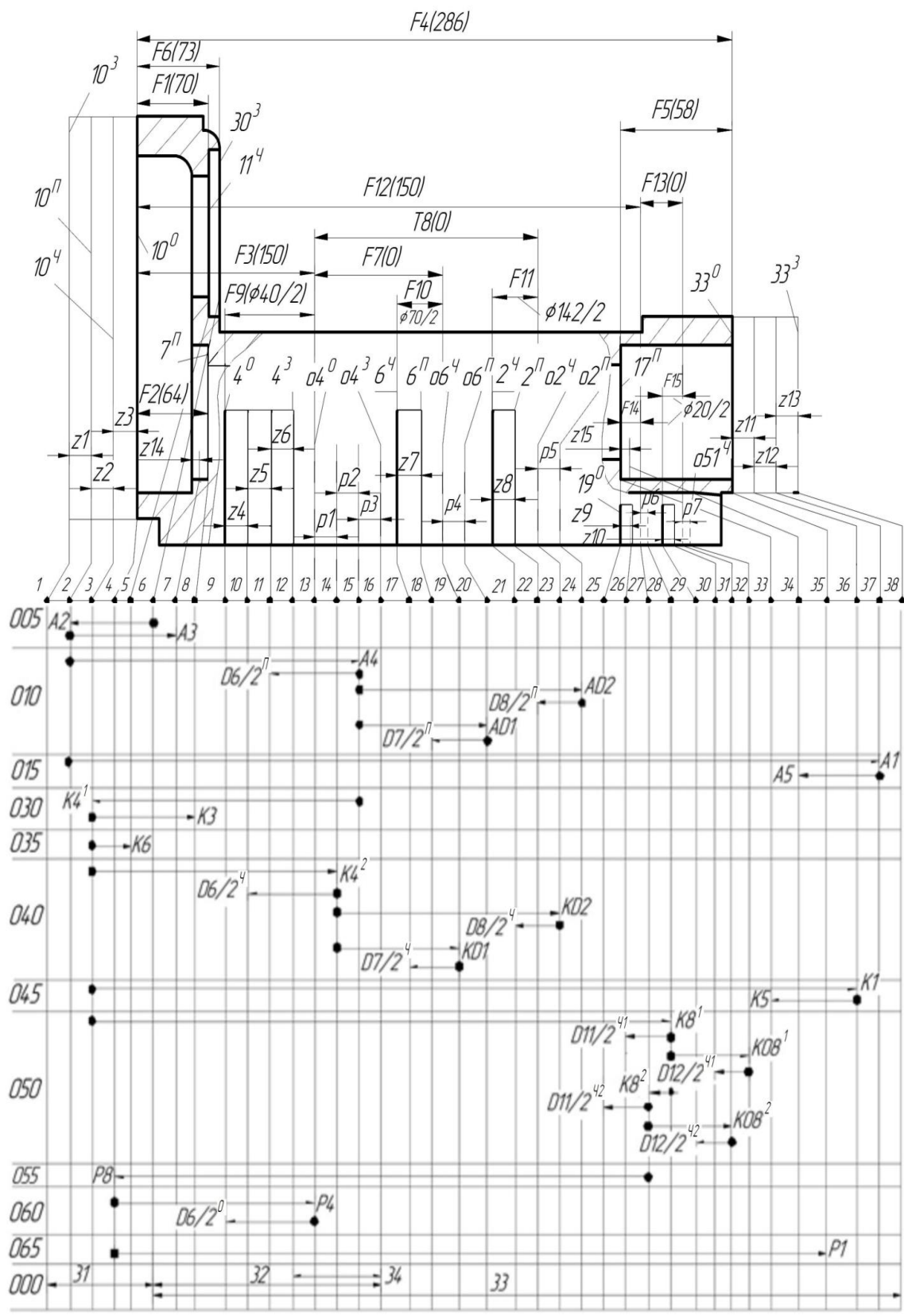
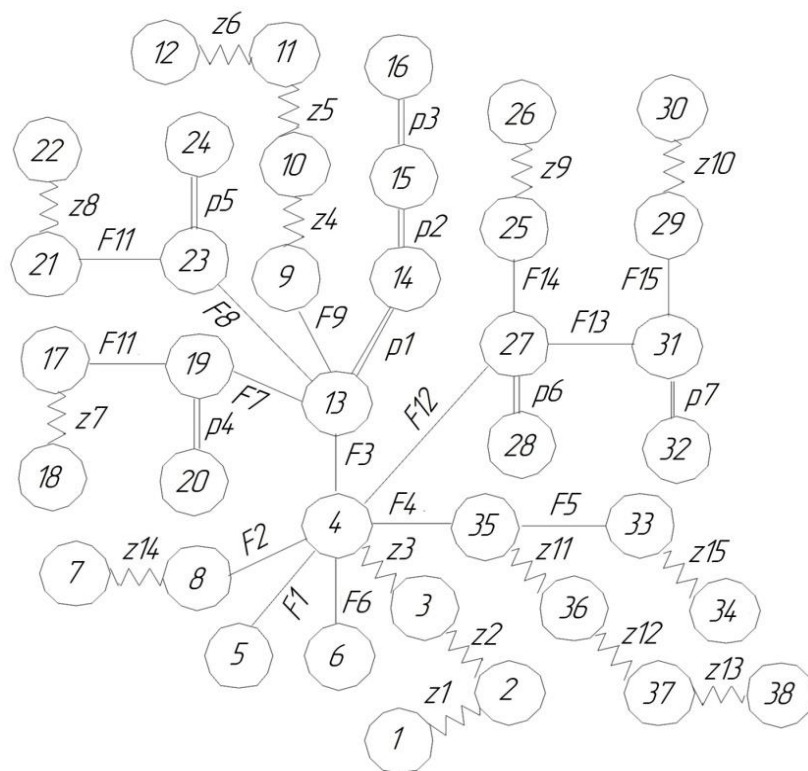
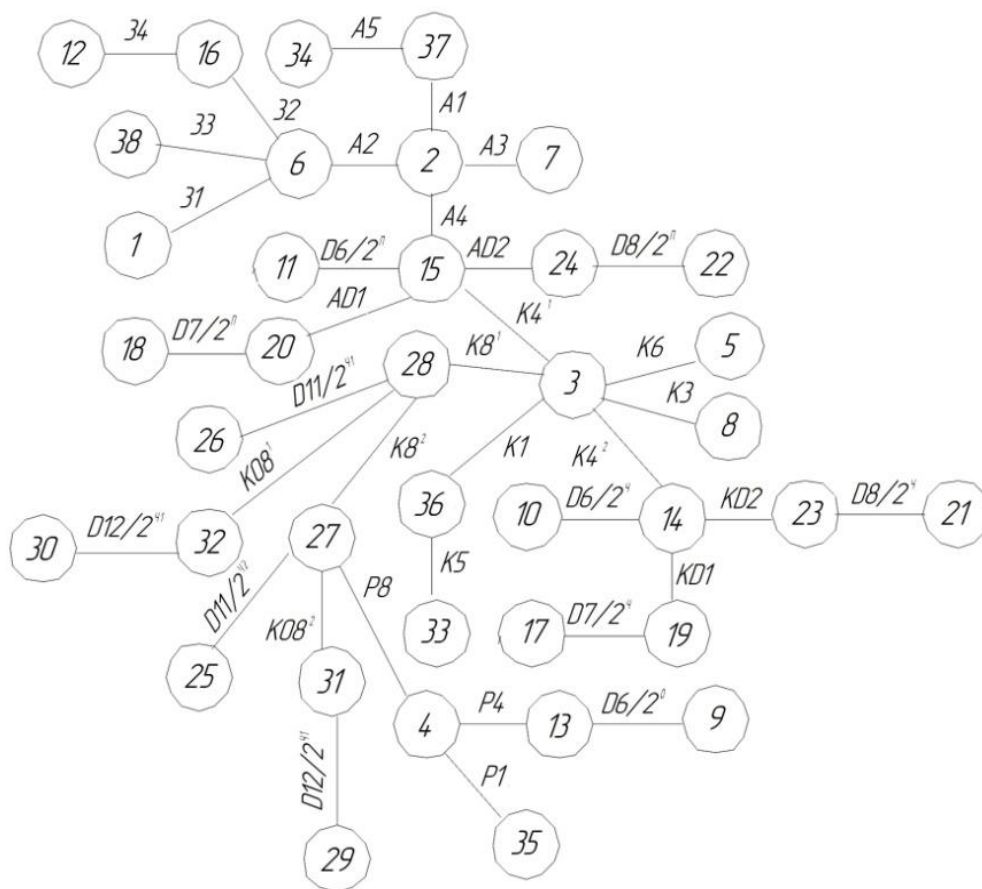


Рисунок 2.70 – Размерная схема технологического процесса по оси X



а



б

Рисунок 2.71 – Графы технологического процесса изготовления детали:
а – исходный, б – производный

Замкнутые контуры (размерные цепи) посредством производного графа выделяются следующим образом. На данном графе отмечаются номера поверхностей, связанных замыкающим звеном, после чего легко находится кратчайший путь, соединяющий на графе отмеченные поверхности. Например, если замыкающее звено $z14$ связывает поверхности 7 и 8, то кратчайшим путем, соединяющим их на производном графе, является цепочка из звеньев $A3-A4-K4^1-K3$. Кратчайший путь всегда будет единственно возможным. Он позволяет записать уравнение размерной цепи без ее построения по следующим правилам:

– в левой части уравнения записывается замыкающее звено со знаком «+»;

– обход размерной цепи начинается с той из поверхностей, связанных замыкающим звеном, у которой меньший номер, в направлении отхода от замыкающего звена;

– по мере обхода в правой части уравнения составляющие звенья записываются со знаком «+», если переход через данное звено идет от поверхности с меньшим номером к поверхности с большим номером, и со знаком «-», если переход идет от поверхности с большим номером к поверхности с меньшим номером. Для звена уравнение размерной цепи будет иметь вид $Z14 = -A3+A4-K4^1+K3$.

Для рассматриваемого примера получаются следующие уравнения размерных цепей:

$$F4 = P1$$

$$F12 = P8$$

$$F3 = P4$$

$$F11 = D8/2^q$$

$$p6 = K8^2$$

$$F10 = D7/2^q$$

$$F9 = D6/2^o$$

$$F14 = D11/2^{q2}$$

$$F15 = D12/2^{q2}$$

$$F13 = K08^2$$

$$z1 = 31-A2$$

$$z2 = A4-K4^1$$

$$p2 = -K4^2+K4^1$$

$$z3 = K8^1 - K8^2 - P8$$

$$p3 = -A4+A2+32$$

$$p7 = -K08^2+K8^2+K08^1$$

$$z13 = -A1+A2+33$$

$$z9 = D11/2^{q2}+K8^2 - D11/2^{q1}$$

$$F1 = P8+K8^2-K8^1+K6$$

$$F2 = P8+K8^2-K8^1+K3$$

$$z12 = -K1+K4^1-A4+A1$$

$$p5 = -K02-K4^2+K4^1+A02$$

$$p4 = -K01-K4^2+K4^1+A01$$

$$z11 = -P1+P8+K8^2-K8^1+K1$$

$$p1 = -P4+P8+K8^2-K8^1+K4^2$$

$$z6 = D6/2^{II}-A4+A2+32-34$$

$$z5 = D6/2^q-K4^2+K4^1-A4-D6/2^{II}$$

$$z10 = D12/2^{q2}-K08^2+K8^2+K08^1-D12/2^{q1}$$

$$F8 = -P4+P8+K8^2-K8^1+K4^2+K02$$

$$F7 = -P4+P8+K8^2-K8^1+K4^2+K01$$

$$F5 = K5-K1+K8^1-K8^2-P8+P1$$

$$F6 = P8+K8^2-K8^1+K4^1-A4+A2$$

$$z8 = D8/2^q-K02-K4^2+K4^1+A02-D8/2^{II}$$

$$z15 = K5-K1+K4^1-A4+A1-A5$$

$$z7 = D7/2^q-K01-K4^2+K4^1+A01-D7/2^{II}$$

$$z4 = D6/2^o-P4+P8+K8^2-K8^1+K4^2-D6/2^q$$

2.7.4 Расчет технологических размеров и размеров заготовки

Расчет технологических размеров и размеров заготовки осуществляется в два этапа.

Этап 1. Проверочный.

Определяется запас по допуску $T(F_i)$, для чего вычисляется поле рассеяния замыкающего звена F_i :

$$\omega F_i = \sqrt{\sum \lambda^2 (T(C_i))^2 + (T(Z_i))^2},$$

где $T(C_i)$ $T(Z_i)$ – допуски технологических размеров и размеров заготовки, λ – коэффициент относительного рассеяния, учитывающий закон распределения размера (в учебных целях допускается принимать усредненное значение 1,44).

Технологический процесс спроектирован правильно, если соблюдается неравенство

$$T(F_i) > \omega F_i,$$

т. е. имеется некоторый запас $\Delta\omega_i > 0$ по допуску на чертежный размер, определяемый выражением

$$\Delta\omega_i = T(F_i) - \omega F_i.$$

Дефицит по точности замыкающего звена (т.е. $\Delta\omega_i < 0$) является признаком неизбежности выхода части деталей в брак. В таком случае необходимо выбранные ранее допуски технологических размеров $T(C_i)$ уменьшить, предусмотрев для этого повышение точности отдельных операций за счет смены оборудования, применения более совершенных приспособлений, инструмента и средств активного контроля. Если это по каким-либо причинам невозможно, то необходима корректировка технологического процесса, которая заключается: 1) в выборе других баз и иной, по сравнению с имеющейся, простановкой размеров на операциях, что может обеспечить укорочение размерной цепи; 2) во введении промежуточного перехода (или переходов), который позволит повысить точность каких-либо составляющих звеньев.

Этап 2. Расчетный.

Расчет технологических размерных цепей осуществляется по средним значениям вероятностным методом.

Для чего рассчитываются средние значения припусков по формуле

$$z_{cpi} = z_{mini} + \frac{\sqrt{\lambda^2_i \sum (T(C_i))^2 + \sum (T(Z_i))^2}}{2}.$$

Средние значения чертежных размеров определяются по формулам:

$$F_{cpi} = F_i + \frac{T(F_i)}{2} \text{ – для охватываемого размера (отверстия);}$$

$$F_{cpi} = F_i - \frac{T(F_i)}{2} \text{ – для охватывающего размера (вала);}$$

$$F_{cpi} = F_i \text{ – для прочих размеров.}$$

Решение системы полученных уравнений размерных цепей осуществляется (после определения средних значений замыкающих звеньев) любым известным методом (метод Гаусса, с помощью определителей и т. д.).

При расчетах округление получаемых значений осуществляется до четвертого знака после запятой. После решения системы необходимо рассчитать номинальные значения размеров заготовки и технологических размеров. После чего необходимо округлить полученные значения технологических размеров и размеров заготовки в соответствии с порядком допуска на соответствующий размер.

2.8 Жесткость машин и технологических систем механической обработки

В процессе эксплуатации на любую машину действуют силы, которые вызывают упругие деформации как машины в целом, так и ее элементов [2–5]. Различают деформации самих деталей, из которых состоит машина, и контактные деформации на поверхностях сопряжения деталей. Деформации деталей не являются доминирующими, они только дополняют контактные, составляющие основную долю (до 85 %) в общих перемещениях. Сближение контактирующих поверхностей зависит не только от приложенной силы, но и от реальной площади контакта, которая определяется погрешностью формы и микрогеометрией этих поверхностей, а также приложенной силой. Технологическая система

механической обработки отличается от обычной системы тем, что в нее, кроме технологической машины (станка), включены приспособление, инструмент и заготовка. В такой системе технолога интересует не полная упругая деформация, а только та ее часть, которая влияет на размер обрабатываемой поверхности, смещая уровень размерной настройки.

Свойство машины (и технологической системы) упруго деформироваться под действием силы будем называть *податливостью*, а обратное податливости свойство – *жесткостью*. Податливость измеряется в миллиметрах на килоньютон (мм/кН), а жесткость j – в килоньютонах на миллиметр (кН/мм). Связь между силой P и соответствующей ей упругой деформацией δ обычно нелинейна (рис. 2.72), поэтому определяющее уравнение жесткости всякой машины имеет вид

$$j = \frac{\Delta P}{\Delta \delta}$$

где ΔP – приращение деформирующей силы; $\Delta \delta$ – соответствующее ему приращение упругой деформации.

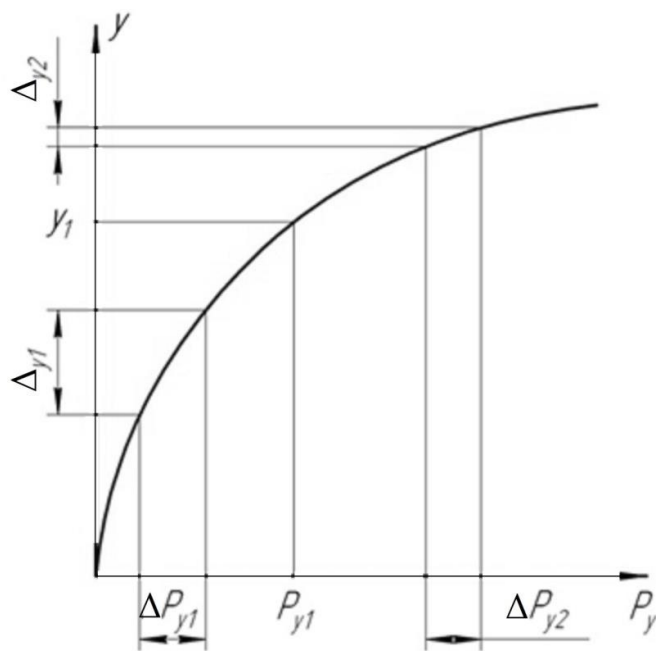


Рисунок 2.72 – Зависимость проекции y упругой деформации δ технологической системы от проекции силы резания

Для технологической системы механической обработки определяющее уравнение жесткости записывается следующим образом:

$$j = \frac{\Delta P_y}{\Delta y},$$

где ΔP_y – приращение проекции силы резания на ось Y , перпендикулярную к обработанной поверхности; Δy – соответствующее ему приращение проекции упругой деформации на ту же ось.

В качестве приближенной характеристики технологической системы используют среднюю жесткость j для диапазона изменения силы P_y от нуля до некоторого фиксированного значения P_{y1} .

Тогда

$$j = \frac{P_{y1}}{y_1}.$$

Жесткость технологической системы существенно зависит от ее состояния и условий нагружения. Так, средняя жесткость шпиндельной бабки круглошлифовального станка после 30-минутного разогрева на

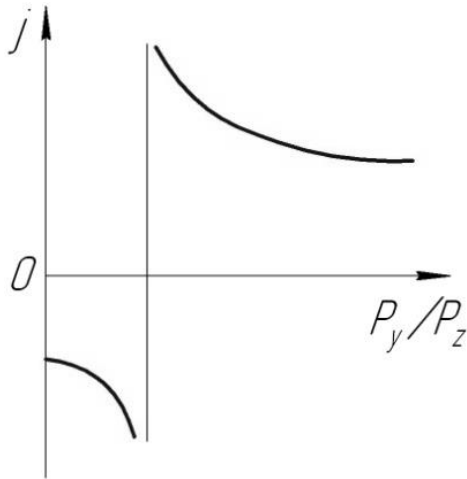


Рисунок 2.73 – Зависимости жесткости токарного станка от отношения проекций силы резания

холостом ходу увеличивается на 44 %. Эксперименты показали, что средняя жесткость существенно зависит от координат точки приложения и направления действия силы резания. Например, на рисунке 2.73 показана зависимость жесткости j токарного станка от отношения P_y/P_z . Объясняется это явление тем, что на упругую деформацию суппорта влияет не только составляющая P_y , но моменты сил P_x и P_z относительно мгновенных точек поворота в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При этом из-за изменения отношения между составляющими силы резания изменяются не только значения указанных моментов, но иногда и их знак.

При точении в центрах жесткость зависит от координаты x точки обработки, а характер этой зависимости обуславливается относительной податливостью заготовки (рис. 2.74). На схеме: $j_{п.б.}$, $j_{суп}$ и $j_{з.б.}$ – жесткости соответственно передней бабки, суппорта и задней бабки, $R_{п.б.}$ и $R_{з.б.}$ – реакции опор заготовки в передней и задней бабках.

Если жесткость заготовки очень велика, то жесткость технологической системы при положении точки A между центрами будет большей, чем в зоне передней или задней бабки (показано штриховой линией). Изменение жесткости, показанное сплошной линией, соответствует случаю, когда жесткость заготовки мала по сравнению с жесткостью передней и задней бабок.

Очень часто при обработке сила резания периодически изменяется либо из-за изменения глубины t резания (рис. 2.75), либо вследствие прерывности процесса резания из-за особенностей метода (строгание, долбление, фрезерование) и(или) формы обрабатываемой поверхности. В первом приближении можно принять, что сила резания изменяется либо гармонически, либо в виде прямоугольных импульсов.

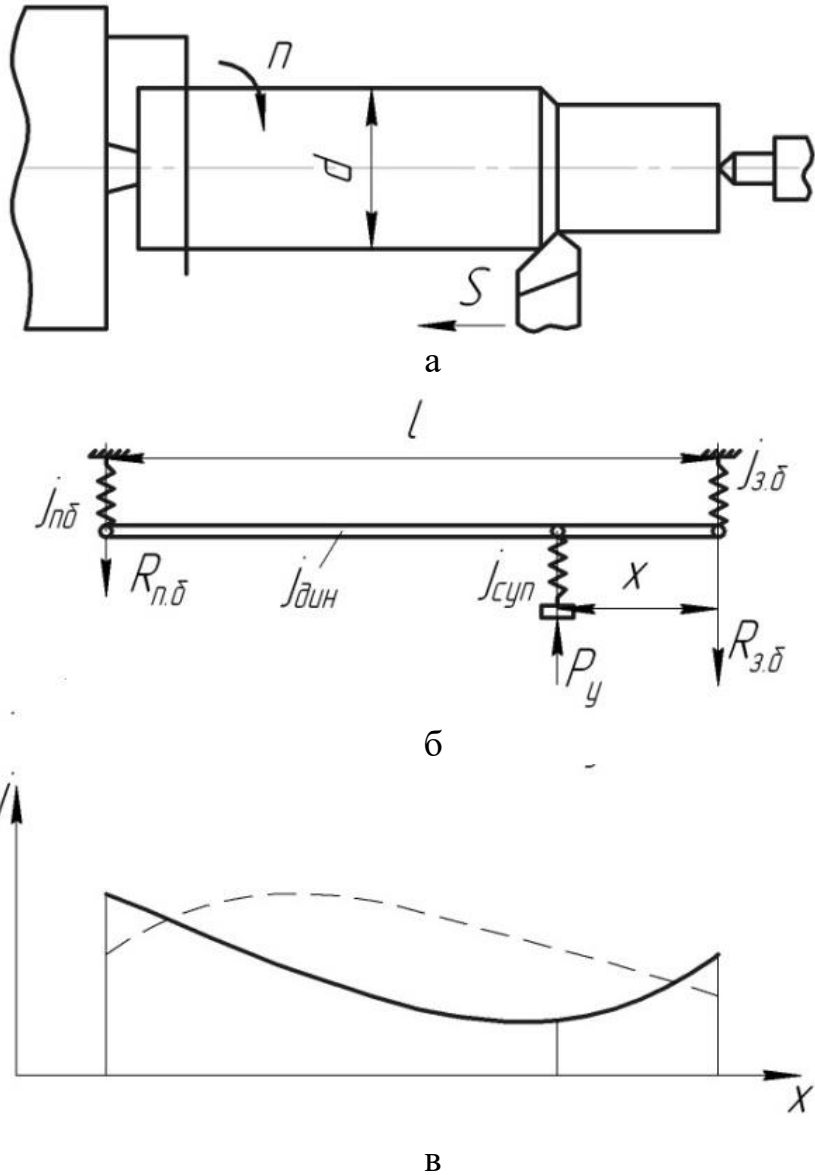


Рисунок 2.74 – Схема изменения жесткости при точении в центрах:
 а – эскиз установки заготовки, б – расчётная схема, в – график зависи-
 мости жесткости от координаты

Полагая, что в определяющем уравнении $\Delta P_y = A_p$, а $\Delta y = A_{упр}$, где A_p – амплитуда силы P_y , а $A_{упр}$ – амплитуда упругой деформации, можно ввести понятие «динамическая жесткость»:

$$j_{дин} = \frac{A_p}{A_{упр}}.$$

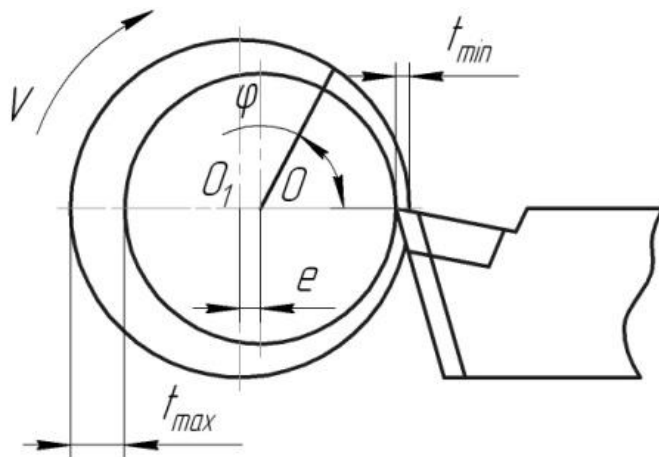


Рисунок 2.75 – Схема изменения глубины резания при точении заготовки, ось вращения O которой не совпадает с ее геометрической осью O_1 (e – смещение осей, φ – угол поворота)

Минимальная жесткость соответствует совпадению частоты возмущения с собственной частотой колебаний системы $\omega_{обр}$. При $\omega_{обр} \rightarrow 0$ динамическая жесткость становится равной *статической жесткости* j .

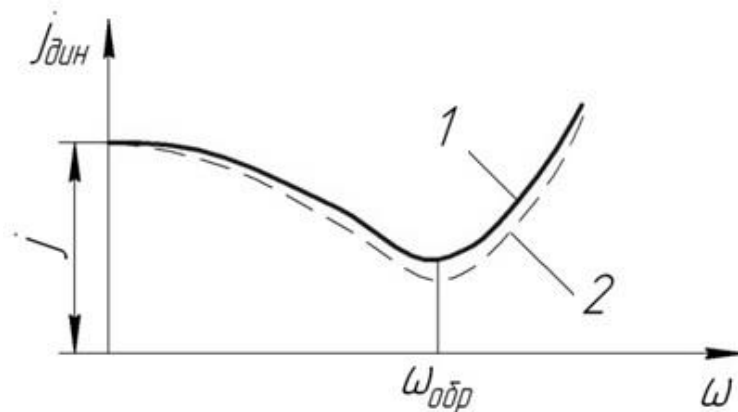


Рисунок 2.76 – Зависимость динамической жесткости системы с одной степенью свободы от частоты возмущающей силы

Динамическая $J_{дин}$ и статическая j жесткости связаны коэффициентом динамичности $K_{дин}$:

Динамическая жесткость характеризует поведение технологической системы при ее нагружении периодической силой. Определяющее уравнение можно применять и для случая, когда характер изменения силы резания имеет вид прямоугольных импульсов. Зависимость динамической жесткости от частоты ω возмущающей силы для системы с одной степенью свободы показана на рисунке 2.76, где линия 1 относится к системе с большим, а линия 2 – к системе с меньшим демпфированием.

$$K_{дин} = \frac{j}{j_{дин}}$$

Чем больше коэффициент $K_{дин}$, тем больше амплитуда упругой деформации при одинаковой амплитуде силы резания.

Обычно технологическая система имеет несколько степеней свободы и соответственно несколько собственных частот колебаний. Например, случай токарной обработки очень жесткой заготовки в патроне можно привести к системе с двумя степенями свободы. Коэффициент динамичности системы в данном случае определяется по формуле

$$K_{дин} = \frac{K_{дин1} j_2 + K_{дин2} j_1}{j_1 + j_2},$$

где индекс 1 относится к заготовке, а индекс 2 – к патрону. Анализ этого выражения показывает, что для уменьшения коэффициента динамичности технологической системы без изменения ее общей жесткости необходимо увеличить статическую жесткость того элемента, у которого $K_{дин}$ больше, и уменьшать у того, у которого он меньше.

Жесткость технологических систем механической обработки и их элементов регламентируется для оценки их качества. Она обычно определяется экспериментально. Наиболее объективные результаты дают методы определения жесткости, которые в качестве источника деформирующей силы используют процесс резания. Такие методы называют производственными. Некоторые из них основаны на использовании элемента с известной жесткостью.

Производственный метод определения жесткости токарного станка (рис. 2.77) осуществляется в три этапа. На первом этапе за 5...7 проходов без изменения размера настройки A_n обтачивается участок заготовки, после чего можно считать, что $A_n = d_n/2$. На втором этапе без изменения размера настройки обрабатывается оставшаяся часть заготовки. На последнем этапе с помощью индикаторного устройства в нескольких сечениях с разными вылетами L_i измеряются отклонения Δ_i радиуса $d_i/2$ от A_n . Причиной этих отклонений является упругая деформация технологической системы, т. е. в любом сечении $\Delta_i = y_i$. Эта деформация складывается из деформации станка $y_{ст}$ и обрабатываемого образца $y_{обр}$ податливость которого, как известно из курса «Сопротивление материалов», пропорциональна вылету обработки L_i в кубе. Для любого сечения можно записать:

$$y_i = \Delta_i = P_y (P_{cm} + P_{обpi}),$$

где $p_{ст}$ – податливость станка; $P_{обpi}$ – податливость обрабатываемого образца в i -м сечении. Отсюда с учетом известной зависимости податливости образца от его вылета и на основании того, что податливость системы из последовательно соединенных элементов равна сумме податливостей этих элементов, получаем

$$j = \frac{29,59D^4}{L_{обр}^3} \frac{1 - K_{di}}{K_{di} - \lambda_i^3},$$

где $K_{di} = \frac{\Delta_i}{\Delta_{обpi}}$; $\Delta_i = \frac{L_i}{L_{обр}}$.

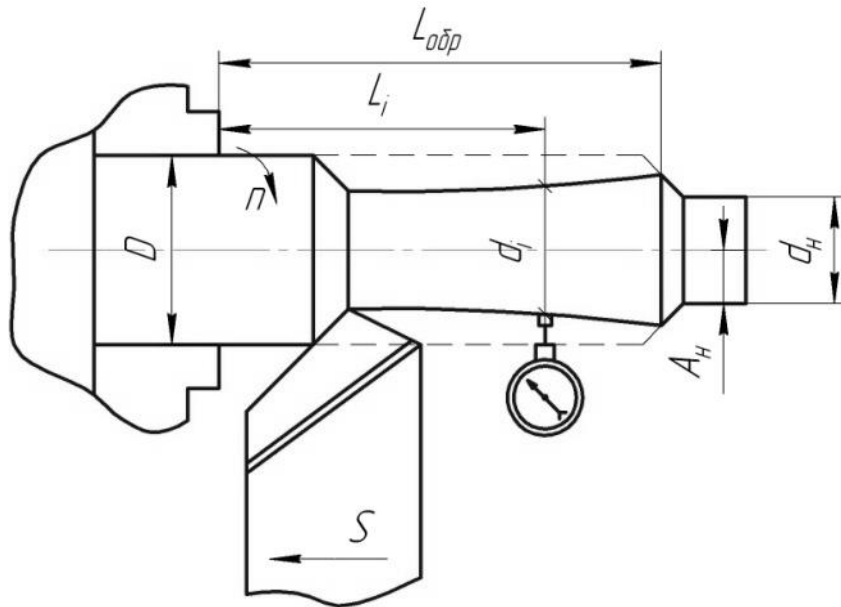


Рисунок 2.77 – Схема производственного метода определения жесткости токарного станка (система «передняя бабка – суппорт»)

Для повышения точности оценки жесткости и компенсации погрешности измерения Δ_i необходимо вычислить j_{cm} для нескольких сечений (значений λ_i) и затем определить среднее значение.

Рассмотренный метод позволяет определять и динамическую жесткость. Для этого образец закрепляют через эксцентричную разрезную втулку с заданным значением эксцентриситета $e_{обр}$. После обтачивания замеряется эксцентриситет e_i в нескольких сечениях. Полученные данные позволяют вычислять динамическую жесткость.

Для определения жесткости плоскошлифовального станка можно использовать двухопорную балку 1, на которой закреплены три образца 2...4 (рис. 2.78). На первом этапе путем длительного выхаживания добиваются, чтобы шлифованные поверхности образцов находились в одной плоскости. Затем, после выполнения вертикальной подачи круга s , осуществляется один проход, во время которого шлифуются только образцы 3 и 4. При шлифовании образца 4 податливость системы равна податливости станка $p_{ст}$, а при шлифовании образца 3 – сумме податливостей станка и балки (p_1). И в данном случае легко получаем выражение для вычисления жесткости станка $j_{ст}$, если известны жесткость балки j_1 и припуски Π_1 и Π_2 , снятые соответственно с образцов 4 и 3:

$$j = \frac{j_1 s (\Pi_1 - \Pi_2)}{(S - \Pi_1) \Pi_2}.$$

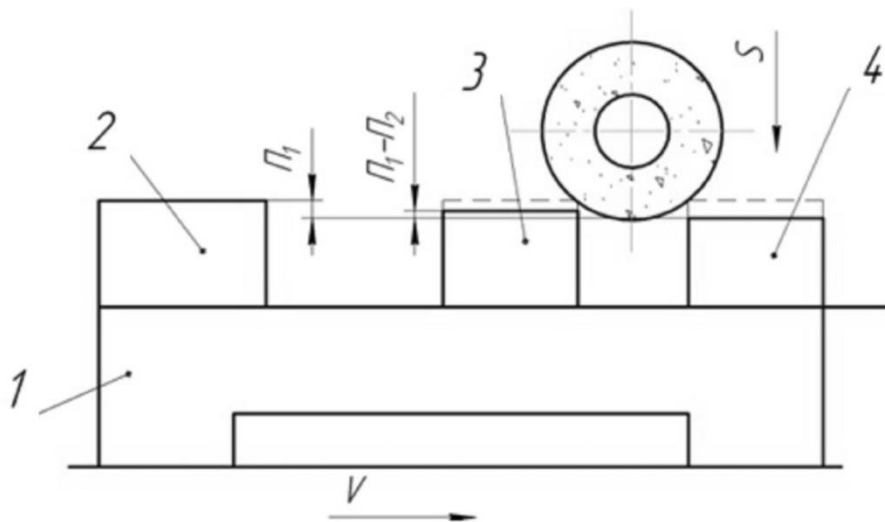


Рисунок 2.78 – Схема производственного метода определения жесткости плоскошлифовального станка

Более точные результаты оценки жесткости получаются, если есть возможность в процессе обработки измерять силу резания и упругую деформацию.

2.9 Погрешности сборки и механической обработки

Погрешности, возникающие при сборке и механической обработке, проявляются как систематические или случайные величины [2–5]. Источником *систематических погрешностей* является определенная

причина или процесс, знание которых позволяет прогнозировать уровень погрешности в любой момент времени протекания технологического процесса. *Случайные погрешности* возникают в результате действия большого количества не связанных между собой факторов. Прогнозировать уровень случайной погрешности для конкретной сборочной единицы или обработанной детали невозможно. Причинная связь между случайной погрешностью и вызывающими ее факторами иногда бывает известной (явной), а иногда – не вполне выясненной.

В зависимости от характера влияния времени τ протекания технологического процесса (или порядкового номера i обрабатываемой заготовки) погрешности проявляются как *стационарные* или *нестационарные*. Средний уровень и размах стационарной погрешности не зависят от времени, а у нестационарной может изменяться средний уровень, как это показано на рисунке 2.79, либо, для случайной погрешности, размах, либо и средний уровень и размах.

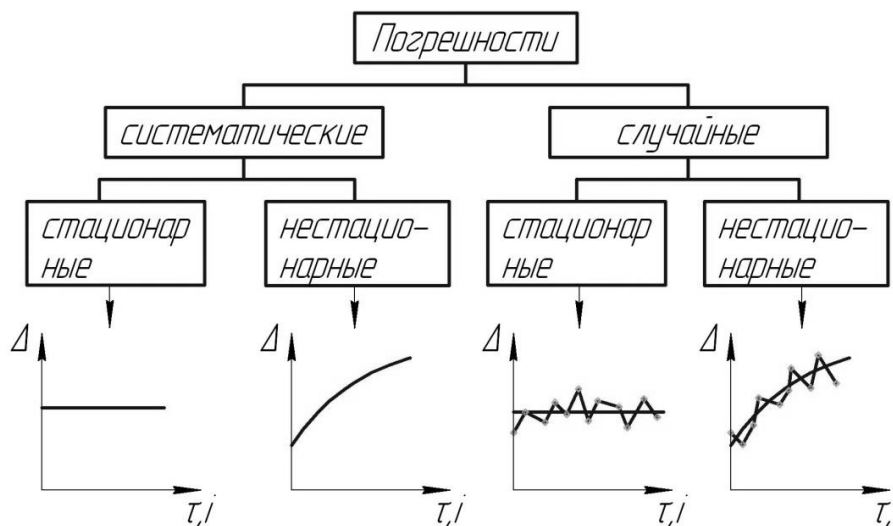


Рисунок 2.79 – Классификация погрешностей по проявлению (Δ – погрешность, τ – время, i – номер заготовки)

Наиболее полно случайная погрешность характеризуется законом распределения (его параметрами). Установлено, что погрешности размеров подчиняются нормальному закону распределения (рис. 2.80), который имеет место, когда случайная величина зависит от действия большого числа различных факторов, причем интенсивность влияния всех факторов примерно одинакова. Нормальному закону, кроме размеров деталей, обработанных на настроенных станках, подчиняются и масса заготовок, погрешности измерений, твердость заготовок и т. д.

Параметры нормального закона: математическое ожидание $M(A)$ и стандартное отклонение σ можно оценить на основании результатов измерения размера A_i деталей выборки объемом m из партии или потока.

Оценкой $M(A)$ является среднее значения \bar{A} :

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^m A_i}{m},$$

а оценкой стандартного отклонения σ величина S , определяемая из выражения

$$S^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(A_i - \bar{A})^2}{m-1},$$

где A_i – элементы вариационного ряда размеров A .

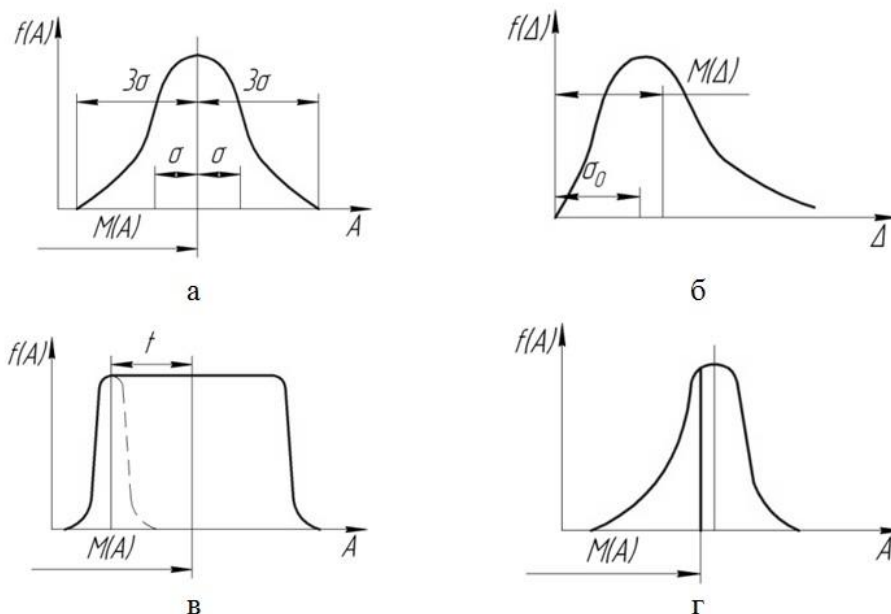


Рисунок 2.80 – Нормальный закон распределения погрешностей обработки

Данные оценки являются приближенными вследствие ограниченности объема выборки. Точность оценки характеризуется доверительным интервалом, в котором с заданной доверительной вероятностью (характеристики достоверности оценки) находятся истинные значения оцениваемого параметра. При относительно небольшом объеме выборки доверительный интервал для $M(A)$ определяется следующим неравенством:

$$\bar{A} - \frac{t(P, m)S}{\sqrt{m}} < M(\bar{A}) < \bar{A} + \frac{t(P, m)S}{\sqrt{m}},$$

где $t(P, m)$ – критерий Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности P и объема выборки m .

Значения критерия Стьюдента для $P = 0,95$ приведены в таблице 2.23. Доверительный интервал для стандартного отклонения определяется следующим неравенством (для $m > 15$):

$$S(1 - q) < \sigma < S(1 + q),$$

где q – критерий, зависящий от доверительной вероятности P и объема выборки m (табл. 2.24).

Если $m < 15$, то оценку S лучше осуществлять по размаху $R_m = A_{\max} - A_{\min}$ значений A в выборке. Тогда

$$\frac{R_m}{d_{m1}} < \sigma < \frac{R_m}{d_{m2}},$$

где d_{m1}, d_{m2} – критерии, зависящие от доверительной вероятности P и объема выборки m (табл. 2.25).

Таблица 2.23 – Значения критерия Стьюдента при $P = 0,95$

m , шт.	t	m , шт.	t
5	2,78	18	2,11
8	2,37	20	2,09
10	2,26	25	2,06
12	2,20	30	2,05
15	2,15	40	2,02

Таблица 2.24 – Значения критерия q при $P = 0,95$

m , шт.	q	m , шт.	q
15	0,46	30	0,28
17	0,42	35	0,26
20	0,37	40	0,24
25	0,32	45	0,22

Таблица 2.25 – Значения критерия d_m при $P = 0,95$

m , шт.	d_{m1}	d_{m2}	m , шт.	d_{m1}	d_{m2}
4	3,98	0,59	10	4,79	1,67
6	4,36	1,06	11	4,86	1,78
8	4,61	1,41	12	4,92	1,88
9	4,70	1,55	-	-	-

Погрешности относительного положения и погрешности формы поверхностей подчиняются закону Рэлея (рис. 2.80 б). Эти погрешности

являются положительными величинами и изменяются от нуля до определенного значения. Закон Рэлея однопараметрический. Стандартное отклонение погрешности $\Delta_{(\sigma)}$ связано с параметром закона распределения σ_0 зависимостью $\sigma = 0,655\sigma_0$, а математическое ожидание погрешности Δ – выражением $M(\Delta) = 1,253\sigma_0$.

Для распределения Рэлея экспериментальная оценка математического ожидания и стандартного отклонения вычисляется так же, как для нормального распределения.

Если на выполняемый размер, кроме случайных причин, обуславливающих рассеяние его значений согласно нормальному распределению, действует систематическая причина, обуславливающая равномерное смещение l центра группирования размеров, то при $l/\sigma > 25$ (рис. 2.80 в) распределение этого размера будет близко к закону равной вероятности.

Если систематическая причина обуславливает неравномерное смещение центра группирования размеров, то выполняемый размер будет подчиняться несимметричному закону распределения (рис. 2.80 г), который называется обобщенным А-законом.

Поле рассеяния размеров (погрешностей) при известных параметрах закона распределения можно определить из следующих выражений: $\omega = 6\sigma$ (закон нормального распределения); $\omega = 5,25\sigma$ (закон Рэлея); $\omega = 3,464\sigma$ (закон равной вероятности). Данные значения соответствуют доверительной вероятности $P = 0,997$.

Источниками сборочных погрешностей являются: погрешности деталей, из которых собирается машина или сборочная единица; силовое замыкание, необходимое для сохранения определенности базирования.

Силовое замыкание вызывает не только полезные, преднамеренно создаваемые упругие деформации деталей, но и вредные, которые искажают форму, полученную деталью после механической обработки. Последние возникают из-за неравномерного распределения внутренних напряжений в деформируемой детали, вызываемых силовым замыканием. Это возможно либо из-за неравномерного распределения точек приложения замыкающих сил, заложенного в конструкции сборочной единицы, либо из-за погрешностей деталей сборочной единицы. Например, при сборке на валу ряда деталей с непараллельными торцами его ось искривляется.

При сборке машин и сборочных единиц нормальной точности вредные деформации составляют небольшую часть допуска на их параметры качества и поэтому считаются несущественными. При сборке же высокоточных (1...4-я степени точности) изделий эти деформации могут не только быть соизмеримыми с допуском, но и существенно превосходить его.

Погрешности механической обработки зависят от множества различных факторов. Их классификация приведена на рисунке 2.81. Для погрешностей, не зависящих от режима резания, предусмотрены два уровня классификации, а для других достаточно одного. Более подробно причины формирования погрешностей механической обработки рассмотрены ниже.

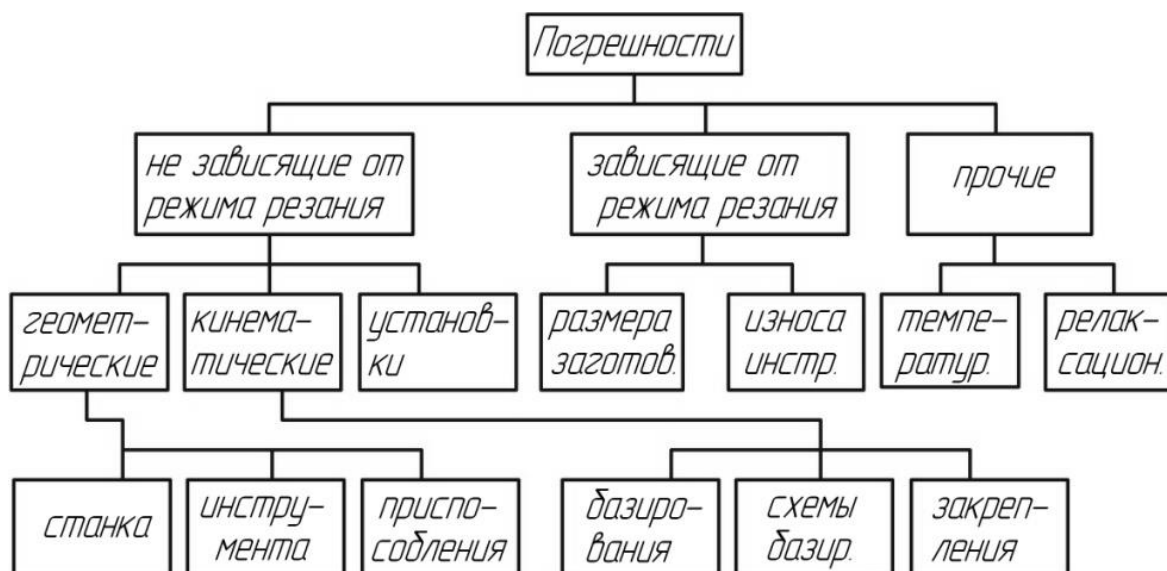


Рисунок 2.81 – Классификация причин возникновения погрешностей

2.10 Погрешности, не зависящие от режима резания

Геометрические, кинематические погрешности и погрешности установки (см. рис. 2.81) не зависят от режима резания. К *геометрическим погрешностям* станка относятся погрешности расстояний и относительных поворотов исполнительных элементов станка, биение шпинделя и погрешности формы направляющих элементов станка. Некоторые из перечисленных погрешностей переносятся на обрабатываемую заготовку (наследуются ею) и проявляются как систематическая стационарная погрешность. Например, погрешности замыкающих звеньев A_{Δ} и α_{Δ} агрегатного станка (см. рис. 2.82) полностью переносятся на обрабатываемую заготовку. В других случаях геометрические погрешности станка при переносе на деталь трансформируются. Так, неперпендикулярность оси шпинделя вертикально-фрезерного станка к направлению подачи (рис. 2.82) ведет к появлению погрешности формы Δ (неплоскостности) обработанной поверхности, поскольку ее образующей становится отрезок эллипса. Радиус кривизны обработанной по-

верхности можно найти по формуле $R = D/(2\alpha)$ (здесь α – угол наклона оси фрезы в радианах), а отклонение Δ от плоскости – по формуле $\Delta = \alpha B^2 / 4D$.

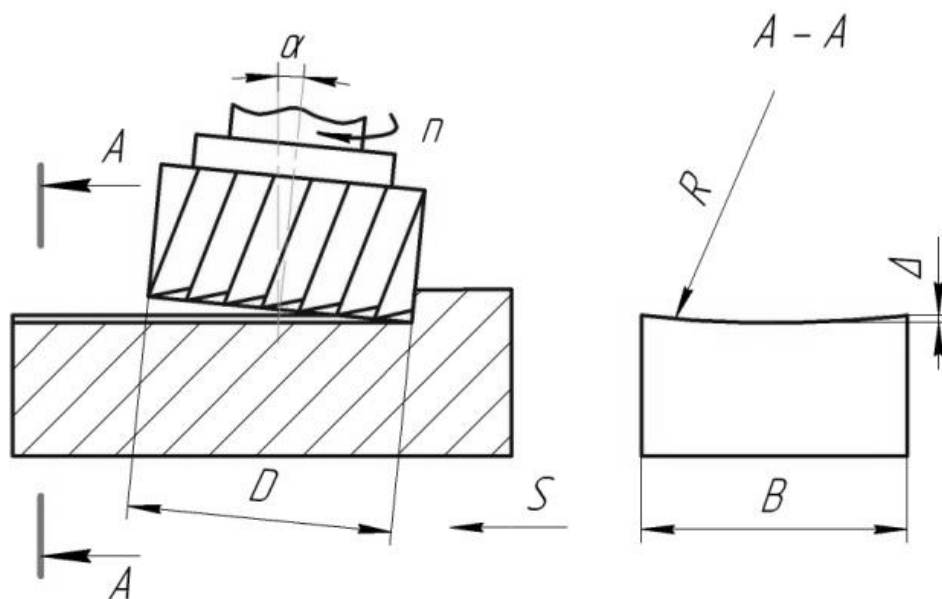


Рисунок 2.82 – Схема формирования отклонения от плоскостности при торцовом фрезеровании

Смещение оси центра задней бабки по отношению к оси шпинделя токарного станка в горизонтальной плоскости приводит к появлению конусности (рис. 2.83 а), а в вертикальной плоскости придает обработанной поверхности вид гиперboloида вращения (рис. 2.83 б). В первом случае максимальное отклонение от цилиндричности $\Delta_{цил} = 2\Delta_{гор}$, а во втором $\Delta_{цил} \approx \Delta_{верт}^2 / d$ (здесь d – номинальный диаметр обработанной поверхности), т. е. во много раз меньше, чем в первом.

Погрешности изготовления инструмента переносятся на обработанную деталь только в тех случаях, когда формообразование осуществляется методами копирования размера и(или) формы инструмента, а также методами огибания. И в данном случае погрешности могут переноситься непосредственно (погрешность диаметра развертки, погрешность формы режущей кромки фасонного инструмента и т. д.) или опосредованно с трансформацией. Например, погрешность заточки сверла (неодинаковость углов в плане для режущих кромок или их торцовое биение) приводит к разбивке просверленного отверстия и уводу его оси.

Сверление отверстий по кондукторным втулкам обеспечивает не только повышение точности положения его оси (начальное смещение уменьшается), но и уменьшение разбивки отверстия примерно на 50 %.

То же можно сказать и о влиянии погрешности заточки зенкеров. Разбивка отверстий в данном случае возрастает с увеличением скорости резания, подачи, глубины резания и твердости обрабатываемого материала и уменьшается с увеличением главного угла в плане, заднего угла и жесткости технологической системы. Применение кондукторных втулок повышает точность диаметра зенкеруемых отверстий.

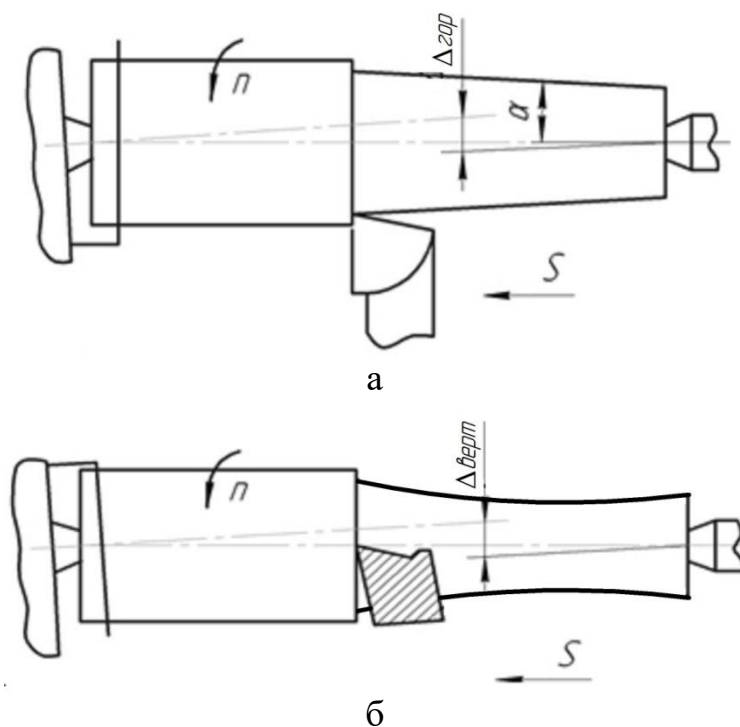


Рисунок 2.83 – Схемы формирования погрешностей формы при точении

К геометрическим погрешностям станочных приспособлений относятся:

1) погрешности расстояний и относительных поворотов установочных и направляющих элементов;

2) погрешности расположения установочных элементов по отношению к основным базам;

3) погрешности формы установочных элементов и основных баз. Степень и способ переноса геометрических погрешностей приспособления на обработанную деталь можно установить только после анализа конкретной ситуации. Например, при изготовлении детали из групповой заготовки с одной установки (рис. 2.84 а) биение установочно-зажимных элементов токарного патрона, а следовательно, и биение заготовки не передается геометрически ступеням детали. Но если требуется доработка детали с другой установки (рис. 2.84 б), то вновь обработанные поверхности *A* будут иметь биение $2e$ относительно технологической базы, т. е. смещение осей *1* и *2*.

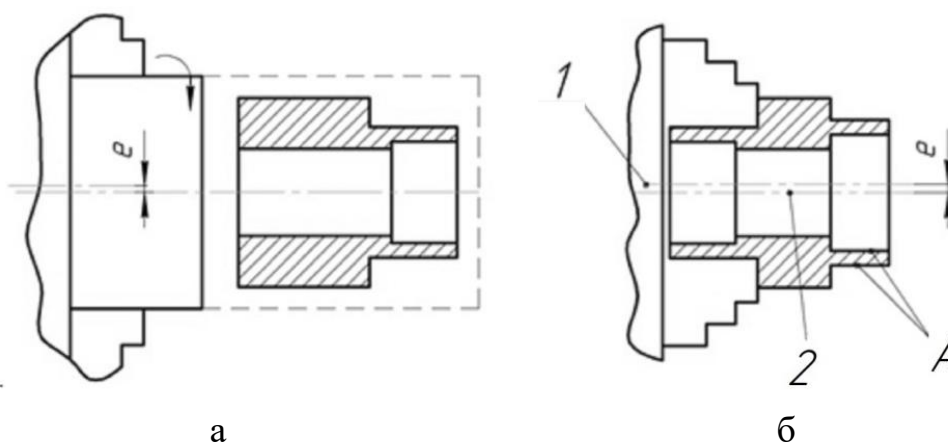


Рисунок 2.84 – Схемы передачи смещения установочно-зажимных элементов приспособления обработанной детали

Источники *кинематических погрешностей* в цепях подачи, деления и огибания металлорежущих станков – это погрешности изготовления и сборки винтовых и зубчатых передач, которые являются элементами кинематической цепи. При обработке с реверсированием движения подачи источником погрешностей могут стать зазоры в передачах. Кинематические погрешности передаются на обработанную деталь чаще всего при формообразовании винтовых и зубчатых поверхностей в виде мгновенной и(или) накопленной ошибок шага, а также в виде погрешности формы. Они могут проявляться также как погрешности позиционирования на горизонтально- и координатно-расточных станках, на обрабатывающих центрах и т. д. Погрешность позиционирования приводит к смещению оси расточенного отверстия или к погрешности выполнения размера.

Для компенсации кинематических погрешностей в станках предусмотрены дифференциальные механизмы с корригирующими элементами типа линеек или кулаков. К достоинствам механических устройств для компенсации кинематических погрешностей относятся относительная простота и достаточно высокая надежность. А главным недостатком является то обстоятельство, что по мере изнашивания элементов передачи необходимо перепрофилировать корригирующий элемент устройства. Поэтому в последнее время в прецизионных станках применяются электронные корректоры с фотодатчиками.

На рисунке 2.85 показана схема компенсации зазоров в зубчатых зацеплениях гитары 3, в резьбе ходового винта 2 и гайки 1 резьбошлифовального станка, приводящих при шлифовании с реверсом подачи без компенсатора к погрешности толщины нитки резьбы. Шпиндель 7 получает движение от шестерни 4 через палец 5, который входит в паз диска 6. Чтобы обеспечить одновременность начала вращения шпинделя и движения стола, при реверсе подачи подбирают рабочий зазор δ в диске 6, соответствующий сумме зазоров в передачах. Установка необ-

ходимого зазора осуществляется на основании замера предварительно шлифованной резьбы.

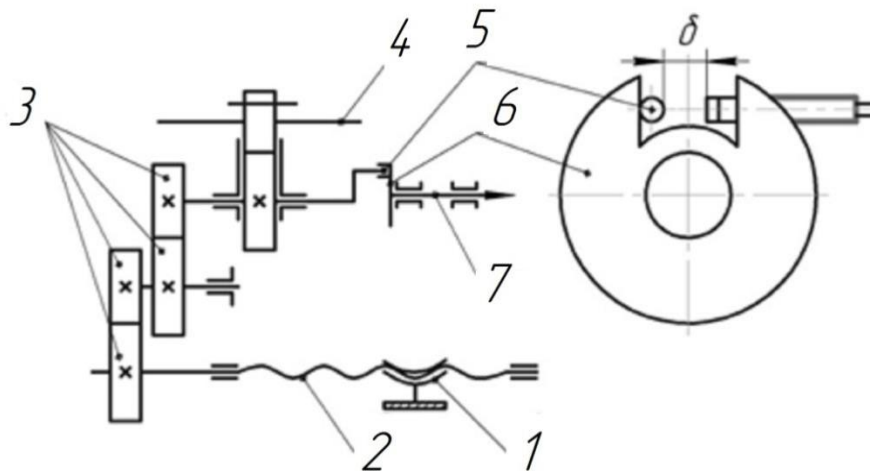


Рисунок 2.85 – Схема компенсации зазора в передачах механизма подачи резьбошлифовального станка

Погрешность установки заготовки в приспособлении обусловлена: погрешностями формы и относительного положения технологических баз; погрешностями, заложенными при проектировании технологического процесса (погрешность схемы базирования и погрешность схемы установки); погрешностями закрепления.

Погрешности технологических баз приводят к смещению Δ_b измерительных баз (рис. 2.86) и проявляются как стационарные случайные погрешности обеспечиваемых на данной операции размеров A и B , поскольку в данной задаче размер настройки A_n считается неизменным.

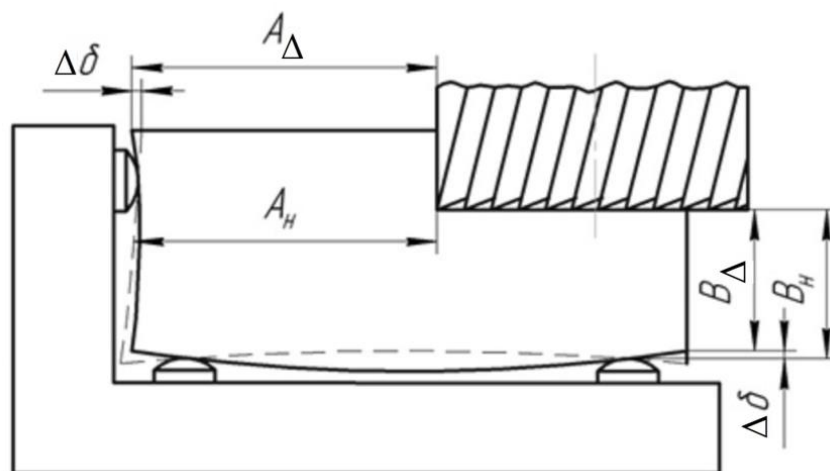


Рисунок 2.86 – Схема формирования погрешности базирования

Схема базирования должна быть спроектирована таким образом, чтобы базовая система координат лежала на компонентах ГМЗ, от которых заданы размеры и показатели угловой ориентации обрабатываемых элементов заготовки. Если это требование невозможно выполнить, то появляются условия для возникновения *погрешности схемы базирования*. Условия для возникновения погрешности схемы базирования имеют место, когда из-за некорректной простановки размеров или по другим причинам невозможно создать ССК на компонентах ГМЗ, от которых заданы размеры и показатели угловой ориентации обрабатываемых элементов заготовки.

Пример указанной ситуации приведен на рисунке 2.87. Положение оси обрабатываемого отверстия определяется углом β , который откладывается от плоскости Б, перпендикулярной установочной базе (плоскость С), и расстоянием A_n , которое откладывается от наружного диаметра ГМО. Плоскость Б будет направляющей базой. Провести третью плоскость СКО через точку М нельзя, так как в этом случае не получится декартовой системы координат. Кроме того, ее положение не является постоянным, а зависит от диаметра D , который изменяется в пределах допуска. Поэтому эту плоскость ССК (Е) следует провести через точку О. В таком случае размер A_n зависит от фактического значения радиуса детали и колеблется в пределах допуска. Тогда погрешность схемы базирования

$$\Delta_{co}(A_n) = TD/2.$$

Если задать размер A_{n1} вместо A_n , то условий для появления погрешности схемы базирования не будет.

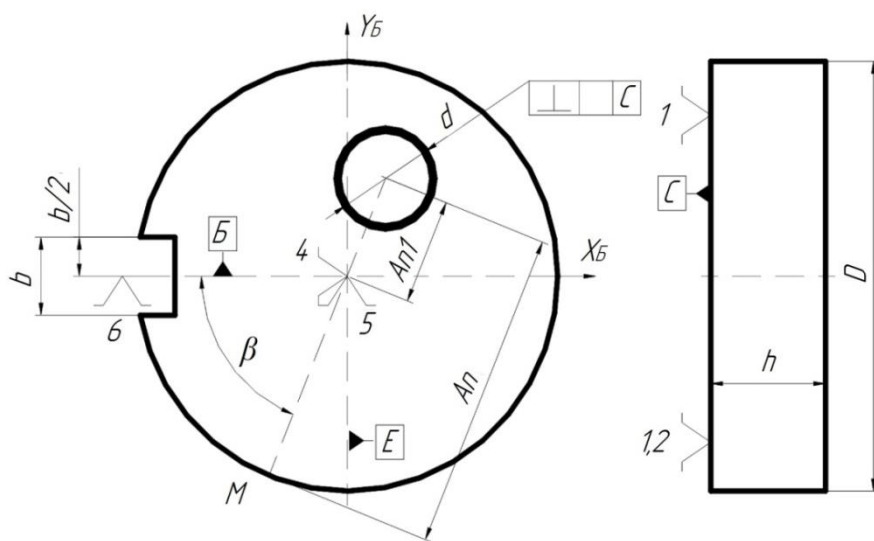


Рисунок 2.87 – Иллюстрация условий для проявления погрешности схемы базирования по размеру

На этапе проектирования теоретической схемы установки нужно обеспечить контакт технологических баз с моделями установочных компонентов (сформировать опорные точки), тем самым определить положение установочной системы координат (УСК) (рис. 2.88). Однако это возможно далеко не всегда, особенно, если технологические базы являются скрытыми. Тогда возникают условия для появления *погрешности теоретической схемы установки*. Погрешностью теоретической схемы установки будем называть поле рассеяния отклонений положения установочной системы координат от базовой системы координат при разработке схемы установки.

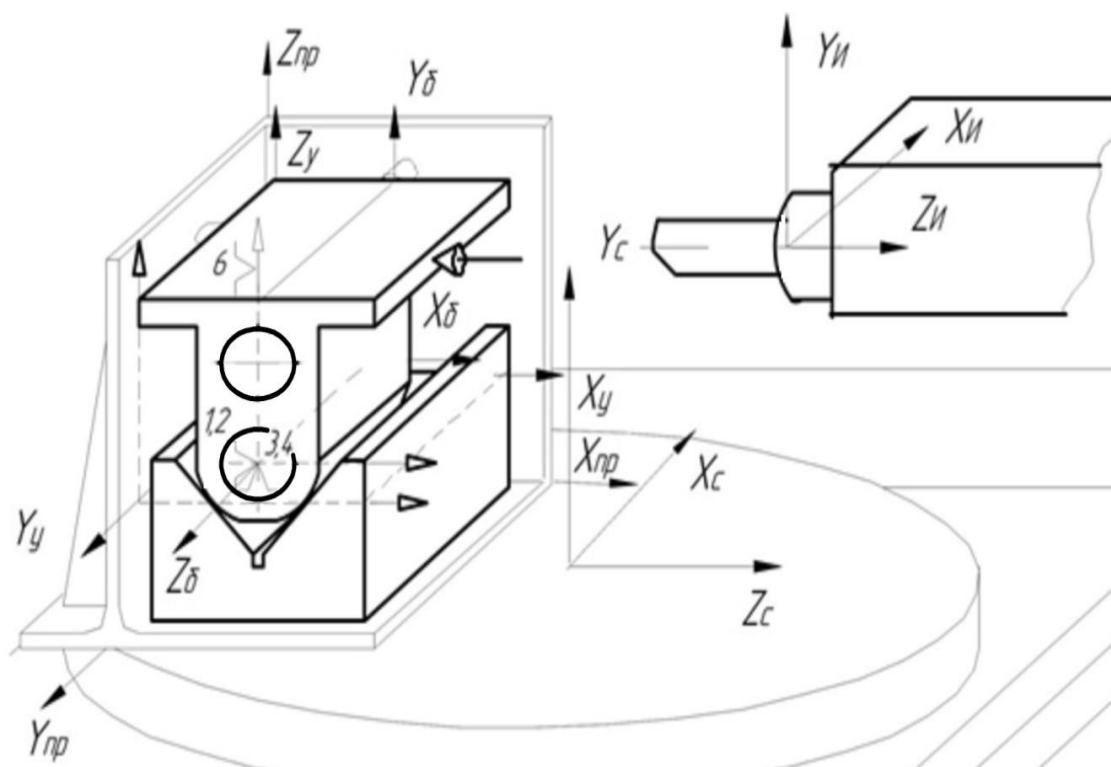


Рисунок 2.88 – Взаимное расположение систем координат:
 б – базовая система координат (система координат объекта производства); у – установочная (опорная) система координат;
 пр – система координат приспособления;
 с – станок; и – инструмент

Таким образом, при проектировании схемы установки желательно совместить опорную систему координат с базовой (собственной), чтобы не создавать условия для возникновения *погрешности схемы установки* – меры несовпадения опорной и базовой систем координат.

Погрешностью схемы установки будем называть поле рассеяния отклонений положения базовой системы координат от заданного при разработке схемы установки. При этом считается, что технологические базы не имеют погрешностей формы. Причиной возникновения по-

грешности схемы установки являются погрешности размеров объекта производства, которые получены на этапах обработки, предшествующих рассматриваемому. Погрешность схемы установки относят обычно к размерам, выполняемым на рассматриваемой операции.

Например, на операции фрезерования выполняются размеры A_2 и B_2 (рис. 2.89), для чего режущие кромки фрезы устанавливаются относительно компонентов ОСК на расстояния, соответствующие размерам настройки A_n и B_n . Другие погрешности обработки, возникающие по разным причинам, в данной задаче не учитываются. При выполнении размера A_2 ось Y_y УСК не совпадает с осью Y_{δ} СКО. Следовательно, условия для возникновения погрешности схемы установки по этому размеру имеются. До рассматриваемой операции в направлении оси X выполнен размер A_1 с допуском TA_1 . Поскольку размер настройки A_n остается постоянным для всей обрабатываемой партии деталей и другие погрешности в данной задаче не учитываются, то A_2 может изменяться только в зависимости от размера A_1 в пределах допуска TA_1 .

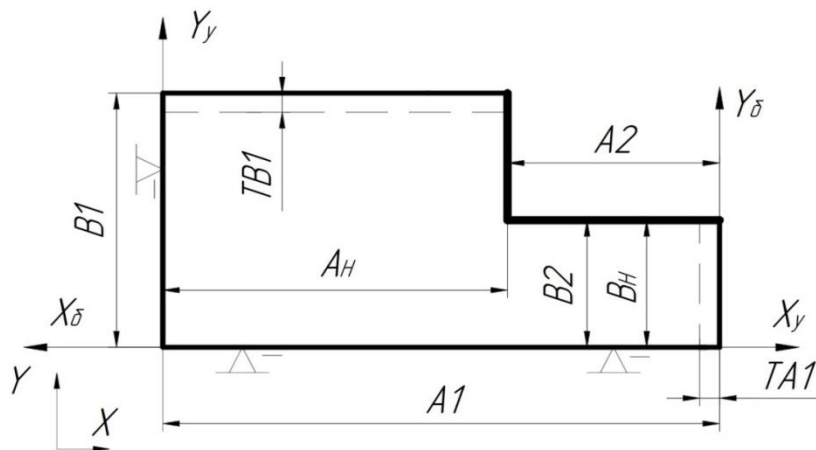


Рисунок 2.89 – Операционный эскиз

Погрешность схемы установки проявляется как случайная величина, так как причина ее порождающая (погрешность размера A_1), тоже является случайной величиной. Принято считать, что погрешность схемы установки – симметричная случайная величина, которая подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием, равным нулю. Тогда ее характеристикой будет максимально возможное поле рассеяния, в рассматриваемом случае TA_1 . Следовательно, можно записать

$$\Delta_{cy}(A_2) = TA_1,$$

где $\Delta_{cy}(A_2)$ – погрешность схемы установки по размеру A_2 .

При выполнении размера B_2 оси X_6 (СКО) и X_y (УСК) совпадают. Следовательно, условий для возникновения погрешности схемы установки нет. Действительно, случайные погрешности размера B_1 не влияют на положение X_6 , т. е. на размер B_2 .

Очень часто погрешность схемы установки зависит не от одного, а от нескольких размеров. В таких случаях алгоритм решения задачи определения погрешности схемы установки многозвенной размерной цепи состоит из следующих этапов: на операционном эскизе указываются все выполненные ранее и выполняемые на рассматриваемой операции размеры, СКО и УСК, а также размеры настройки; строится размерная цепь (рис. 2.90); определяется погрешность замыкающего звена, которым является выполняемый размер. При этом погрешность настроечного размера A_n считается равной нулю, так как она, оставаясь постоянной для всей партии обрабатываемых деталей, не может быть источником случайной погрешности.

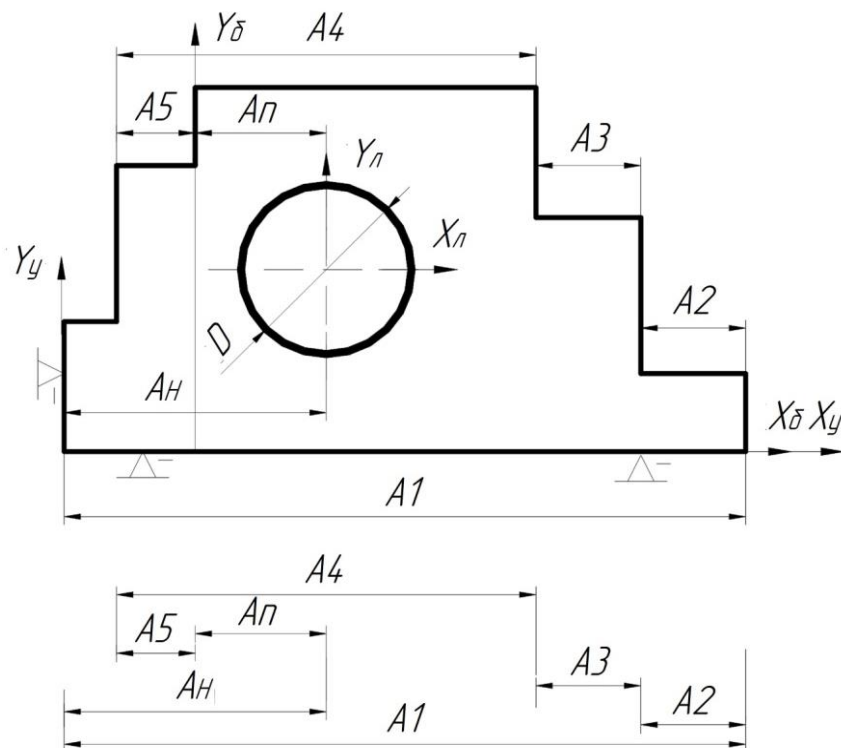


Рисунок 2.90 – Расчетная схема и многозвенная размерная цепь

Максимально возможное (но весьма маловероятное) значение погрешности схемы установки определяется по формуле

$$\Delta_{cy}(A_n) = \sum_{i=1}^{n-1} TA_i$$

где n – число звеньев размерной цепи.

Из математической статистики известно, что при заданной доверительной вероятности P поле рассеяния случайной величины (в нашем случае погрешность звена размерной цепи A_i) связано со стандартным отклонением, а следовательно, и с дисперсией D_i следующим равенством: $TA_i = \lambda_i \sqrt{D_i}$, где λ_i – коэффициент, зависящий от закона распределения рассматриваемого звена и доверительной вероятности P . С другой стороны, известно, что если случайная величина является алгебраической суммой других случайных величин, то дисперсия суммы равна сумме дисперсий слагаемых. На этом основании можно записать для линейной размерной цепи:

$$\Delta_{cy}(A_n) = \lambda_n \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (TA_i / \lambda_i)^2}$$

Для нормального закона распределения $\lambda_i=3$, а для закона равной вероятности $\lambda_i=1,732$.

Последним выражением предлагается пользоваться при $n > 3$ (если погрешности составляющих звеньев распределены по нормальному закону) и при $n > 6$ (если погрешности составляющих звеньев распределены по закону равной вероятности).

Для случая, показанного на рисунке 2.90, можем записать

$$\Delta_{cy}(A_n) = \sqrt{TA_1^2 + TA_2^2 + TA_3^2 + TA_4^2 + TA_5^2}$$

Погрешность схемы установки для плоской размерной цепи определяется так же, как и для многозвенной линейной цепи. Отличие состоит только в том, что все звенья плоской размерной цепи необходимо спроектировать на направление вектора замыкающего звена. Например, размерная настройка для схемы, показанной на рисунке 2.91, осуществляется от начала УСК. Проектируя звенья размерной цепи на A_n , получаем

$$A_n - B_1 \sin \alpha - A_1 \cos \alpha - A_n = 0.$$

Тогда

$$\Delta_{cy}(A_n) = TB_1 \sin \alpha + TA_1 \cos \alpha$$

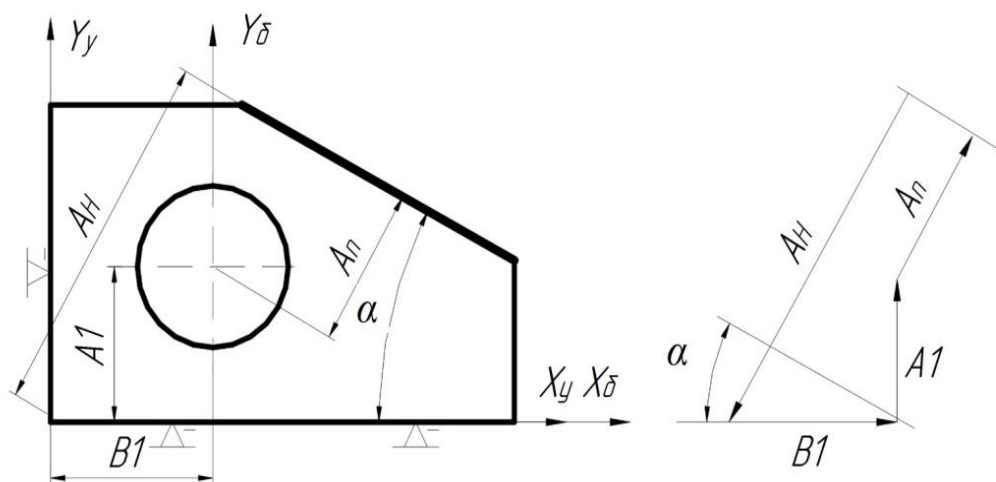


Рисунок 2.91 – Расчетная схема и плоская размерная цепь

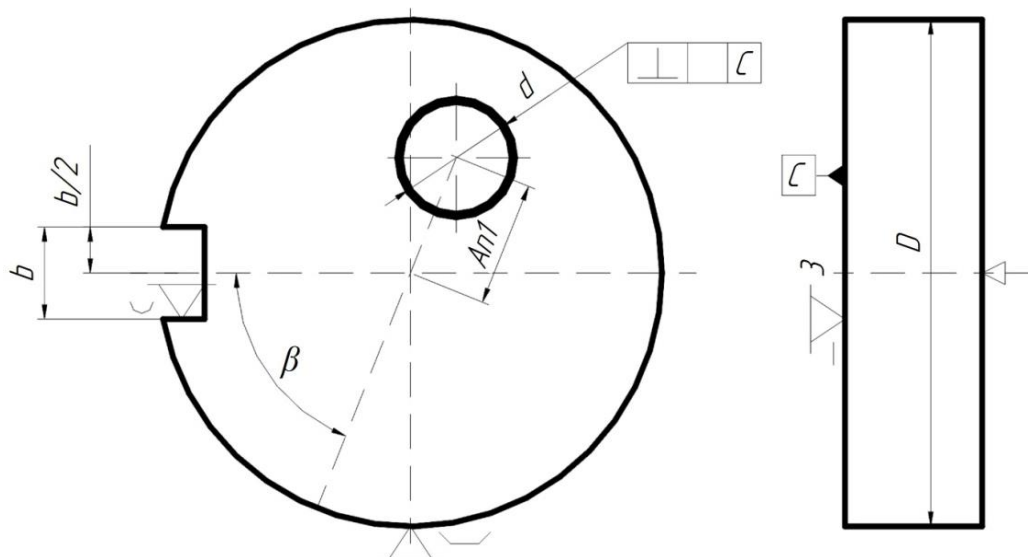


Рисунок 2.92 – Схема установки, соответствующая схеме базирования детали, представленной на рисунке 2.87

Рассмотрим установку по наружной цилиндрической поверхности при помощи призмы для обработки отверстия диаметром d . Кроме того, должны быть выдержаны размер A_{n1} и угол β . До рассматриваемой операции были обработаны наружный диаметр D с допуском TD , шпоночный паз шириной b с допуском Tb . Соответствующая схема установки показана на рисунке 2.92, а расчетная схема и размерные цепи для расчета погрешности схемы установки – на рисунке 2.93.

Уравнение плоской размерной цепи, показанной на рисунке 2.93 б, имеет вид

$$A_{n1} \sin \beta + A_{n2} \cos \beta = A_{n1} + OM \sin \beta,$$

где $OM = D / (2 \cdot \sin \alpha)$.

Тогда

$$A_{n1} = A_{n1} \sin \beta + A_{n2} \cos \beta - D \sin \beta / 2 \sin \alpha.$$

Дифференцированием по D получаем

$$d(A_{n1}) = dD \cdot \sin \beta / (2 \sin \alpha)$$

Размеры A_{n1} , A_{n2} и β от размера D не зависят. Поэтому, заменив дифференциал малыми погрешностями, погрешность схемы установки по размеру A_{n1} можно определить с помощью модели

$$\Delta_{cy}(A_{n1}) = TD \cdot \sin \beta / (2 \sin \alpha).$$

Из второй размерной цепи (рис. 2.93 в) получаем

$$A_{n1} \sin \beta + A_{n2} \cos \beta = A_n - D / 2 + OM \sin \beta.$$

Погрешность схемы установки по размеру A_n можно определить с помощью модели

$$\Delta_{cy}(A_n) = TD / 2 - TD \cdot \sin \beta / (2 \sin \alpha).$$

В этом случае погрешность схемы установки включает в себя соответствующую погрешность схемы базирования.

Причем если $\beta = \alpha$, то $\Delta_{cy}(A_n) = 0$

Уравнение размерной цепи, показанной на рисунке 2.93 г, имеет вид

$$B_H + b / 2 = e + OM = e + D / 2 \sin \alpha,$$

где e – смещение оси цилиндра, вызванное погрешностью размеров D и b .

Тогда дополнительный поворот заготовки (погрешность схемы установки по углу β) будет

$$\Delta_{cy}(\beta) = e / (D / 2) = (TD / \sin \alpha + Tb) / D.$$

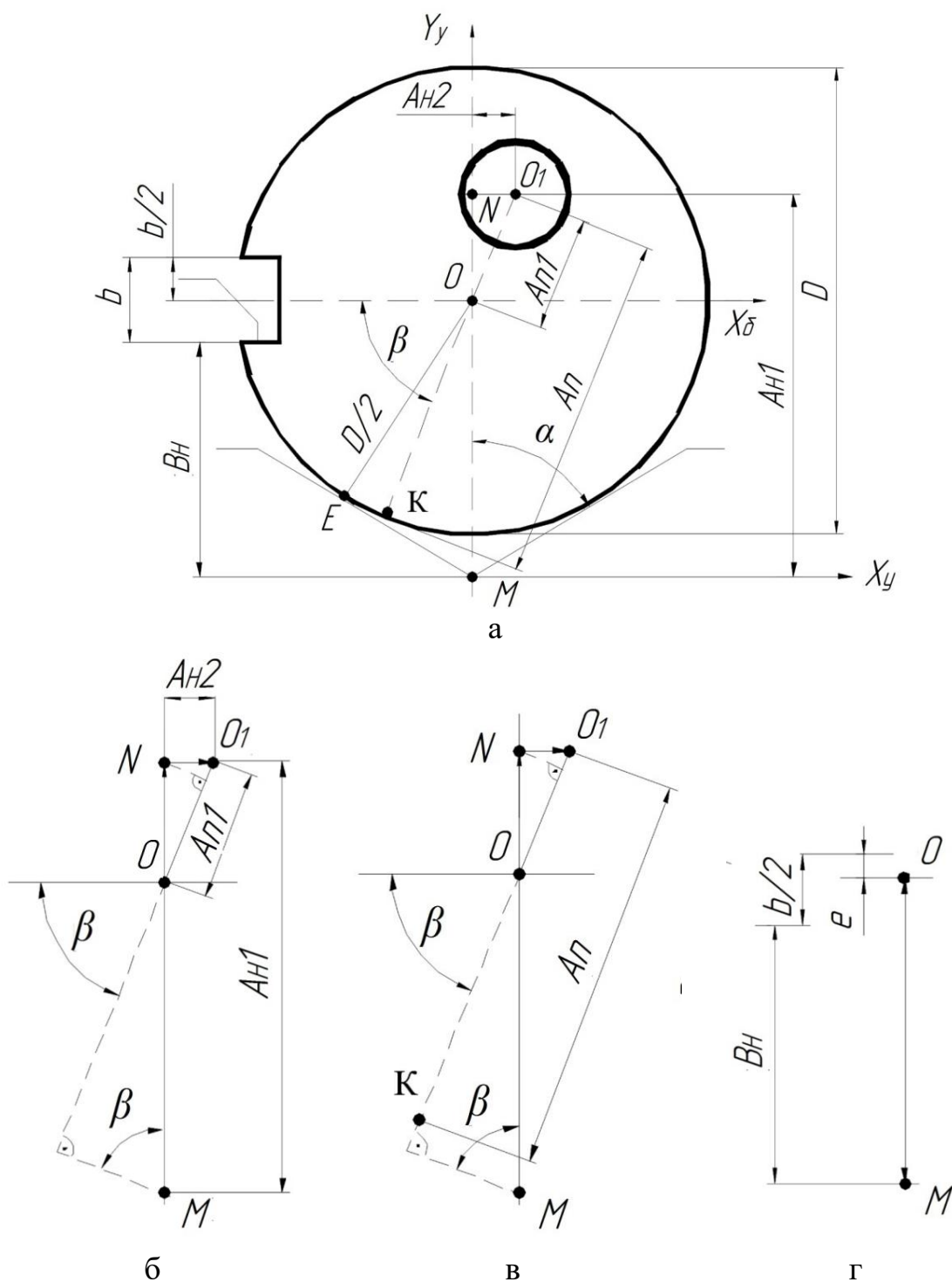


Рисунок 2.93 – Расчетная схема и размерные цепи для определения погрешности схемы установки по размерам A_{H1} , A_{H2} и β

При установке по отверстию на цилиндрический палец возникает неопределенность положения заготовки, которая может смещаться в любом направлении в пределах зазора (рис. 2.94).

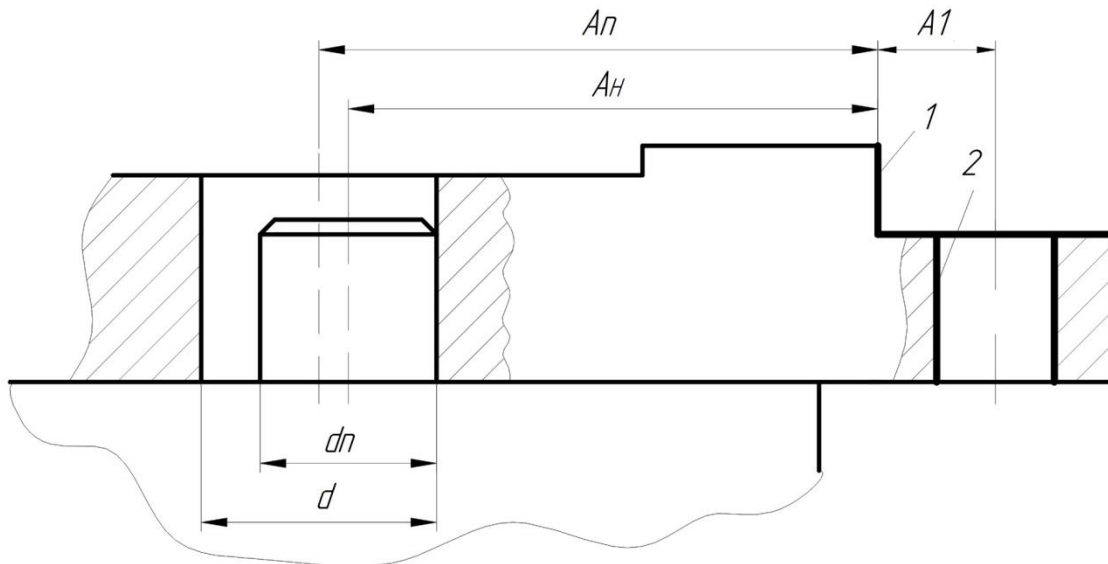


Рисунок 2.94 – Установка заготовки по отверстию на цилиндрический палец

Погрешность схемы установки $\Delta_{cy}(A_n)$ в этом случае можно определить по модели

$$\Delta_{cy}(A_n) = Td + BO(d_n),$$

где Td – допуск диаметра отверстия; $BO(d_n)$ – верхнее отклонение диаметра цилиндрического пальца.

При обработке нескольких поверхностей с одной установки только по отношению к одной определяется погрешность схемы установки, и эта поверхность далее служит настроечной базой. Погрешность схемы установки $\Delta_{cy}(A_1) = 0$, т. к. поверхность 1 служит настроечной базой для обработки поверхности 2.

При установке заготовки на два пальца расчетная схема для определения погрешности схемы установки по углу α будет иметь вид, представленный на рисунке 2.95.

На этой схеме O_1, O_2 – оси отверстий, $П_1$ – ось симметрии ромбического пальца, $П_2$ – ось цилиндрического пальца. Тогда

$$\Delta_{cy}(\alpha) = \frac{e1_{\max} + e2_{\max}}{B} = \frac{(TD1 + BO(b1)) + (TD2 + BO(d2))}{B},$$

где $TD1, TD2$ – допуски диаметров соответствующих отверстий; $BO(b1), BO(d2)$ – верхние отклонения соответствующих пальцев. Погрешностью размера B можно пренебречь.

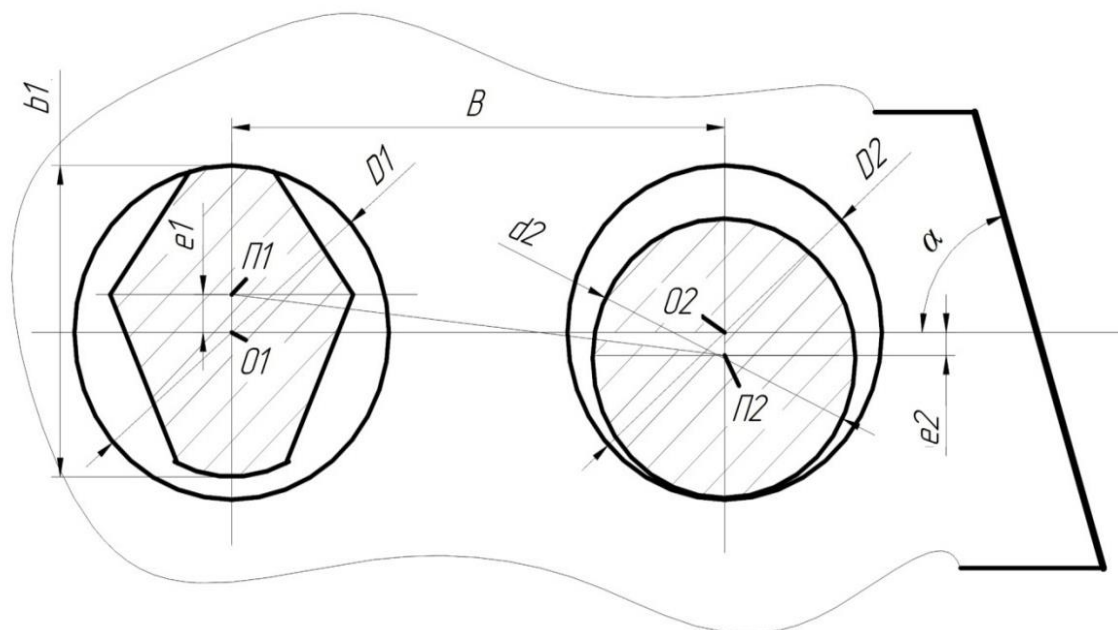


Рисунок 2.95 – Расчетная схема для определения погрешности схемы установки по углу α при установке на цилиндрический и ромбический пальцы

Для анализа пригодности принятой схемы установки нужно оценить значение ее погрешности.

Погрешность схемы установки по цилиндрической поверхности равна нулю, если в качестве установочных элементов используются: 1) подпружиненный конический палец 1 (рис. 2.96); 2) самоцентрирующие установочно-зажимные элементы (цанги, разжимные оправки, гидрорасширители зажимы и т. д.). Под действием зажимающих сил изменяется полученное при базировании положение заготовки 2 и ее форма. Причинами изменения исходного положения заготовки являются контактные упругие деформации в местах сопряжения заготовки с установочными элементами приспособления, а также упругие деформации самого приспособления. Для партии заготовок погрешность закрепления считается равной нулю, если смещение конструкторской базы хотя и существенно, но постоянно. В этом случае смещение конструкторской базы частично компенсируется размерной настройкой. Остаются некомпенсированными относительные повороты, возникающие из-за неравномерной нагрузки на установочные элементы.

Большая часть упругих деформаций станочных приспособлений приходится на стыки, особенно в подвижных соединениях, жесткость которых намного меньше, чем жесткость затянутых стыков. Последнее обстоятельство при установке заготовок в кулачковых патронах или в тисках приводит к существенному смещению зажимаемой заготовки в направлении, перпендикулярном к зажимаемой силе. Как это видно из схемы, изображенной на рисунке 2.97, указанное смещение возникает

из-за поворота подвижной губки тисков парой сил (зажимающей $P_{зж}$ и реакции R) на плечо h . Зазоры и малая контактная жесткость направляющих делает этот поворот существенным.

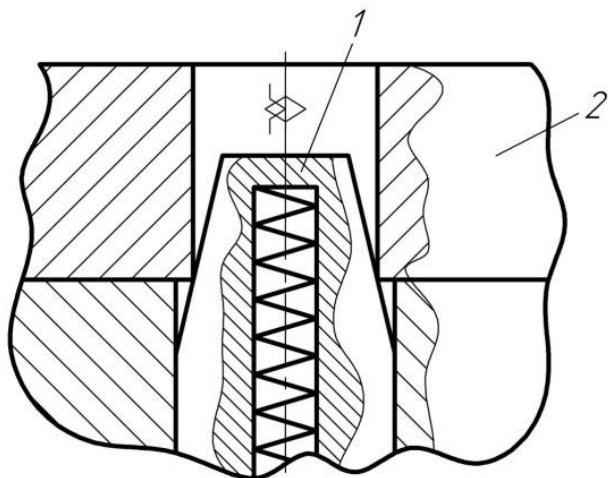


Рисунок 2.96 – Установка заготовки с помощью конического пальца

Кольца и втулки при обработке закрепляются в самоцентрирующихся патронах или на разжимных оправках. Под действием радиальных зажимающих сил эти заготовки деформируются (рис. 2.98). После обработки в закрепленном состоянии получается поверхность правильной формы. Но после открепления заготовки и ее упругого восстановления форма поверхности искажается. Такая погрешность формы сопоставима с допуском (и даже превышает его) при обработке тонкостенных и высокоточных деталей. Уменьшить ее можно, увеличив количество установочно-зажимных элементов.

Если за единицу принять погрешность формы, получаемую при закреплении в трехкулачковом патроне, то погрешность закрепления в четырехкулачковом патроне составит 0,38, а в шестикулачковом – 0,11. Существенно уменьшает упругую деформацию увеличение ширины кулачков (угла охвата). При этом радиус цилиндрической поверхности установочно-зажимного элемента для базирования по наружной поверхности кольца должен быть равен радиусу технологической базы. При увеличении угла охвата зоны контакта кулачка с заготовкой от нормального для трехкулачкового патрона до 60° относительная погрешность формы уменьшается в 8...12 раз. Погрешность формы существенно уменьшается, если силы зажима прикладываются к торцу тонкостенной или высокоточной втулки.

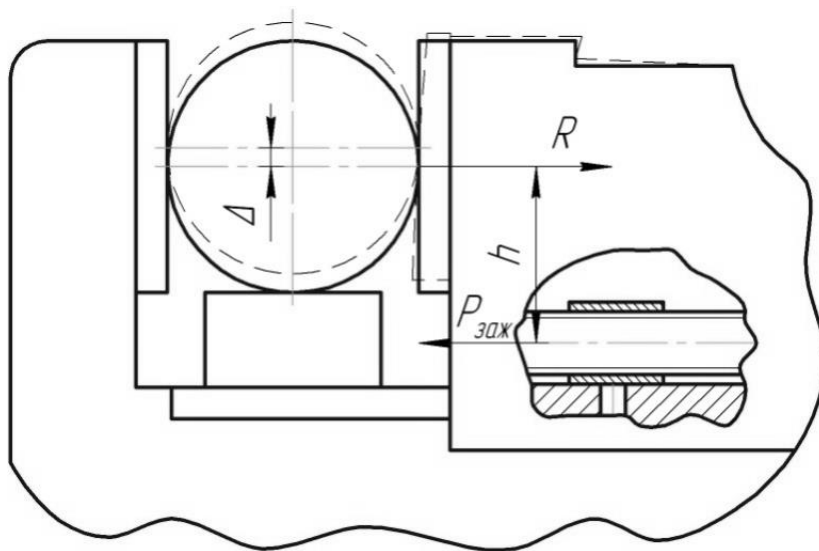


Рисунок 2.97 – Схема смещения заготовки в направлении, перпендикулярном к зажимающей силе

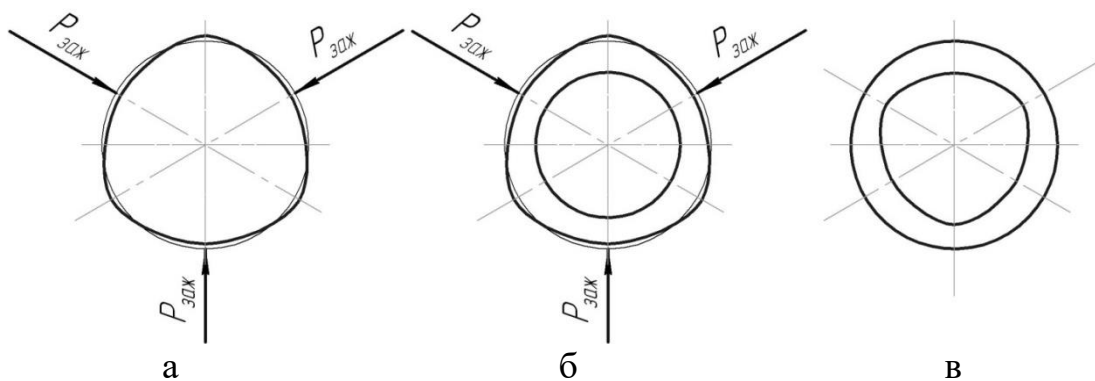


Рисунок 2.98 – Схема формирования погрешности формы при действии зажимающих сил:
 а – форма заготовки после закрепления, б – форма расточенного отверстия в закрепленной заготовке, в – форма отверстия после раскрепления заготовки

2.11 Погрешности, зависящие от режима резания

Под действием составляющих силы резания элементы технологической системы деформируются и относительное положение заготовки и инструмента, сообщенное им при базировании и размерной настройке, нарушается. Один из примеров этого процесса показан на рисунке 2.99, где A_n – размер настройки; $A_{\text{факт}}$ – фактический размер; y_n – проекция упругой деформации инструмента; y_3 – проекция упругой деформации заготовки с приспособлением. Согласно данной схеме

$$A_{\text{факт}} = A_n + y,$$

где y – суммарная проекция упругой деформации технологической системы на плоскость, перпендикулярную к обработанной поверхности.

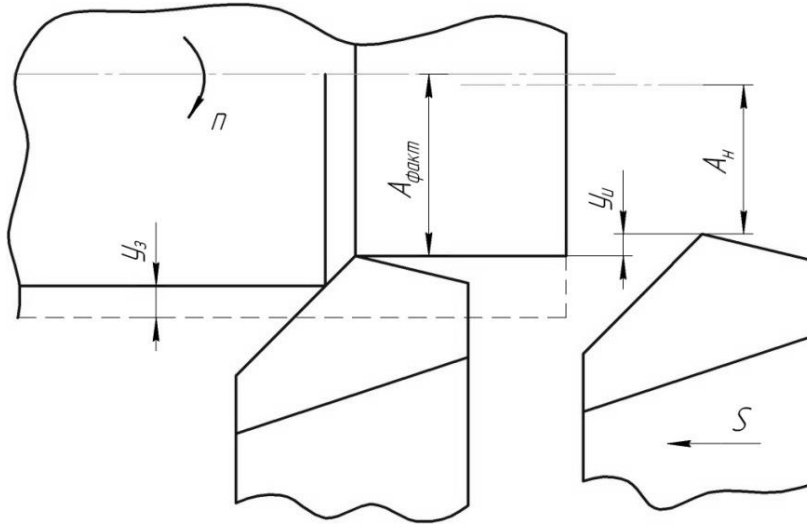


Рисунок 2.99 – Схема деформации технологической системы под действием сил резания

С учетом эмпирической зависимости упругой деформации можно записать выражение следующим образом:

$$A_{\text{факт}} = A_n + C_p t^{x1} S^{y1} HB^n / j,$$

где t – глубина резания; S – подача, HB – твердость заготовки по Бригеллю; $x1$, $y1$, n и C_p – параметры модели зависимости силы P_y от режима резания и свойств заготовки; j – жесткость технологической системы.

Случайные изменения размеров заготовки ведут к соответствующим изменениям глубины t , что изменяет второе слагаемое выражения. Следовательно, будет изменяться фактический размер и появится погрешность обработки как результат «наследования» погрешности заготовки. Назовем коэффициентом наследования $K_{\text{нас}}$ отношение погрешности детали Δ_D к погрешности заготовки Δ_3 . Обратное отношение Δ_3 / Δ_D будем называть коэффициентом уточнения $K_{\text{ут}}$.

Заменяв малые изменения Δ_t и Δ_y их дифференциалами, с учетом формул получим для случая однократного точения твердосплавным резцом

$$K_{\text{ут}} = \frac{jt^{0,1}}{0,9C_p S^{0,6} HB^2}.$$

Из данного выражения следует, что коэффициент уточнения прямо пропорционален жесткости технологической системы, слабо зависит от глубины резания, существенно уменьшается при увеличении твердости заготовки и подачи. Затупление резца, увеличивая значение C_p , снижает коэффициент уточнения.

При обработке наследуется не только погрешность размера заготовки, но и погрешности формы и относительного положения, ведущие к изменению глубины резания. Случайные изменения твердости заготовки также приводят к появлению погрешности размера. Изменение жесткости технологической системы, вызванное изменением состояния станка (нагрев подшипников) или изменением координаты точки приложения силы резания, также приводит к появлению погрешности соответственно размера или формы.

Чтобы увеличить коэффициент уточнения, а это особенно важно при низкой жесткости технологической системы, необходимо удалить припуск за несколько (n) проходов. Тогда, если жесткость технологической системы не зависит от координат точки приложения силы резания, общий коэффициент уточнения равен произведению коэффициентов уточнения после каждого прохода, т. е.

$$K_{\text{ут}} = K_{\text{ут1}} K_{\text{ут2}} \dots K_{\text{утn}}.$$

В процессе обработки режущий инструмент изнашивается, что приводит к появлению погрешности размера и(или) формы поверхности. Размерный износ инструмента в направлении, перпендикулярном к обрабатываемой поверхности, ведет к увеличению (уменьшению) размера настройки (A_n) и, кроме того, к увеличению силы P_y , а следовательно, к увеличению упругой деформации y . Изнашивание таких многолезвийных инструментов, как сверла и зенкеры, ведет к некоторому увеличению увода оси обработанного отверстия, а изнашивание разверток – к значительному увеличению разбивки отверстия (т. е. разности между диаметром отверстия и диаметром развертки).

Для увеличения размерной стойкости необходимо повышать качество заточки (прижоги, микротрещины, $Ra > 0,6$ мкм снижают стойкость в 2...3 раза), выполнять на режущей кромке фаску размером 0,05 мм под углом $\gamma = -45^\circ$ или радиусное скругление на режущей кромке. Наименьший размерный износ имеет резец со скругленной режущей кромкой, если радиус скругления $\rho = 0,04 \dots 0,05$ мм. Наилучшим способом повышения размерной стойкости является нанесение износо-

стойких вакуумно-плазменных покрытий (TiN или трехслойных TiC + TiCN + TiN), которые повышают почти в 2 раза микротвердость режущих пластин из твердого сплава T15K6 и в 4...5 раз их стойкость при чистовой обработке.

Одной из особенностей процесса изнашивания шлифовального круга является происходящее одновременно с изнашиванием формирование волнистости на его рабочей поверхности. Экспериментально установлено, что чем меньше диаметр круга и его высота, тем быстрее возникают волны на его рабочей поверхности; высота волн на круге пропорциональна скорости его размерного изнашивания и может достигать 10...30 мкм. Волнистость рабочей поверхности круга существенно увеличивает амплитуду колебаний и высотные параметры шероховатости шлифованной поверхности. Поэтому высота волн является основным ограничением стойкости шлифовального круга, который работает в режиме затупления и(или) частичного самозатачивания.

Существенное влияние на точность обработки размерный износ круга оказывает при глубинном и профильном шлифовании, при шлифовании резьбы и шлицев, так как в этих случаях часть размеров шлифованной поверхности копирует соответствующие размеры шлифовального круга.

2.12 Прочие погрешности при механической обработке

В процессе механической обработки элементы технологической системы нагреваются. Причины нагрева – процесс резания, трение в различных соединениях станка, процессы дросселирования в гидроаппаратуре, теплота от внешних источников. Из-за перерывов в работе и большой тепловой инерции тепловое поле элементов технологической системы обычно бывает неравномерным и нестационарным. Тепловые циклы определяются: временем обработки одной заготовки; длительностью смены (или ее половины); годом, в течение которого изменяется температура в цехе.

Пример температурного поля и изменения температуры во времени показаны на рисунке 2.100. Разность температур в отдельных элементах станка составляет 5...50 °С. Наиболее высокая температура наблюдается в области подшипников шпинделя и быстроходных валов. Такой неравномерный нагрев приводит к тепловой деформации системы «станок – приспособление – инструмент», которая нарушает геометрическую точность станка (параллельность, перпендикулярность, прямолинейность) и его размерную настройку. Наблюдения и расчеты показали, что потеря точности от тепловых деформаций элементов станка

сопоставима, а иногда и превосходит по значению допускаемую погрешность обработки (табл. 2.26).

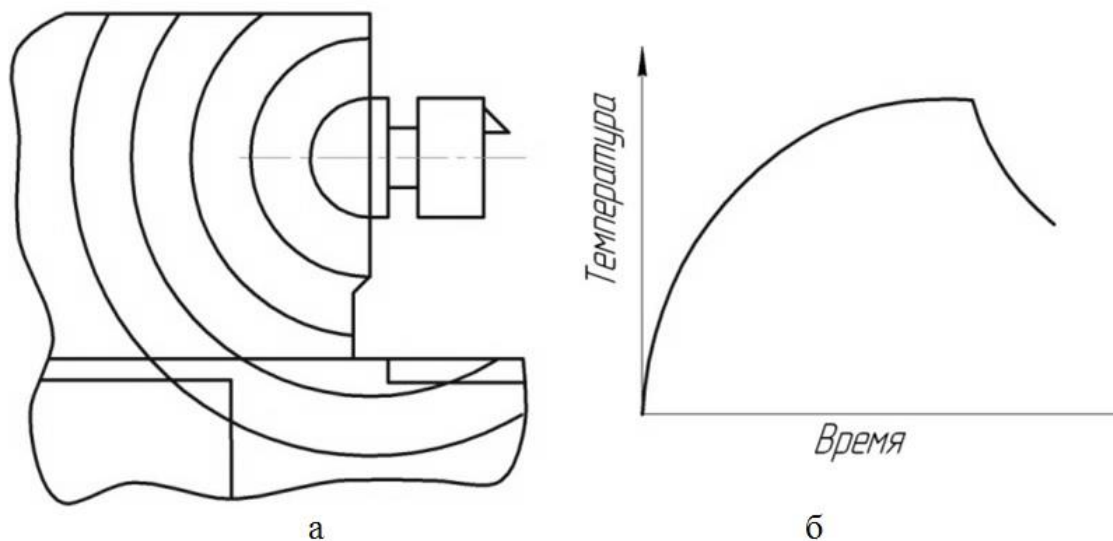


Рисунок 2.100 – Температурное поле:
 а – схема температурного поля передней бабки токарного станка,
 б – график изменения температуры при работе и выключении станка

Таблица 2.26 – Примеры тепловых погрешностей

Элемент станка	Вид погрешности детали	Уровень погрешности
Колонна расточного станка	Непараллельность оси отверстия и основной базы	0,12 мм/м
Станина токарного станка	Седлообразность	0,15 мм/м
Передняя бабка токарного станка	Уменьшение диаметра	0,008...0,05 мм
	Конусность на длине 300 мм	0,006...0,04 мм
	Осевое смещение шпинделя	0,25 мм
Колонна плоскошлифовального станка	Непараллельность торцов	0,1 мм/м
	Осевое смещение шпинделя	0,15 мм

Уменьшить влияние температурных деформаций станка на точность и стабильность размеров и формы обработанных деталей можно следующим образом: 1) оградив станок от теплового воздействия внешней среды (термоконстантные цехи, защита от направленных потоков нагретого или холодного воздуха); 2) защитив станок от неравномерного нагрева со стороны источников интенсивного тепловыделения (встроенных электродвигателей, гидроприводов, резервуаров для масла) путем выделения их из общей компоновки станка; 3) приняв меры для выравнивания температурного поля станин и стоек (применив охлаждающие ребра на наиболее нагретых частях, используя потоки воздуха от электродвигателей и пневмоустройств для обдува более холодных элементов и т. д.); 4) подогревая более холодные элементы станка,

масло в гидробаке и весь станок перед началом работы до получения стационарного теплового поля; 5) увеличив частоту коррекции размерной настройки в начальный период работы станка.

Для уменьшения температурных деформаций инструмента, влияющих на точность обработки, применяют обильное охлаждение. Обработка на токарном станке с охлаждением 5%-й эмульсией (расход 1,75 л/мин) увеличивает теплоотдачу инструмента в 15 раз по сравнению с обработкой без охлаждения. Температурные деформации обрабатываемых заготовок также являются источником погрешности обработки. Теплота, выделяющаяся в процессе резания, распределяется между стружкой, инструментом и заготовкой. При точении, фрезеровании, строгании и растачивании без охлаждения большая часть выделяющегося количества теплоты переходит в стружку, а при сверлении большая часть теплоты остается в заготовке. При токарной обработке в стружку уходит 50...86 % теплоты, 10...40 % переходит в резец, а остальная – в обрабатываемую заготовку и рассеивается в окружающую среду. При сверлении в стружку уходит 28 % выделяющейся теплоты, 14,5 переходит в сверло, 52,5 % остается в заготовке, а остальная уходит в окружающую среду.

Применение обильного охлаждения позволяет практически устранить нагревание детали, и в большинстве случаев ее тепловыми деформациями можно пренебречь. Но тепловые деформации тонкостенных заготовок с относительно большими обрабатываемыми поверхностями и неравномерной толщиной стенок могут достигать значений, сопоставимых с допусками 6-го качества точности. Так, например, при шлифовании поршня некруглость наружной шлифованной поверхности из-за наследования конфигурации внутренних элементов составляет 9 мкм.

Серьезным источником погрешностей является деформация (коробление) заготовки или детали, вызванная нарушением равновесия остаточных напряжений. Условно назовем эти погрешности *релаксационными*. Остаточные напряжения возникают на всех этапах изготовления детали, от заготовительных операций до отделочных, в результате неравномерных изменений удельного объема материала, вызванных неоднородными: нагревом или охлаждением заготовки либо детали; структурными превращениями при термической и химико-термической обработке; пластическим деформированием подповерхностных слоев заготовки. Часто одновременно действуют две причины.

В качестве примера рассмотрим первый из механизмов формирования остаточных напряжений при остывании нагретого до 800 °С стального диска. Сначала остывают наружные слои, которые, стремясь сократиться, сжимают еще горячую сердцевину. В результате наружные слои упруго пластически растягиваются, а внутренние подвержены всестороннему сжатию и не могут деформироваться. При постепенном остывании и выравнивании температурного поля сердцевина стягивает

пластически вытянутый наружный слой, создавая в нем напряжения сжатия. Во внутренней части диска формируются растягивающие напряжения, которые уравнивают напряжения сжатия наружных слоев.

При закалке на рассмотренный выше процесс неравномерного уменьшения объема накладывается увеличение удельного объема в момент перехода от аустенита к мартенситной структуре. На уровень и распределение напряжений в материале после термической обработки влияют конфигурация детали, равномерность нагрева, прокаливаемость, температура отпуска.

Возникшие в детали остаточные напряжения не остаются постоянными, а с течением времени релаксируют в сторону уменьшения. Релаксация остаточных напряжений обычно сопровождается общей деформацией детали, иногда настолько значительной, что она визуально наблюдается или приводит к трещинам. При нормальной температуре релаксация развивается очень медленно (до нескольких лет) или совсем не наблюдается. Внешние переменные нагрузки и нагрев деталей ускоряют процесс релаксации напряжений.

Искусственное нарушение равновесия остаточных напряжений путем удаления припуска при механической обработке ведет к медленному деформированию заготовки и проявляется при передаче предварительно обработанной заготовки на последующую чистовую обработку (без разрыва во времени между этими этапами). Деформирование продолжается после приемки детали и в процессе ее эксплуатации в машине и достигает у мало жестких деталей довольно больших значений (до 1...1.5 мм).

Основным способом борьбы с релаксационными погрешностями является старение, которое выполняется обычно после предварительной обработки, а иногда в целях получения деталей высокой точности и после чистовой обработки перед отделочной. При длительной выдержке чугунных отливок в заделе в течение 6...18 месяцев (естественное старение) остаточные напряжения уменьшаются только на 30...35 %. Полное снятие остаточных литейных напряжений (искусственное старение) достигается отжигом с медленным (со скоростью 50...150 °C в час) нагревом отливок до 500...550 °C, выдержкой при этой температуре в течение 2...10 ч и медленным охлаждением (со скоростью 30...50 °C в час) до 200...300 °C.

Старение стальных закаленных деталей заключается в их нагреве до 150...180 °C и выдержке при этой температуре в течение 5...25 ч. Оно применяется для измерительных инструментов, точных деталей топливной аппаратуры и т. д.

2.13 Обеспечение точности обработки

2.13.1 Характеристики точности и стабильности технологического перехода

За время реализации перехода на технологическую систему действует множество факторов, часть которых (износ инструмента, тепловые деформации и т. п.) вызывает систематические, а часть (колебания припуска, колебания твердости заготовки и т. п.) – случайные погрешности обработки. Кроме того, зависимости, связывающие отклонения размеров с порождающими их факторами, не только не являются функциональными (детерминированными), но и не сохраняются неизменными во времени. Так, коэффициенты регрессионного уравнения, которое описывает зависимость между износом инструмента и отклонением размера, существенно изменяются по мере потери инструментом режущей способности (сказывается дополнительное влияние изменения уровня силы P_y от износа инструмента).

Под воздействием всех факторов формируются отклонения обработанной поверхности от ее идеального образа (компоненты погрешностей формы и размеров). Изменение интегральной размерной характеристики обработанной поверхности (диаметр, высота и т. д.) для совокупности последовательно обработанных деталей можно считать реализацией случайной последовательности, которая длится в течение периода времени между коррекциями размерной настройки или сменами затупившегося инструмента.

Случайная последовательность описывается следующими функциями:

- 1) уравнением регрессии

$$\bar{A}(i) = M\left(\frac{A}{i}\right)$$

где $M\left(\frac{A}{i}\right)$ – условное математическое ожидание параметра A при заданном значении (i) порядкового номера обработанной детали;

- 2) уравнением дисперсии

$$D(A(i)) = M(A(i)) - \bar{A}(i))^2;$$

- 3) корреляционным уравнением

$$K(i_1, i_2) = M((A(i_1)) - \bar{A}(i_2))(A(i_2) - \bar{A}(i_1))),$$

где M – символ математического ожидания. Функция $\bar{A}(i)$ является неслучайной, отражающей влияние детерминированных факторов на исследуемый параметр. Функция $D(A(i))$ характеризует неслучайную зависимость параметра рассеяния размера от порядкового номера обработанной детали. Считается, что эти параметры характеризуют так называемую «мгновенную» точность обработки. Корреляционное уравнение отражает тесноту связи значений A для деталей с номерами i_1 и i_2 .

Дело в том, что влияние некоторых факторов на отклонения размера A в данном цикле обработки не сразу прекращается в последующих циклах. Примером может служить тепловая деформация технологической системы, вызванная случайными отклонениями от средних значений припуска и твердости заготовки. Возникшая на i -м цикле вследствие разогрева (по указанной причине) деформация системы должна сказаться не только на отклонении размера детали, обработанной на этом же цикле, но и на отклонениях размеров в циклах $i+1$, $i+2$ и т. д. Если $K(i_1, i_2) = 0$, то значения $A(i_1)$ и $A(i_2)$ являются независимыми.

В зависимости от свойств технологической системы возможны различные по типу случайные процессы:

– стационарные, если $\bar{A}(i) = const$, $D(A(i_1)) = const$,

$K(i_1, i_2) = K(\Delta_i)$, где $\Delta_i = i_2 - i_1$;

– нестационарные, если A или D изменяется в зависимости от номера обработанной детали.

Функции \bar{A} , D и K можно определить экспериментально, если имеется достаточное число реализаций. Когда процесс стационарный, для определения параметров указанных функций достаточно одной реализации. Однако и в случае нестационарного по A процесса, который чаще всего встречается при механической обработке, с достаточной для практики точностью можно для определения параметров функций \bar{A} , D и K использовать одну реализацию. Для этого необходимо разделить размер $\bar{A}(i)$ на две составляющие (рис. 2.101):

$$A(i) = \bar{A}(i) + X(i),$$

где $X(i)$ – отклонения размера A от кривой регрессии $\bar{A}(i)$, которая получается «сглаживанием» результатов эксперимента полиномом по методу наименьших квадратов. Таким образом,

$$\bar{A}(i) = b_0 + b_1 i + b_2 i^2,$$

где b_1 – коэффициент полинома.

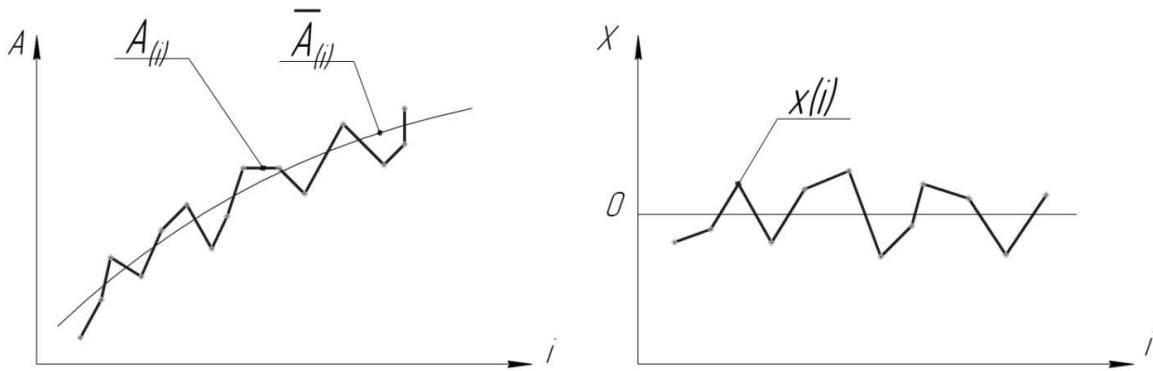
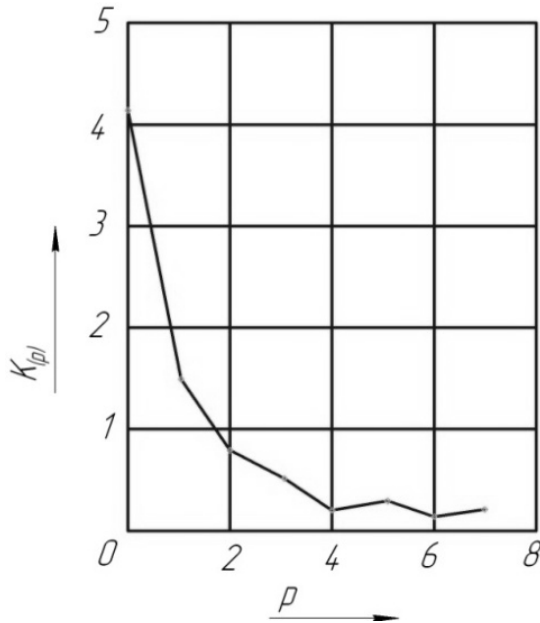


Рисунок 2.101 – Схемы разделения погрешностей обработки

Дисперсия процесса в данном случае оценивается величиной S^2 :

$$D(X(i)) = S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (A(i) - \bar{A}(i))^2}{n-1}$$

Предполагается, что случайные отклонения $X(i)$ складываются из двух: $V(i)$ – скорректированной случайной составляющей, вызываемой случайным фактором с последствием, и $Z(i)$ – независимой случайной составляющей, т. е.



$$X(i) = V(i) + Z(i).$$

Если известны значения $A(i)$ для $i = \overline{1, n}$, то значения корреляционной функции определяются по выражению

$$K(p) = \frac{\sum_{i=1}^{n-p} A(i)A(i+p)}{n-p}$$

Типовой график корреляционной функции показан на рисунке 2.102. Степень тесноты связи между соседними значениями $A(i)$ и $A(i+1)$ характеризуется коэффициентом корреляции ρ :

$$\rho = \frac{K(1)}{D(X(i))}$$

Рисунок 2.102 – График корреляционной функции центрированных отклонений размеров

2.13.2 Статистическое регулирование точности обработки

Статистическое регулирование является простым и наглядным методом управления точностью обработки [2–5, 92–94]. Для его реализации на предварительно настроенном станке через определенные промежутки времени берутся выборки из m деталей, обработанных последними в данном промежутке. Детали измеряются, и результаты измерения заносятся в контрольную карту в виде точек, которые должны располагаться в пределах, заранее рассчитанных и нанесенных на контрольную карту границ. Тогда считается, что технологический процесс протекает удовлетворительно. В случае выхода размеров за пределы контрольных границ необходимо выполнить коррекцию размерной настройки. Таким образом, статистическое регулирование дает возможность осуществить предупредительный контроль и избежать брака при обработке, а также снизить трудоемкость контрольных операций, так как вместо сплошного контроля осуществляется выборочный.

Условиями целесообразности применения статистического регулирования являются: массовое производство; наличие систематической нестационарной составляющей общей погрешности обработки; достаточно большой период размерной стойкости инструмента; достаточный запас точности операции, который характеризуется коэффициентом запаса точности $K_{3.T}$:

$$K_{3.T} = \frac{TA}{6\sqrt{D(X(i))}},$$

где TA – допуск на контролируемый размер; $D(X(i))$ – дисперсия. Минимальное значение $K_{3.T} - 1,2$.

Стандартизованы и применяются в промышленности два метода статистического регулирования: 1) *метод средних и размахов*; 2) *метод медиан и крайних значений*. Первый метод рекомендуется применять в случаях, когда требования к точности достаточно высоки и когда необходимо обеспечить безопасность потребителя (авиационная техника, автомобили и т. п.). Вторым методом проще реализовать, так как он не требует вычислений, но дает менее достоверные результаты.

Для реализации метода средних и размахов подготавливают заранее две точечные диаграммы, обычно объединенные в одну контрольную карту (рис. 2.103). На точечной диаграмме средних отмечают верхнюю (BT) и нижнюю (HT) технологические границы. При наружной обработке BT совпадает с максимальным размером A_{\max} , а HT выше нижней границы допуска на погрешность измерения. При обработке отверстий наоборот: HT совпадает с минимальным размером, а BT ниже

верхней границы допуска на погрешность измерения $\Delta_{ИЗ}$. Обычно принимают $\Delta_{ИЗ} = 0,1TA$.

Допустимое поле изменения среднего арифметического \bar{A}_m малой выборки ограничивается верхней (*ВК*) и нижней (*НК*) контрольными границами, которые отстоят от *ВТ* и *НТ* на одинаковом расстоянии l . В зависимости от значения $K_{3,T}$ значение l выбирается по-разному. Если $1,18 < K_{3,T} < 1,34$, то $l = KTA$, где K – коэффициент, зависящий от размера выборки m следующим образом:

m , шт.	.....	4	5	6	7	8	9
K	.....	0,25	0,276	0,296	0,311	0,323	0,344

Если $K_{3,T} > 1,35$, то значение l выбирается в зависимости от оценки «мгновенного» поля рассеяния, которая также определяется в предварительных экспериментах. Тогда

$$l = 0,5\omega A \left(1 - \frac{1}{\sqrt{m}}\right).$$

На диаграмме размахов в пределах от нижней границы допуска до *ВТ* наносится одна верхняя граница размахов (*ВГР*), которая определяет допустимые значения размахов $R = A_{\max} - A_{\min}$ в любой выборке. Если $1,18 < K_{3,T} < 1,34$, то $ВГР = K_1TA$, где K_1 зависит от размера выборки следующим образом:

m , шт.	.....	4	5	6	7	8	9
K_1	.....	0,780	0,815	0,840	0,860	0,875	0,890

Если $K_{3,T} > 1,35$, то значение l выбирается в зависимости от определенного заранее мгновенного стандартного отклонения размеров S . $ВГР = K_2S$, где K_2 зависит от размера выборки:

m , шт.	.....	5	6	7	8	9
K_2	.....	4,918	5,078	5,206	5,307	5,394

Необходимо отметить, что указанный расчет контрольных границ на контрольных картах статистического регулирования допускает возможность появления ошибок первого и второго рода. Ошибки первого рода заключаются в подаче ложного сигнала о разладке процесса, которой на самом деле нет. Ошибки второго рода состоят, наоборот, в неправильном заключении о нормальном ходе процесса, когда на самом деле он уже разлажен. Вероятность таких ошибок при наблюдении за

средними или медианами составляет 0,027. Эта вероятность очень мала, однако ложный сигнал может появиться и при очень малой вероятности. Поэтому во избежание ненужных вмешательств в процесс обработки рекомендуется при появлении сигнала о разладке процесса тотчас же проверить его путем взятия повторной выборки.

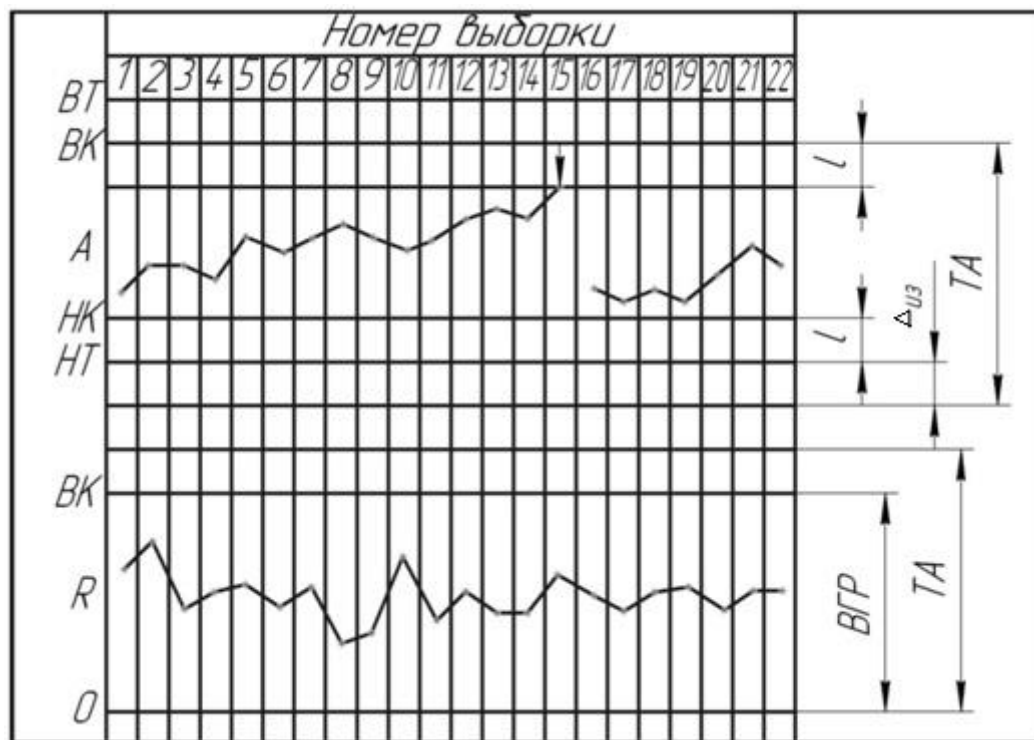


Рисунок 2.103 – Контрольная карта статистического регулирования методом средних и размахов

С экономической точки зрения выгодно увеличивать промежуток времени между взятием контрольных проб. Но при увеличении длительности межпроверочного периода $\tau_{кон}$ возрастает вероятность брака. Оптимальное значение $\tau_{кон}$ определяется экспериментально при внедрении технологического процесса со статистическим регулированием точности. Анализ контрольных карт, оформленных за время эксплуатации нескольких инструментов (10...15), позволяет определять среднее значение размерной стойкости инструмента по количеству обработанных заготовок N_3 и поле его рассеяния ωN_3 , где N_3 – среднее количество заготовок, обработанных за период между коррекциями размерной настройки. В течение периода, соответствующего $N_3 - 0,5\omega N_3$, необходимо выполнить не менее четырех контрольных операций, что позволит определить темп смещения уровня размерной настройки и сделать прогноз о количестве заготовок, которые могут быть обработаны до необходимости в коррекции.

2.13.3 Автоматическое управление точностью обработки по выходным данным

Выходным параметром технологической операции может быть непосредственно размер обработанной заготовки, измеряемый прямым или косвенным способом, положение режущей кромки инструмента (рабочей поверхности шлифовального круга) или положение исполнительных органов станка. Задача компенсации действия источников технологических погрешностей решается с максимальной эффективностью в том случае, когда выходным параметром является непосредственно размер обрабатываемой заготовки. Этот параметр может контролироваться после обработки заготовки (вне зоны обработки) или во время ее обработки.

По результатам контроля система управления вырабатывает управляющую команду либо на коррекцию размерной настройки, либо на изменение скорости и направления рабочей подачи. В первом случае различают одностороннюю и двустороннюю коррекции размерной настройки. Односторонняя коррекция уровня размерной настройки применяется чаще всего при обработке на станках с непрерывным процессом. Исполнительные органы таких станков в процессе обработки не имеют подачи в направлении выполняемого размера, в этом направлении их сдвигают только для изменения уровня настройки. К станкам данной группы относятся бесцентрово-шлифовальные, работающие методом «на проход», плоскошлифовальные для глубинного шлифования и др. Доминирующим фактором, определяющим смещение уровня размерной настройки этих станков, является износ шлифовального круга. Обычно его влияние настолько сильнее влияния прочих факторов, что уровень настройки получает лишь одностороннее смещение. Поэтому при коррекции уровня настройки таких станков подаются командные импульсы лишь одного знака, в соответствии с которыми смещаются массивные рабочие органы станка.

На рисунке 2.104 показана принципиальная схема односторонней коррекции уровня настройки при бесцентровом шлифовании колец подшипников. Прошлифованные кольца, двигаясь сплошным потоком, поступают на позицию измерения и контролируются измерительным устройством (*ИУ*). Результаты измерения (в виде уровней напряжения) поступают в счетно-логическое устройство (*СЛУ*), которое по определенному алгоритму вырабатывает команду, передаваемую исполнительному устройству (*ИСУ*) или приводу, который обеспечивает выполнение данной команды, т. е. изменяет позицию бабки шлифовального круга.

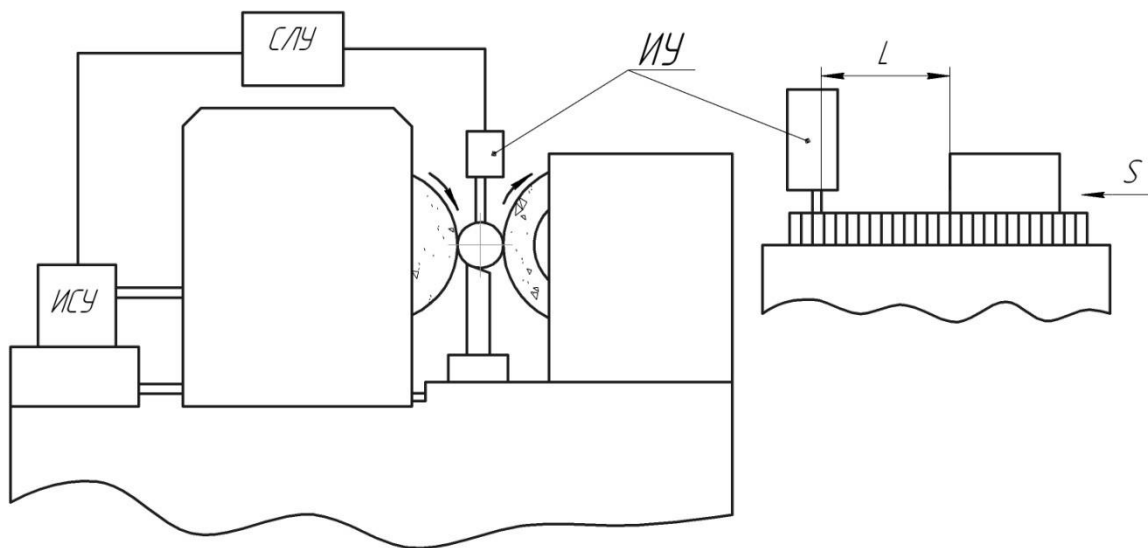


Рисунок 2.104 – Схема односторонней коррекции уровня размерной настройки

На рисунке 2.105 изображена принципиальная схема односторонней коррекции уровня настройки с помощью регулируемого упора. Обработка ведется врезным шлифованием до регулируемого упора 1. Шлифованная заготовка передается в измерительную позицию, где контролируется измерительным устройством. По сигналу СЛУ исполнительное устройство изменяет положение упора 1. Основное преимущество этого способа заключается в том, что малый подналадочный импульс сообщается не массивной бабке, а легкому упору, точность перемещения которого выше точности отработки механизма. СЛУ данных систем автоматической коррекции уровня размерной настройки может работать по одному из приведенных ниже алгоритмов.

Коррекция настройки по нескольким (от двух до пяти) последовательно обработанным заготовкам. В данном случае контролируются размеры всех последовательно обработанных заготовок. Корректирующий импульс подается только тогда, когда размеры нескольких последовательных обработанных заготовок превысят контрольную границу. В частном случае корректирующий импульс может подаваться, если размеры только одной заготовки превысят контрольную границу. В данном случае аппаратно СЛУ является самым простым. Однако возможно запаздывание сигнала на коррекцию, особенно при большой скорости изменения уровня центра рассеяния размеров обработанных заготовок, и, следовательно, появление брака.

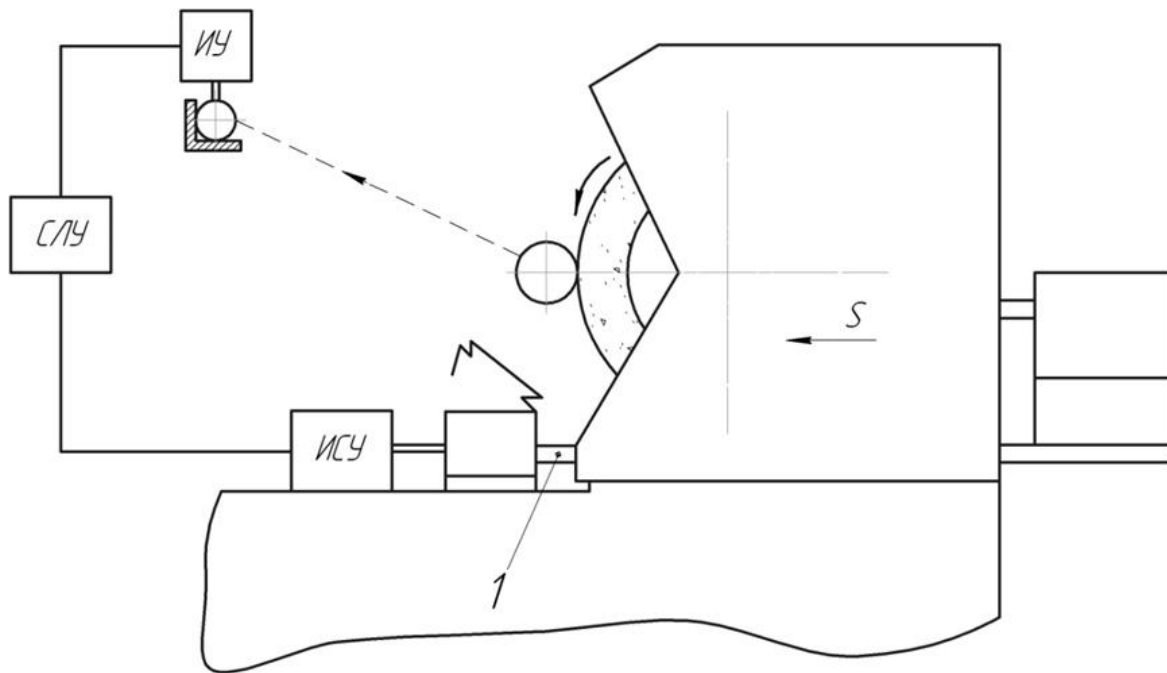


Рисунок 2.105 – Схема односторонней коррекции уровня размерной настройки с помощью регулируемого упора

Коррекция настройки по положению центра группирования. В данном случае СЛУ вычисляет среднее значение размера \bar{A}_{mi} в выборке из m обработанных заготовок. Когда \bar{A}_{mi} достигает контрольной границы, выдается сигнал на коррекцию размерной настройки. Удобнее всего вести расчет \bar{A}_{mi} по следующей рекуррентной формуле (если $i > m$):

$$\bar{A}_{mi} = \bar{A}_{m,i-1} + \frac{(A_i - A_{i-m})}{m},$$

где i – текущий номер обработанной детали с размером A_i . При таком расчете требуемый объем памяти не зависит от размера выборки, так как необходимы элементы для запоминания только четырех величин: $A_{m,i-1}$, A_i , A_{i-m} и m .

Чем больше объем выборки, тем точнее оценка \bar{A}_{mi} , но увеличивать m больше, чем до 7...9, не имеет смысла, так как при этом темп уменьшения доверительного интервала ξ резко замедляется. Доверительный интервал для \bar{A}_{mi} обратно пропорционален \sqrt{m} и при доверительной вероятности 99 %.

m , шт. ...	3	4	5	6	7	8	9	10
ε/σ	5,72	2,92	2,06	1,65	1,40	1,24	1,12	1,03

Данный способ обеспечивает большую надежность управления, чем предыдущий, но требует более сложного, а следовательно, и более дорогого СЛУ.

Коррекция настройки по скользящей медиане. В данном случае также непрерывно анализируется скользящая выборка из m обработанных заготовок, но не производятся расчеты. Сигнал на коррекцию выдается, если $m/2$ (или больше) заготовок выборки имеют размер, больший установленного контрольной границей. В данном случае грубые погрешности (измерения или обработки) меньше влияют на надежность управления, так как уровни отклонений размеров не имеют значения для выработки сигнала. Важно лишь, чтобы 50 % заготовок выборки имело размер больше граничного, а 50 % – меньше. Коррекция настройки по накопленной медиане. Способ отличается от предыдущего тем, что счет заготовок начинается сразу после выполнения коррекции, а контрольная граница расположена посередине поля допуска. Сигнал о следующей коррекции также поступает, когда 50 % обработанных после предыдущей коррекции заготовок будет иметь размер, больший установленного контрольного, а 50 % – меньший.

Имитационное моделирование различных способов работы СЛУ показало, что степень подавления систематической составляющей погрешности зависит не только от способа, но и от выбранного значения корректирующего импульса.

Двусторонняя коррекция размерной настройки применяется в тех случаях, когда при отсутствии существенных доминирующих причин, определяющих одностороннее смещение размеров обработанных заготовок, уровень настройки смещается периодически в одну или другую сторону. Для двусторонней коррекции используются обычно те же способы работы СЛУ, что и для односторонней. Но устройства для двусторонней коррекции имеют двойной комплект ряда элементов, так как устанавливаются две контрольные границы. Из перечисленных выше способов работы СЛУ в данном случае не годится лишь четвертый (по накопленной медиане). Но его можно условно рассматривать как двусторонний, где две контрольные границы сливаются в одну.

При непрерывном процессе обработки, когда применяется односторонняя коррекция уровня настройки, влияние запаздывания сигнала о коррекции может быть в какой-то степени уменьшено соответствующим расположением контрольной границы. Расстояние от ИУ до зоны обработки влияет в противоположных «направлениях». Удаление ИУ от зоны обработки повышает точность и надежность его работы, но при этом увеличивается запаздывание сигнала, что снижает точность кор-

рекции уровня размерной настройки, особенно при двусторонней коррекции.

Схема автоматического управления точностью обработки при контроле размера в процессе обработки показана на рисунке 2.106 а. Прибор активного контроля (ПАК) непрерывно измеряет обрабатываемую врезным шлифованием заготовку. По мере изменения ее фактического размера СЛУ и ИСУ измеряют скорость поперечной подачи, и при достижении заданного размера подается команда на ускоренный отскок (рис. 2.106 б). Таким образом, рассмотренная схема управления подачей может компенсировать действие источников не только систематической, но и случайной погрешности.

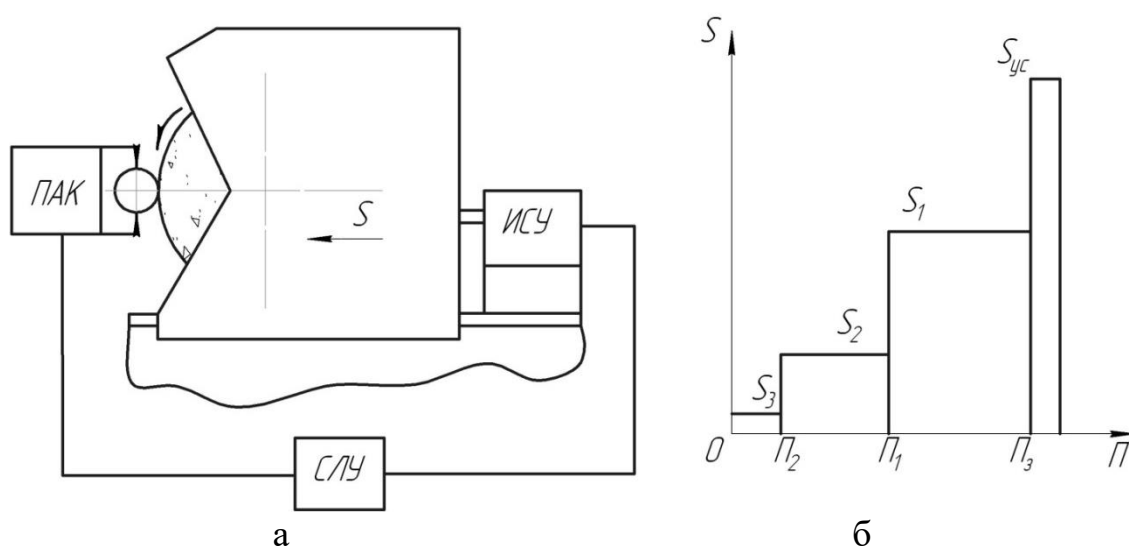


Рисунок 2.106 – Схема автоматического управления точностью при контроле размера в процессе обработки (S_{yc} – подача ускоренного врезания; S_1, S_2 – подачи при предварительной и чистовой обработке; S_3 – микроподача на этапе выхаживания)

В описанном случае новым источником систематической погрешности является износ измерительных наконечников ПАК. Чтобы компенсировать действие этого нового источника, используют комбинированные системы управления точностью, в которых применяются дополнительные измерительные устройства, измеряющие обработанную заготовку в отдельной рабочей позиции. Их измерительные наконечники изнашиваются значительно медленнее основных, так как работают неполное время обработки и в более благоприятных условиях. Дополнительные ИУ дают в СЛУ информацию о степени износа основных наконечников, обеспечивая коррекцию их настройки. ПАК разработаны и испытаны и для других методов обработки.

2.13.4 Автоматическое управление точностью обработки по рассогласованию

Рассмотренные средства управления точностью срабатывают, когда контролируемый параметр достигает заданного уровня. Во многих случаях более эффективными являются системы управления, которые приходят в действие при рассогласовании текущего значения контролируемого параметра с заданным его уровнем. Назначение таких систем – уменьшение случайных отклонений размеров, связанных со случайными и систематическими изменениями упругой деформации технологической системы. Поэтому контролируемым параметром в данном случае является либо отклонение упругой деформации от заданного уровня, либо сила резания P_y , связанная с упругой деформацией функционально.

На рисунке 2.107 показана схема управления точностью обработки на токарном гидрокопировальном полуавтомате путем компенсации изменения упругой деформации технологической системы соответствующим изменением уровня размерной настройки.

Чтобы фактический размер оставался постоянным, необходимо соблюдать равенство $\Delta A_H = -\Delta y$, где ΔA_H – изменение уровня размерной настройки; Δy – изменение упругой деформации. В системе, показанной на рисунке 2.107, измерительное устройство непрерывно определяет уровень радиальной силы P_y , который косвенно оценивает уровень упругой деформации y согласно выражению

$$y = P_y / j ,$$

где j – жесткость технологической системы. Это значение P_y сравнивается в устройстве сравнения (СУ) с заданным значением (уставкой), которое передается в СУ задающим устройством (ЗУ).

Если полагают, что жесткость можно считать постоянной, то и уставка будет постоянной. Но если обрабатывают маложесткие валы и жесткости передней и задней бабок сильно различаются, то ЗУ вырабатывает переменный сигнал, зависящий от координаты x . Разность между сигналами ИУ и ЗУ, пропорциональная Δy , поступает в исполнительное устройство, которое перемещает корпус 1 золотника в ту сторону и до тех пор, пока сигнал, выходящий из СУ, не станет равным нулю. При перемещении корпуса золотника изменяются размер A_2 и, согласно показанной на рисунке размерной цепи, размер $A_{кон}$ на копире. Действительно,

$$A_{\Delta} = A_{ст} + A_{кон} + A_1 - A_2 - A_3 ,$$

где $A_{ст}$, A_1 – постоянные станка; $A_{кон}$ – размер на копии; A_2 , A_3 – размеры цепи в золотнике управления, соответствующие равновесному положению суппорта.

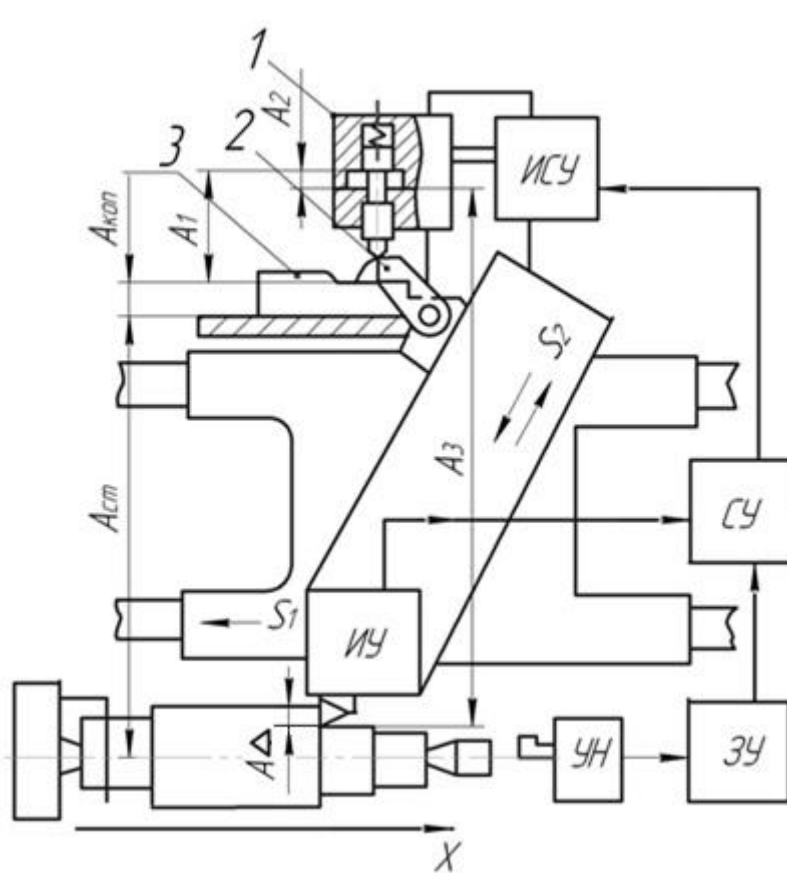


Рисунок 2.107 – Схема управления точностью обработки путем компенсации изменения упругой деформации изменением уровня размерной настройки

Для компенсации размерного износа резца система снабжена устройством установки нуля (УН). Перед обработкой каждой заготовки партии резец подводится к измерительному рычагу УН. При этом щуп 2 находится на нулевой ступени копира, а собственные сигналы ИУ и ЗУ равны нулю. Сигнал УН об отклонении положения вершины резца от нулевого через ЗУ и СУ передается в ИСУ, которое изменяет положение корпуса 1 золотника до тех пор, пока сигнал УН не станет равным нулю.

Стабилизация фактического размера возможна также путем стабилизации уровня упругих деформаций технологической системы при случайных изменениях глубины резания (припуска), твердости заготовки, а также при затуплении резца. Это возможно, если подача будет изменяться так, что

$$yC_p t^x s^y HB^n / j = const .$$

Схема системы управления точностью обработки на токарном гидрокопировальном полуавтомате путем стабилизации упругой деформации технологической системы показана на рисунке 2.108. В данном случае ИУ, ЗУ и СУ выполняют те же функции, что и в системе, показанной на рисунке 2.107. А ИСУ изменяет задающую подачу S_1 так, чтобы вышеуказанное выражение оставалось постоянным.

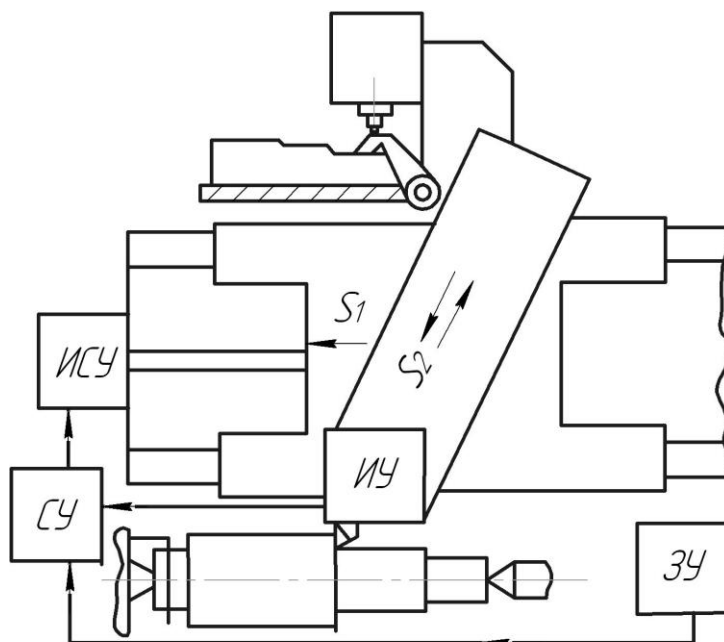


Рисунок 2.108 – Схема управления точностью обработки путем стабилизации упругой деформации

Управление точностью обработки путем компенсации изменений упругой деформации технологической системы изменением размерной настройки позволяет: существенно (в 2...6 раз) сокращать рассеяние размеров, порождаемое случайными факторами, и тем самым повышать точность размеров и формы обработанных заготовок; сохранять шероховатость обработанных поверхностей такой же, как при обычной обработке; увеличивать производительность оборудования за счет обработки за меньшее число проходов; повышать производительность на следующих операциях технологического процесса обработки за счет увеличения точности межоперационных размеров. Недостатком данного способа управления является относительная трудность в создании механизмов малых плавных перемещений, работающих с точностью до нескольких микрон.

Указанного недостатка лишена система управления путем стабилизации упругих деформаций. Однако из-за изменения подачи обработанные заготовки имеют разную шероховатость. Наилучшими свойствами обладают комбинированные системы управления точностью, которые в заданном диапазоне подач ($S_{\min} \dots S_{\max}$) стабилизируют упругую

деформацию, а при $S > S_{\max}$ компенсируют изменения упругой деформации изменением размерной настройки.

В настоящее время прошли лабораторные испытания системы управления точностью обработки на токарных, фрезерных, расточных, кругло- и внутришлифовальных, шлицешлифовальных, отрезных и других станках. При этом принципиальная схема управления осталась той же. Различие только в способах получения информации об упругих деформациях технологической системы и способах изменения уровня размерной настройки или стабилизации упругих деформаций. Так, в некоторых случаях вместо силы P_y измеряется мощность привода главного движения, а для стабилизации упругих перемещений изменяется угол резания путем поворота резца вокруг горизонтальной оси, проходящей через его вершину.

2.14 Обеспечение точностных характеристик при формировании соединений

Схемы установки изделий при узловой и общей сборке выбирают для обеспечения заданной точности сборки, удобства ее выполнения сборщиками, упрощения конструкции приспособлений, оборудования и транспортных средств, а также надежной собираемости деталей. Последнее важно в условиях механизированной и автоматизированной сборки. В зависимости от точности ориентации базовой детали и постоянства ее технологических баз различают следующие основные случаи установки [96–97]:

- неточная (неполная) ориентация базовой детали, которая позволяет с одной установки выполнять все переходы сборки изделия (сборочной единицы); случай характерен для ручной сборки, когда достаточно обеспечить неподвижность базовой детали, удобство подвода присоединяемых деталей и сборочных приспособлений и инструментов с разных (необходимых) сторон;

- неточная ориентация базовой детали с необходимостью последовательной смены ее технологических баз; и этот вариант применяется при ручной сборке в случаях, когда конструкция изделия (сборочной единицы) не позволяет выполнять всю сборку с одной установки;

- точная ориентация базовой детали на единый для всего процесса сборки комплект баз (обязательно обработанных поверхностей); данный вариант характерен для механизированной и автоматизированной сборки, а также для ручной сборки в приспособлениях для точной относительной ориентации сопрягаемых деталей;

- то же, что и в предыдущем пункте, но с последовательной сменой технологических баз.

Для осуществления соединений необходима также ориентация комплектующих (присоединяемых) и соединительных деталей, *обеспечивающее условие собираемости*, т. е. максимально допустимые значения отклонений относительного положения сопрягаемых поверхностей собираемых деталей. На условие собираемости деталей влияют не только допустимое смещение и перекося осей сопрягаемых поверхностей, но и поведение собираемых деталей в процессе сопряжения, например, необходимость смещения и поворота одной из сопрягаемых деталей в пределах погрешности их относительного расположения. В сборочных устройствах подобные смещения (компенсация) происходят за счет податливости исполнительного элемента устройства или зазоров.

На условия собираемости двух деталей, сопрягаемых по цилиндрическим, резьбовым, плоским и другим поверхностям, оказывают влияние фаски на их заходных участках, выполняющие роль подвижных компенсаторов. Силы тяжести или силы, прилагаемые при сборке, вызывают на фасках заходных участков реакции, которые обеспечивают компенсирующие смещения одной из сопрягаемых деталей.

Основными факторами, влияющими на точность совпадения осей сопрягаемых поверхностей, являются, как правило, погрешности диаметральных размеров, геометрической формы сопрягаемых поверхностей и баз (изогнутость, овальность, конусность и т. д.), относительного расположения сопрягаемых поверхностей и баз (неперпендикулярность, несоосность и т. д.).

В каждой схеме базирования каждый из перечисленных факторов влияет на точность положения по-разному.

Процесс сопряжения оси и втулки, показанных на рисунке 2.109, осуществляется в три стадии. На первой стадии (рис. 2.109 а) происходит скольжение по образующей втулки-питателя или плоскостям призмы до момента соприкосновения с фаской сопрягаемого вала. Если при этом ось втулки находится ниже оси вала, то в этот момент не произойдет заклинивания, а сила P , приложенная к торцу втулки, вызовет на фаске реакцию R , которая заставит втулку скользить по фаске, одновременно отрываясь от призмы. При этом происходит смена баз: базирующие точки 1...3 перейдут на торец втулки, а точка 4 – в место контакта кромки втулки с фаской вала (рис. 2.109 б). Вторая стадия продолжается до тех пор, пока не совпадут контуры валика и отверстия втулки (рис. 2.109 в). Совмещение контуров определяет начало третьей стадии, т. е. непосредственного сопряжения (рис. 2.109 г).

При сборке с сопряжением по цилиндрическим поверхностям с обеспечением точности положения собираемых деталей вдоль осей сопрягаемых поверхностей возможны два случая: вал (или втулка) устанавливается до упора в его торец; вал (или втулка) устанавливается вдоль оси с точностью, которая обеспечивается сборочным приспособлением (рис. 2.110). Первый вариант (рис. 2.110 а) является неудачным,

так как при такой схеме базирования точность выдерживаемого размера A_{Δ} будет зависеть от погрешностей размеров корпуса 1 (A_1, A_2) и втулки 2 (A_3), т. е. погрешность схемы базирования $\Delta_6(A_{\Delta})$ в данном случае будет определяться выражением:

$$\Delta_6(A_{\Delta}) = TA_1 + TA_2 + TA_3,$$

где TA – допуск на соответствующий (A_i) размер. Кроме того, будет иметь место систематическая погрешность, обусловленная точностью изготовления детали 3 приспособления по настроечному размеру A_H .

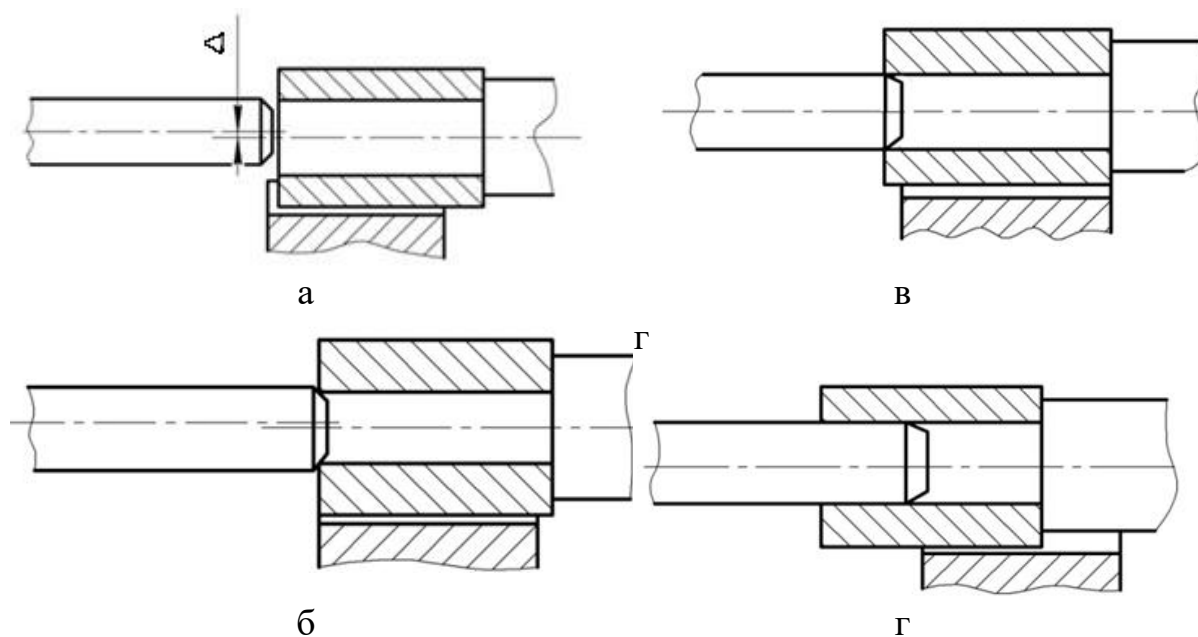


Рисунок 2.109 – Схема процесса смены баз при сопряжении по цилиндрическим поверхностям

При втором варианте (рис. 2.110 б) погрешность схемы базирования по A_{Δ} равна нулю. Имеет место только систематическая погрешность, обусловленная точностью изготовления пуансона 4 по размеру A_H .

Не всегда имеется возможность непосредственного использования схемы базирования, при которой необходимые сборочные базы совпадают с сопрягаемыми поверхностями (или измерительными базами), как это имело место в случае, показанном на рисунке 2.110 б.

Тогда можно применить принцип смены баз в процессе базирования и подвижных компенсаторов. Пример такого решения задачи показан на рисунке 2.111. Для запрессовки подшипников и упорных пружинных колец в отверстие проушины вилки карданного шарнира необходимо обеспечить его точное положение по высоте (несмотря на колебания размера A_3) и углу поворота относительно вертикальной оси.

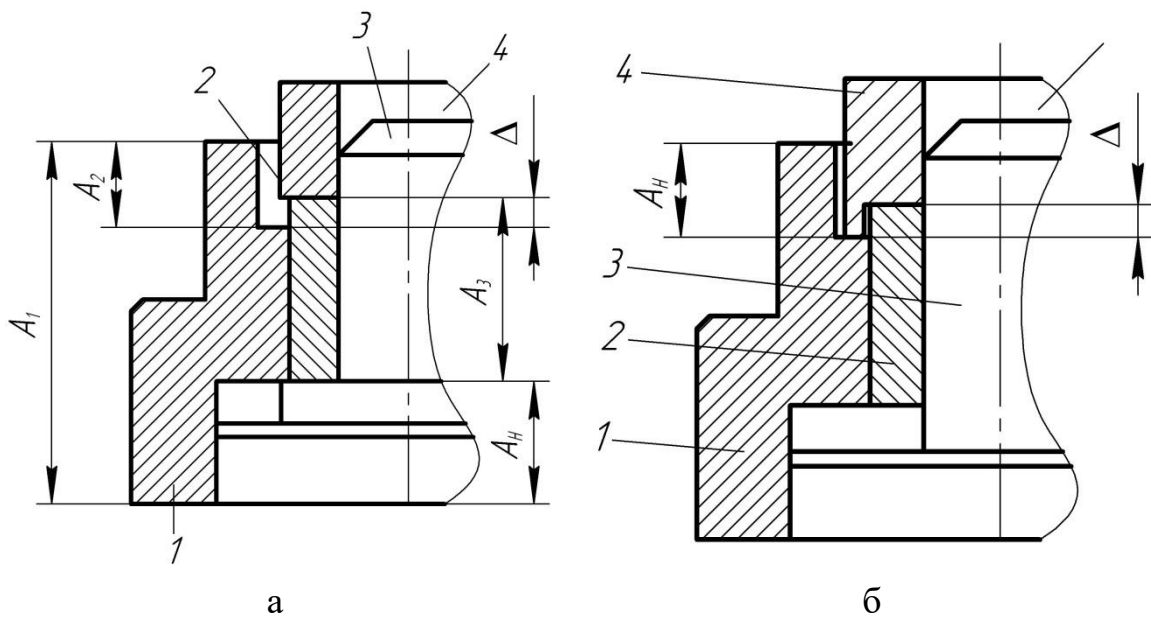


Рисунок 2.110 – Варианты схем базирования в приспособлениях для сборки втулки с корпусом при необходимости выдерживания размера A

На первом этапе базирования осуществляется приблизительное ориентирование с помощью опорных точек на торце (5') и проушине (6'). Это приближенное базирование дает возможностьвилке кардана перемещаться в пределах, необходимых для ввода оправки 1 в отверстия проушины. При этом происходит смена баз, которые переходят в указанные отверстия проушины (точки 5 и 6). Затем с помощью компенсатора 2 ликвидируется зазор с торцом вилки, а сила P сохраняет определенность базирования после удаления оправки 1 и при запрессовке. Последнюю удобнее проводить в другой позиции сборочной машины.

Проектирование (выбор) *сборочного приспособления* на предварительном этапе необходимо осуществлять в следующем порядке.

Проводится проверка технических требований к собираемой сборочной единице. При этом проверяется правильность простановки размеров, требований к относительному положению поверхностей и допусков. При необходимости вносятся согласованные с конструктором коррективы. Определяются условия собираемости, которые выражаются зависимостями:

$$\sum \Delta_i \leq \Delta_E ; \sum \alpha_j \leq \alpha_E ,$$

где Δ_i – допуск на i -й размер размерной цепи схемы базирования; Δ_E – допустимое по условию собираемости смещение; α_j – допуск на j -й относительный поворот размерной цепи схемы базирования; α_E – допустимый по условию собираемости относительный поворот.

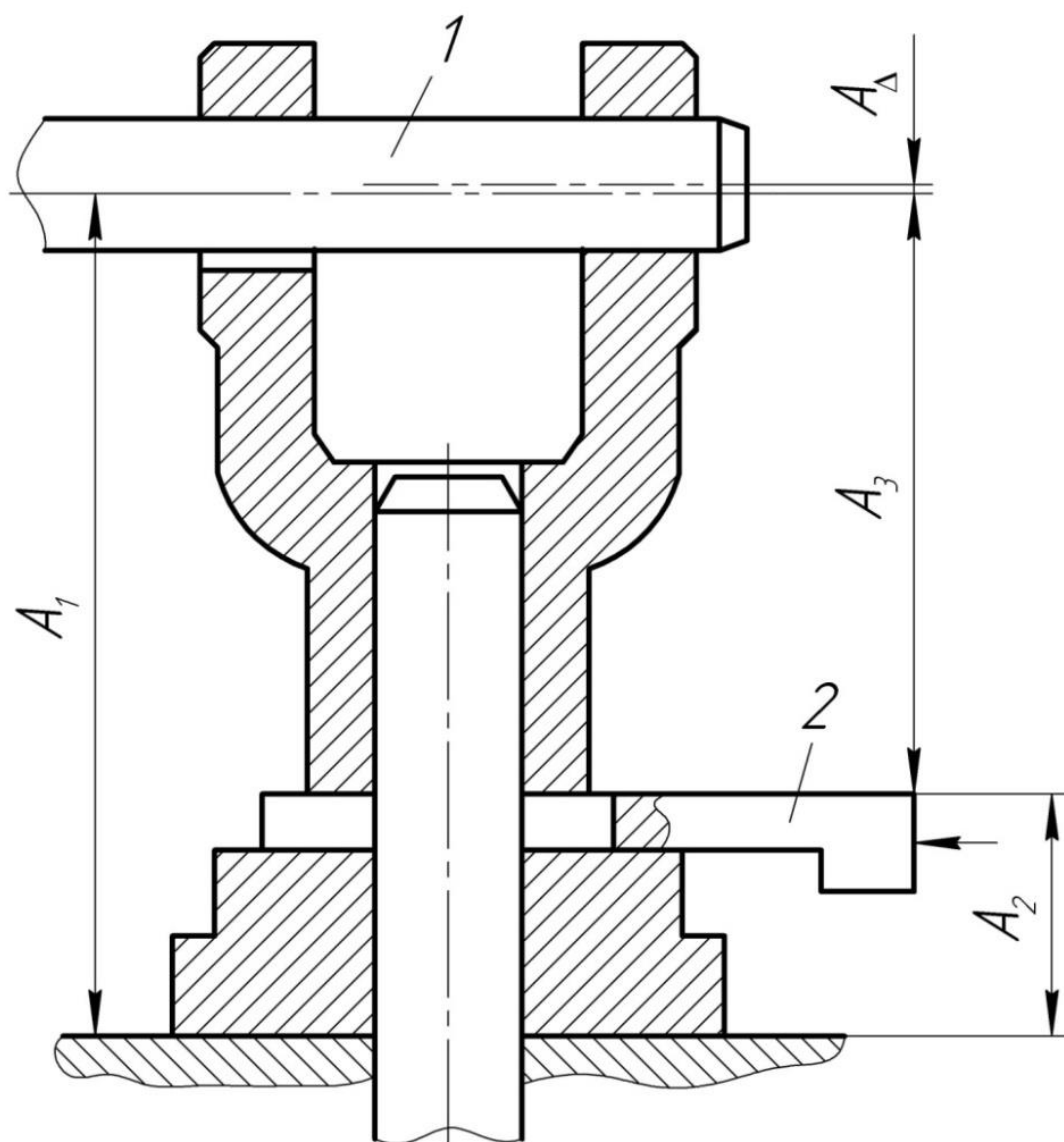


Рисунок 2.111 – Схема базирования вилки кардана для сборки с крестовиной и подшипниками

Условие собираемости рассматривается для начального этапа процесса сопряжения (см. рис. 2.112). Значения Δ_E и α_E определяются теоретически (для относительно простых случаев) или экспериментально. Согласно рисунку 2.112 а, допустимое смещение осей при $D > d$

$$\Delta_E = C_A + C_B + (D - d)/2,$$

где C_A , C_B – размеры фасок соответственно отверстия и вала.

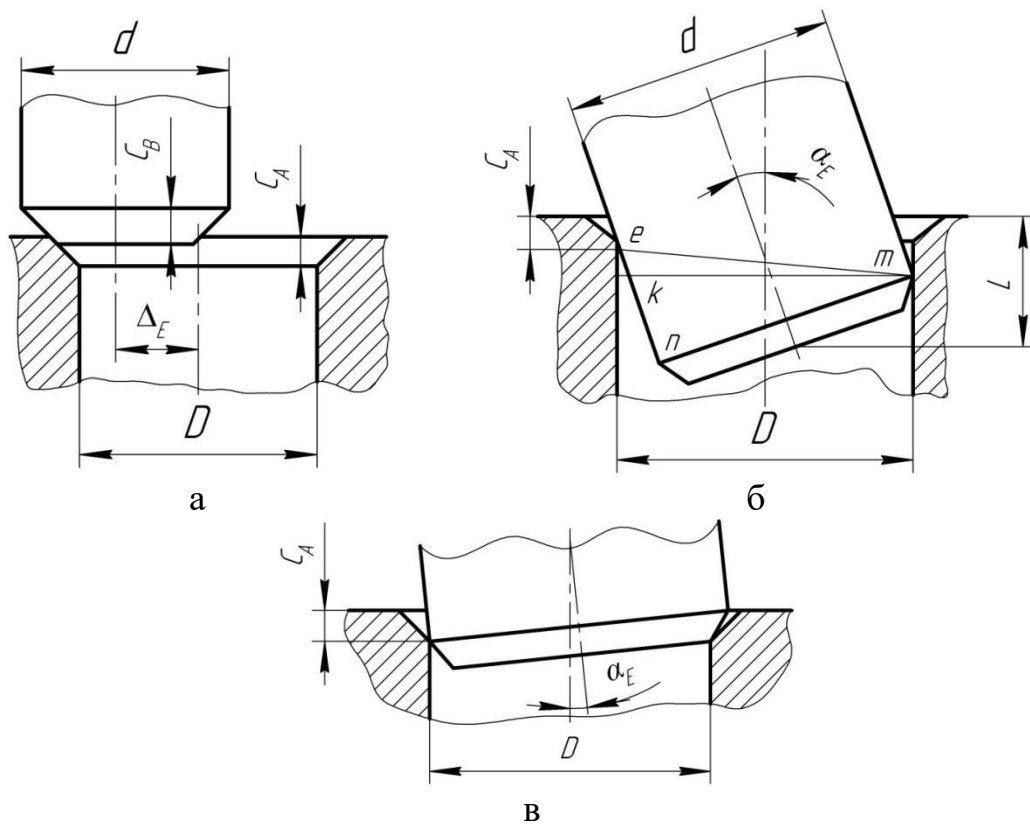


Рисунок 2.112 – Схемы оценки условий собираемости по цилиндрическим поверхностям

Из треугольников ekt и enm (рис. 2.112 б) при $D > d$ после упрощения получаем:

$$\alpha_E = \arctg((D - d)/(L - C_A)),$$

где L – требуемая глубина свободного ввода.

Для деталей, сопрягаемых по цилиндрическим поверхностям с гарантированным натягом ($D < d$), значение α_E ограничивают размерами фаски, чтобы при приложении силы их не заклинило. Тогда (рис. 2.112 в)

$$\alpha_E = \arcsin(C_B/D)$$

или

$$\alpha_E = \arcsin(C_A/D).$$

Согласно рисунку 2.113 а, параметр собираемости Δ_E можно определить выражением

$$\Delta_E = b/3,$$

где b – ширина шпонки, радиус округления которой, равный $b/2$, работает при сопряжении как фаска. Тогда допустимая погрешность угла поворота вала φ_E в начале сопряжения определяется выражением:

$$\varphi_E = \arcsin(2\Delta_E/d)$$

Согласно рисунку 2.113 б, допустимый угол перекоса шпонки (или паза) α_E можно определить следующим образом:

$$\alpha_E = \arcsin((B - b)/(L - b)).$$

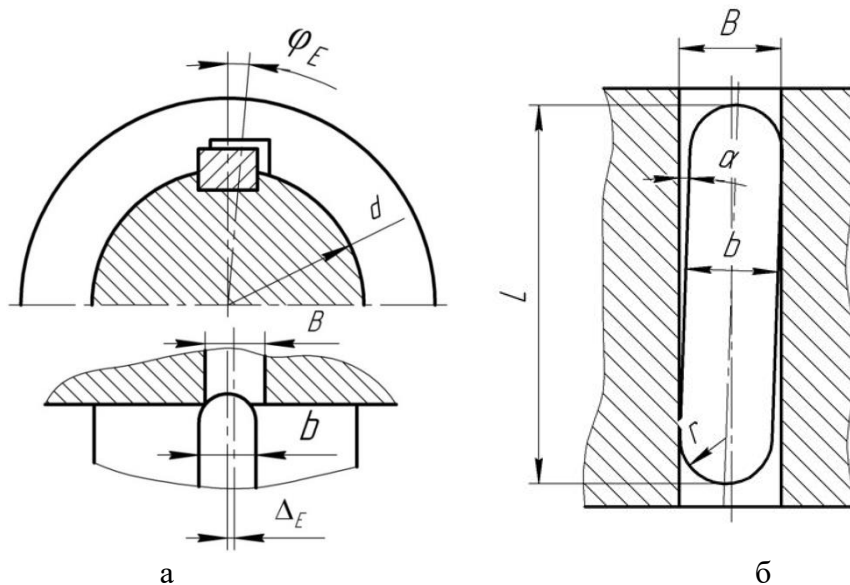


Рисунок 2.113 – Схемы оценки условий собираемости шпоночного соединения

Если найденные значения параметров условия собираемости ставят слишком жесткие требования по точности, то приходится повторно пересматривать технические требования к объекту сборки и составляющим его деталям.

2.15 Вопросы для самоконтроля

1. Что в машиностроении понимают под точностью?
2. Определите понятия функциональных и технологических допусков.
3. В чем особенность технологических допусков при механической обработке и сборке?

4. Перечислите основные положения ГОСТ 21495-77 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения».

5. Охарактеризуйте современное состояние развития теории базирования.

6. В чем суть предложений по корректировке положений теории базирования современными исследователями?

7. Как определяют понятия погрешности базирования и установки современные исследователи?

8. Какие недостатки имеет ГОСТ 21495-77 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения»?

9. В чем разница между проектным и реальным базированием?

10. Дайте определение понятию «реальное базирование заготовки при обработке на станке».

11. Дайте определение понятию «реальное базирование при сборочных операциях».

12. Дайте определение понятию «реальное базирование для контрольных приспособлений».

13. Как классифицируются базы по назначению?

14. Дайте определение понятию «Конструкторские базы».

15. Дайте определение понятию «Технологические базы».

16. Как различаются базы по проявлению?

17. Дайте определение понятию «Измерительные базы».

18. Назовите методы реального базирования.

19. Что выверяется при базировании выверкой по реальной технологической базе?

20. Когда применяется базирование по разметке?

21. С помощью чего осуществляется контроль положения линий разметки при базировании по разметке?

22. С помощью чего осуществляется регулировка положения заготовки при базировании по разметке?

23. Укажите достоинства и недостатки базирования по разметке.

24. Укажите достоинства и недостатки базирования выверкой.

25. Укажите достоинства и недостатки базирования сопряжением.

26. Назовите цель проектного базирования.

27. Как определяется конструкторская база при проектном базировании?

28. Дайте определение понятию «Геометрическая модель объекта производства».

29. Дайте определение понятию «Проектная технологическая база».

30. Чем реальная технологическая база отличается от проектной технологической базы?

31. Дайте определение понятию «Комплект технологических баз».

32. Перечислите известные Вам комплекты технологических баз ориентации.

33. Как должно задаваться относительное угловое положение оси поверхности вращения на чертеже детали или оси обрабатываемой поверхности заготовки на операционном эскизе?

34. Как должно задаваться относительное угловое положение плоской поверхности на чертеже детали или оси обрабатываемой поверхности заготовки на операционном эскизе?

35. Какие базы называются явными?

36. Какие базы называются скрытыми?

37. Как осуществляется создание собственной системы координат при проектном базировании?

38. Что определяет вид компонента комплекта баз?

39. Как определяются неуказанные допуски взаимного расположения?

40. Дайте определение понятию «Теоретическая схема базирования».

41. Дайте определение понятию «Установочная (тройная однонаправленная) технологическая база».

42. Сколько и каких связей накладывает установочная (тройная однонаправленная) технологическая база?

43. С помощью чего может быть реализована установочная (тройная однонаправленная) технологическая база?

44. Дайте определение понятию «Направляющая (двойная однонаправленная) технологическая база».

45. Сколько и каких связей накладывает направляющая (двойная однонаправленная) технологическая база?

46. С помощью чего может быть реализована направляющая (двойная однонаправленная) технологическая база?

47. Дайте определение понятию «Опорная (одионочная) технологическая база».

48. Сколько и каких связей накладывает опорная (одионочная) технологическая база?

49. С помощью чего может быть реализована опорная (одионочная) технологическая база?

50. Дайте определение понятию «Двойная опорная (двойная разнонаправленная) технологическая база».

51. Сколько и каких связей накладывает двойная опорная (двойная разнонаправленная) технологическая база?

52. С помощью чего может быть реализована двойная опорная (двойная разнонаправленная) технологическая база?

53. Дайте определение понятию «Двойная направляющая (четверная) технологическая база».

54. Сколько и каких связей накладывает двойная направляющая (четверная) технологическая база?

55. С помощью чего может быть реализована двойная направляющая (четверная) технологическая база?

56. Дайте определение понятию «Тройная опорная (тройная разнонаправленная) технологическая база».

57. Сколько и каких связей накладывает тройная опорная (тройная разнонаправленная) технологическая база?

58. С помощью чего может быть реализована тройная опорная (тройная разнонаправленная) технологическая база?

59. Перечислите комплекты технологических баз в зависимости от вида компонента.

60. С какими базами может сочетаться в комплект установочная (тройная однонаправленная) база?

61. С какими базами может сочетаться в комплект двойная направляющая (четверная) база?

62. С какими базами может сочетаться в комплект тройная опорная (тройная разнонаправленная) база?

63. С какими базами может сочетаться в комплект направляющая (двойная однонаправленная) база?

64. С какими базами может сочетаться в комплект двойная опорная (двойная разнонаправленная) база?

65. На какие классы можно разделить варианты схем базирования в зависимости от «главной» базы?

66. Дайте определение понятию «Теоретическая схема установки».

67. Изобразите условные обозначения опор, оправок, патронов на схеме установки.

68. Перечислите этапы разработки модели установки заготовки.

69. Дайте определение понятию «Размерная настройка».

70. Изобразите схему размерной настройки.

71. Назовите методы размерной настройки.

72. Укажите недостатки размерной настройки по эталону.

73. Укажите недостатки размерной настройки методом пробной стружки.

74. Укажите цели размерной настройки на партию.

75. Назовите этапы (процедуры) размерной настройки на партию.

76. Дайте определение понятию «Поле рассеяния размеров».

77. Дайте определение понятию «Доверительный интервал для выборочного среднего».

78. Дайте определение понятию «Оптимальная точность размерной настройки».

79. От чего зависит оптимальная точность размерной настройки?

80. Дайте определение понятию «Размерная цепь».

81. Дайте определение понятию «Сборочная размерная цепь».
82. Дайте определение понятию «Линейная размерная цепь».
83. Дайте определение понятию «Плоская размерная цепь».
84. Дайте определение понятию «Пространственная размерная цепь».
85. Дайте определение понятию «Технологическая размерная цепь».
86. Назовите методы обеспечения точности замыкающего звена размерной цепи.
87. Опишите методы полной и неполной взаимозаменяемости.
88. Опишите метод групповой взаимозаменяемости.
89. Приведите алгоритм графического метода сортировки деталей при групповой взаимозаменяемости.
90. Опишите метод подбора.
91. Опишите метод пригонки.
92. Какую информацию содержит типовая схема обработки деталей?
93. Что является исходными данными для проектирования технологического процесса?
94. Как производится проверка правильности простановки размерных связей на чертеже детали?
95. Назовите правила проверки правильности простановки линейных размеров с помощью графа размерных связей.
96. Приведите алгоритм проверки правильности простановки линейных размеров с помощью матрицы смежности.
97. Дайте определение понятию «Граф угловых связей».
98. Опишите способы обеспечения точности взаимного расположения поверхностей.
99. Опишите алгоритм определения порядка обработки и смены баз.
100. Как строятся графы размерных связей заготовки для этапов типовой схемы?
101. Как формируются «Отсеченные» графы размерных связей?
102. Как проводится анализ возможности совмещения и последовательности выполнения переходов технологической операции?
103. Опишите постулаты и правила синтеза схем базирования.
104. Опишите алгоритм синтеза схемы установки.
105. Какие задачи решаются с помощью размерного анализа ТП?
106. Дайте определение понятиям «Припуск» и «Напуск».
107. Какие методы используются для определения припусков?
108. Дайте определение понятиям «Операционный и общий припуск».
109. Опишите алгоритм расчета односторонних припусков.

110. Опишите алгоритм расчета припусков при обработке параллельных плоскостей.
111. Как определить значение минимального припуска?
112. Дайте определение понятию «Размерная схема ТП».
113. Опишите правила построения исходного и производного графов ТП.
114. Опишите правила построения уравнений размерных связей ТП.
115. Как проверить, что разработанный ТП обеспечивает заданную чертежом точность?
116. Каковы алгоритмы расчета технологических размеров, припусков и размеров заготовки?
117. Дайте определение понятию «Жесткость машин и технологических систем механической обработки».
118. Дайте определение понятию «Динамическая жесткость».
119. Дайте определение понятию «Коэффициент динамичности».
120. Опишите производственный метод определения жесткости токарного станка.
121. Опишите производственный метод определения жесткости плоскошлифовального станка.
122. Опишите классификацию погрешностей сборки и механической обработки.
123. Приведите пример погрешностей, не зависящих от режима резания.
124. Как определяются погрешности схемы установки при несовпадении опорных точек с точками сопряжения?
125. Как определяются погрешности схемы установки при установке заготовки в призму?
126. Как определяются погрешности схемы установки при установке заготовки на пальцы?
127. Как определяются погрешности, вызванные деформациями от сил закрепления?
128. Приведите пример погрешностей, зависящих от режима резания.
129. Дайте определение понятию «Коэффициент наследования погрешности».
130. Дайте определение понятию «Коэффициент уточнения».
131. Приведите пример прочих погрешностей при механической обработке.
132. Назовите характеристики точности и стабильности технологического перехода.
133. Как осуществляется статистическое регулирование точности обработки?

134. Как осуществляется автоматическое управление точностью обработки по выходным данным?

135. Как осуществляется односторонняя коррекция уровня размерной настройки?

136. Как осуществляется автоматическое управление точностью при использовании приборов активного контроля?

137. Как осуществляется автоматическое управление точностью обработки по рассогласованию?

138. Приведите положения по обеспечению точности при формировании соединений.

139. Как определяются условия собираемости для начального этапа процесса сопряжения?

3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

3.1 Механизмы формирования показателей качества поверхностей деталей машин

Как уже было отмечено ранее, остаточные напряжения возникают на всех этапах технологического процесса – от заготовительного до отделочного. При воздействии режущего клина K (рис. 3.1) на заготовку в ее подповерхностном слое протекает процесс неравномерного пластического деформирования. В зоне I стружкообразование происходит в условиях интенсивных нормальных сжимающих (-) напряжений, которые проникают под поверхность резания и уравниваются упругими растягивающими (+) напряжениями во внутренних слоях заготовки. В зоне II силы трения о заданную поверхность режущего клина вызывают пластическое растяжение в тонком слое под поверхностью резания. После выхода из зоны резания напряжения в пластически деформированном подповерхностном слое (зоны III и IV) изменяют знак [2–5, 97–101].

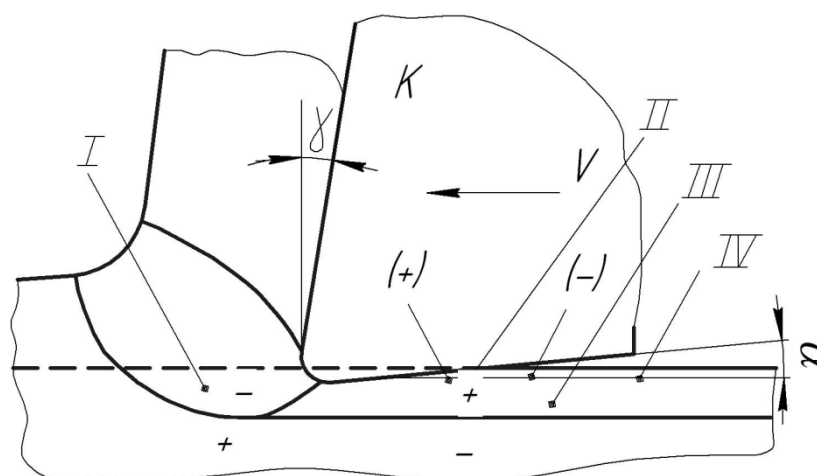


Рисунок 3.1 – Схема зон пластического деформирования и напряжений при резании лезвийным инструментом

В пластически деформированном подповерхностном слое снижается (на 0,3...0,8 %) плотность материала, повышаются его твердость и хрупкость, уменьшаются пластичность и вязкость, изменяются магнитные и некоторые другие свойства. Упрочнение (наклеп) материала подповерхностного слоя зависит от степени его пластической деформации.

Выделяющаяся в зоне резания теплота нагревает тонкий подповерхностный слой до высоких температур, что вызывает увеличение его удельного объема. Однако уровень напряжений в разогретом слое низок

в связи со значительным снижением модуля упругости и повышением пластичности. После прекращения воздействия режущего клина происходит быстрое охлаждение металла подповерхностного слоя, сопровождающееся его сжатием, чему препятствуют нижележащие слои металла, оставшиеся холодными. В результате в нагретом подповерхностном слое развиваются остаточные напряжения растяжения, а в нижележащих слоях – уравновешивающие их напряжения сжатия.

С другой стороны, повышение температуры в зоне резания и подповерхностном слое ведет к уменьшению упрочнения. Чем выше температура нагрева и больше продолжительность теплового воздействия, тем значительно понижается уровень упрочнения.

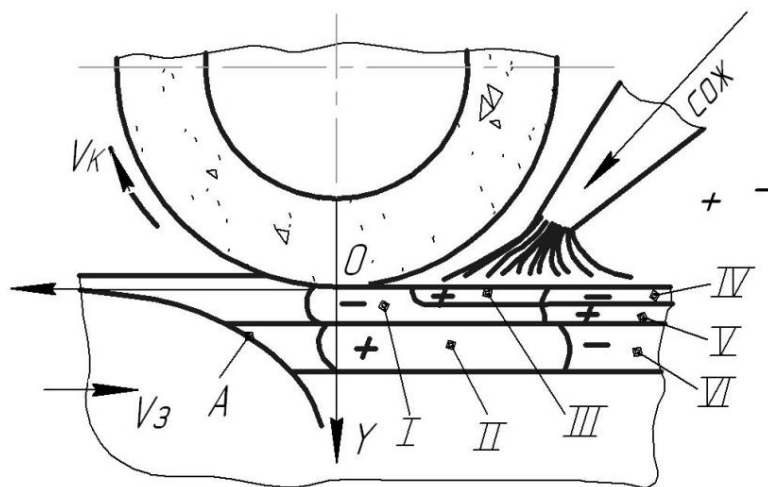


Рисунок 3.2 – Схема формирования остаточных напряжений в подповерхностном слое при шлифовании

На рисунке 3.2 показана схема формирования остаточных напряжений в подповерхностном слое при шлифовании, когда главное влияние на их уровень и характер изменения оказывает нестационарное и неравномерное температурное поле. В момент максимального нагрева это поле характеризуется кривой *A*. Поле вызывает в зоне *I* сжимающие напряжения в связи с тем, что нижележащий слой заготовки (зона *II*) препятствует ее термическому расширению. Эти напряжения обычно превышают предел текучести шлифуемого материала (при высокой температуре), что приводит к пластическим деформациям сжатия в зоне *I*. Естественно, в зоне *II* возникают временные растягивающие напряжения.

После выхода из зоны шлифования обрабатываемая поверхность под действием СОЖ резко охлаждается, вследствие чего образуется зона *III*, в которой формируются временные растягивающие напряжения. Часто и они превышают предел текучести шлифуемого материала. По мере удаления от зоны шлифования температура в подповерхностном слое выравнивается, что в связи с пластической деформацией в зонах *I* и

III приводит к изменению знака временных напряжений (зоны *IV*, *V* и *VI*) и формированию таким образом остаточных напряжений.

При шлифовании закаленных сталей уровень остаточных напряжений и характер их изменения по глубине подповерхностного слоя существенно зависят от структурных превращений в материале под действием кратковременных тепловых импульсов. Эти структурные изменения принято называть *прижогами*. В зависимости от внешнего вида прижоги бывают: сплошные – вся поверхность покрыта прижогом; пятнистые – на шлифованной поверхности имеются отдельные пятна прижогов; однородные штриховые – вся шлифованная поверхность покрыта однородными штриховыми прижогами; циклические штриховые – штриховые прижоги циклически повторяются на шлифованной детали.

По характеру изменения микроструктуры подповерхностного слоя различают: прижоги отпуска – в подповерхностном слое в местах прижога имеются только структуры отпуска (сорбит или троостит, сорбито-троостит или троостито-мартенсит); прижоги вторичной закалки с отпуском – в подповерхностном слое шлифованной детали в местах прижога тонкий слой вторичной закалки расположен на более мягкой основе отпущенного слоя. Структура слоя вторичной закалки может содержать мартенсит или аустенит (для легированных сталей).

Изменение структуры подповерхностного слоя ведет к изменению удельной плотности материала в нем и, следовательно, к появлению собственной схемы распределения остаточных напряжений, которые складываются с полученными под воздействием «теплого удара». В зависимости от сочетания методов и режимов обработки в подповерхностном слое обработанной заготовки образуются остаточные напряжения с различными законами изменения по глубине.

3.2 Влияние способов и условий обработки на шероховатость поверхности

Все многообразные причины, обуславливающие шероховатость обработанной поверхности, можно объединить в три основные группы: причины, связанные с геометрией процесса резания; причины, связанные с пластической деформацией обрабатываемого материала; вибрации инструмента относительно обрабатываемой поверхности [2–5, 97–101].

С геометрической точки зрения высота, форма и относительное расположение неровностей (направления обработанных рисок) определяются формой и состоянием формообразующих элементов инструмен-

та и теми элементами режима обработки, которые влияют на изменение траектории его движения относительно заготовки.

На рисунке 3.3 показаны схемы формирования «геометрической» шероховатости. При точении резец описывает относительно оси вращения заготовки винтовую линию с шагом, равным подаче S .

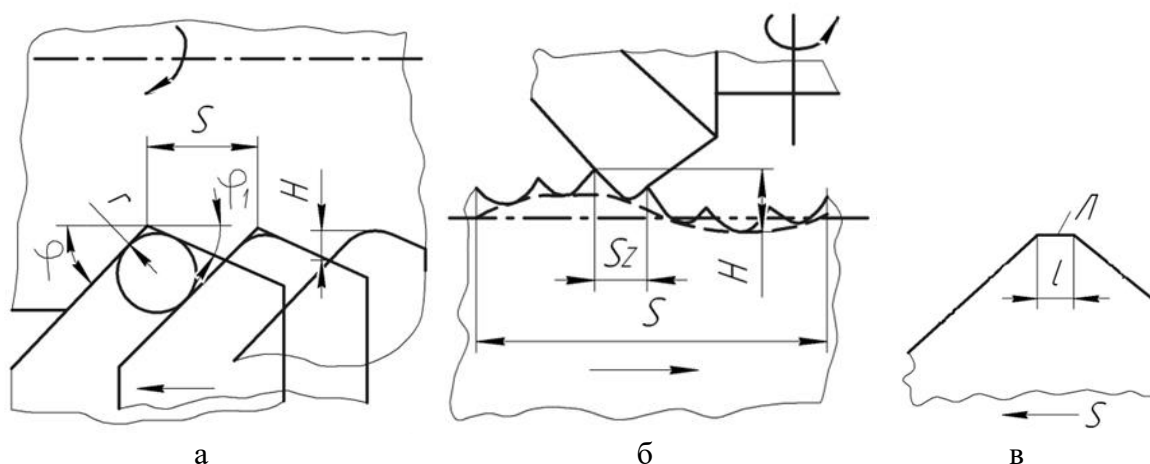


Рисунок 3.3 – Формирование «геометрической» шероховатости:
а – при точении, б – торцовом фрезеровании, в – резец с
дополнительным режущим-защитным лезвием

В осевом сечении обработанной поверхности образуются гребешки (рис. 3.3 а), высота которых зависит от подачи s , углов в плане φ_1 и φ , радиуса r скругления режущей кромки. При достаточно малой подаче высота H зависит уже только от r и s . Зависимость «геометрической» шероховатости от подачи s отражает кривая 1 на рисунке 3.4 а.

При торцовом фрезеровании H зависит не только от подачи на зуб Sz , но и от торцового биения режущих кромок (рис. 3.3 б). В данном случае «геометрические» гребешки касаются не прямой линии, а синусоиды с шагом $S = Sz \cdot z$, где z – число зубьев фрезы. Из-за неравномерного положения вершин резцов фрезы опорная кривая получается сложнее.

При обработке резанием в подповерхностном слое протекают два процесса – пластическое деформирование и упругое восстановление (зоны I и II на рисунке 3.1). Эти процессы приводят к увеличению шероховатости по сравнению с H , что иллюстрируется экспериментальными графиками на рисунке 3.4, где линии 1–3 отражают зависимость H от рассматриваемого фактора. Эксперименты показали, что уменьшение подачи от 0,1 до 0,02 мм/об при точении конструкционных сталей практически не влияет на Rz (рис. 3.4 а, кривая 2). Неровности обработанной поверхности в этом случае образуются не столько под влиянием геометрических причин, сколько в результате пластических и упругих де-

формаций. При очень малых подачах Rz может даже увеличиваться вследствие потери устойчивости движения суппорта, который начинает перемещаться не плавно, а рывками.

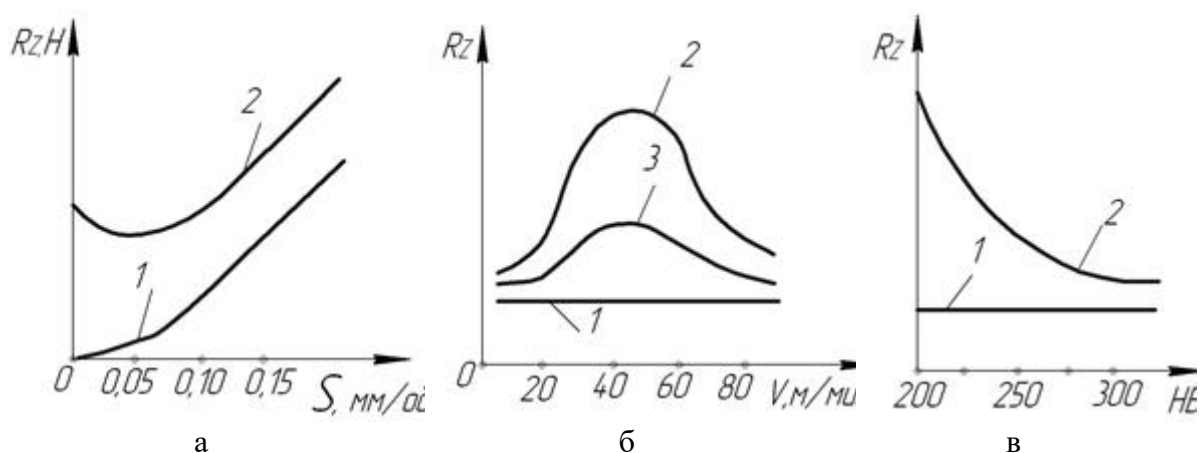


Рисунок 3.4 – Влияние скоростей резания, подач и твердости заготовки на высоту неровностей обработанной поверхности

Существенное влияние на пластические деформации в подповерхностном слое оказывает скорость резания. Кроме того, она обуславливает процесс образования нароста, который значительно повышает уровень Rz . В зависимости от значения подачи и пластических свойств заготовки максимальная высота нароста приходится на скорость в диапазоне от 20 до 40 м/мин, что отражается на значении Rz (кривая 2 на рисунке 3.4 б). Применение охлаждения сульфоземлем снижает значение Rz , но при этом сохраняется характер зависимости Rz от скорости резания (кривая 3 на рисунке 3.4 б). При увеличении скорости резания сверх определенного граничного значения Rz перестает изменяться. Граничная скорость $v_{гр}$ резания зависит от подачи. Например, для конструкционных сталей присущи такие соотношения S и $v_{гр}$:

S , мм/об	0,1	0,2	0,3	0,4
$v_{гр}$, м/мин	190	145	105	92

Увеличение твердости заготовки ведет к уменьшению ее пластичности и, следовательно, к уменьшению уровня пластических деформаций в подповерхностном слое. Поэтому, как показывают эксперименты (рис. 3.4 в), с увеличением твердости уровень Rz снижается. Однако при увеличении твердости сверх определенного предела (300 HB или 32 HRC_3) ее влияние на Rz незначительно. При повышении твердости снижается зависимость Rz от скорости резания.

При затуплении инструмента на его режущих лезвиях образуются неровности, которые переносятся на поверхность резания и обработан-

ную поверхность. Кроме того, скругление режущей кромки, обязательно сопровождающее процесс изнашивания, и увеличение площадки трения на задней грани режущего клина приводят к существенному увеличению пластических деформаций в подповерхностном слое, что также повышает высоту неровностей.

При обработке инструментом, у которого предусмотрено дополнительное режущее лезвие L (рис. 3.3 в) длиной $l > s$, параллельное направлению подачи S (образующей обработанной поверхности), высота H неровностей, возникающих по геометрическим причинам, должна быть равна нулю. Неровности на обработанной поверхности в данном случае возникают вследствие пластического деформирования, трения по задней грани, изменения контура дополнительной режущей кромки из-за ее износа. Экспериментальные исследования показали, что при достаточно высокой твердости заготовки (твердость больше 32 HRC₃) коэффициент перекрытия $K_{ПЕР} = l/sv$ в пределах 2...6 существенно уменьшает высотные параметры шероховатости.

Вибрации (вынужденные и автоколебания), сопровождающие процесс резания, обычно увеличивают шероховатость. Например, при увеличении амплитуды осевых (параллельных подаче) колебаний от нуля до 0,2 мм значение параметра Rz шероховатости при точении увеличивается от 5 до 38 мкм.

При шлифовании в режиме полного самозатачивания параметр Ra шероховатости увеличивается пропорционально увеличению номера зернистости абразивного материала шлифовального круга. Чем меньше зерна, тем меньше их разновысотность и расстояние между ними вдоль образующей рабочей поверхности круга. Процесс изнашивания круга после некоторого этапа приработки ведет к увеличению параметра Ra . Главной причиной этого является неравномерность износа. На рабочей поверхности шлифовального круга образуются волны. Амплитуда волнистости может достигать 15...25 мкм. Эти волны вызывают высокочастотные радиальные колебания, резко увеличивающие уровень Ra . Характер и темп изменения Ra зависят от метода правки и свойств правящего инструмента.

Окончательно уровень Ra формируется обычно в конце цикла шлифования на этапе выхаживания. Однако если время выхаживания превышает некоторый оптимальный уровень τ_{opt} , то дальнейшее выхаживание не дает эффекта. Наоборот, при очень малых значениях силы P_y процесс шлифования часто становится неустойчивым, возникают автоколебания, ведущие к увеличению значения параметра Ra (рис. 3.5 а). Вообще, при шлифовании вибрации являются одной из основных причин образования шероховатости (и волнистости). Характер влияния вибраций, вызванных дисбалансом шлифовального круга, при различных уровнях жесткости j_1 и j_2 технологической системы и постоянном времени выхаживания показан на рисунке 3.5 б.

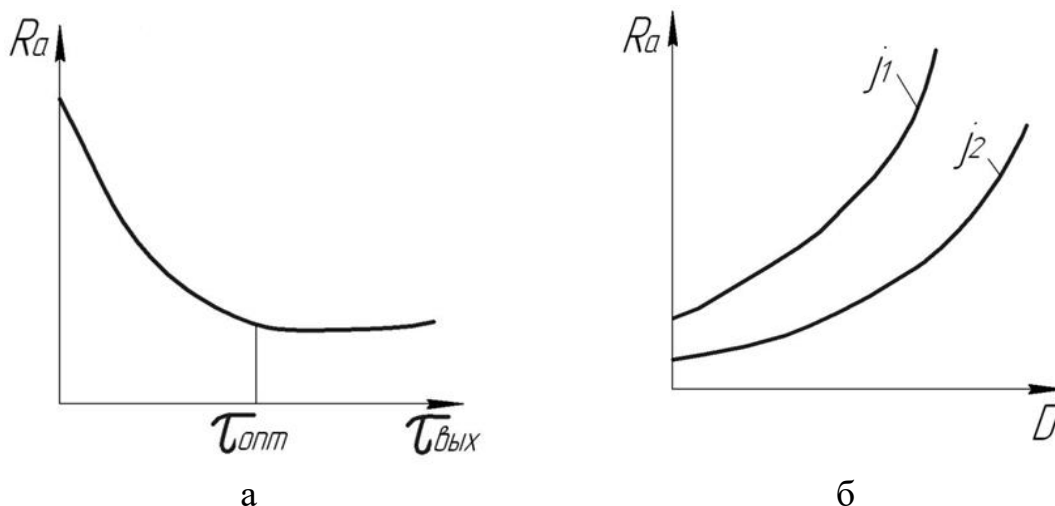


Рисунок 3.5 – Влияние на параметр Ra ($j_1 < j_2$):
 а – времени выхаживания $\tau_{\text{вых}}$, б – дисбаланса шлифовального круга

На высотные параметры шероховатости, образующейся при обработке способами ППД, оказывают существенное влияние давление в зоне контакта инструмента и заготовки, продольная подача, форма и размеры деформирующего элемента, исходная шероховатость обрабатываемой поверхности и физико-механические свойства материала обрабатываемой заготовки. Остальные параметры обработки на уровень параметра шероховатости влияют незначительно.

С увеличением нормальной силы P при обкатывании и раскатывании параметр Ra уменьшается, но до определенного предела – при оптимальной силе $P_{\text{опт}}$ (рис. 3.6 а). При увеличении твердости и снижении пластичности материала заготовки значения $P_{\text{опт}}$ возрастают. Следует, однако заметить, что, хотя сила P является основным параметром, исходя из которого разрабатываются практические рекомендации по режимам обкатывания, в сущности эффективность процесса зависит от среднего давления p на поверхности контакта, которое может быть различным при одной и той же силе P (рис. 3.6 б). Оптимальное давление $P_{\text{опт}}$ несколько возрастает при увеличении твердости материала заготовки. Но если при обкатывании стали 20 оптимальное давление (1,70 кПа) достигается при $P = 650 \text{ Н}$, то при обкатывании стали У8 оптимальное давление, равное 2 кПа, достигается при $P = 1350 \text{ Н}$. При обкатывании закаленных сталей, имеющих твердость 58...62 HRC_э, $P_{\text{опт}} = 2,6...2,8 \text{ кПа}$. Давление p зависит не только от силы P , но и от радиусов кривизны инструмента и заготовки в месте контакта.

Зависимость параметра Ra от числа $N_{\text{прох}}$ проходов с заданным значением P показана на рисунке 3.7 а. Увеличение числа проходов сверх оптимального приводит к шелушению поверхности и увеличению шероховатости. Резкое ухудшение поверхности происходит при испы-

таниях после 25 проходов: появляются многочисленные микротрещины, чешуйки, начинается процесс разрушения (шелушения) подповерхностного слоя.

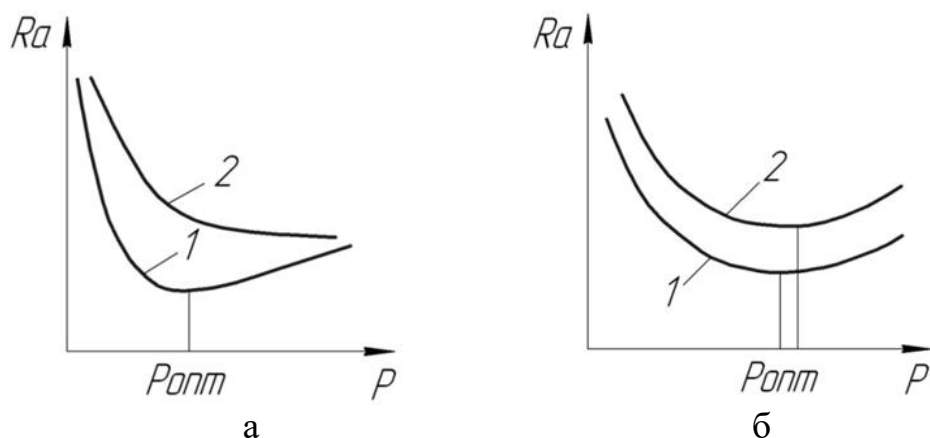


Рисунок 3.6 – Влияние на параметр Ra при обработке ППД материалов разной твердости:
 а – нормальной силы P , б – давления p в зоне контакта;
 1 – для HB_1 ; 2 – для HB_2 ($HB_1 < HB_2$)

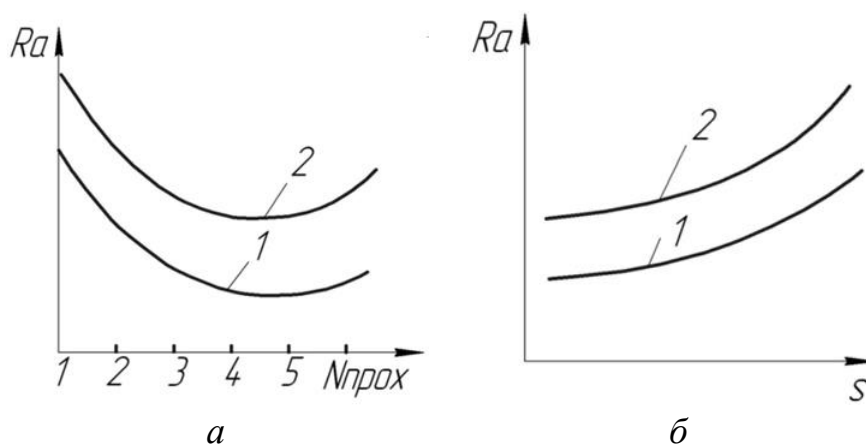


Рисунок 3.7 – Влияние на параметр Ra при обработке ППД материалов разной твердости:
 а – числа проходов $N_{прох}$, б – продольной подачи; S_1 – для HB_1 ;
 2 – для HB_2 ($HB_1 < HB_2$)

Изменение подачи s и радиуса r деформирующего элемента существенно влияет на параметр Ra (рис. 3.7 б). Высота микронеровностей прямо пропорциональна подаче во второй степени и обратно пропорциональна радиусу деформирующего элемента (шара). Но в результате наблюдений установлено, что при накатывании существует «граничная» подача, превышение которой существенно влияет на Rz . Эта подача зависит от твердости заготовки. Так, например, при обкатывании высокопрочных сталей шарами диаметром 5...10 мм уменьшение подачи от

0,12 мм/об практически не влияет на Ra , а увеличение подачи сверх этого значения приводит к резкому увеличению Ra . При обработке заготовок из отожженных сталей 20 и 15 это граничное значение подачи равно 0,2 мм.

Влияние исходной шероховатости на шероховатость, полученную после обработки способами ППД, показано на рисунке 3.8 а. Однако оно начинается только с определенного значения исходного параметра Ra , которое зависит от твердости и пластичности материала заготовки. Например, при обкатывании незакаленных сталей с давлениями, близкими к оптимальным, исходные неровности до $Ra = 3...4$ мкм практически не влияют на значение Ra (0,15...0,2 мкм) после обработки. При давлении ниже оптимального вследствие неполной деформации исходных неровностей их влияние проявляется более резко. То же самое происходит при обкатывании более твердых (улучшенных или закаленных) сталей. В этом случае Ra исходной поверхности начинает влиять при меньших, чем было указано, значениях (рис. 3.8 а, кривая HB_2).

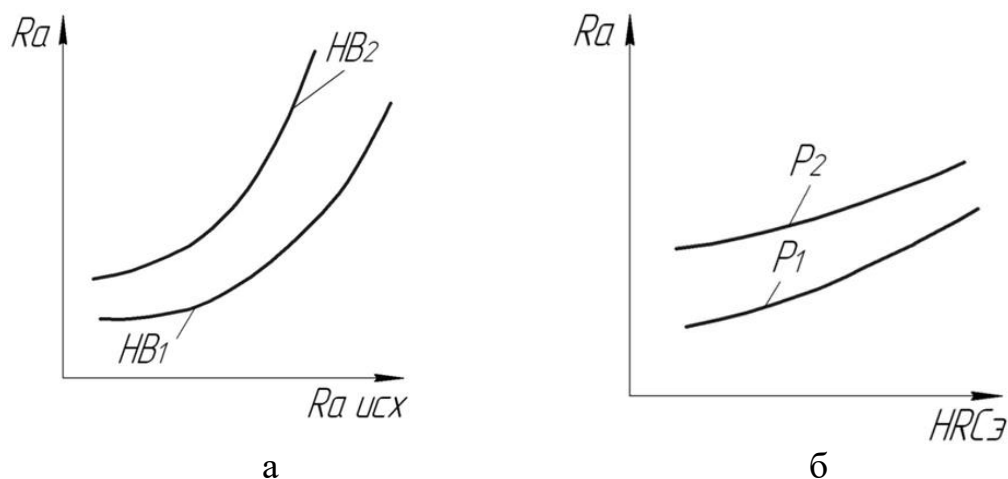


Рисунок 3.8 – Влияние на Ra при обработке материалов способами ППД: ($HB_1 < HB_2$, $p_1 < p_2$): а – параметра шероховатости $Ra_{исх}$ исходной поверхности, б – твердости материала заготовки

Как видно из рисунков 3.6...3.8, твердость материала заготовки существенно влияет на параметр Ra . Чем выше твердость, тем хуже обрабатываются способами ППД заготовки, т. е. с увеличением твердости заготовки параметр Ra при прочих равных условиях тоже увеличивается, так как с увеличением твердости понижается пластичность и исходные неровности деформируются менее полно. А по мере увеличения исходных неровностей их деформирование все более затрудняется.

Характер зависимости параметра Ra от условий обработки одинаков и для обкатывания (раскатывания), и для выглаживания. Но алмазное выглаживание обеспечивает получение более ровной и менее шеро-

ховатой поверхности (с меньшим значением Ra), чем обкатывание, особенно это проявляется при обработке закаленных сталей.

Результаты обработки способами ППД зависят также от направления пластического деформирования по отношению к направлению предшествующей обработки. Наименьшая шероховатость и более однородная поверхность без местных повреждений образуются при противоположных направлениях рабочих движений на смежных операциях. Так, например, при совпадении направления вращения расточной борштанги с направлением вращения выглаживающего инструмента во время обработки отверстия в чугуновой заготовке были получены значения параметра Ra от 0,18 до 0,5 мкм. А при выглаживании в тех же условиях, но с изменением направления вращения инструмента, значения параметра Ra снизились до 0,1...0,28 мкм. Те же результаты были получены при раскатывании отверстия после его растачивания. Это можно объяснить снижением сопротивления пластическому деформированию после предварительного пластического деформирования противоположного знака.

3.3 Влияние способов и условий обработки на состояние подповерхностного слоя материала

Состояние подповерхностного слоя обычно характеризуется двумя сравнительно легко определяемыми показателями: степенью упрочнения N и глубиной (толщиной) упрочненного слоя h . Степень упрочнения определяется выражением

$$N = 100(H_{уп} - H_{исх}) / H_{исх} (\%),$$

где $H_{уп}$ – микротвердость обработанного (упрочненного) материала; $H_{исх}$ – микротвердость исходного материала заготовки [2–5, 97–101].

Эксперименты показали, что с увеличением расстояния h от поверхности микротвердость монотонно уменьшается от $H_{уп}$ до $H_{исх}$ в соответствии с моделью

$$H = H_{исх} + (H_{уп} - H_{исх}) \exp(-kx),$$

где k – параметр, характеризующий темп снижения микротвердости в упрочненном слое.

Влияние скорости резания на степень и глубину упрочнения не является монотонным. Оказалось, что существует оптимальная скорость

резания, при которой эти показатели будут минимальными. Увеличение подачи не меняет характера влияния скорости резания на степень и глубину упрочнения, а только уменьшает значение оптимальной скорости резания.

При уменьшении переднего угла от $+15^\circ$ до -15° глубина упрочнения увеличивается почти в 3 раза, а степень упрочнения – на 13 %. Увеличение радиуса скругления режущего лезвия повышает степень и глубину упрочнения при всех подачах, особенно если он больше, чем толщина среза. Существенно влияет на упрочнение увеличение износа инструмента по задней поверхности. Наибольшее влияние на упрочнение оказывает фаска износа на задней грани при скоростях резания, больших или меньших оптимальной. Например, при увеличении фаски износа от 0 до 0,4 мм и оптимальной скорости резания глубина упрочнения увеличивается на 20 мкм, а степень упрочнения – на 4 %. А при обработке со скоростями, меньшими или большими оптимальной, глубина упрочнения возрастает на 55...70 мкм, а степень упрочнения – на 8...10 %.

Стали и сплавы, обладая различными прочностными и пластическими свойствами, по-разному упрочняются при обработке резанием. Увеличение относительного удлинения при разрыве (показатель пластичности) существенно увеличивает степень и глубину упрочнения. При многофазной структуре большее упрочнение получают те структурные составляющие, которые более склонны к деформированию и упрочнению.

Марка инструментального материала в широком диапазоне скоростей резания значительно влияет на коэффициент трения на задней поверхности инструмента, а следовательно, на степень и глубину упрочнения. Инструментальный материал, обеспечивающий меньшее значение коэффициента трения, формирует подповерхностный слой детали с меньшей степенью и глубиной упрочнения. Например, поверхность, обработанная резцом из сплава Т14К8, имеет меньшую глубину и степень упрочнения по сравнению с поверхностью, обработанной резцом из сплава ВК8. Это связано с тем, что с увеличением содержания карбидов вольфрама повышается склонность к адгезионному взаимодействию материалов инструмента и заготовки, увеличивается коэффициент трения на задней поверхности.

Формирование подповерхностного слоя у закаленных и незакаленных сталей (чугунов) при шлифовании происходит по-разному. Кратковременные тепловые импульсы при шлифовании незакаленных сталей не могут привести к структурным изменениям в подповерхностном слое, так как не успевают произойти необходимые для этого диффузионные процессы. Процесс стружкообразования при шлифовании сопровождается значительными пластическими деформациями в подповерхностном слое, что способствует упрочнению. Однако высокие тем-

пературы в зоне резания вызывают разупрочнение материала, и его наклеп при этом снижается.

Особенностью формирования подповерхностного слоя при шлифовании закаленной стали является то, что ее структура может изменяться под действием даже кратковременных тепловых импульсов, так как при этом в основном происходят бездиффузионные процессы (переход $\alpha \rightarrow \gamma$), а распад твердых растворов требует значительно меньших тепловых затрат, чем их образование. При низкой производительности процесса и нормальной (30 м/с) или пониженной скорости шлифования подповерхностный слой упрочняется (наклёпывается) так же, как у незакаленных сталей. При повышении производительности и недостаточном охлаждении происходит отпуск мартенсита (прижог отпуска) и микротвердость материала становится ниже исходной. При дальнейшем повышении производительности и обильном охлаждении наблюдается вторичная закалка (прижог закалки). Быстрое охлаждение поверхности, выходящей из зоны шлифования, формирует аустенитно-мартенситную структуру. Слой вторичной закалки при этом имеет высокую микротвердость (выше микротвердости мартенсита), хотя и может содержать до 60...70 % аустенита. Это обусловлено мелкодисперсной структурой аустенита и его упрочнением. Обычно под вторично закаленным слоем находится слой с пониженной микротвердостью. При значительной производительности и недостаточном охлаждении может наблюдаться отпуск вторично закаленного слоя.

При выхаживании производительность процесса шлифования непрерывно уменьшается, что приводит к некоторому увеличению степени упрочнения. Оптимальное время выхаживания для получения поверхности с достаточно малой шероховатостью и достаточным упрочнением материала при врезном шлифовании составляет 8... 12 с.

Обработка способами ППД вызывает в подповерхностном слое значительно большее упрочнение, чем обработка резанием (кривая 1 на рисунке 3.9 а). Глубина упрочненного слоя также значительно больше. С увеличением силы P , с которой рабочее тело (шар, ролик, алмазный наконечник) прижимается к обрабатываемой поверхности, возрастает как степень, так и глубина (толщина слоя) упрочнения (рис. 3.9 а). Однако такая связь имеет место только до определенного предела. В каждом конкретном случае существует предельное значение силы P , превышение которого приводит не к повышению, а к понижению микротвердости обработанного материала (рис. 3.9 б). При алмазном выглаживании максимальное повышение твердости выше и достигается при значительно меньших значениях нормальной силы, чем при обкатывании шарами. На рисунке 3.9 б алмазному выглаживанию соответствует кривая 1, а обкатыванию шаром – 2. Радиус сферы деформирующего инструмента в обоих случаях был один и тот же.

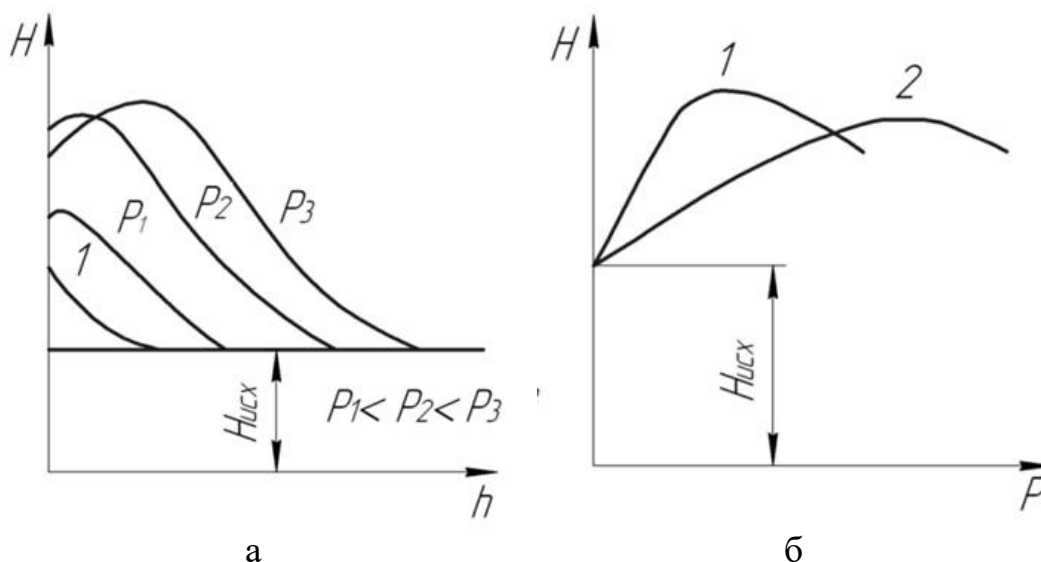


Рисунок 3.9 – Зависимость степени и глубины (толщины слоя) упрочнения от условий обработки способами ППД

С увеличением диаметра рабочего элемента выглаживающего (накатывающего) инструмента снижается максимально достижимая степень упрочнения и существенно повышается необходимое для ее достижения значение нормальной силы. Это предельное значение нормальной силы зависит от механических свойств обрабатываемого материала. У мягких и пластичных материалов и сплавов оно меньше, чем у более твердых и менее пластичных. Так, например, у армко-железа прирост твердости прекращается при значениях P , больших 0,5 кН, а у сталей 20, 45 и У8 – соответственно при значениях 1; 1,8 и 2 кН. Прирост твердости поверхности, обработанной способами ППД, существенно зависит от структуры материала заготовки. Минимальный прирост твердости наблюдается при обработке сорбита и троостита, а максимальный – ферритно-перлитной структуры.

Высокую склонность к упрочнению при выглаживании обнаруживают аустенитные стали, особенно при предварительном охлаждении заготовок до -70 °С. Это связано с тем, что при пластическом деформировании аустенитных сталей происходит не только упрочнение аустенита, но и аустенитно-мартенситное фазовое превращение. Деформация мартенситной структуры сопровождается интенсивным дисперсионным твердением и превращением остаточного аустенита в мартенсит.

Изменение подачи и скорости в пределах, рекомендуемых для обкатывания и алмазного выглаживания, практически не влияет на глубину и степень упрочнения. Увеличение числа проходов при обкатывании или выглаживании с оптимальным значением нормальной силы практически не увеличивает твердость обработанного материала. Но если давление ниже оптимального, то повторные проходы (до определенного числа) повышают твердость. При этом допустимое, с точки зрения

упрочнения, число проходов тем больше, чем меньше оптимальное значение силы P . А если рабочее значение нормальной силы больше оптимального, то дополнительные проходы ведут к уменьшению твердости обработанной поверхности.

3.4 Управление качеством поверхности при шлифовании

Экспериментальные исследования показали, что глубина структурно измененного слоя (прижогов) при шлифовании закаленной стали при прочих равных условиях линейно зависит от объемной производительности процесса шлифования (или от параметров, функционально связанных с ней). Один из примеров такой зависимости при круглом врезном шлифовании образцов из стали ШХ15 кругом 24А40СМ2К5 со скоростью шлифования $v_k = 35$ м/с и скоростью вращения заготовки $v_3 = 135$ м/мин показан на рисунке 3.10. Круг считается «острым» непосредственно после его правки. Объемная производительность Q связана со скоростью v_r уменьшения радиуса заготовки известным выражением

$$Q = \pi D_3 B v_r,$$

где D_3 , B – соответственно диаметр и ширина заготовки.

Анализ графиков на рисунке 3.10 позволяет сделать следующие выводы: 1) в каждом конкретном случае существует критическая производительность $Q_{\text{крит}}$, при которой не образуется прижогов; 2) по мере изнашивания и затупления шлифовального круга значения $Q_{\text{крит}}$ уменьшаются, а глубина (толщина) дефектного слоя (прижогов) увеличивается; 3) зависимость между глубиной прижогов X и параметрами производительности съема припуска можно отразить следующей моделью:

$$X = K_d (Q - Q_{\text{крит}}) \text{ при } Q > Q_{\text{крит}};$$

$$X = 0 \text{ при } Q \leq Q_{\text{крит}}$$

или

$$X = \pi D_3 B K_d (v_r - v_{r \text{ крит}}),$$

где K_d – коэффициент дефекта.

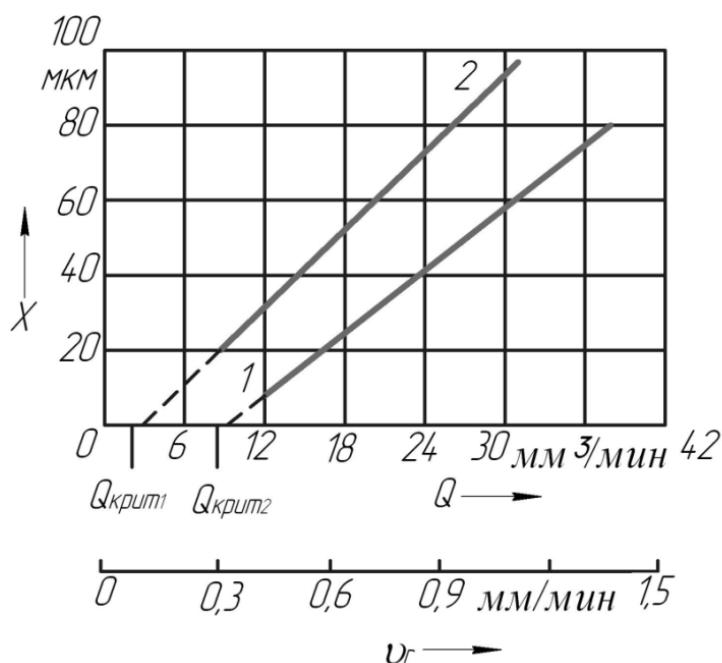


Рисунок 3.10 – Зависимость глубины (толщины) дефектного слоя (прижогов) от интенсивности удаления материала заготовки при шлифовании «острым» (1) и «затупленным» (2) кругами

Чтобы в подповерхностном слое шлифованной детали не было структурных изменений, необходимо либо шлифовать с интенсивностью съема припуска ниже критической (но в этом случае сильно снижается производительность), либо так изменять параметры режима шлифования, чтобы в любой момент времени глубина X прижога была меньше припуска Π , который еще остался, т. е. $X \leq \Pi$. Если подставить это неравенство в модель, получим

$$Q \geq Q_{\text{крит}} + \Pi / K_{\text{д}}.$$

Данное выражение можно назвать тепловым ограничением производительности процесса шлифования.

При управлении процессом шлифования необходимо, кроме теплового, учитывать и силовое ограничение производительности. На начальных этапах рабочего цикла съема припуска силовое ограничение определяется допустимой (с точки зрения получаемой на этом этапе погрешности формы или относительного расположения) упругой деформацией технологической системы (следовательно, значением радиальной силы P_y). В некоторых случаях силовое ограничение выбирается из условия сохранения режима работы круга (например, частичного самозатачивания). На последнем этапе рабочего цикла силовое ограничение может быть получено из условия обеспечения требуемого значения параметра шероховатости. Схема ограничений производительности при

шлифовании показана на рисунке 3.11, где Π_0 – исходный припуск, Π_1 и Π_2 – значения припуска, при которых пересекаются линии теплового и силовых ограничений. В общем случае эти линии в пределах Π_0 могут и не пересекаться. Тогда производительность ограничивается только тепловыми процессами в зоне шлифования.

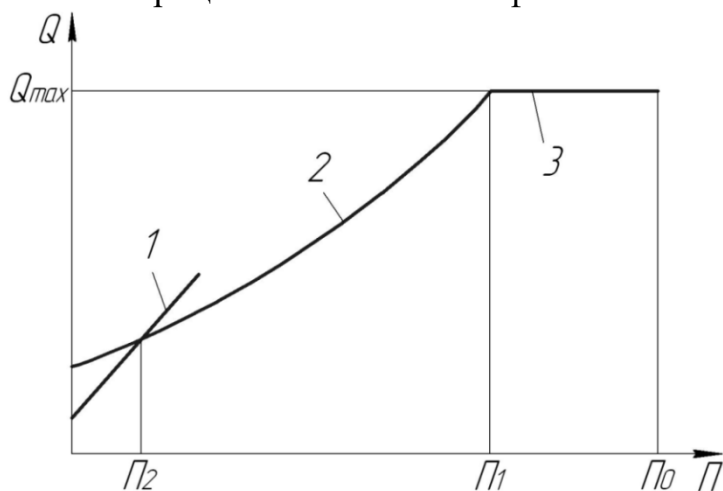


Рисунок 3.11 – Схема ограничений производительности при шлифовании:

1, 3 – силового; 2 – теплового

Часть времени шлифования, непосредственно связанную со съемом припуска, будем называть *рабочим циклом* шлифования. Он может быть разбит на ряд последовательных этапов, каждый из которых выполняет определенную функцию (предварительное шлифование, чистовое, выхаживание). *Алгоритмом управления съемом припуска* будем называть программу изменения

скорости одного или нескольких рабочих движений за время рабочего цикла в соответствии с функцией выполняемого этапа. Целью управления съемом припуска является минимизация затрат времени и(или) денег на его реализацию при обязательном обеспечении требований к качеству шлифованной поверхности и подповерхностного слоя. Программа изменения скорости рабочих движений может быть задана как функция той части припуска, которую осталось снять, или как функция времени. При определении параметров любого алгоритма съема припуска необходимо обязательно учитывать ограничения производительности.

Наиболее часто на практике применяется ступенчатый алгоритм управления съемом припуска по каналу (СтАЛП), который состоит из ряда подач, последовательно уменьшающихся от начала рабочего цикла к его концу. Согласование параметров рабочего цикла с тепловыми ограничениями для СтАЛП является сложной задачей, так как сводится к решению системы трансцендентных уравнений, и может быть выполнено только с помощью ЭВМ.

Наиболее эффективным является *границный алгоритм управления съемом припуска по каналу радиальной подачи* (ГрАЛП), в котором подача изменяется так, чтобы скорость v_r уменьшения радиуса заготовки (или глубина шлифования) в любой момент шлифования соответствовала требованиям силового и теплового ограничений. Использование ГрАЛП снижает время съема припуска на 10...80 % по сравнению со

СтАЛП, который согласован с ограничениями производительности. Причем чем выше жесткость технологической системы и коэффициент режущей способности $K_{рез}$, тем эффективнее ГраАЛП по сравнению со СтАЛП.

Для реализации ГраАЛП используется система автоматического управления на базе микроЭВМ. Схема такой системы приведена на рисунке 3.12. В процессе круглого шлифования заготовки 1 кругом 2 с помощью прибора активного контроля ДП (датчика припуска) непрерывно фиксируется изменение диаметра заготовки. Одновременно измеряется упругая деформация у одного из элементов технологической системы. Эта деформация пропорциональна радиальной силе шлифования P_y . Задающее устройство (ЗУ) формирует сигналы (уставки), пропорциональные заданным значениям параметров k , Q_{max} , $Q_{крит}$, K_d , где k – коэффициент пропорциональности между фактической производительностью и упругой деформацией; Q_{max} – максимальная, согласно силовому ограничению, производительность. Все эти сигналы, а также сигналы от ДП и Ду поступают в счетно-логическое устройство (СЛУ), которое формирует сигнал, пропорциональный требуемой ограничением подаче, и передает его в исполнительное устройство (ИСУ) для обработки.

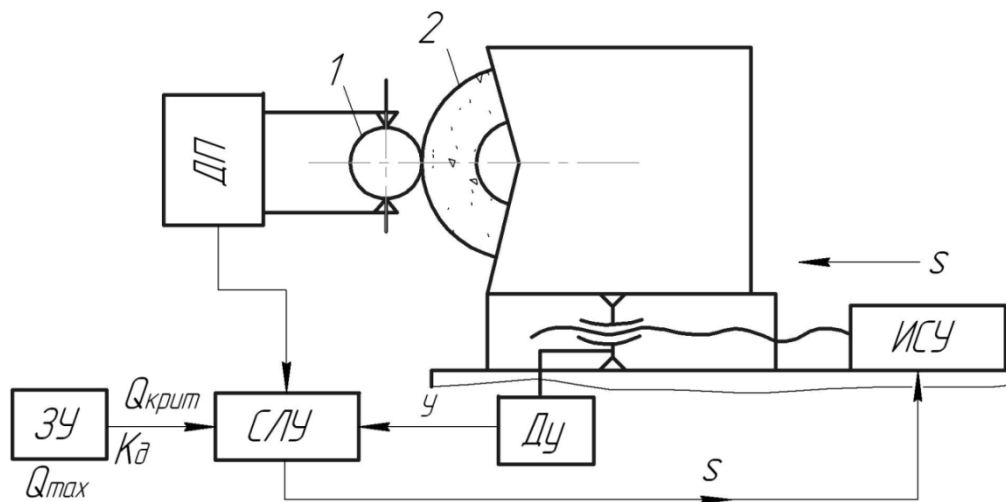
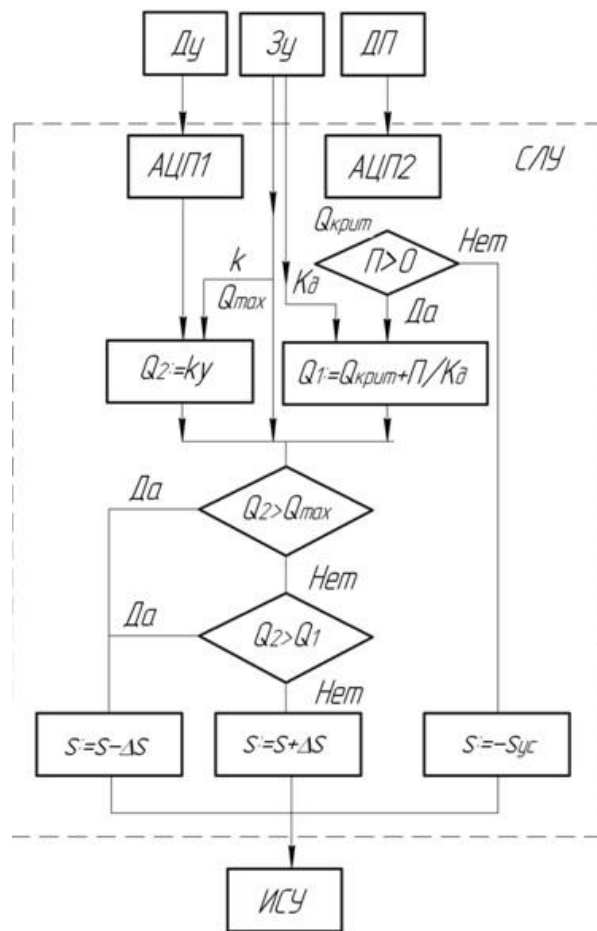


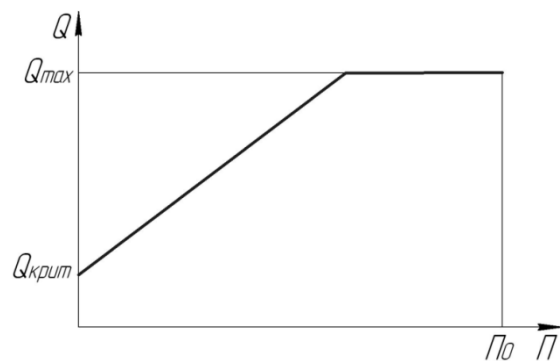
Рисунок 3.12 – Система автоматического управления циклом съема припуска при круглом врезном шлифовании

Схема алгоритма работы СЛУ показана на рисунке 3.13 а. На рисунке 3.13 б дана упрощенная схема ограничений производительности шлифования. Пока не снят весь припуск ($\Pi > 0$), сигналы от Ду и ДП через аналогово-цифровые преобразователи АЦП1 и АЦП2 передаются с определенной частотой в вычислительное устройство, которое вычисляет значения фактической (Q_2) и допустимой тепловым ограничением

(Q_1) производительности, сравнивает их между собой и с Q_{max} и, в зависимости от результатов, изменяет на дискрету Δs текущее значение подачи. Когда припуск Π становится равным нулю, включается ускоренный отвод бабки шлифовального круга (подача s_{yc}).



а



б

Рисунок 3.13 – Круглое врезное шлифование при круглом врезном шлифовании:

а – алгоритм работы СЛУ системы автоматического управления циклом съема припуска, б – ограничения

Чтобы повысить эффективность систем управления съемом припуска, необходимо создать условия шлифования, существенно повышающие параметры ограничений производительности. Главным является снижение температуры в зоне шлифования. Обычное охлаждение поливом почти не уменьшает максимальную температуру в зоне шлифования (рис. 3.14). Оно уменьшает теплосодержание шлифуемой заготовки в целом за счет быстрого охлаждения за пределами зоны шлифования. Такая низкая эффективность охлаждения поливом объясняется влиянием воздушных потоков, которые образуются быстро вращающимся пористым шлифовальным кругом. Эти потоки создают вблизи зоны шлифования область повышенного давления, и падающая струя СОЖ практически не проникает в зону резания. Чем больше скорость вращения круга v_k , тем меньше СОЖ попадает в зону шлифования. При скоростном шлифовании, когда $v_k \geq 50...70$ м/с, процесс резания протекает практически всухую.

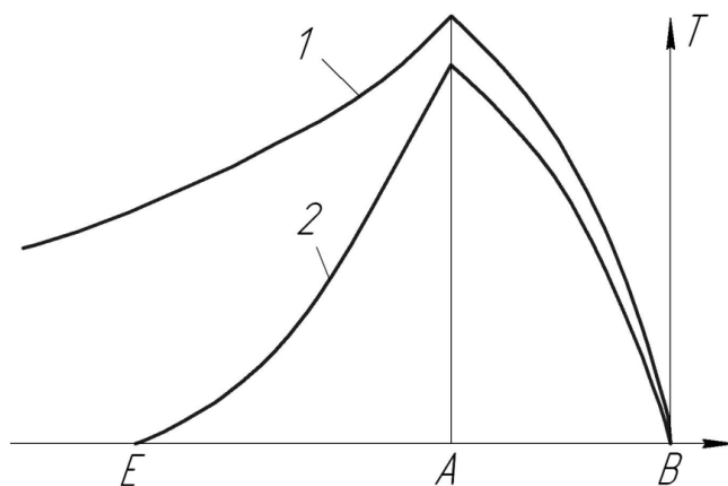


Рисунок 3.14 – Изменение температуры T в зоне шлифования (A-B) и на шлифованной поверхности (A-E) при шлифовании без охлаждения (кривая 1) и с охлаждением (кривая 2)

На рисунке 3.15 показан способ подачи СОЖ, обеспечивающий ее проникновение в зону контакта круга 4 со шлифуемой заготовкой 3. Часть СОЖ подается через сопло 2 как обычно, свободно падающей струей, а часть – в промежуток между кожухом 1 и рабочей поверхностью круга. Здесь СОЖ, разгоняясь за счет трения о круг, попадает в клиновую часть (E) устройства, где вследствие перехода кинетической энергии струи в потенциальную резко повышается давление, за счет которого СОЖ «задавливается» в подповерхностные слои круга. Из этих слоев СОЖ под действием центробежных сил попадает в зону шлифования, как это указано стрелками. Испытания показали, что данный способ подачи СОЖ по сравнению с обычным обеспечивает почти дву-

кратное снижение объемного износа круга и более чем двадцатикратное повышение съема металла за период стойкости круга. При этом прижогов не наблюдается.

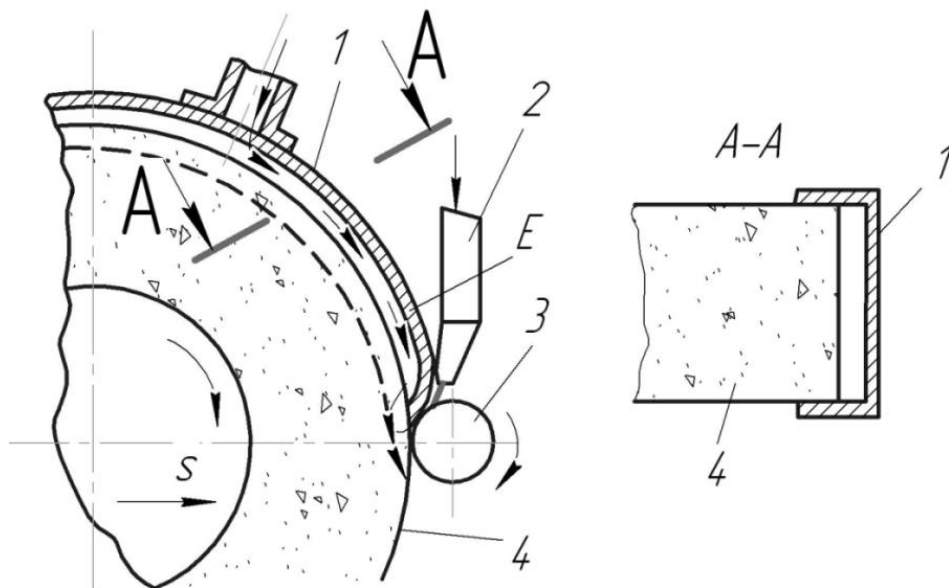


Рисунок 3.15 – Схема комбинированной подачи СОЖ при круглом шлифовании

Достаточно эффективным оказался способ подачи СОЖ, показанный на рисунке 3.16 а. В данном случае подача СОЖ свободно падающей струей из сопла 3 сочетается с вынесенной за пределы зоны шлифования (сдвиг фазы на угол β) гидроочисткой круга высоконапорной струей СОЖ из размещенного в кожухе 2 сопла 1, которое может быть неподвижным многоканальным (рис. 3.16 б) или подвижным одноканальным (рис. 3.16 в). Расход СОЖ через неподвижное многоканальное сопло увеличивается пропорционально ширине круга, что требует соответствующего повышения мощности насосной станции. Поэтому использовать такое сопло при шлифовании широкими кругами затруднительно, а иногда и невозможно. В этих случаях целесообразно применять подвижное сопло, либо движущееся возвратно-поступательно, либо качающееся, либо вращающееся. Испытания подачи СОЖ со струйно-напорной очисткой показали, что при этом: в 1,15...2,47 раза увеличивается коэффициент режущей способности шлифовального круга ($K_{реж}$); наибольший эффект увеличения $K_{реж}$ имеет место при шлифовании сталей и сплавов, склонных к адгезии с материалом абразивных зерен (эффект засаливания); наибольший эффект увеличения $K_{реж}$ имеет место при чистовом шлифовании и при использовании в качестве СОЖ смеси сульфозрезола (90 %) и дизельного топлива; существенно увеличивается период стойкости круга; повышается точность формы шлифованной поверхности в продольном и поперечном сечениях.

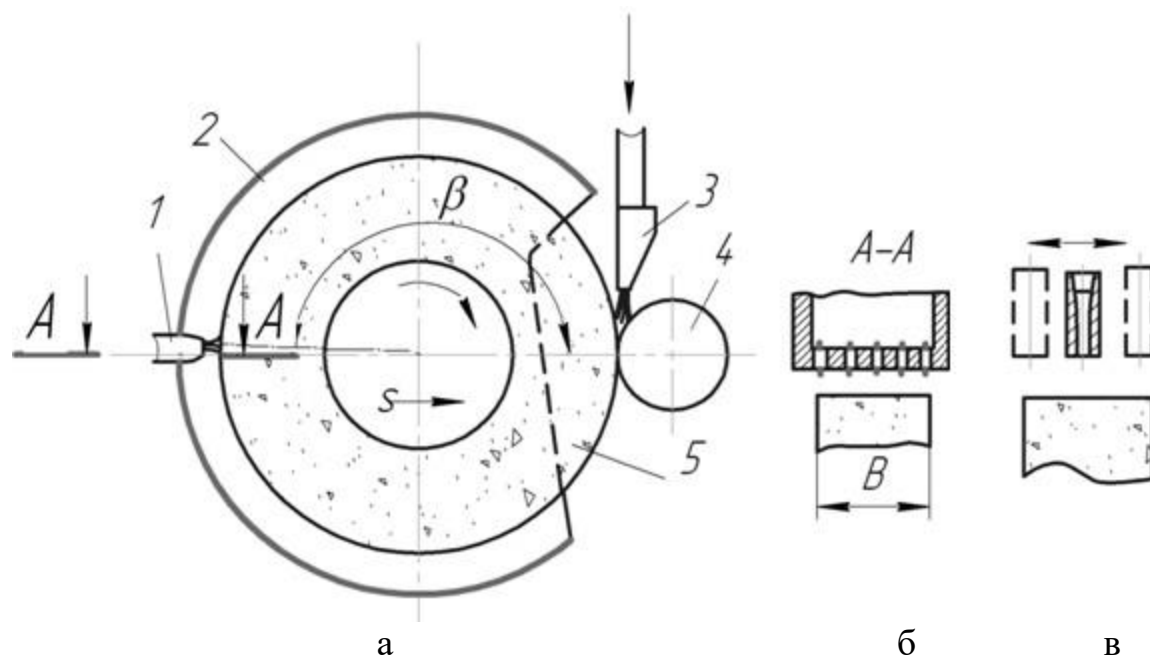


Рисунок 3.16 – Схема подачи СОЖ со струйно-напорной очисткой круга:
1,3 – сопла; 2 – кожух; 4 – заготовка; 5 – шлифовальный круг

Существенное снижение теплонапряженности процесса может быть достигнуто, если шлифование осуществлять кругом с прерывистой рабочей поверхностью (рис. 3.17). Для этого на рабочей поверхности круга предварительно формируют тем или иным способом канавки, направленные параллельно оси круга или под углом β (для уменьшения уровня вибраций). Если дно спиральной канавки расположено не на цилиндре, а на конусе, то круг, работая как диагональный вентилятор, будет под давлением прогонять СОЖ, подаваемую путем свободного полива к его торцу, в зону шлифования. Прокачка СОЖ через прорези круга обусловлена в данном случае действием кориолисовых сил инерции. Характер изменения температуры в зоне сплошного и прерывистого шлифования иллюстрируется графиками, приведенными на рисунке 3.18. Эксперименты показали, что максимальная температура $T_{пер}$ при шлифовании прерывистым кругом в два и более раз ниже, чем температура $T_{снл}$ при шлифовании сплошным кругом. Оптимальная длина выступов (l_1 на рис. 3.17), при которой достигается максимальное снижение температуры, как показали эксперименты, составляет 10...40 мм. При этом длину впадины l_2 из соображений сохранения достаточно высокой износостойкости круга следует выбирать согласно равенству $l_2 = (0,3...0,5)l_1$.

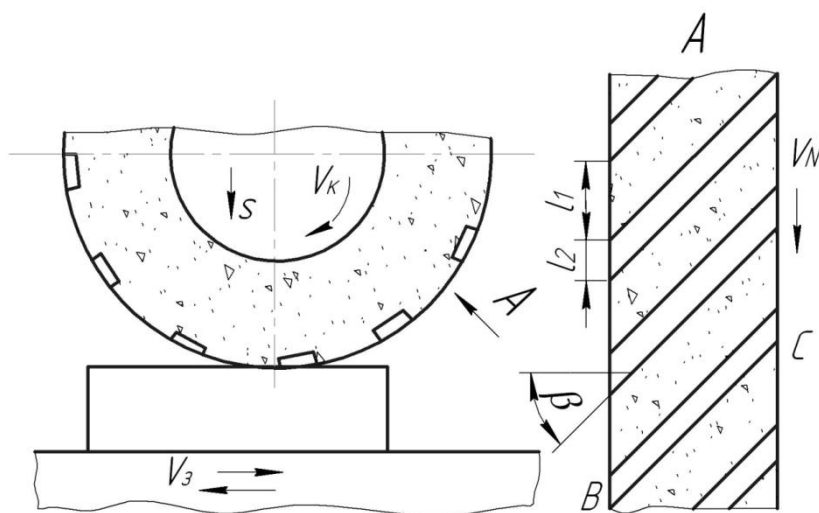


Рисунок 3.17 – Схема плоского шлифования кругом с прерывистой рабочей поверхностью

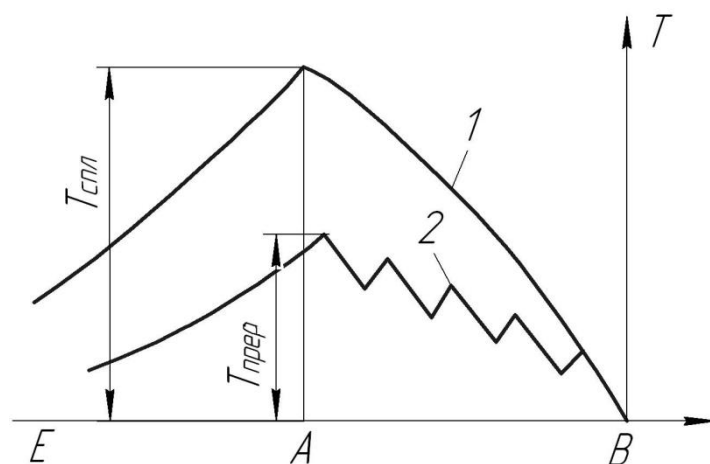


Рисунок 3.18 – Изменение температуры в зоне шлифования:
1 – при обработке сплошным кругом, 2 – прерывистым

С увеличением скорости v_3 перемещения заготовки длина выступа l_1 должна уменьшаться. Так, согласно расчетам, при изменении скорости заготовки от 10 до 15 м/мин длину выступа следует уменьшить с 34 до 23 мм. При этом уровень уменьшения температуры $T_{пер}$ сохранится.

Круги с прерывистой рабочей поверхностью сохраняют длительное время хорошую режущую способность. Так, в интервале 30-минутного шлифования заготовок из стали 12Х12Н4А сплошным кругом коэффициент режущей способности уменьшился более чем в 2 раза, а при шлифовании прерывистым кругом его значение практически не изменилось. А сразу после правки круга значения $K_{рез}$ для прерывистого круга были на 20...30 % больше, чем для сплошного.

Прерывистые круги, пазы которых заполнены твердой смазкой, а также круги, имеющие на рабочей поверхности периодически чередующиеся участки с различной твердостью, называют *композиционными*. Испытание опытной партии кругов с графитовыми вставками показало, что максимальная температура в зоне шлифования уменьшилась на 30...40 %. А при испытании кругов, имеющих по четыре режущих сектора твердостью СМ2 и ВМ2, установлено, что такая конструкция круга снижает максимальную температуру в зоне шлифования на 15...20 % по сравнению со сплошным кругом твердостью СМ2.

3.5 Влияние вибрации на процесс и результаты обработки

3.5.1 Источники вибрации при лезвийной обработке резанием и шлифовании

Вибрации, возникающие во время обработки (т. е. между инструментом и заготовкой), а также во время холостых перемещений и позиционирования, в зависимости от вызывающих эти вибрации причин можно разбить на два класса. К первому относят *вынужденные колебания*, которые вызываются и поддерживаются энергетическим источником периодического характера. Таким источником может быть процесс резания, например, при фрезеровании и протягивании, когда периодически изменяется суммарное сечение среза (а значит, и сила резания), или при точении с переменной глубиной резания, когда ось вращения и ось симметрии заготовки не совпадают. К первому классу относятся также вибрации, вызванные дисбалансом быстровращающихся элементов рассматриваемой технологической системы или передаваемые через опоры от другого технологического оборудования [2–5, 97–101].

Частота вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы, а их амплитуда зависит от динамической жесткости технологической системы. Обычно технологическая система имеет не одну, а несколько частот собственных колебаний, поэтому частотная характеристика динамической жесткости имеет не один, а несколько минимумов.

Вибрации в технологической системе могут возникнуть и при отсутствии явной (внешней) вынуждающей периодической силы. Причем, в отличие от свободных колебаний, эти вибрации могут быть незатухающими и при наличии диссипативных (рассеивающих энергию, демпфирующих) сил. Такие вибрации называют *автоколебаниями* и относят ко второму классу. При автоколебаниях источник энергии, восполняющий ее потерю, связанную с работой диссипативных сил, по своей природе не является периодическим. Переменная сила, поддерживающая колебательное движение, создается самой замкнутой движущейся си-

стемой за счет ее внутренних связей и при прекращении процесса резания (или движения) исчезает.

Можно выделить следующие виды внутренних связей в технологической системе: координатные, скоростные и инерционные. *Координатная связь* проявляется в том, что связанное с какой-либо причиной перемещение в определенном направлении вызывает также перемещение вдоль других осей. *Скоростная связь* возникает в тех случаях, когда в системе действуют силы, являющиеся функциями скорости (силы резания и трения). Она проявляется, когда их изменение по одной координате вызывает изменение сил по другой. *Инерционная (или динамическая)* возникает в технологической системе при наличии в ней нескольких упруго связанных масс и в тех случаях, когда равнодействующая сил инерции не проходит через центр жесткости системы. В таких случаях одновременно с прямолинейным смещением происходит угловое, вызванное моментом сил инерции относительно центра масс.

Возбуждение автоколебаний или потеря устойчивости процесса обработки (а также холостых движений) обуславливается следующими причинами: нелинейной зависимостью силы резания (и трения) от скорости; запаздыванием силы по сравнению с перемещением; влиянием внутренних (координатных, скоростных и инерционных) связей; вторичным возбуждением от волнистости, образующейся на поверхности резания (заготовки) или рабочей поверхности шлифовального круга. В большинстве случаев наблюдается одновременное влияние нескольких из перечисленных причин, причем одна из них обычно доминирует, т. е. оказывает наибольшее влияние.

Частота автоколебаний (как и при свободных колебаниях) определяется частотой собственных колебаний системы. Для систем с несколькими степенями свободы возможны автоколебания на разных частотах: низкочастотные, соответствующие основной (минимальной) частоте собственных колебаний, и высокочастотные, когда устойчивость теряет элемент с высокой частотой собственных колебаний. Амплитуда автоколебаний зависит от многих факторов.

На рисунке 3.19 показана зависимость амплитуды A продольных автоколебаний стола с механическим (винтовым) приводом от скорости v его движения. Экспериментами установлено, что при потере устойчивости в данной системе, не подвергающейся действию сил резания, возникают автоколебания, складывающиеся из колебаний в направлении заданного движения и в направлении, перпендикулярном к плоскости скольжения. Соотношение амплитуд колебаний по этим направлениям составляет примерно 400:1. Установлено, что при некоторой скорости, зависящей от других параметров системы, начинается уменьшение амплитуды автоколебаний и после минимума может, при дальнейшем увеличении скорости стола, появиться новый максимум амплитуды. Между этими максимумами может быть область скоростей с отсутствием авто-

колебаний, т. е. устойчивого движения. При скорости v , большей 8... 10 м/мин, движение стола становится устойчивым.

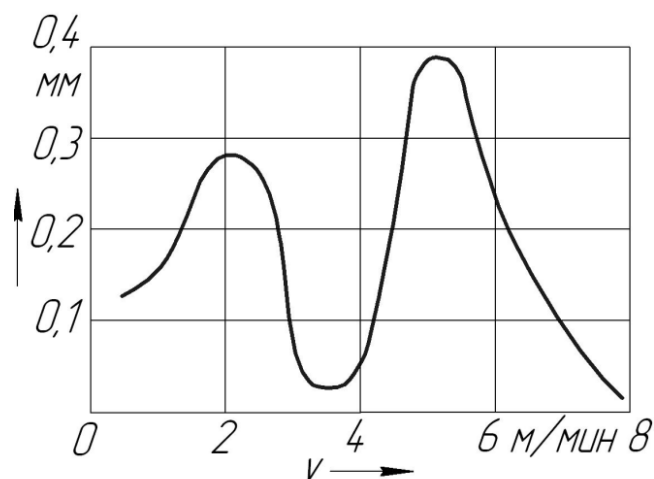


Рисунок 3.19 – Зависимость амплитуды продольных автоколебаний стола с механическим приводом от скорости его движения (без резания)

Эксперименты показали, что увеличение жесткости привода и вязкости смазочного материала уменьшает амплитуду автоколебаний. А разгрузка направляющих путем подачи смазочного материала под давлением (до 0,15 МПа) уменьшает области скоростей неустойчивого движения и амплитуду колебаний в этих областях. Замена механического привода стола гидравлическим устраняет вторую (по скорости движения) область существования автоколебаний, а первая область при этом сокращается до скоростей, меньших 0,2 м/мин. Максимальный уровень амплитуды автоколебаний стола с гидравлическим приводом оказался в 2 раза ниже, чем стола с механическим приводом.

Эксперименты показали, что при точении частота автоколебаний слабо зависит от показателей режима резания, а определяется главным образом основной частотой собственных колебаний технологической системы. Амплитуда автоколебаний при точении существенно зависит от условий обработки. Увеличение ширины среза (глубины резания) ведет к резкому увеличению амплитуды автоколебаний. Такое влияние ширины среза снижается при увеличении его толщины (подачи). При подачах, больших 0,6...0,8 мм/об, увеличение или уменьшение ширины среза практически не влияет на амплитуду автоколебаний.

Установлено, что существует скорость резания (35...50 м/мин), при которой амплитуда автоколебаний при точении достигает максимума. Ширина зоны скоростей, оказывающих существенное влияние на амплитуду автоколебаний, зависит от переднего угла резца и уменьшается с его увеличением. При этом уменьшается также максимальное значение амплитуды автоколебаний. Кроме того, установлено, что уменьшение главного угла в плане, увеличение радиуса скругления вершины резца и

уменьшение жесткости технологической системы увеличивают амплитуду автоколебаний. Уменьшение заднего угла от 16° до 3° также не оказывает влияния на интенсивность автоколебаний. Однако при уменьшении заднего угла от 3° до 2° амплитуда автоколебаний увеличивается.

Эксперименты также показали, что, кроме рассмотренных выше относительно низкочастотных автоколебаний, при растачивании возникают высокочастотные, амплитуда которых зависит от глубины и скорости резания так же, как и амплитуда низкочастотных автоколебаний. Но характер влияния переднего и заднего углов расточного резца на амплитуду высокочастотных колебаний совсем не такой, как на интенсивность низкочастотных. В данном случае наблюдается оптимальное значение этих углов, при которых амплитуда автоколебаний либо равна нулю, либо минимальна при данной скорости резания. Если затупление резца обычно снижает амплитуду низкочастотных колебаний, то с увеличением износа резца по задней грани амплитуда высокочастотных автоколебаний увеличивается.

При круглом шлифовании с продольной подачей при увеличении скорости вращения заготовки амплитуда автоколебаний увеличивается тем больше, чем меньше продольная подача и глубина шлифования. При круглом шлифовании, как показали эксперименты, частота автоколебаний зависит от их амплитуды. Так, при частоте собственных колебаний заготовки 352 Гц с увеличением амплитуды автоколебаний от 5 до 15 мкм их частота понижается с 600 до 400 Гц.

При врезном круглом шлифовании также было замечено увеличение амплитуды автоколебаний с 1 до 20 мкм, если скорость вращения заготовки увеличивается от 30 до 100 м/мин. Интенсивность автоколебаний возрастает при увеличении ширины шлифования и уменьшается при увеличении радиальной подачи.

При круглом шлифовании процесс высокочастотных автоколебаний обусловлен вторичным возбуждением, суть которого заключается в образовании волнистости на рабочей поверхности шлифовального круга благодаря его неравномерному радиальному износу. Скорость увеличения интенсивности автоколебаний в данном случае зависит от твердости круга (всегда существует оптимальная), от радиальной подачи и скорости шлифования. С увеличением радиальной подачи и уменьшением скорости шлифования растет средняя скорость радиального изнашивания, а значит, и скорость нарастания амплитуды высокочастотных автоколебаний.

Обычно в технологической системе наблюдаются оба класса источников вибраций. В зависимости от разности между частотой вынуждающей силы и частотами собственных колебаний могут существовать три вида колебательных движений. Если частота возмущающей силы близка к собственной частоте, то в системе устанавливается режим гармонической синхронизации. В этом случае частота колебаний системы равна частоте вынуждающей силы. При средней разности между указанными частотами в системе имеет место квазипериодическое движение – режим биений. В

случае большой разности указанных частот в системе имеет место автоколебательное движение.

3.5.2 Борьба с вибрацией при обработке на станках

Вибрации обычно ограничивают возможность повышения производительности обработки, точности и качества обработанных поверхностей. Они создают дополнительные динамические нагрузки, часто снижающие стойкость инструмента и долговечность станка. Автоколебания в системе подачи станка обычно снижают точность позиционирования (выход суппорта или стола на заданный размер), что особенно нежелательно при обработке на станках с ЧПУ. Вибрации при обработке резанием увеличивают шероховатость обработанной поверхности и приводят к появлению волнистости [2–5, 97–101].

При обработке цилиндрической фрезой или шлифовальным кругом часто формы кривых профиля волнистой поверхности и траектории относительного перемещения инструмента и заготовки существенно различаются (рис. 3.20). Увеличение амплитуды $2A$ относительных колебаний инструмента и заготовки в таких случаях еще не означает увеличения высоты $H_{вол}$ волны на обработанной поверхности. Причиной этого явления считается процесс «самоперерезания» волн. Процесс начинается при больших амплитудах колебаний и малых ее частотах. При постоянной частоте колебаний «самоперерезание» волн наступает при малых скоростях стола и малых амплитудах относительных колебаний инструмента и заготовки.

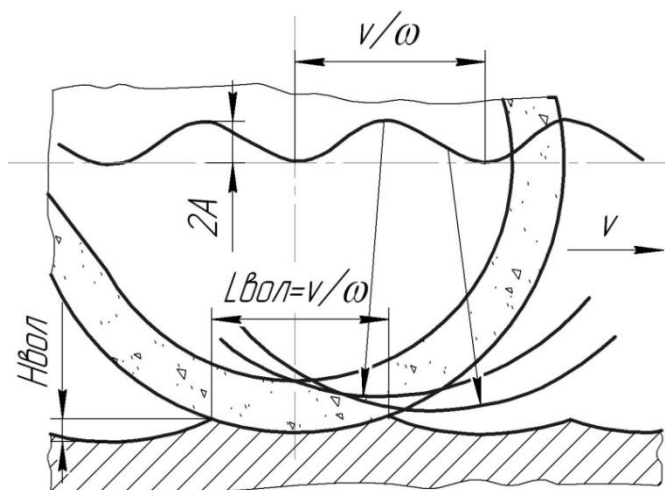


Рисунок 3.20 – Схема формирования волнистости при шлифовании:
 $L_{вол}$ – длина волны; v – скорость относительного перемещения круга;
 ω – частота вынуждающей силы

Для ослабления вынужденных колебаний станка, *передаваемых через фундамент от внешних источников*, станок необходимо удалить от них на достаточное расстояние и(или) установить на виброизолирующие устройства (резинометаллические опоры, виброизолирующие коврики и т. д.). Зависимость амплитуды колебаний фундамента $A_{\text{фун}}$ рассматриваемого станка от амплитуды колебаний $A_{\text{ис}}$ внешнего источника отражается следующей экспериментальной моделью:

$$A_{\text{фун}} = A_{\text{ис}} \exp(-0,146L),$$

где L – расстояние от внешнего источника колебаний, м.

Наиболее существенной частью любого виброзащитного устройства является упругий элемент, обладающий достаточной податливостью и способный служить механическим фильтром низких частот. Широко распространены резинометаллические виброзащитные устройства (амортизаторы) различной конструкции, в которых резиновый упругий элемент привулканизирован к металлическим деталям крепления. Недостатком резиновых упругих элементов является их «старение» под действием температуры окружающей среды, влажности и кислорода воздуха. В настоящее время получили распространение демпфированные амортизаторы, снабженные специальными устройствами для рассеяния энергии колебаний – демпферами (воздушными, гидравлическими или сухого трения).

Для снижения вибраций, *вызванных работой собственных механизмов и приводов станка*, необходима тщательная балансировка быстро вращающихся валов, шпинделей и двигателей. Хорошие результаты дает установка двигателей на виброизолирующие резиновые прокладки (амплитуда вибраций от таких двигателей уменьшается в 2...3 раза). Особенно важной является балансировка шлифовальных кругов, так как они в состоянии поставки имеют существенный дисбаланс, фаза и значение которого изменяются в процессе эксплуатации. Поэтому на прецизионных шлифовальных станках балансировка шлифовальных кругов производится не только после сборки с фланцами перед установкой на станок, но и периодически в процессе эксплуатации. Для такой балансировки разработано множество балансирующих устройств.

Одним из методов борьбы с автоколебаниями является *выбор таких условий работы* станка, при которых процесс позиционирования его узлов и процесс резания устойчивы. На рисунке 3.21 показана зависимость области устойчивости движения стола станка, не нагруженного силами резания, от скорости v движения, жесткости y привода и нагрузки на направляющие (массы стола). Из графиков на этом рисунке видно, что увеличение жесткости привода уменьшает область скоростей скольжения, где движение неустойчиво. Увеличение нагрузки на

направляющие (увеличение массы стола) для устойчивого движения требует повышения жесткости привода.

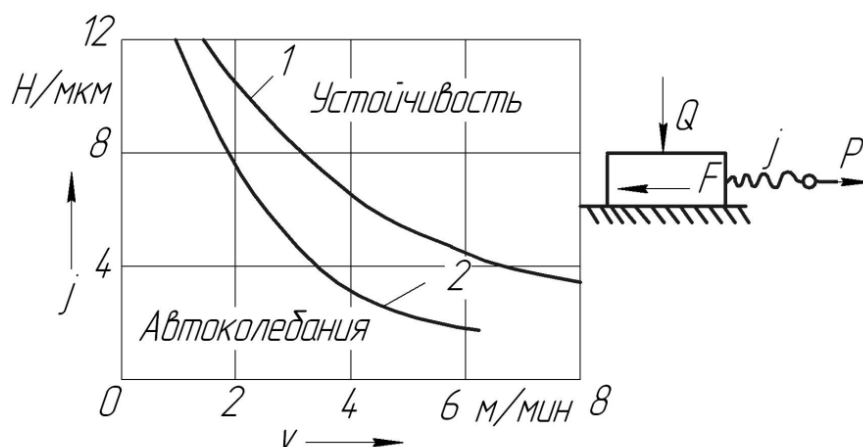


Рисунок 3.21 – Область устойчивости движения стола в параметрах скорости v жесткость j привода:
1 – масса стола 860 кг, 2 – масса 620 кг

Для повышения плавности перемещения элементов станков рекомендуется: исключать скорости скольжения и контактные давления, при которых возникает «схватывание»; уменьшать коэффициент трения за счет использования соответствующих материалов пары трения и смазывания; устранять непосредственный контакт трущихся поверхностей при движении и в относительном покое путем использования аэро- и гидравлических устройств в направляющих; повышать жесткость привода стола без уменьшения демпфирующей способности; совмещать векторы равнодействующих сил трения и упругих сил привода. Большая часть приведенных рекомендаций может быть использована при модернизации существующих или проектировании специальных станков, а также сложных приспособлений.

На рисунках 3.22–3.25 дано расположение областей устойчивости в зависимости от параметров и условий точения и фрезерования. Графики зависимости ширины b и толщины c среза на рисунке 3.22 а показывают, что при точении на токарном станке выйти из области автоколебаний можно либо за счет уменьшения ширины b , либо за счет увеличения толщины среза c . Увеличение частот ω_{01} , ω_{02} , ω_{03} собственных колебаний системы закрепления заготовки (за счет увеличения жесткости или уменьшения массы) расширяет область устойчивости процесса точения. Согласно графикам зависимости b от скорости v на рисунке 3.22 б, выход из зоны автоколебаний возможен как при увеличении, так и при уменьшении скорости резания, а также при уменьшении ширины среза. Увеличение частот собственных колебаний системы крепления

заготовки и в данных экспериментах в основном расширяет зону устойчивого течения.

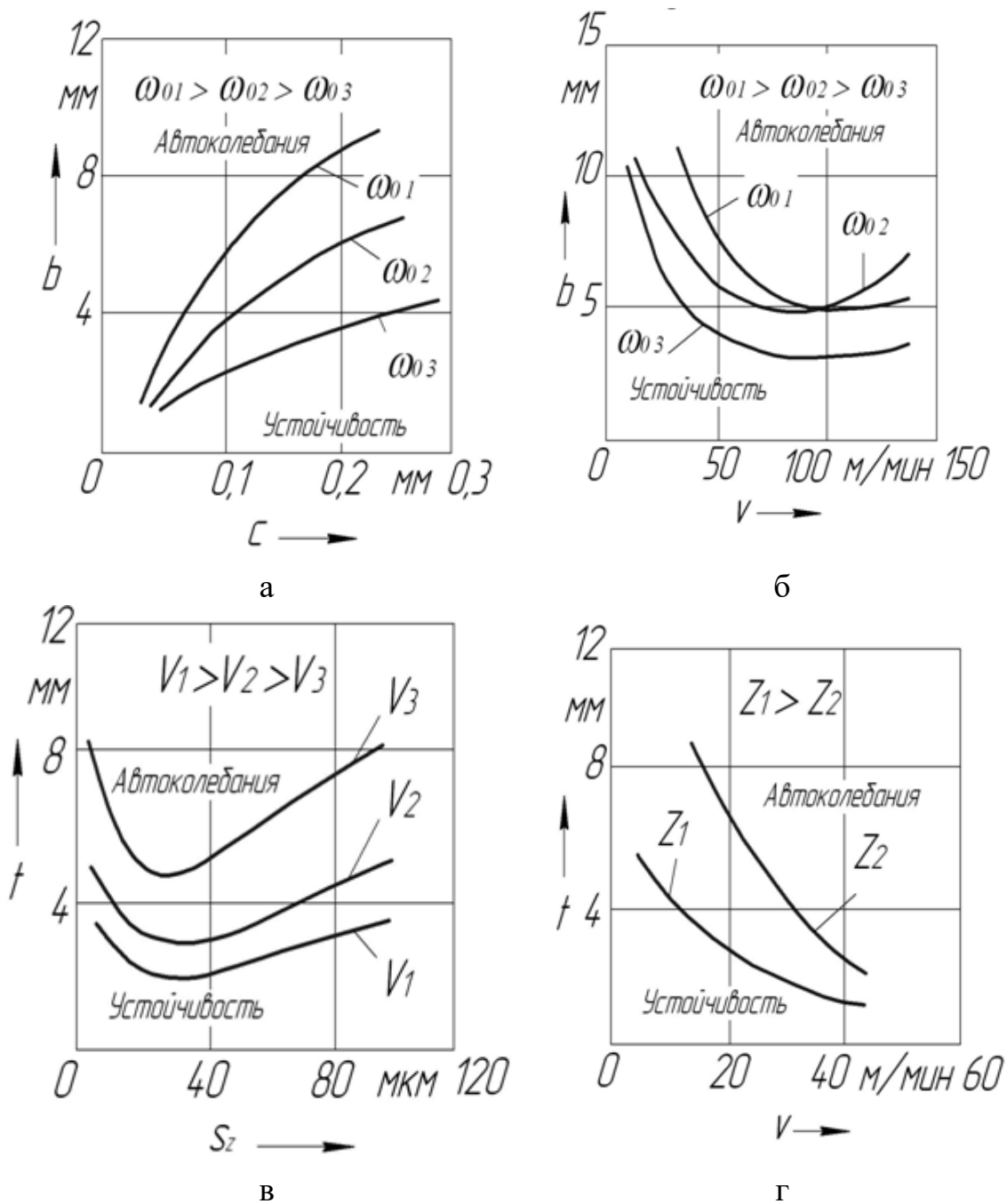


Рисунок 3.22 – Области устойчивости процесса резания при тчении и фрезеровании

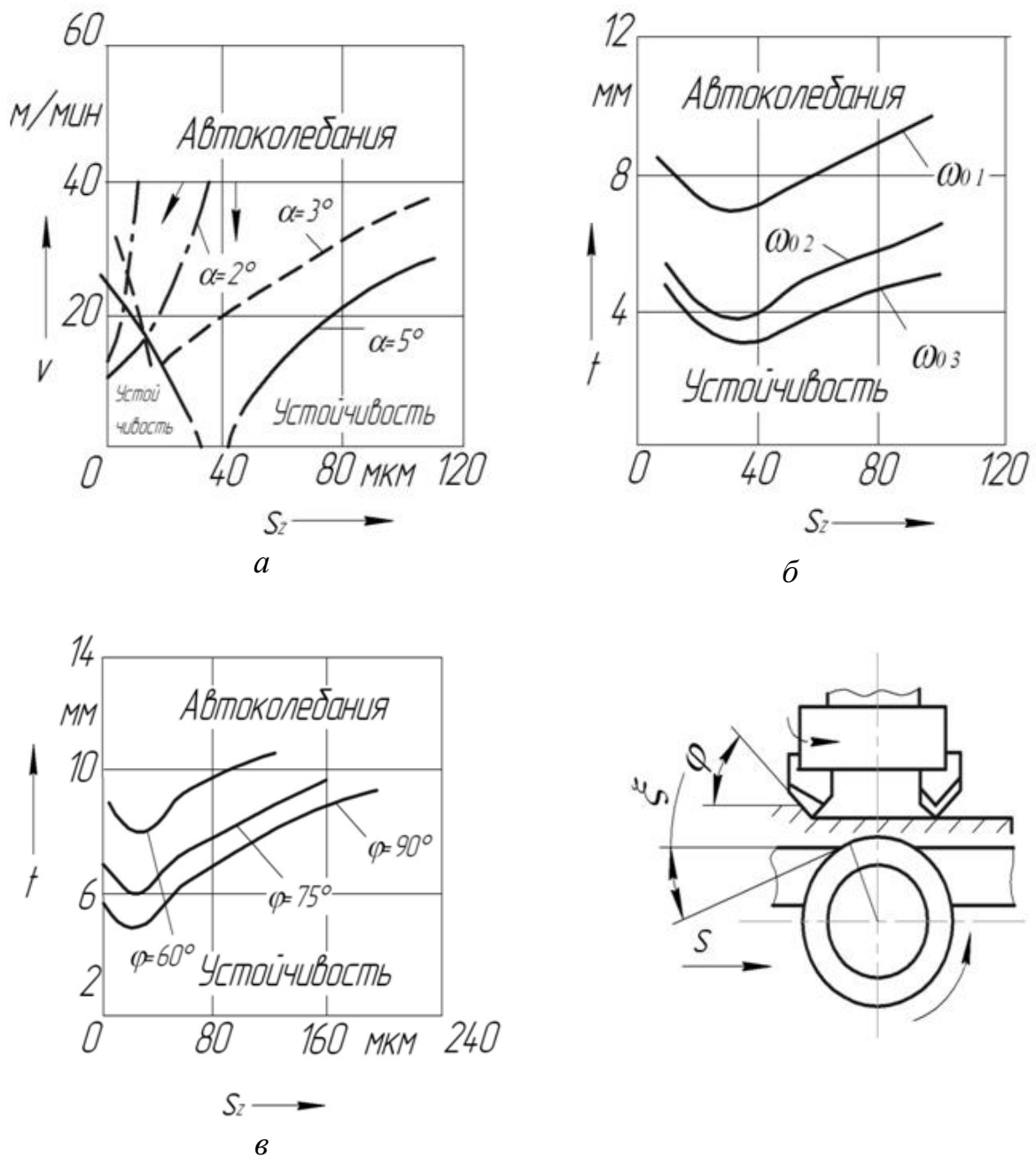


Рисунок 3.23 – Области устойчивости процесса резания при фрезеровании

Графики зависимости глубины t резания от подачи s_z , приведенные на рисунке 3.22 в, показывают, что увеличение скорости резания v (с 14 до 35 м/мин) понижает границу устойчивости процесса фрезерования быстрорежущей торцевой фрезой. Выход из зоны автоколебаний возможен либо при увеличении, либо при уменьшении подачи на зуб S_z , а также при уменьшении глубины t фрезерования. Снижение границы устойчивости при повышении скорости v резания видно также на рисунке 3.22 г. Существенно понижаются границы устойчивого фрезерования при увеличении числа зубьев фрезы z (соответственно числа

зубьев, одновременно находящихся в зоне резания). Уменьшение заднего угла α значительно сужает область автоколебаний при фрезеровании (рис. 3.23 а). А уменьшение частоты ω_0 собственных колебаний системы «шпиндель – фреза», которая изменялась путем крепления к фрезе дополнительного маховика, понижает границу устойчивого фрезерования (рис. 3.23 б). Аналогичное явление имеет место при уменьшении жесткости крепления фрезы к шпинделю.

Эксперименты показали, что устойчивость процесса резания зависит от ориентации силы резания относительно осей эллипса жесткости технологической системы. Ориентация силы резания изменялась за счет изменения угла в плане φ и угла входа ξ (рис. 3.23 в). Уменьшение угла φ повышает границу устойчивости. При опытах с углом в плане 45° и 30° автоколебания не возникали во всем диапазоне применявшихся значений глубины t фрезерования и подачи S_z . При фрезеровании с продольной подачей увеличение угла врезания увеличивает граничную глубину резания, а при фрезеровании с поперечной подачей – наоборот, уменьшает.

Опыты, проведенные на токарном станке со специальным резцедержателем, который позволял изменять угловое положение резца, показали, что предельная ширина среза точения существенно зависит от направления силы резания (рис. 3.24 а). Как можно видеть, автоколебания возникают при минимальной ширине b среза, когда резец находится в положении, обозначенном -20° и 160° , и при максимальной ширине среза, когда резец находится в положении, обозначенном 70° . Эти опыты показали, что нормальное положение резца почти совпадает с наименее благоприятной его ориентацией и что изменением ориентации можно было бы повысить предельную глубину резания t почти в 2 раза.

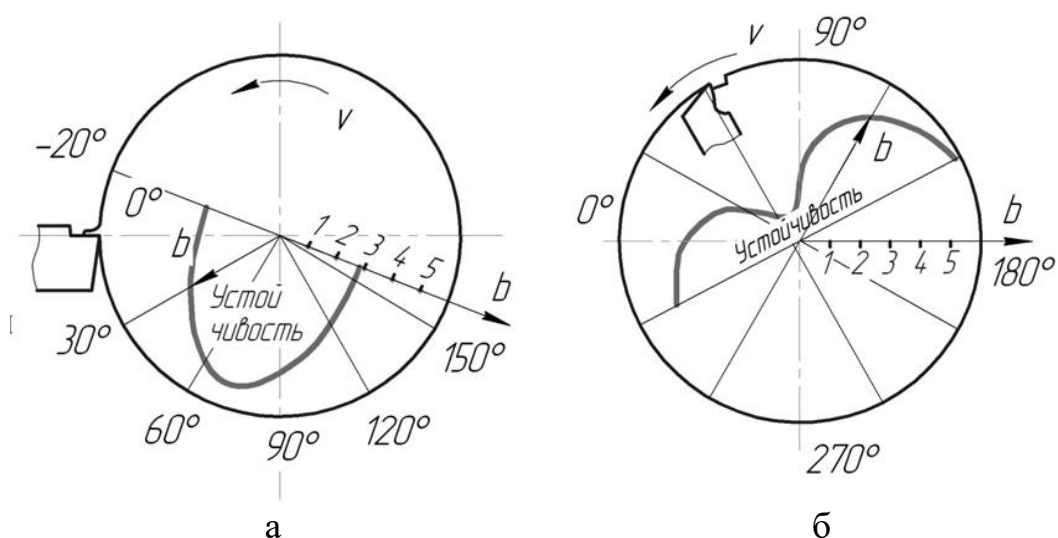


Рисунок 3.24 – Зависимость устойчивости процесса резания на токарном станке от ориентации силы резания:
а – обтачивание, б – растачивание

Зависимость устойчивости (максимальной ширины среза) от ориентации резца при растачивании отверстий на токарном станке показана на рисунке 3.24 б. Резец закреплялся в цилиндрической борштанге диаметром 55 мм и длиной 350 мм. Минимальная предельная ширина среза соответствует положению резца при смещении на угол 60° от горизонтального положения. При этом в вертикальном направлении жесткость системы минимальна, а в горизонтальном – максимальна. Значения граничной ширины b среза с наилучшей и наихудшей ориентацией находятся между собой в отношении 7:1. При увеличении диаметра борштанги до 80 мм положение и форма границ устойчивости существенно изменяются (рис. 3.25 а). На рисунке 3.25 б показаны результаты экспериментов, когда резец крепился в борштанге некруглого сечения. На ней вблизи места крепления были профрезерованы две лыски, так что ее жесткость зависела от направления прикладываемой силы. Резец все время сохранял горизонтальное, показанное на рисунке, положение. А борштанга занимала различные угловые положения, так что направление минимальной жесткости служит вектором, до которого отсчитывается угол поворота. Эксперименты показали, что можно подобрать четыре угловых положения борштанги, при которых предельная ширина b среза максимальна.

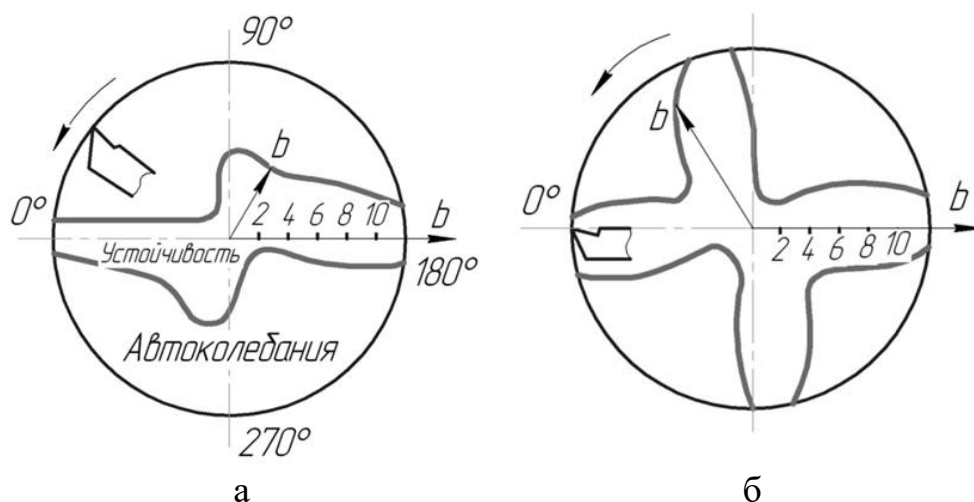


Рисунок 3.25 – Зависимость устойчивости процесса растачивания от ориентации силы резания и оси эллипса жесткости оправки

Значительно повысить виброустойчивость процесса точения можно, сместив точку приложения силы резания относительно нейтральной оси изгиба державки (рис. 3.26 а) или изменив направление главных осей эллипса жесткости резца (рис. 3.26 б). Эта цель может быть также достигнута с помощью заточки виброгасящей фаски на главной режущей кромке (рис. 3.26 в). Угол фаски $\gamma_{\text{фас}}$ рекомендуется принимать в пределах $-85^\circ \dots -80^\circ$, а ширина фаски f равняется $0,1 \dots 0,3$ мм при точе-

нии и 0,07...0,15 мм при растачивании. Вместо виброгасящей фаски можно выполнить скругление главной режущей кромки, которое, требует больших затрат времени.

Для гашения колебаний при обработке на станках часто используют дополнительные устройства, либо увеличивающие демпфирование, либо создающие силы, равные и противоположные по направлению возмущающей силе. Эти устройства называют обычно виброгасителями.

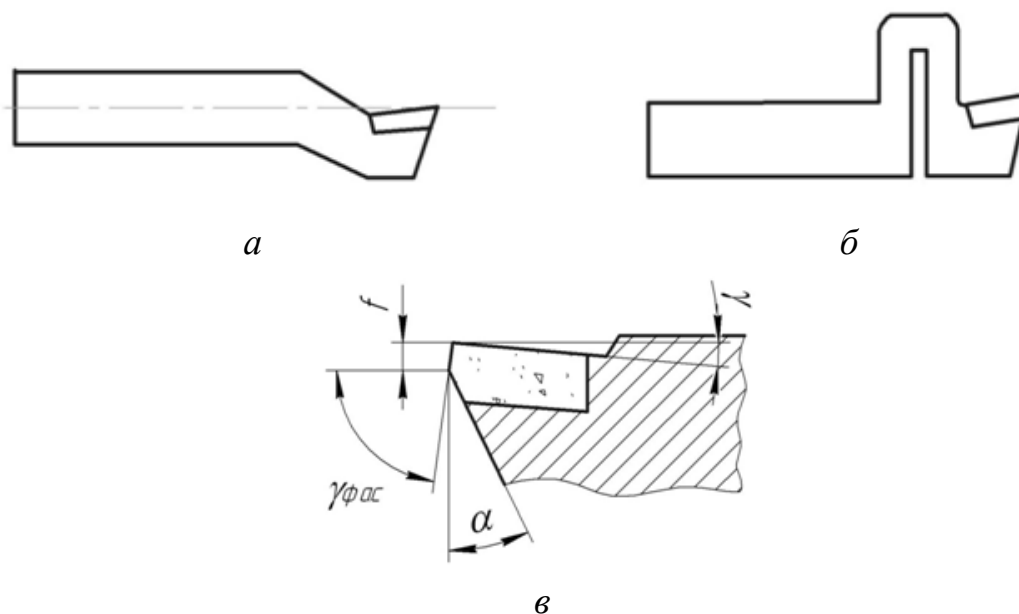


Рисунок 3.26 – Пример конструкций резцов и заточки, повышающих устойчивость резания

Динамический гаситель колебаний представляет собой массу, присоединенную к основной механической системе с помощью упругого элемента и элемента трения. Наиболее эффективно он гасит колебания в области резонанса. Уменьшив частоту собственных колебаний динамического виброгасителя, можно добиться некоторого снижения интенсивности вибраций в дорезонансной области (особенно в области очень низких частот). Если частота собственных колебаний динамического виброгасителя больше, чем частота собственных колебаний основной системы, то существенно уменьшается эффективность гашения вибраций в зоне резонанса, но зато появляется дополнительная область гашения вибраций в зарезонансной области.

Значительное влияние на эффективность гашения колебаний в области, близкой к резонансу, оказывает логарифмический декремент колебаний основной механической системы.

Схемы конструкций динамического виброгасителя для консольных борштанг, которые используются для растачивания на алмазно-

расточных станках, показаны на рисунке 3.27. На конце борштанги 4 выполнена расточка, в которую помещают дополнительный груз 3 (цилиндр) с двумя резиновыми кольцами 2. Отверстие в борштанге закрывается крышкой 1. Резиновые кольца осуществляют упруго-вязкую связь дополнительного груза и борштанги (рис. 3.27 а). Рекомендуется принимать массу груза 3 равной 0,125 приведенной массы борштанги, а его длина должна быть больше двух диаметров борштанги. Рекомендуемая ширина резиновых поясков 0,125...0,17 длины груза 3.

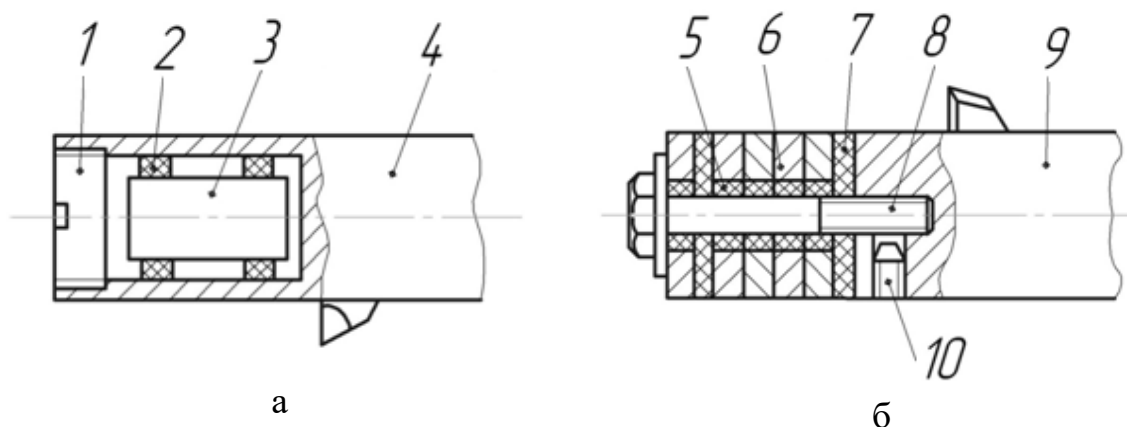


Рисунок 3.27 – Динамические гасители колебаний для расточных борштанг

На рисунке 3.27 б показана схема конструкции многомассового динамического виброгасителя. Набор грузов 6 прижимается к торцу борштанги 9 винтом 8 через резиновую прокладку 7. В радиальном направлении грузы 6 центрируются резиновыми кольцами 5. После регулировки силы сжатия грузов 6 винт 8 стопорится винтом 10. Сила сжатия грузов зависит от диаметра борштанги и изменяется в пределах 10...40 Н. Эксперименты показали, что применение динамических виброгасителей при алмазном растачивании снижает волнистость (на 20...30 %) и шероховатость (в 2...3 раза).

Более простыми и надежными в работе являются ударные гасители колебаний (рис. 3.28). В них энергия колебаний рассеивается при ударе неабсолютно упругих тел. При гармонических колебаниях с амплитудой A и частотой ω рассеяние энергии будет максимальным, если в момент удара скорости груза и основной системы будут равны и противоположно направлены. Это условие может быть выполнено при определенном соотношении зазора δ и амплитуды колебаний A . Другими словами, время перемещения груза в пределах зазора от одной стенки до другой должно быть равно половине периода колебаний основной системы, откуда $2\delta = \pi A$.

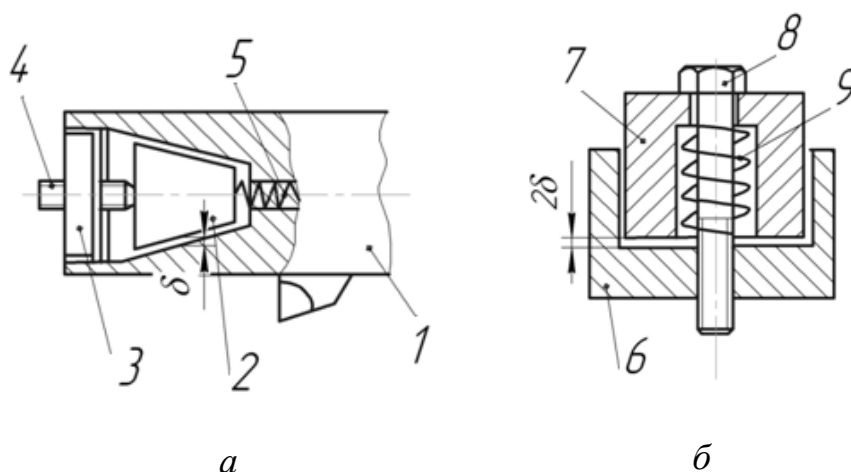


Рисунок 3.28 – Ударные гасители колебаний

В конструкциях, показанных на рисунке 3.28, предусмотрена возможность регулирования зазора δ . Ударный гаситель колебаний расточных борштанг 1 (рис. 3.28 а) представляет собой конический груз 2, помещенный в коническую выточку в передней части борштанги, закрытую крышкой 3. Для регулирования зазора груз 2 фиксируется в определенном осевом положении с помощью винта 4 и пружины 5.

В конструкции виброгасителя, который можно прикреплять к резцу или хоботу фрезерного станка (рис. 3.28 б), зазор между грузом 7 и корпусом 6 регулируется винтом 8 и пружинной 9. Чтобы обеспечить эффективное гашение вибраций, масса груза $m_{\text{груз}}$ должна равняться 0,33 приведенной массы основной системы. Указанная конструкция ударного гасителя колебаний может быть использована в устройствах контактного действия. Так, например, ударный виброгаситель 2 (рис. 3.29 а) можно встроить в рычаг 3 люнета так, что он будет соприкасаться с обрабатываемой заготовкой 1 через ролик под действием сил тяжести. Аналогично действует устройство, показанное на рисунке 3.29 б. В данном случае ударный гаситель 2 крепится к рычагу 3, который может свободно поворачиваться вокруг оси 5, присоединенной к резцедержателю 6. Под действием сил тяжести рычаг через ролик 4 прижимается к обрабатываемой заготовке 1. Ось этого ролика можно смещать вдоль рычага 3 так, чтобы линия, проходящая через эту ось и ось заготовки, была параллельна равнодействующей компонент сил резания P_y и P_z . При этом эффективность виброгасителя максимальна.

Рассмотренные конструкции виброгасителей не позволяют автоматически управлять процессом гашения колебаний при изменении условий обработки с целью поддержания максимальной эффективности. Поэтому разработаны и разрабатываются электронные устройства, управляющие вибраторами, которые создают силу, равную по модулю и противоположную по фазе возмущающей силе.

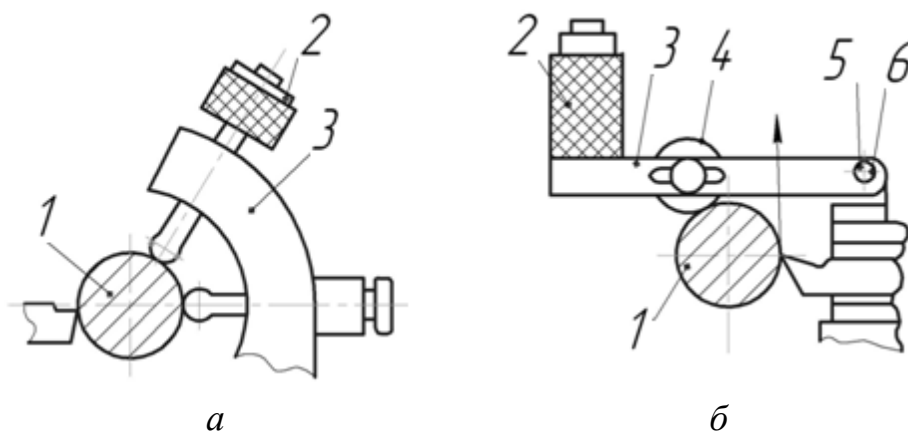


Рисунок 3.29 – Контактно-ударные виброгасители

Волнистость шлифованной поверхности может быть снижена, если созданы условия для «самоперерезания» волн. Для этого на этапе выхаживания рекомендуется снижать или повышать частоту вращения заготовки. Эксперименты показали, что таким способом можно снизить волнистость на 30...50 %. Если в процессе шлифования периодически изменять (в пределах 12...30 %) скорость вращения шлифовального круга, то, как показали эксперименты, можно в 2,5...2,8 раза уменьшать высоту волн на рабочей поверхности круга по сравнению с высотой волн при шлифовании с постоянной частотой вращения круга. На поверхности шлифованной детали высота волн уменьшается примерно в 10 раз, а параметр R_a – в 2,5...3 раза.

Для уменьшения эффекта вторичного возбуждения автоколебаний, кроме периодического изменения скорости резания, можно применять такие инструменты, как *фрезы, протяжки и развертки с неравномерным шагом*. Подбором неравномерности шага фрез можно влиять и на резонансные вынужденные колебания, возбуждаемые переменностью толщины срезаемой стружки. Для борьбы с этими колебаниями неравномерность шага устанавливается из условия

$$\frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\text{cp}}} = \frac{nz}{60\omega},$$

где t_{\max} , t_{\min} , t_{cp} – максимальный, минимальный и средний шаги фрезы; n – частота ее вращения; z – число ее зубьев; ω – частота колебаний, которые следует подавить.

Фрезы с различной неравномерностью шага работают эффективно каждая при своей скорости резания. Например, эксперименты показали, что фреза с перепадом соседних шагов, равным 1 мм, хорошо работает при скорости резания 56 м/мин, а при скорости резания 112 м/мин не дает никакого эффекта по сравнению с нормальным инструментом. Ес-

ли фреза имеет перепад соседних шагов 1,5 мм, то она существенно снижает уровень вибраций при скорости 112 м/мин, а при скорости 56 м/мин не отличается от нормальной. Аналогичные явления наблюдаются при протягивании. Поэтому эффект от инструментов с переменным шагом зубьев нельзя считать достаточно универсальным, так как трудно подобрать неравномерность шага, одинаково приемлемую для относительно широкого диапазона режимов резания.

3.5.3 Использование вибрации при обработке на станках

Низкочастотные и ультразвуковые механические колебания используются в комбинации с различными способами обработки для дробления стружки, повышения стойкости инструмента, уменьшения сил резания, повышения точности формы и качества обработанной поверхности, создания регулярного микрорельефа на обработанной поверхности. При этом используются три источника вибраций: специальное устройство; автоколебания технологической системы; специфическая форма рабочей части инструмента. Устройства для поддержания «технологических» колебаний (осцилляторы) можно разделить на ряд функциональных элементов: первичный двигатель, преобразователи энергии, генератор колебаний, серводвигатель, исполнительное звено и т. д. [2–5, 97–101].

В зависимости от вида и конструктивных особенностей функциональных элементов можно систематизировать осцилляторы по следующим признакам: вид энергии, используемой в генераторе колебаний и серводвигателе; наличие резонанса в колебаниях исполнительного звена; принцип работы генератора колебаний (кинематическое или силовое возбуждение колебаний). Направление колебаний может быть параллельно вектору скорости главного движения или подачи, т. е. лежать в плоскости, касательной к обработанной поверхности (характерно для низкочастотных колебаний), а также быть перпендикулярным к этой поверхности (характерно для ультразвуковых колебаний). Возможны и комбинации указанных направлений.

Устойчивое стружкодробление при точении с воздействием осевых (вдоль оси заготовки) колебаний имеет место, если амплитуда колебаний будет не меньше определенного значения, зависящего от условий обработки и материала заготовки (рисунки 3.30 и 3.31, где кривая 1 – для стали 45, а 2 – для стали 18ХГТ). С увеличением подачи s и глубины резания t требуемое минимальное значение амплитуды осевых колебаний реза (A_{\min}) увеличивается. А при увеличении угла в плане ϕ оно уменьшается. Наибольшее влияние на требуемое значение A_{\min} оказывают подача и вязкость материала заготовки.

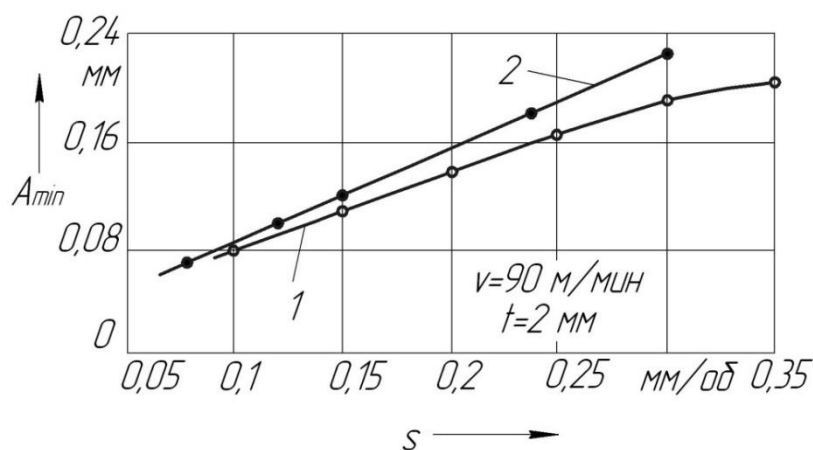


Рисунок 3.30 – Зависимость минимальной амплитуды колебаний, обеспечивающей стружкодробление, от подачи при точении

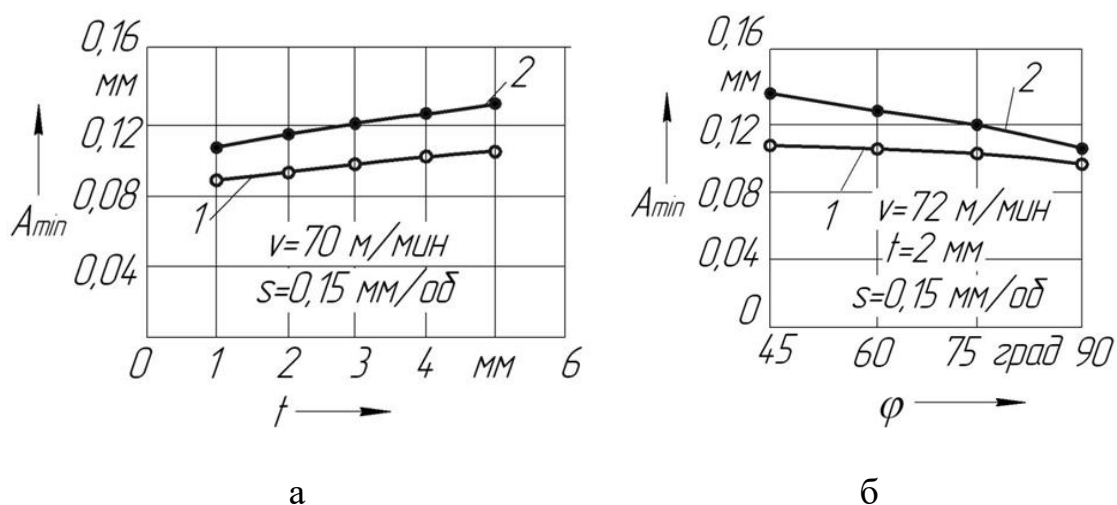


Рисунок 3.31 – Зависимость минимальной амплитуды колебаний, обеспечивающей стружкодробление, от параметров режима точения и резца

Экспериментально установлено, что стружка при точении с воздействием осевых вибраций надежно дробится при всех частотах, отличающихся от частоты вращения заготовки n на 5...10 % и более. Рекомендуется при выборе частоты f колебаний выдерживать отношение f/n близким к одному из чисел следующего ряда: 1,5; 2,5; 3,5; 4,5;... так, чтобы длина элемента стружки (без учета усадки) была 60...100 мм. Выполнение данной рекомендации снижает шероховатость обработанной поверхности. В большинстве случаев надежное стружкодробление обеспечивается только при точении с воздействием вибраций в режиме прерывистого резания (релаксационные колебания).

Экспериментально доказано, что точение с наложением низкочастотных колебаний не только обеспечивает дробление стружки, но и на 40...50 % увеличивает стойкость резцов. Поскольку при этом увеличивается шероховатость обработанной поверхности, такой способ точения

можно рекомендовать только для предварительной обработки. Кроме того, установлено, что в некоторых случаях осциллирующее точение значительно (в 2...3 раза) повышает параметр устойчивости технологической системы токарного станка (предельная ширина стружки b) к возникновению автоколебаний. При этом низкочастотные осевые колебания подачи создавались системой ЧПУ.

Применение кинематического дробления стружки при точении требует обычно серьезной модернизации станка. Этого недостатка лишен автоколебательный суппорт, схема которого показана на рисунке 3.32. Он состоит из державки 1 резца, которая может совершать качательное движение вокруг оси 5. Жесткость этой системы определяется активной длиной L_a пластинчатой пружины 4, которая регулируется подвижным упором 3 с помощью винта 2. В случае необходимости к державке прикрепляется дополнительный груз (на схеме не показан). Данная конструкция позволяет регулировать амплитуду и частоту колебаний, вибрации прекращаются, когда износ резца по задней грани достигает 0,35...0,5 мм. Эксперименты показали, что в широком диапазоне скоростей резания (50...180 м/мин), подач (0,1...0,42 мм/об) и глубин резания (0,5...2,5 мм) энергии автоколебаний было вполне достаточно для дробления стружки.

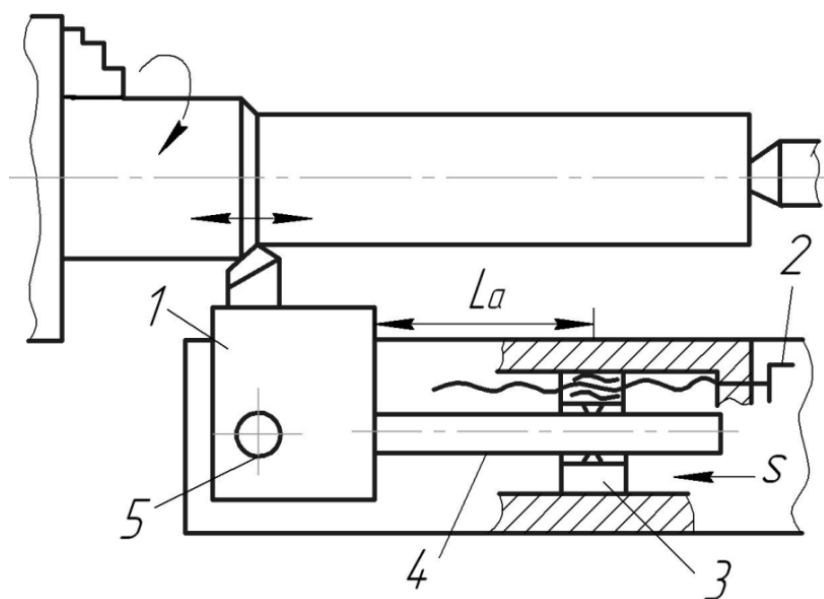


Рисунок 3.32 – Схема автоколебательного вибросуппорта

Обработываемость при точении высоколегированных нержавеющей и жаропрочных сталей, а также титановых сплавов существенно

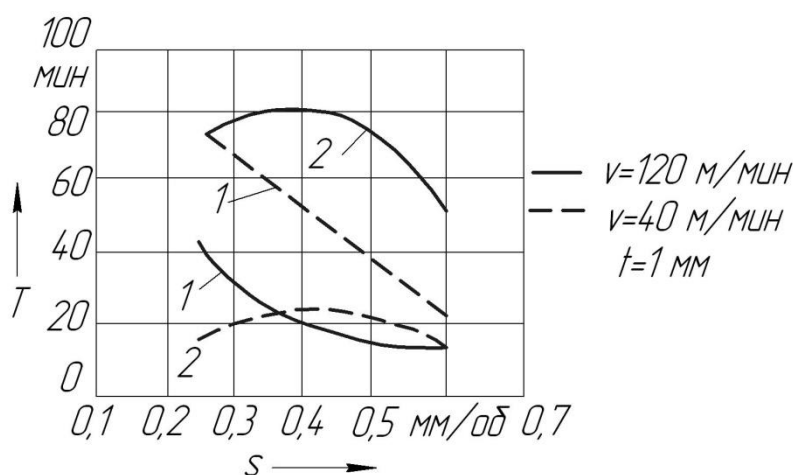


Рисунок 3.33 – Зависимость стойкости резца от параметров режима точения

повышается при использовании высокочастотных тангенциальных вибраций (параллельных скорости резания). Некоторые результаты испытания данного метода показаны на рисунке 3.33: графики 1 относятся к точению стали 12Х18Н10Т без вибраций, а 2 – к точению с вибрациями, амплитуда которых $A = 0,2$ мм, а частота $f = 175$ Гц. Графики показывают, что при скорости резания 40 м/мин стойкость T резцов при обычном точении выше, чем при точении с тангенциальными вибрациями. А при скорости 120 м/мин в зависимости от подачи S стойкость резца при точении с вибрациями повышается в 2...4 раза. Средняя скорость резания (80 м/мин) при точении является некоторой критической величиной, определяющей переход из области отрицательного влияния вибраций в область положительного влияния. Увеличение амплитуды вибраций снижает выигрыш в стойкости в 1,5...2 раза.

Графики показывают, что при скорости резания 40 м/мин стойкость T резцов при обычном точении выше, чем при точении с тангенциальными вибрациями. А при скорости 120 м/мин в зависимости от подачи S стойкость резца при точении с вибрациями повышается в 2...4 раза. Средняя скорость резания (80 м/мин) при точении является некоторой критической величиной, определяющей переход из области отрицательного влияния вибраций в область положительного влияния. Увеличение амплитуды вибраций снижает выигрыш в стойкости в 1,5...2 раза.

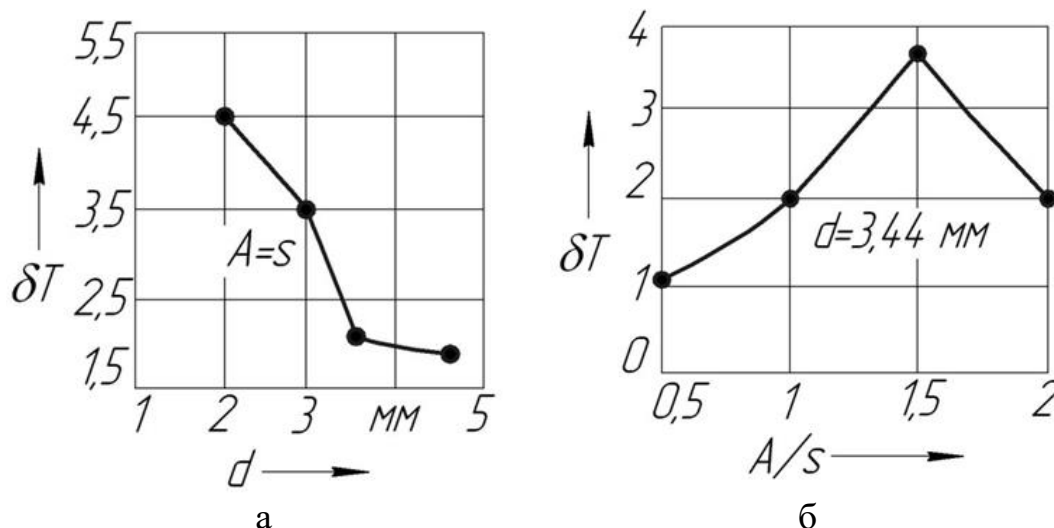


Рисунок 3.34 – Зависимость относительной стойкости сверл: а – от диаметра d отверстий, б – от отношения амплитуды A к подаче

Значительное улучшение обрабатываемости при сверлении прежде всего за счет облегчения процесса удаления стружки и повышения эффективности действия СОЖ достигается путем задания принудительных вибраций инструменту или заготовке в осевом направлении. При обработке отверстий относительно малого (1...4 мм) диаметра наложение осевых вибраций с частотой 75...150 Гц значительно повышает стойкость δT инструмента (рис. 3.34), которая характеризуется количеством отверстий, просверленных до поломки сверла, а также параметры качества обработанной поверхности. Эффективность наложения вибраций зависит от диаметра сверла и относительной амплитуды колебаний. Она повышается при уменьшении диаметра обрабатываемого отверстия, а при $A = (1...1,5)S$ достигает максимума. При вибросверлении параметр шероховатости Ra снижается в 2...3 раза. Кроме того, значительно уменьшается увод (искривление оси) отверстия.

Особые затруднения в производственных условиях вызывает сверление глубоких отверстий. Для удаления стружки при обычном сверлении приходится периодически прерывать процесс и выводить сверло. Вибросверление глубоких отверстий обеспечивает надежное дробление и вынос стружки из обрабатываемого отверстия. Его лучше выполнять не стандартным спиральным сверлом, а инструментом, показанным на рисунке 3.35 (особенно при обработке отверстий небольшого диаметра). В данном случае СОЖ подается через внутренний и боковые каналы в сверле. Для вибросверления отверстий диаметром до 10 мм и глубиной до 200 мм можно рекомендовать следующее: применять подачи, в 1,2...1,5 раза превышающие подачи при обычном сверлении; скорости резания выбирать такие же, как при обычном сверлении, с учетом материала инструмента и заготовки; отношение частоты f вибраций к частоте вращения n_z заготовки (или сверла) следует принимать 17:8 или 19:8 при частоте вращения заготовки до 15 об/с и 9:8 или 11:8 при большей частоте вращения; амплитуду вибраций $2A$ для сверления отверстий глубиной 5...8 диаметров следует выбирать в пределах $(1...2)S$, а для отверстий глубиной более 8 диаметров – в пределах $(2...3)S$.

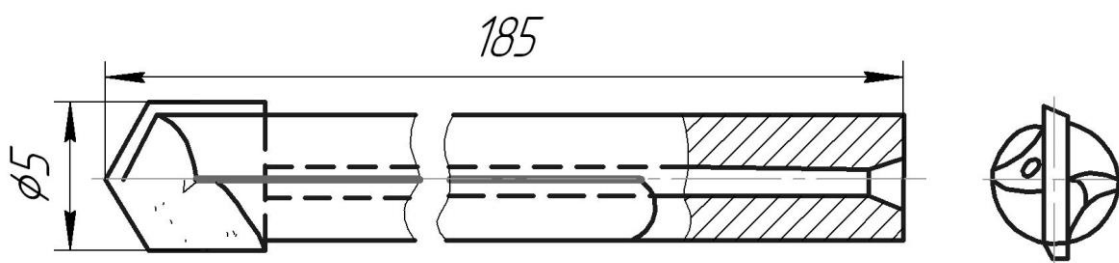


Рисунок 3.35 – Сверло с напайкой из твердого сплава для вибросверления глубоких отверстий малого диаметра

Наложение ультразвуковых колебаний на инструмент при развертывании и зенкерования отверстий в заготовках из жаропрочных сталей, титановых и алюминиевых сплавов снижает силы резания в 1,5...2 раза, повышает стойкость инструмента в 2 раза и производительность обработки отверстий в 1,5...2 раза.

Ультразвуковое нарезание резьб в заготовках из труднообрабатываемых материалов также уменьшает силы резания в 1,5...2 раза, исключает срывы ниток резьбы и заклинивание метчиков, повышает производительность резьбонарезания (в 2...4 раза) и точность получаемой резьбы. Улучшается также качество поверхности профиля резьбы. Колебания при нарезании резьбы направлены вдоль оси метчика, но могут быть и крутильными. Последние, правда, менее эффективны.

Воздействие вибраций значительно улучшает показатели абразивной обработки. Для улучшения процессов шлифования и заточки используют колебания как низких, так и высоких (ультразвуковых) частот. Направление низкочастотных колебаний совпадает с образующей рабочей поверхности шлифовального круга (т. е. с осью вращения круга), а ультразвуковые колебания могут быть как осевыми, так и радиальными (т. е. перпендикулярными к обработанной поверхности). При шлифовании с вибрациями улучшается процесс самозатачивания круга, повышается производительность, уменьшается опасность прижогов и уменьшается значение параметра шероховатости. Силовое ограничение производительности при шлифовании с радиальными ультразвуковыми (20 кГц) вибрациями зависит от амплитуды колебаний. Так, при увеличении амплитуды колебаний от 5 до 30 мкм значение коэффициента режущей способности $K_{\text{реж}}$ возрастает в 1,5 раза.

При алмазном хонинговании с наложением круговых вибраций производительность процесса существенно возрастает с увеличением частоты и амплитуды колебаний (при частоте колебаний 12,5 Гц и амплитуде 3 мм производительность увеличивается в 2,5 раза, а конусность хонингуемого отверстия остается такой же, как и при обычном хонинговании).

При суперфинишировании с наложением дополнительных ультразвуковых колебаний, направленных перпендикулярно к обрабатываемой поверхности, производительность по сравнению с обычным процессом увеличивается в 2 раза и более, возрастает выход годной продукции, уменьшается чувствительность к разбросу твердости брусков. Шероховатость поверхности соответствует параметру $Ra = 0,02...0,12$ мкм при исходном значении $Ra = 0,2...1,25$ мкм, причем Ra исходной поверхности оказывает незначительное влияние на параметр Ra , полученный после вибросуперфиниширования. Лучше, чем при обычном суперфинишировании, исправляются погрешности формы (волнистость, огранка). Обычно суперфиниширование с ультразвуковыми колебаниями осу-

ществляют в два этапа. На втором (отделочном) этапе ультразвуковые колебания отключают и уменьшают давление бруска.

Наложение вибраций при обработке способами ППД преследует одну из следующих целей: создание регулярного или нерегулярного микрорельефа поверхности с заданными характеристиками (глубина и ширина канавок, относительная несущая поверхность); интенсификация процесса пластического деформирования материала заготовки, чтобы при меньших силах достигнуть требуемой микрогеометрии поверхности и степени упрочнения материалов. Заданный микрорельеф может быть получен и без наложения вибраций с помощью фасонных роликов (рис. 3.36). Параметры выдавливаемых канавок (ширина $b_{\text{кан}}$ и глубина $h_{\text{кан}}$) зависят от силы прижима P инструмента, диаметра шара $d_{\text{шар}}$ и диаметра заготовки D_3 , как это показано на рисунке 3.37.

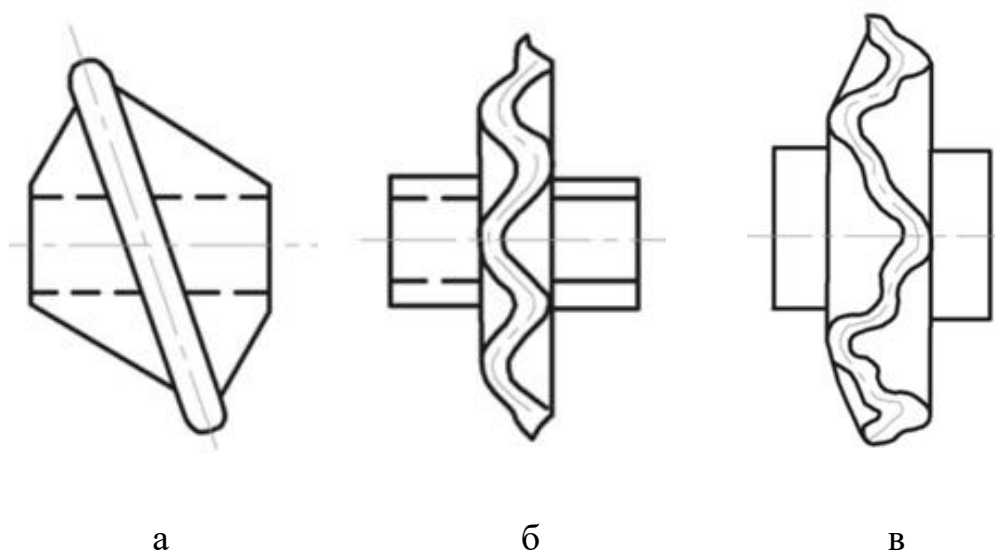
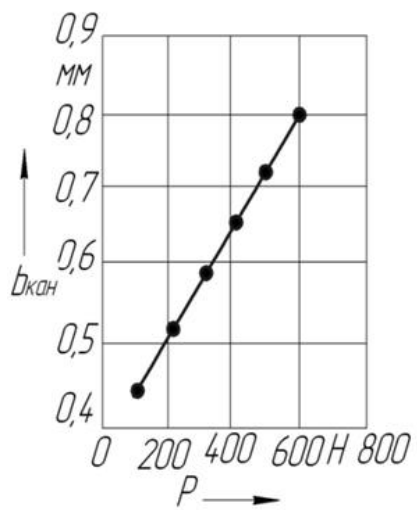


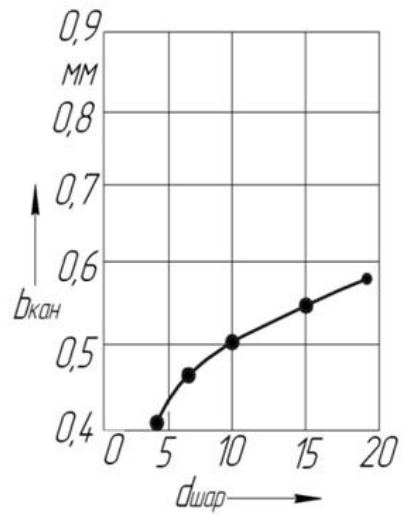
Рисунок 3.36 – Ролики для образования микрорельефа на поверхности вибрационной отделочно-упрочняющей обработки ППД (без наложения вибраций):

а – наклонный; б – синусоидальный; в – косинусоидальный

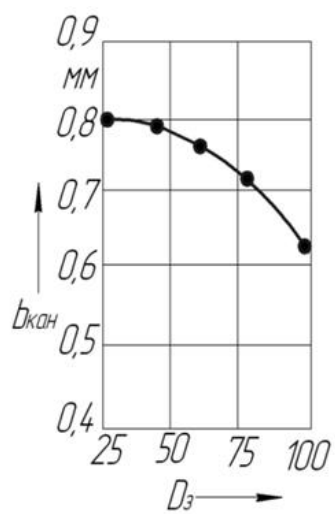
Вторая из указанных выше целей виброобработки способами ППД достигается наложением ультразвуковых колебаний в направлении, перпендикулярном к обрабатываемой поверхности. Это рационально при обработке: заготовок из инструментальных и высоколегированных сталей (У8, У12, 12Х13, ШХ15 и др.) после термической обработки; заготовок и инструментов из твердых сплавов (ВК8, ВК15, ВК30); заготовок большого диаметра и заготовок малой жесткости; заготовок с тонкими гальваническими покрытиями; поверхностей сложной формы (когда копиром может служить сама обрабатываемая поверхность).



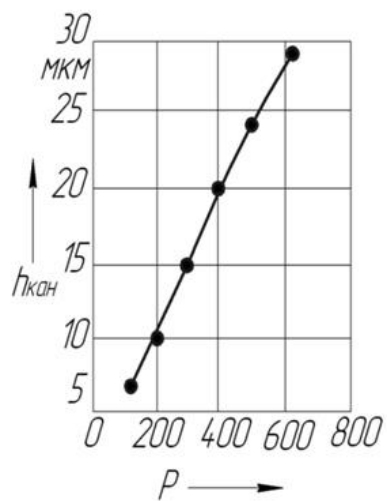
а



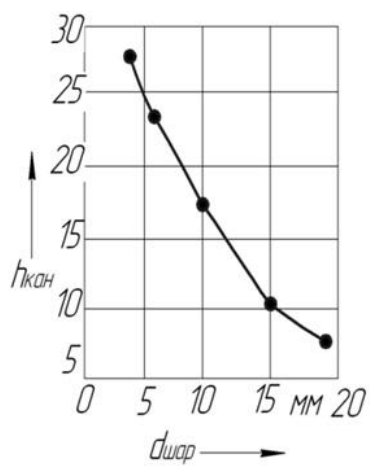
б



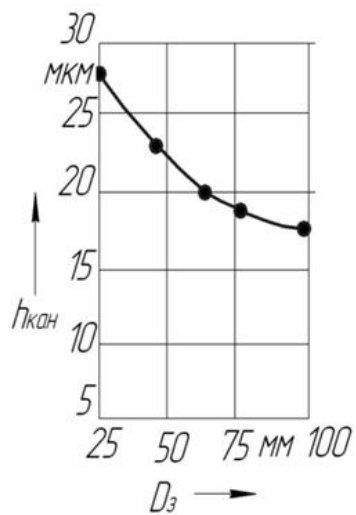
в



г



д



е

Рисунок 3.37 – Зависимость вершины и глубины канавки от параметров режима виброобкатывания титанового сплава ВТ1-1

Наложение ультразвуковых вибраций при обработке способами ППД в десятки раз увеличивает скорость пластической деформации, в 3...9 раз – давление в зоне контакта при той же силе прижима инструмента к поверхности, что и при обычном ППД.

3.6 Вопросы для самоконтроля

1. Опишите процессы пластического деформирования подповерхностного слоя заготовки при воздействии режущего клина.
2. Изобразите схему зон пластического деформирования и напряжений при резании лезвийным инструментом.
3. Изобразите схему формирования остаточных напряжений в подповерхностном слое при шлифовании.
4. Какое влияние оказывает нестационарное и неравномерное температурное поле в подповерхностном слое при шлифовании?
5. Дайте определение понятию «прижог».
6. Какие Вы знаете виды прижогов?
7. Перечислите группы причин, обуславливающие шероховатость обработанной поверхности.
8. Изобразите схему формирования «геометрической» шероховатости при точении.
9. Изобразите схему формирования «геометрической» шероховатости при торцовом фрезеровании.
10. Опишите характер влияния скоростей резания при лезвийной обработке на высоту неровностей обработанной поверхности.
11. Опишите характер влияния подач при лезвийной обработке на высоту неровностей обработанной поверхности.
12. Опишите характер влияния твердости заготовки на высоту неровностей обработанной поверхности.
13. Как влияет затупление инструмента на величину шероховатости поверхности?
14. Какое влияние оказывают вибрации при обработке на шероховатость поверхности?
15. Как влияет на шероховатость обработанной поверхности зернистость шлифовального круга?
16. Изобразите зависимости времени выхаживания и дисбаланса шлифовального круга на параметр шероховатости.
17. Что оказывает влияние на высотные параметры шероховатости, образующейся при обработке способами ППД?
18. Изобразите графики зависимости нормальной силы и давления в зоне контакта на параметр R_a при обработке ППД материалов разной твердости.

19. Изобразите графики зависимости числа проходов и продольной подачи на параметр Ra при обработке ППД материалов разной твердости.

20. Какое влияние оказывает параметр шероховатости исходной поверхности на шероховатость при обработке материалов способами ППД?

21. Какое влияние оказывает твердость материала заготовки на шероховатость при обработке материалов способами ППД?

22. Как влияет на шероховатость поверхности направление пластического деформирования по отношению к направлению предшествующей обработки?

23. Какими показателями характеризуется состояние подповерхностного слоя?

24. Как влияют на степень и глубину упрочнения скорость резания и подача при механической обработке?

25. Как влияют на степень и глубину упрочнения передний угол и радиус скругления режущего лезвия?

26. Как на упрочнение поверхности влияет износ инструмента по задней поверхности?

27. Охарактеризуйте влияние на степень и глубину упрочнения марки инструментального материала.

28. Какова особенность формирования подповерхностного слоя при шлифовании закаленной стали?

29. Опишите зависимости степени и глубины упрочнения от условий обработки способами ППД.

30. Как при выглаживании влияет подача на степень и глубину упрочнения?

31. Запишите выражение для определения объемной производительности при шлифовании.

32. Изобразите зависимость глубины дефектного слоя (прижога) от интенсивности удаления материала заготовки при шлифовании «острым» и «затупленным» кругами.

33. Запишите выражение для теплового ограничения при шлифовании.

34. Изобразите схему силового и теплового ограничений производительности при шлифовании.

35. В чем суть граничного алгоритма управления съемом припуска по каналу радиальной подачи?

36. В чем суть ступенчатого алгоритма управления съемом припуска по каналу?

37. Изобразите схему системы реализации граничного алгоритма управления съемом припуска при круглом врезном шлифовании.

38. Опишите алгоритм работы СЛУ системы автоматического управления циклом съема припуска при круглом врезном шлифовании.

39. Опишите способы подачи СОЖ в зону шлифования.
40. Опишите достоинства кругов с прерывистой рабочей поверхностью.
41. Каков характер изменения температуры в зоне сплошного и прерывистого шлифования?
42. Назовите причины вынужденных колебаний в процессе резания.
43. Назовите причины возбуждения автоколебаний.
44. Изобразите зависимость амплитуды продольных автоколебаний стола с механическим приводом от скорости его движения.
45. Как влияет увеличение жесткости привода и вязкости смазочного материала на амплитуду автоколебаний?
46. Опишите влияние условий обработки на амплитуду автоколебаний при точении.
47. Опишите влияние режимов и условий обработки на амплитуду автоколебаний при шлифовании.
48. Изобразите схему формирования волнистости при шлифовании.
49. Как ослабить вынужденные колебания станка, передаваемые через фундамент от внешних источников?
50. Как снизить вибрации, вызванные работой собственных механизмов и приводов станка?
51. Что рекомендуется для повышения плавности перемещения элементов станков?
52. Изобразите графики расположения областей устойчивости в зависимости от параметров и условий точения и фрезерования.
53. Как зависит устойчивость процессов точения и растачивания на токарном станке от ориентации силы резания?
54. Как зависит устойчивость процесса растачивания от ориентации силы резания и оси эллипса жесткости оправки?
55. Как для повышения устойчивости процесса точения сместить точку приложения силы резания относительно нейтральной оси изгиба державки резца?
56. Изобразите схему динамического гасителя колебаний для точных борштанг.
57. Изобразите схему ударного гасителя колебаний.
58. Изобразите схему контактно-ударного виброгасителя.
59. Как создать условия для «самоперерезания» волн при шлифовании?
60. Опишите область применения и особенности использования фрез, протяжек и разверток с неравномерным шагом.
61. Для чего могут использоваться низкочастотные и ультразвуковые механические колебания?
62. По каким признакам систематизируются осцилляторы?

63. Изобразите график зависимости минимальной амплитуды колебаний, обеспечивающей стружкодробление, от подачи при точении.
64. Изобразите график зависимости минимальной амплитуды колебаний, обеспечивающей стружкодробление, от параметров режима точения и резца.
65. Изобразите схему автоколебательного вибросуппорта.
66. Как влияют на обрабатываемость высоколегированных нержавеющих и жаропрочных сталей высокочастотные тангенциальные вибрации?
67. Как влияет задание вибраций инструменту или заготовке в осевом направлении при сверлении?
68. Опишите преимущества и особенности процесса вибросверления глубоких отверстий.
69. Как влияет наложение ультразвуковых колебаний на инструмент при развертывании и зенкерованиях?
70. Опишите преимущества и особенности ультразвукового нарезания резьб.
71. Каковы преимущества и особенности наложения вибраций при шлифовании?
72. Каковы особенности использования вибраций при хонинговании и суперфинишировании?
73. Какие цели преследуют при наложении вибраций при обработке способами ППД?

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

4.1 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 пласти-

чески сформированного металла соседних микронеровностей, они приподнимают их впадины (рис. 4.1).

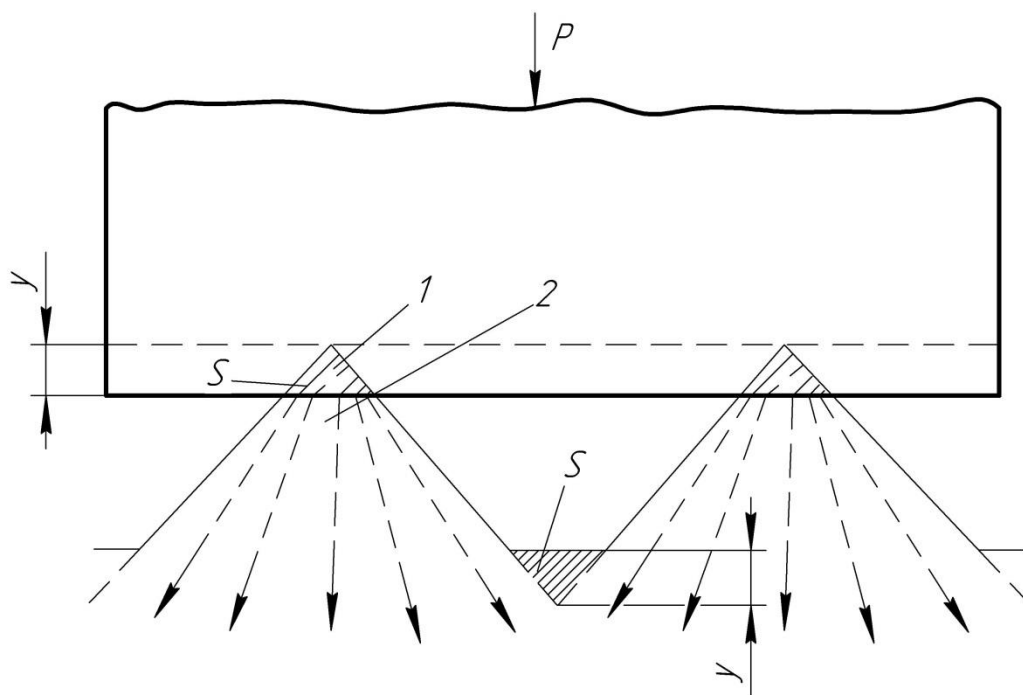


Рисунок 4.1 – Схема переформирования шероховатости при ее пластическом деформировании:

1 – исходная шероховатость; 2 – шероховатость после пластического деформирования

Тщательно проведенные эксперименты по изменению профиля шероховатости до и после пластических деформаций (рис. 4.2) 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. 4.1):

$$\Delta R_z = 2y_{пл.в.ш}$$

Шероховатость поверхности, не вступившей в контакт, естественно, остается без изменения. Таким образом, шероховатость контактирующих поверхностей будет находиться в диапазоне от $\Delta R_{z_{эксп}} = R_{z_{исх}} - 2y_{пл.в.ш}$ 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. 4.3). 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 $2y_{пл.в.в}$.

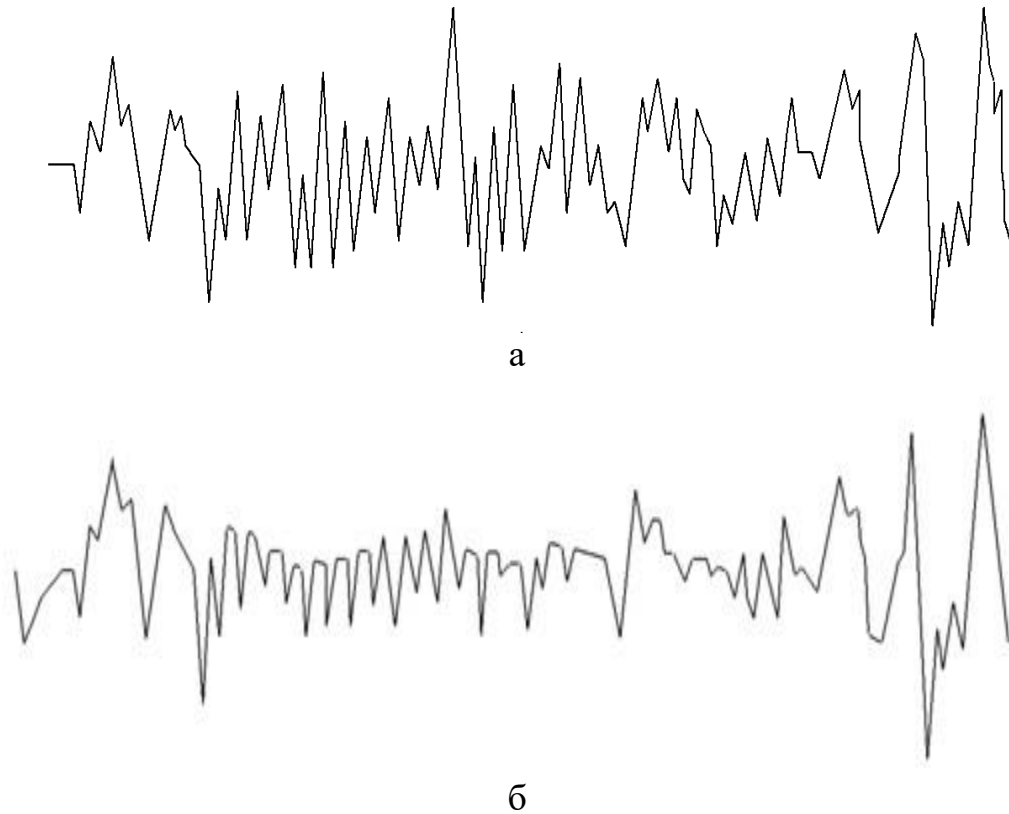


Рисунок 4.2 – Изменение профиля шероховатости при пластическом деформировании:

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

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

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

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

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

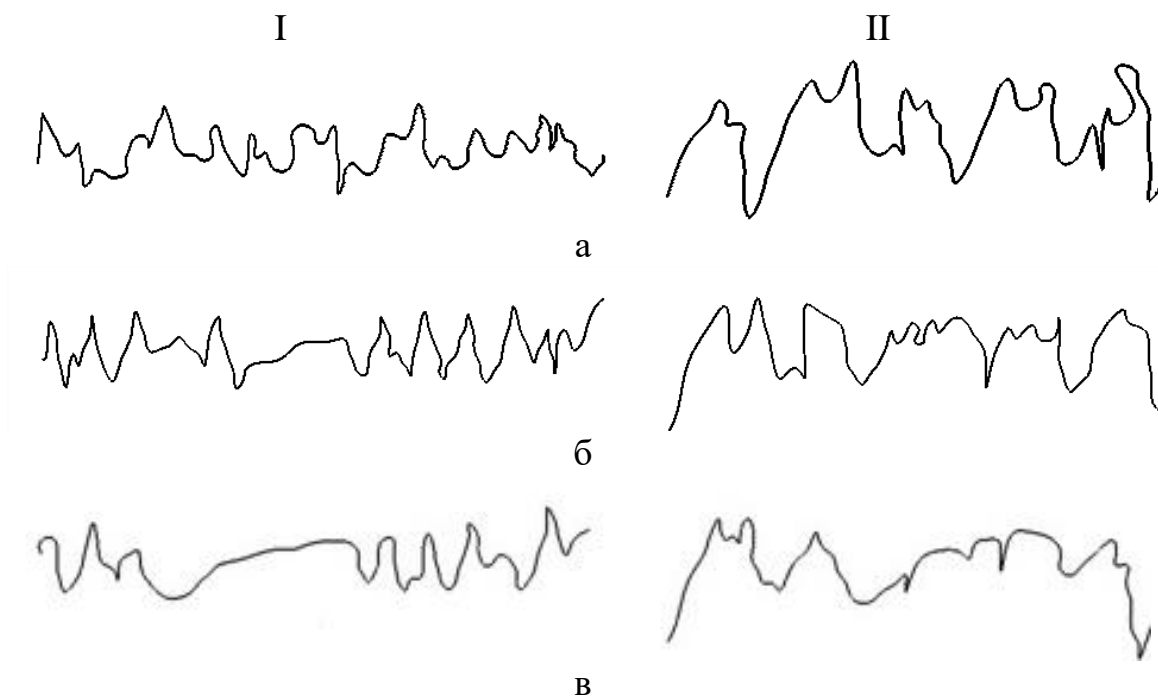


Рисунок 4.3 – Изменение шероховатости при пластическом деформировании:

а – $P = 10 \text{ Н}$; б – $P = 100 \text{ Н}$; в – $P = 250 \text{ Н}$
 (I – $Ra_{\text{исх}} = 1,0 \text{ мкм}$, II – $Ra_{\text{исх}} = 2,0 \text{ мкм}$)

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. 4.4).

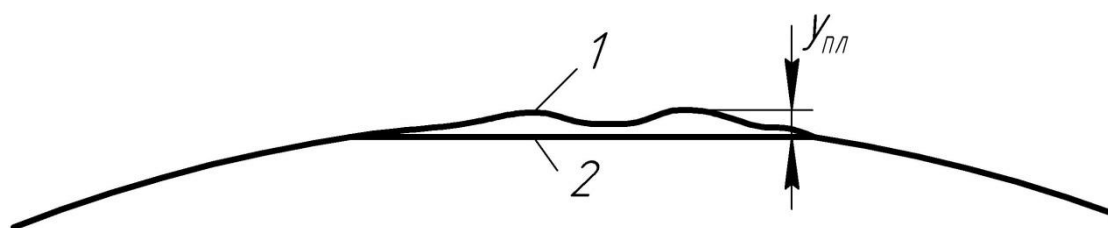


Рисунок 4.4 – Изменение профиля единичной волны в процессе пластических деформаций:

1 – исходный профиль, 2 – пластически деформированный

Уменьшение макроотклонения контактирующей поверхности составит

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

где A – геометрическая площадь контакта; $H_{махисх}^2$ – 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 Бринелю; $k = v_{исх}$ – 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 $H_{\muисх}$ (для участков, не вступивших в контакт) до пластической твердости HD , при которой выступы неровностей в начале контакта 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 приработки 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 из-

нашивание. Она может быть как меньше, так и больше исходной (рис. 4.5). И.В. Крагельский и В.С. Комбалов для шероховатости, сформировавшейся в процессе приработки, ввели понятие «равновесная шероховатость» и предложили безразмерный комплексный параметр ее оценки

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

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

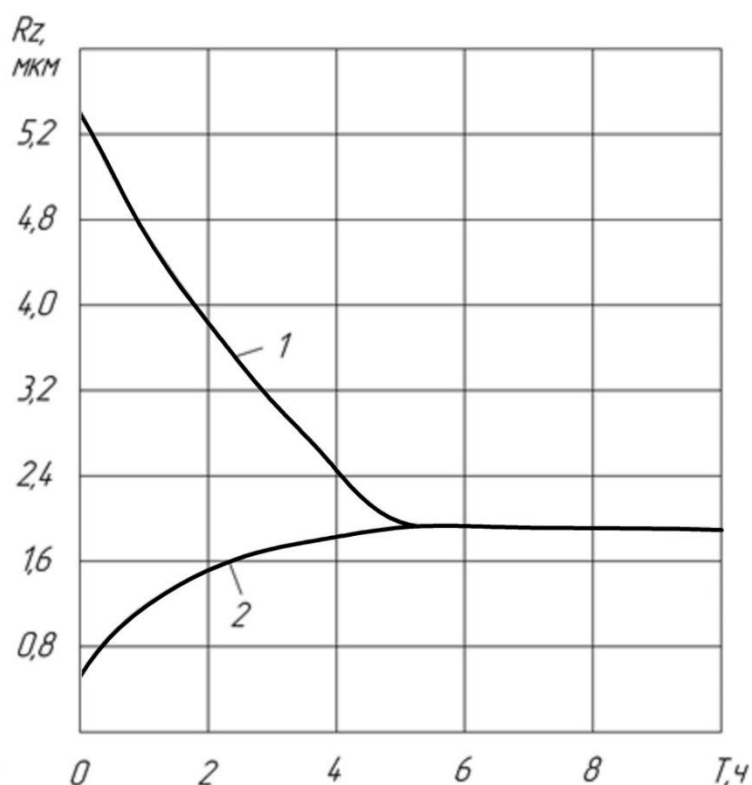


Рисунок 4.5 – Изменение шероховатости поверхности трения при изнашивании:
1 – $Rz_{исх} = 5,4$ мкм; 2 – $Rz_{исх} = 0,5$ мкм

Процесс формирования равновесной шероховатости поверхности трения схематически представлен на рисунке 4.6. Слева показан износ идеально гладкой поверхности, приводящей к схватыванию 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.

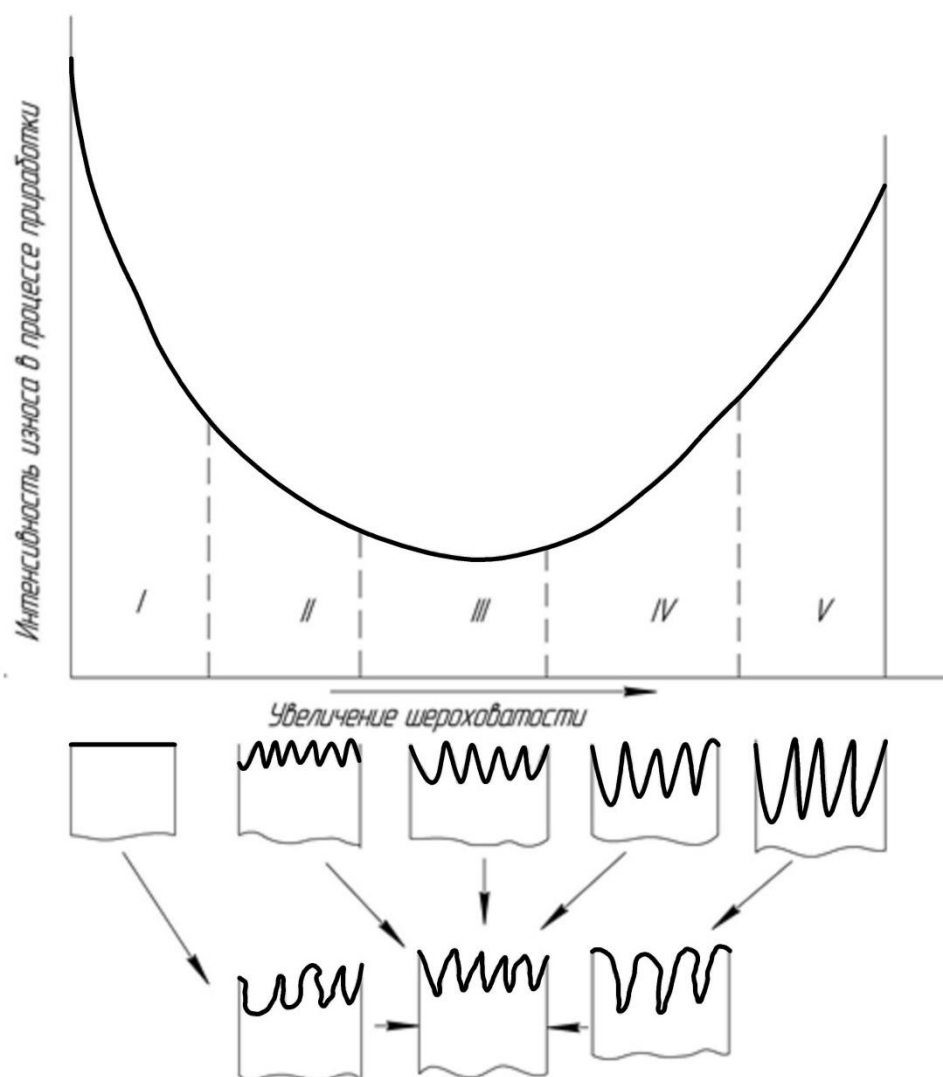


Рисунок 4.6 – Схематическое представление формирования равновесной шероховатости

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 – коэффициент 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. 4.7). 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.

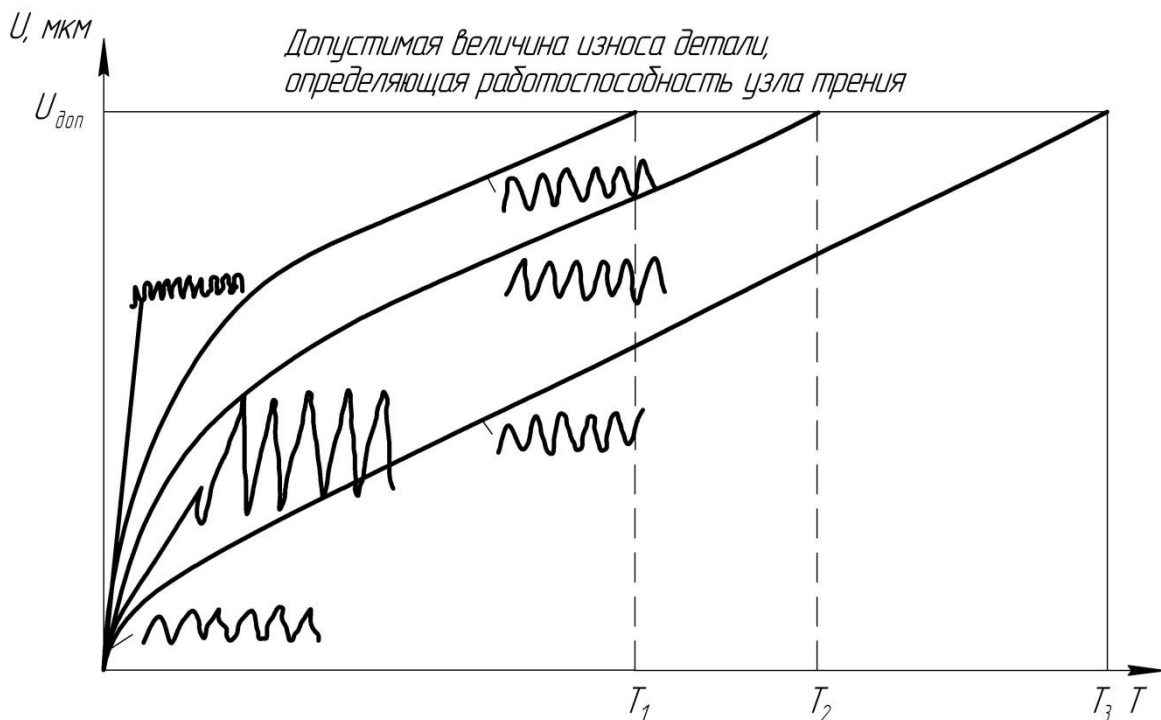


Рисунок 4.7 – Взаимосвязь долговечности поверхности трения с ее исходной шероховатостью

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 кон-

тактирующих 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 «пленочное голодание», схватывание и разрушение 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.

4.2 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 4.1.

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

Чистовое наружное точение:

– с учетом только шероховатости:

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

– с учетом шероховатости и волнистости:

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

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 4.1 – Возможности методов обработки в обеспечении нормальной контактной жесткости поверхностей

Методы обработки	С учетом только шероховатости		С учетом шероховатости и волнистости	
	j_I , Па/мкм	J_n , Па/мкм	j_I , 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:

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

– с учетом шероховатости и волнистости:

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

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 4.8 приведена зависимость износа образцов из закаленной стали от пути трения для различных методов их окончательной обработки.

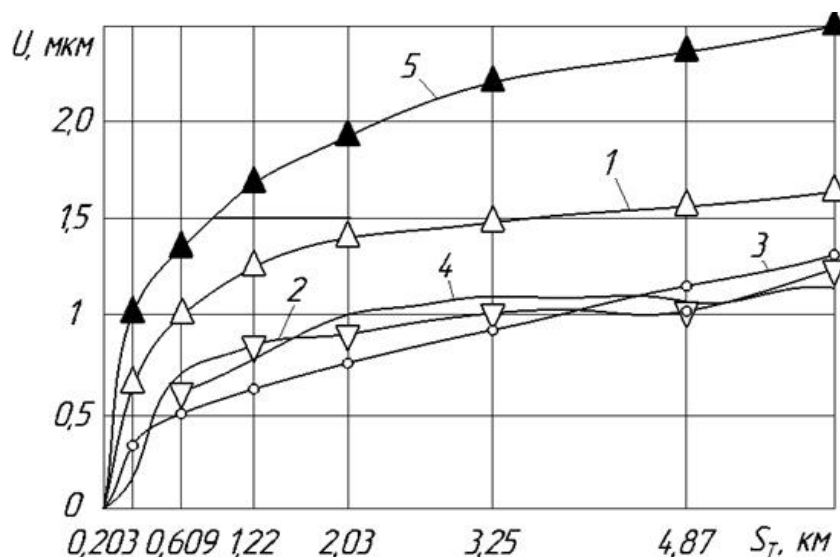


Рисунок 4.8 – Зависимость износа образцов от пути трения в процессе приработки для закаленной стали:

- 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 соот-

ветствуют трению по чугуноу СЧ21, а 4–6 – трению по молибденовому покрытию (рис. 4.9).

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

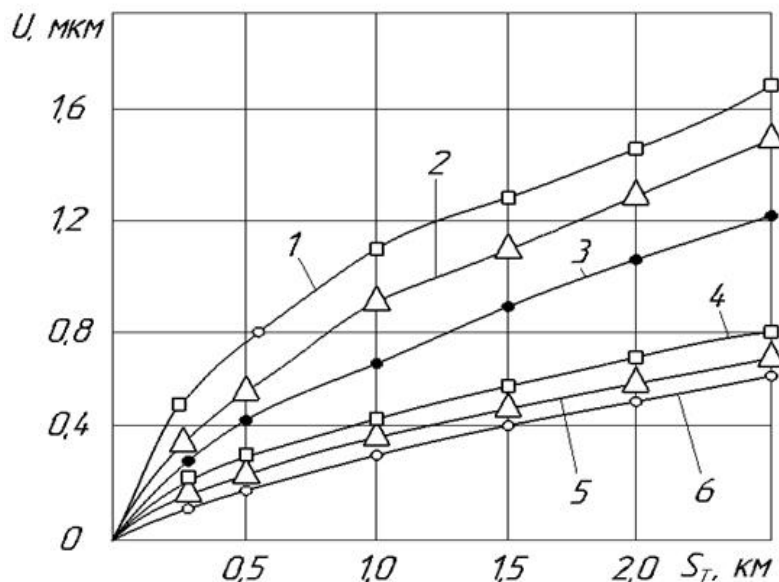


Рисунок 4.9 – Зависимость величины износа чугунных образцов в процессе приработки от пути трения и метода их обработки: 1, 4 – шлифование периферией круга; 2, 5 – шлифование торцом эльборового круга; 3, 6 – суперфиниш алмазным бруском

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 4.2.

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 4.10 и в таблице 4.3 приведены данные проф. М.А. Елизаветина, убедительно подтверждающие это.

На рисунке 4.10 по оси ординат отложены значения коэффициента R , характеризующие влияние метода обработки на предел выносливости в зависимости от предела прочности:

$$\beta = \frac{\sigma_{-1}'}{\sigma_{-1}}$$

где σ_{-1} – предел выносливости образцов, обработанных данным методом; σ_{-1} – предел выносливости тщательно отполированных образцов.

Таблица 4.2 – Коррозионная стойкость образцов (сталь 45, HRC 30–35)

Метод обработки	Параметры шероховатости по ГОСТ 2789-73					Степень наклепа, u_n	Потеря в массе, u_m , 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	Стойкие	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	Весьма стойкие	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	Весьма стойкие	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	Стойкие	5
	6,2	11,2	25,3	55	0,115	1,45	9,0	0,01403	Стойкие	5
	3,54	5,1	17,1	65	0,140	1,58	6,25	0,0975	Весьма стойкие	3

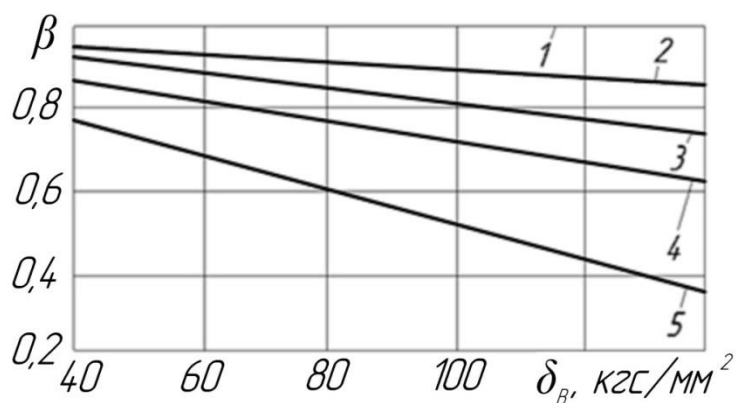


Рисунок 4.10 – Влияние метода окончательной обработки поверхности на предел выносливости стали различной прочности:
 1 – полирование; 2 – шлифование; 3 – тонкое точение;
 4 – грубое точение; 5 – наличие окалины

Таблица 4.3 – 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_b 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. 4.4).

Таблица 4.4 – Коэффициенты трения в соединении

Диаметр соединения, мм	Материал, метод обработка		Коэффициент трения f
	втулки	вала	
1	2	3	4
Сборка с нагревом			
18	Стали 35, 40 (220 НВ), развертывание	Стали 36, 40 (190 НВ), шлифование	0,37
30	Сталь 38ХС, улучшение (340 НВ)	Сталь 18Х2Н4МА, цементация и закалка (58–59 HRCэ), шлифование.	0,30
		Сталь 18Х2Н4МА (220 ЯЛ), шлифование	0,45
48	Сталь 45, расточка	Сталь 45, накатка с последующим шлифованием	При $t = 50$ °С $f = 0,31$, при $t = 20$ °С $f = 0,34$
80	Сталь 40 (190 НВ), шлифование	Чугун СЧ28 (210 НВ)	0,28
100	Сталь 30 (175 НВ), шлифование	Стали 30 (175 НВ), шлифование	0,23
140	Сталь 30 (175 НВ), 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 НВ), развертывание	Стали 35, 40 (140 НВ), шлифование	0,25

Окончание таблицы 4.4

1	2	3	4
40	Сталь 40 (190 НВ), шлифование	Бронза БрАЖ9-4 (140 НВ), шлифование	0,28
50	Сталь 50, нормализация, развертывание	Сталь 50, чистое точение	0,35
50	Сталь 50, нормализация, шлифование	Бронза БрАЖ9-4 (140 НВ), 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 НВ)	Чугун СЧ28 (210 НВ)	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 4.5–4.7.

Таблица 4.5 – 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 4.5

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.

4.3 Технологическое повышение долговечности изделий машиностроения

4.3.1 Обработка поверхностным пластическим деформированием

4.3.1.1 Общая характеристика

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. 4.11) [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 4.6 – Влияние условий алмазно-абразивной 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					
Скорость резания	+	+	+	+	+	+	+
Круговая или линейная скорость детали	-	-	-	-	-	-	-
Подача	—*	—*	—*	—*	—*	—*	—*
Глубина резания	+	-	+	-	+	-	+
Зернистость	—*	—*	—*	—*	—*	+	-
Концентрация	+	+	+	-	+	+	+
Число выхаживаний	+	+	+	+	+	+	+
Жесткость технологической системы	+	+	+	+	+	+	+
СОТС	+	+	+	+	+	+	0
Примечания (см. табл. 4.5).							

Таблица 4.7 – Влияние условий ОУО ППД 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					
Скорость	-	-	-	+	-	—*	-
Подача	—*	—*	—*	-	-	—*	-
Раб. давление	+	+	+	—*	—*	+	—*
Число раб. ходов	+	+	+	-	-	+	+
Радиус рабочего шарика и индикатора	+	+	+	+	+	+	+
Диаметр раб. ролика	+	+	+	+	+	+	+
Профильный радиус ролика	+	+	+	+	+	+	+
Задний угол вдавливания ролика	-	-	-	-	-	-	-
Жесткость техн. системы	+	+	+	+	+	+	+
СОТС	+	+	+	+	+	+	0
Примечания (см. табл. 4.5).							

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

мых 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.

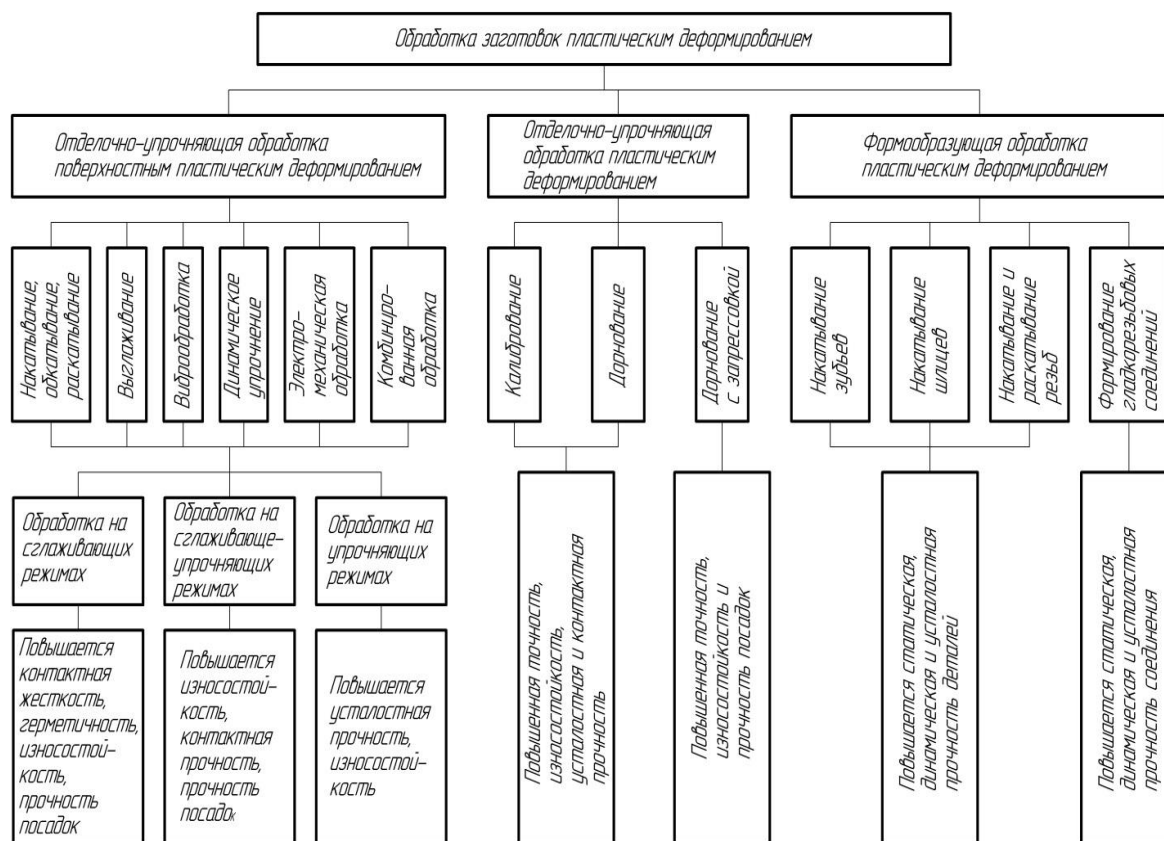


Рисунок 4.11 – Классификация методов обработки заготовок пластическим деформированием

4.3.1.2 Отделочно-упрочняющая обработка

При поверхностном пластическом деформировании, как было отмечено в главе 3, 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. 4.12). 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].

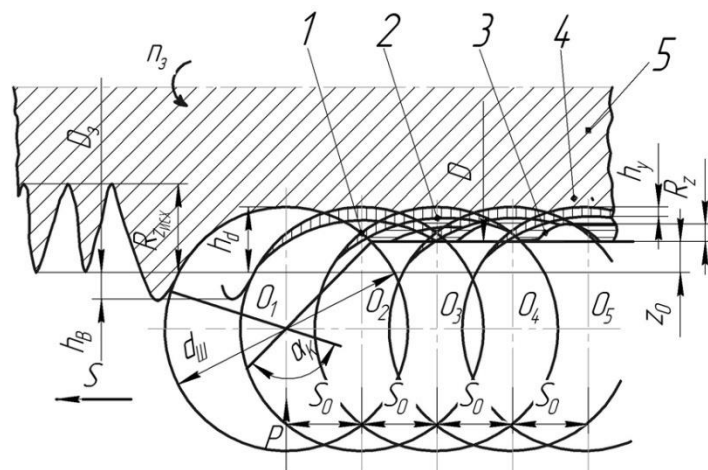


Рисунок 4.12 – Схема деформации поверхности и материала при отделочно-упрочняющей обработке ППД:

- 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; $R_{z_{исх}}$, R_z – высоты неровностей исходной и накатанной поверхностей;
- Z_o – пластическая деформация поверхности; h_y – упругая деформация материала; h_d – глубина внедрения инструмента; h_B – высота выступа деформируемого материала; α_k – угол контакта шара с 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

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. 4.14) 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.

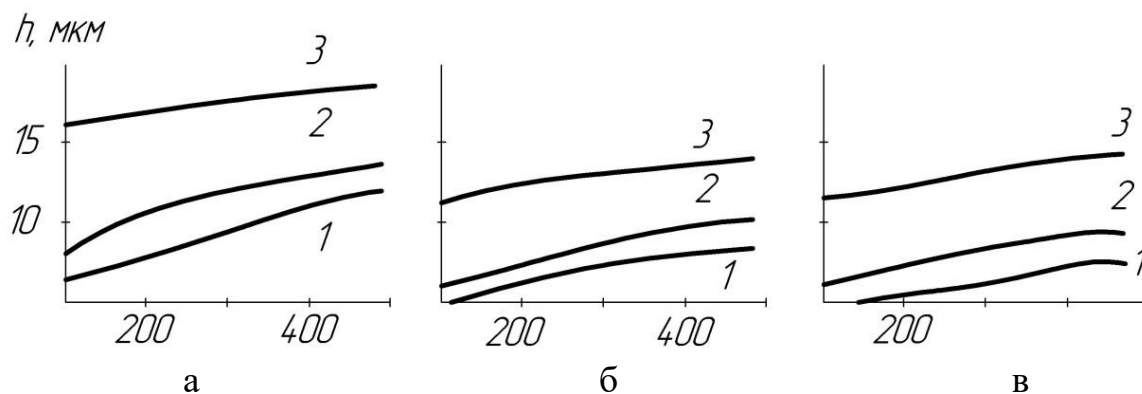


Рисунок 4.14 – Изменение глубины канавки h при обкатывании:
 а – стали 12X18H10T, б – никелевого сплава XH67BMТЮ,
 в – титанового сплава BT3-1

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 4.15 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 синусоида в сечении (г) и косинусоидальными с гофрами в виде косинусоида, перемежающимися с прямыми участками (д), роликами. Вибрация инструмента с частотой f_B при обработке деталей осуществляется в направлении подачи S (рис. 4.15 а, б). Обкатывание фасонными и профильными роликами (рис. 4.15 в–д) может служить примером вибрационной обработки, обеспечиваемой конструкцией обрабатывающего инструмента. Ультразвуковое выглаживание (рис. 4.15 е) осуществляется с вибрацией ультразвуковой частоты f_{BU} в направлении действия силы прижима P .

4.3.1.3 Формообразующая обработка 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].

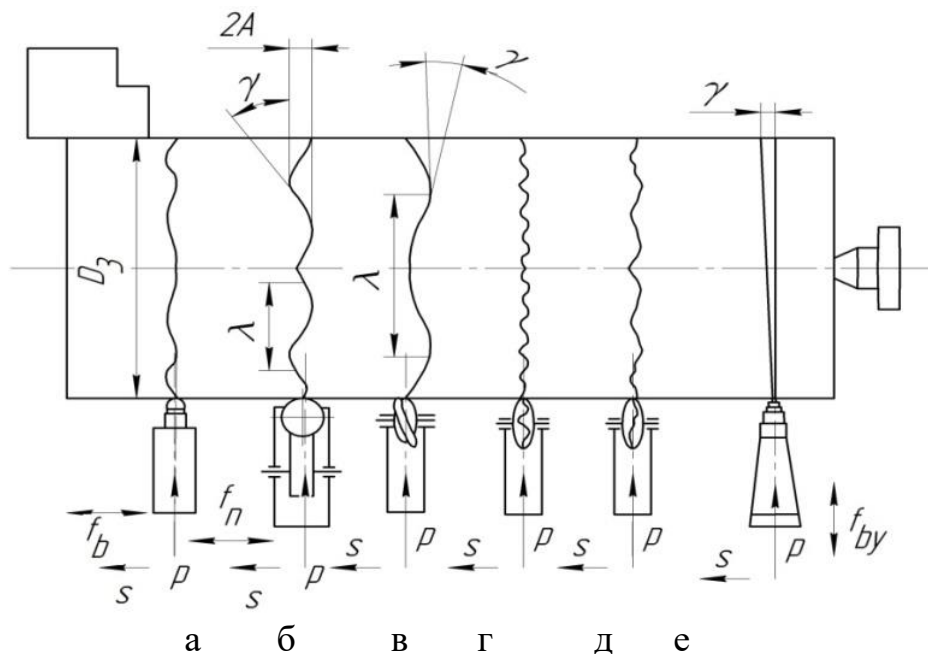


Рисунок 4.15 – Схемы вибрационной обработки ППД и параметры наносимых следов

Накатывание резьб обычно производится до термической обработки заготовок. Распространенным способом является образование резьбы плашками (рис. 4.16 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. 4.16 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.

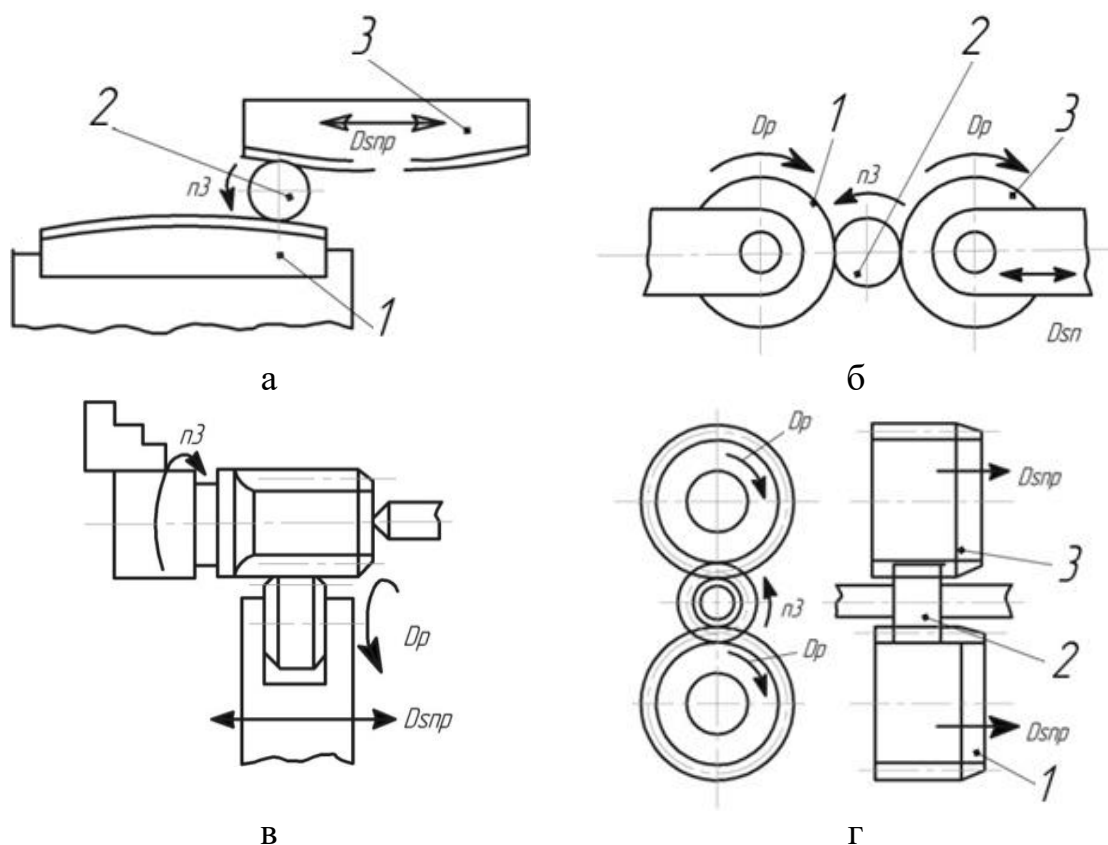


Рисунок 4.16 – Схемы формообразующего накатывания

Накатывать мелкие шлицы на валах (рис. 4.16 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. 4.16 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.

4.3.1.4 Упрочняющая обработка

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 10^3 – 10^4 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. 4.17 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.

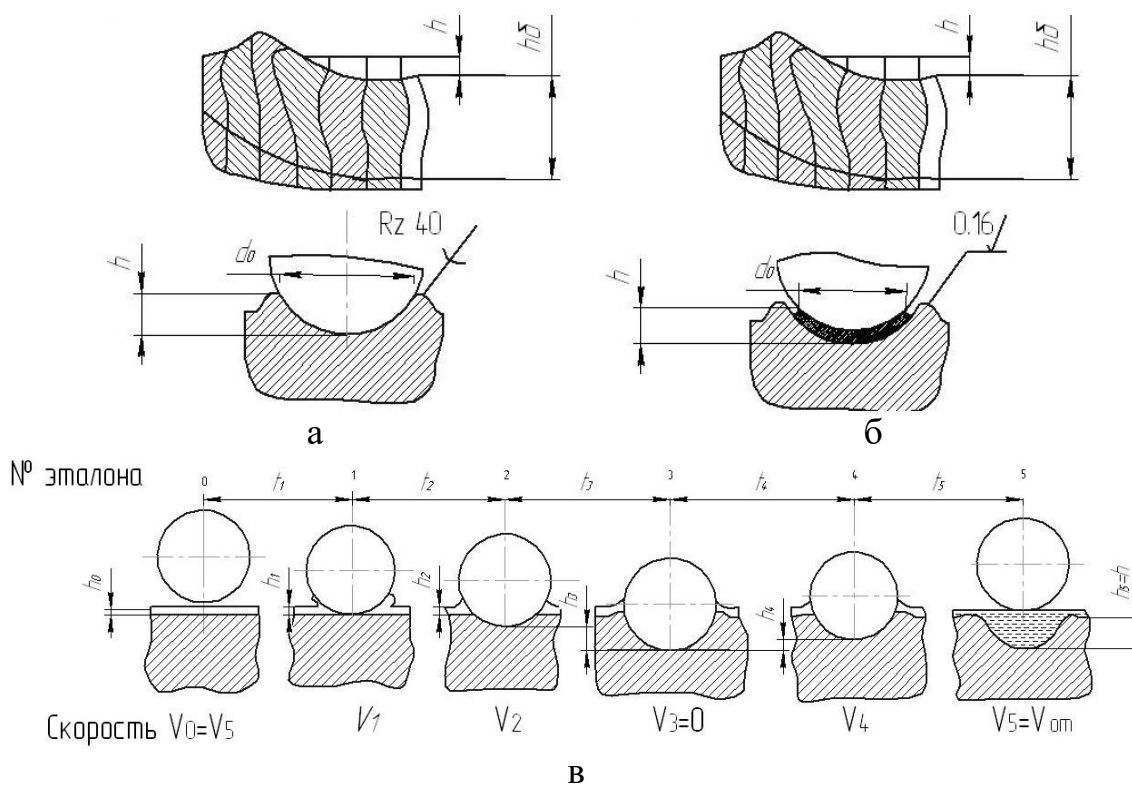


Рисунок 4.17 – Характер контактной зоны:
а – без СОЖЭ, б – с СОЖ,
в – этапы взаимодействия дроби с обрабатываемой
поверхностью при обработке

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. 4.17 а).

Напльвы имеют более заостренную и наклоненную форму в виде ПН, в верхнем слое создаются растягивающие (+) напряжения, а в более глубоких слоях – сжимающие (–).

При гидродробеструйном упрочнении (ГДУ) под поверхностью дробы обрабатываемый металл деформируется свободно, создавая по краям отпечатка напльвы более пологой формы. В этом случае создаются только сжимающие остаточные напряжения (рис. 4.17 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. 4.17 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 $h = h_5$, $av_5 = v_{от}$ (здесь $v_{от}$ – скорость отскока дробы).

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. 4.18 а). Под действием вибраций рабочая среда и заготовки совершают два вида движений: колебательное и циркуляционное (медленное

вращение всей массы). В процессе обработки заготовки занимают различное положение в рабочей среде, что обеспечивает достаточно равномерную обработку всех поверхностей.

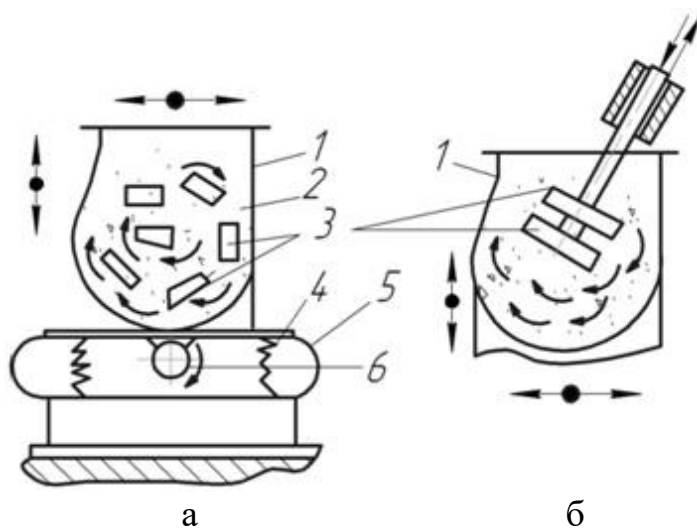


Рисунок 4.18 – Схемы виброабразивной обработки:
а – обычной, б – шпиндельной

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, накипи 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 4.8.

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 дает 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 4.49 б. Скорость вращения на поверхности заготовки достигает от 1 до 15 м/с.

Таблица 4.8 – 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
Стеклоянная 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

4.3.2 Ионная имплантация и лазерная обработка

4.3.2.1 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 выделиться 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 ; $1 \text{ эВ} = 1,6 \dots 10^{19} \text{ Дж}$) 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 при-

мерно 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 большей 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

$R \leq 1,56\sigma_{сж}$. Особенно эффективна ионная имплантация азота в стали с содержанием хрома более 12 %.

В таблице 4.9 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. 4.19).

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.

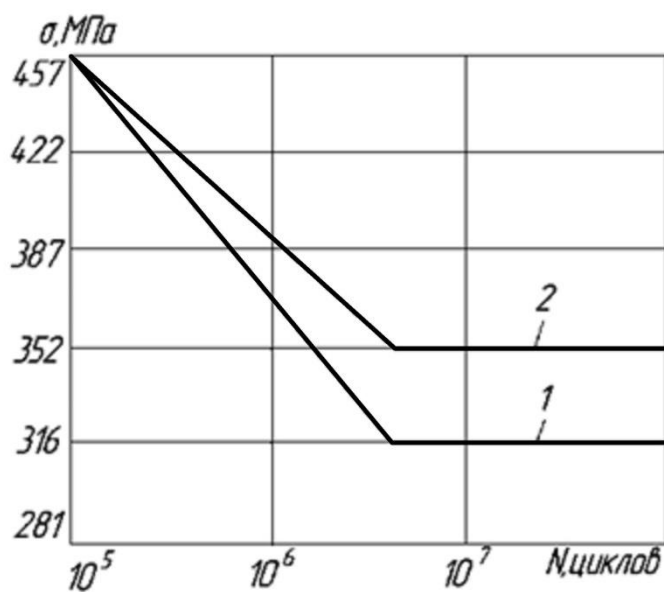


Рисунок 4.19 – Влияние имплантации на усталостную долговечность:
1 – без имплантации; 2 – после имплантации

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. 4.20). 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 4.9 – Эффективность обработки деталей ионной имплантацией

Материал заготовки	Импантируемые ионы и параметры имплантации	Оказанное влияние
1	2	3
Цементированная сталь	Доза имплантации 10^{16} – 10^{17} см ⁻² : K ⁺ Pb ⁺ Sn ⁺ Mo ⁺ +2S ⁺	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 Ti ⁺ + C ⁺
V ⁺ 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 V ⁺ 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 4.9

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 % С, 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 % С	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 VT1–0	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 пластика 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 Т5К10	N^+ при дозе $8 \cdot 10^{17} \text{см}^{-2}$	Возрастание стойкости резцов в 7,5 раза
Твердый сплав ВК6	N^+ при дозе $8 \cdot 10^{17} \text{см}^{-2}$ C^+ или N^+ при дозе $5 \cdot 10^{17} \text{см}^{-2}$	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 ре-

зультат 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.

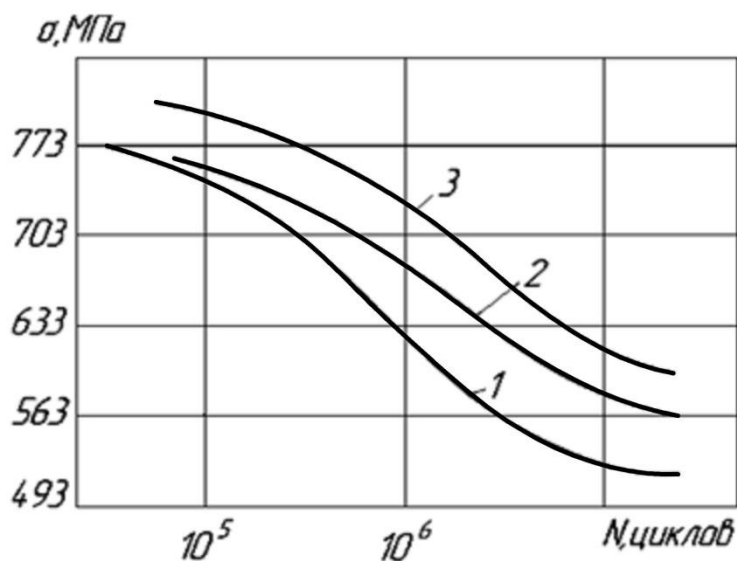


Рисунок 4.20 – Усталостные кривые для сплава на основе титана:
 1 – без имплантации; 2 – после имплантации азота;
 3 – после имплантации углерода

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 $Ti + 6\% Al, 2\% Sn, 4\% Zn$ и $2\% Mo$ оказала имплантация платины с дозой (1...2) 10^{16} см^2 и энергией 150 кэВ, а также имплантация бария с дозой $2-10^{16} \text{ см}^2$ 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 очаговой 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 % C, 0,36 % Mn, 1,36 % Cr), приведенным в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Рекомендуемые режимы имплантации

Материал	Ионы	Доза • 10 ¹⁷ , см ¹²	Напряжение, кэВ
M50	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 Р6М5с твердостью $HRC_{\text{э}} = 64\text{--}65$, полученной закалкой и двукратным отпуском при 560 °С, повышены износостойкость в 3 раза, микротвердость в 1,8 раза (рис. 4.21). 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.

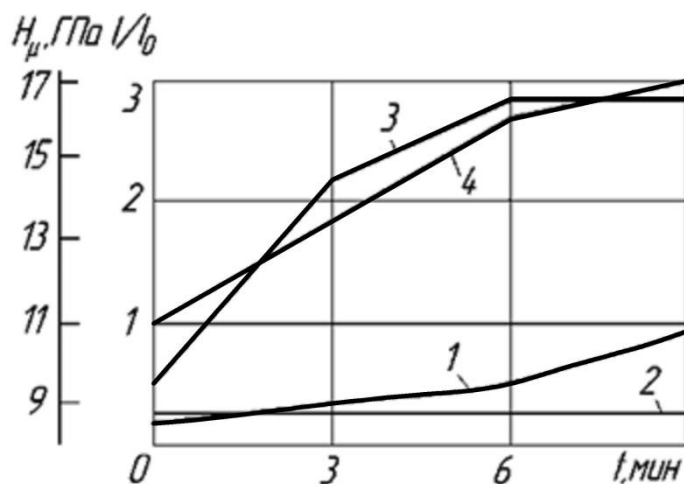


Рисунок 4.21 – Зависимость твердости $2_{\text{н}}$ и относительной износостойкости $3_{\text{н}}$ от времени облучения:

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 ($\alpha_N \rightarrow \text{FeN}$), 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 расположен-

ных нитридных слоев: $Fe_2N(\xi\text{-фаза}) \rightarrow Fe_{2-3}N(\varepsilon\text{-фаза}) \rightarrow Fe_4N(\gamma\text{-фаза})$ – 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 ε -фазе уменьшением активности насыщающей атмосферы.

Кроме того, покрытия высокоазотистого нитрида $Fe_2N(\xi\text{-фаза})$ 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 $Fe_3(N, C)$ или $Fe_3(N, C, O)$, 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 % Аг. Чем выше температура азотирования, тем больше глубина азотированного слоя (рис. 4.22). 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. 4.23).

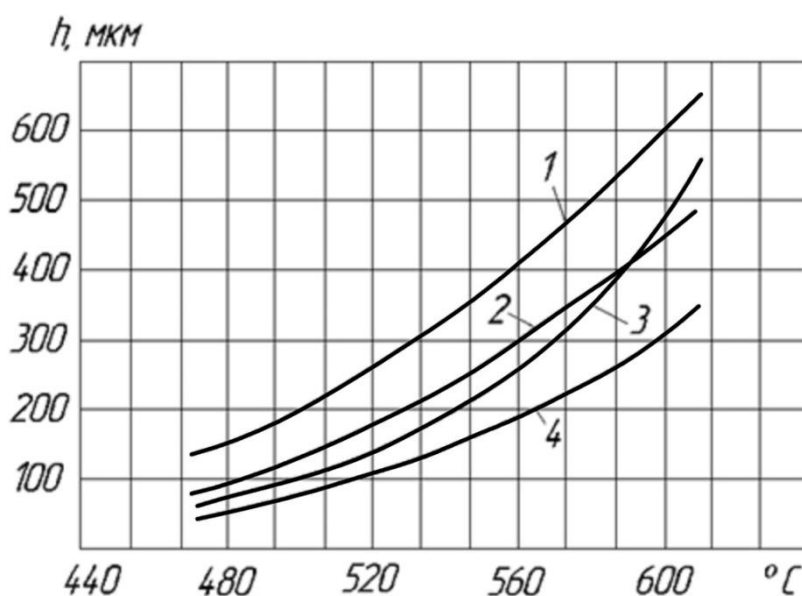


Рисунок 4.22 – Влияние температуры на глубину азотирования:

- 1 – сталь 20X; 2 – сталь 40X; 3 – сталь 38ХМЮА;
- 4 – сталь 45X (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 рас-

твора с меньшим содержанием нитридов концентрация азота практически не изменяется (рис. 4.24).

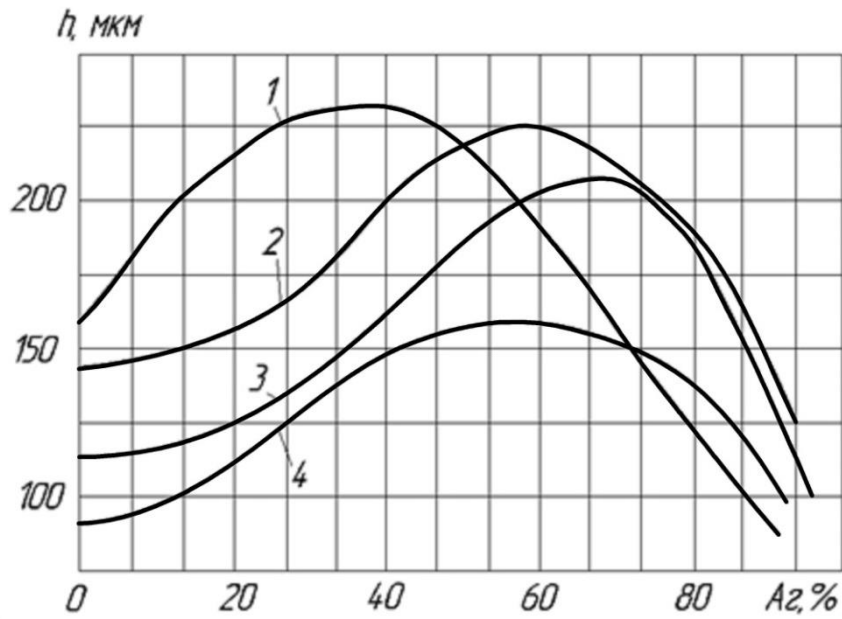


Рисунок 4.23 – Распределение аргона по толщине азотированного слоя:
 1 – сталь 20X; 2 – сталь 40X; 3 – сталь 38ХМЮА;
 4 – сталь 45X (среда 100 % N₂, $p = 265$ Па, $t = 6$ ч)

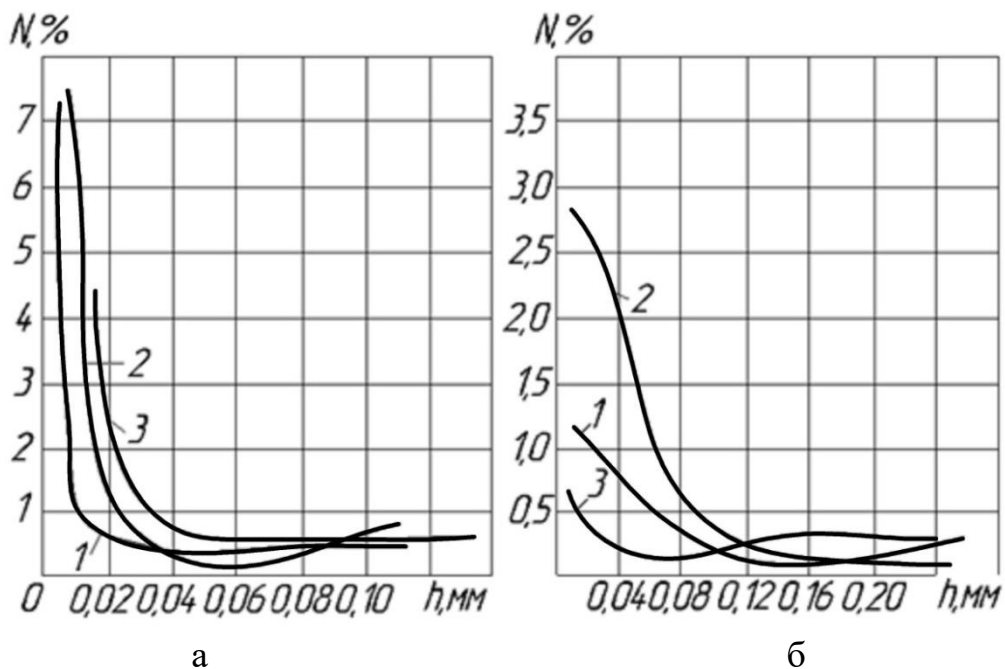


Рисунок 4.24 – Распределение азота по толщине диффузионного слоя в заготовке из сталей 38XC (а) и 13X11H2B2MФ (б):
 h – расстояние от поверхности; 1 – вакуумное азотирование;
 2 – ионное азотирование; 3 – газовое азотирование

Для высокохромистой стали 13X11H2B2MФ различие в насыщении азотом максимально при ионном азотировании, что коррелирует с данными (табл. 4.11) и характером распределения твердости по толщине диффузионного слоя (рис. 4.25).

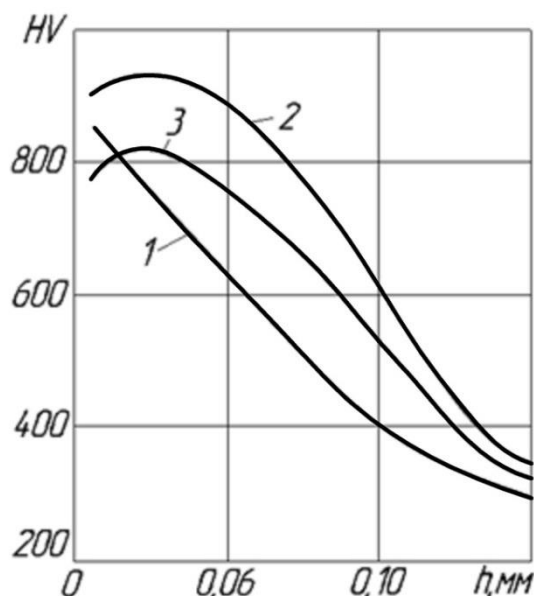


Рисунок 4.25 – Распределение твердости по толщине диффузионного слоя в заготовке из стали 13X11H2B2MФ:

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 4.11 – 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 уменьшается. Распределение твердости по толщине диффузионного слоя в заготовке из стали 13X11H2B2MФ представлено на рисунке 4.26. 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.

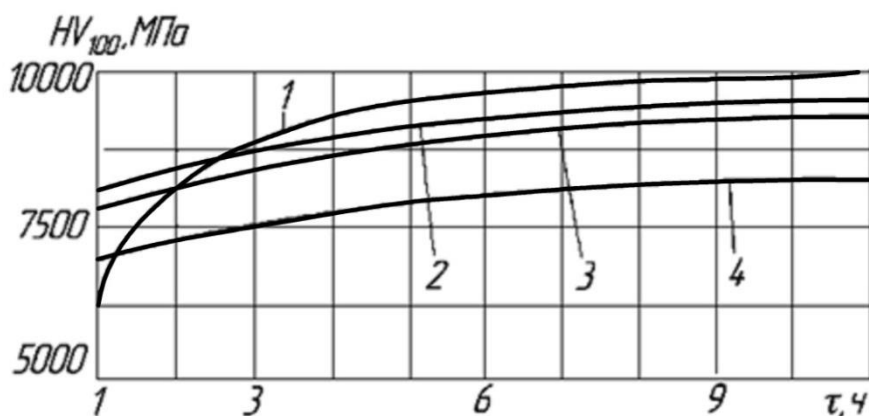


Рисунок 4.26 – Изменение твердости в зависимости от продолжительности процесса азотирования поверхности заготовки из стали 40X:

1 – $t = 500$ °C; 2 – $t = 550$ °C; 3 – $t = 600$ °C; 4 – $t = 650$ °C
(среда 75 % N_2 + 25 % Ag , $p = 250$ 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 °C).

Для повышения вязкости диффузионного слоя и износостойкости инструмента, работающего в условиях знакопеременных изгибающих нагрузок (сверла, развертки, зенкера), рекомендуется отпуск при 300 °C в течение 1 ч в камере азотирования.

4.3.2.2 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 CO₂-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. 4.12) [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 4.12 – Комбинированные методы улучшения качества поверхности с помощью лазерной обработки

Метод	Материал заготовки	Результат
1	2	3
Лазерное легирование легкими элементами и карбонитридами	Стали 40Х, 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 18000–20000 МПа. Износостойкость увеличивается в 15 раз по сравнению с износостойкостью при азотировании
Последовательные ионное и лазерное воздействия	Стали 95Х18 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 20Х43Л	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 40Х	Уменьшаются параметры шероховатости и волнистости
Борохромирование + лазерная обработка	Сталь 40Х	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 4.12

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
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 14000 до 18000 МПа. Устраняется скол боридного слоя с режущей кромки
Комплексное лазерное и криогенное упрочнение	Стали Х12, ХВГ, Р6М5	Твердость увеличивается от 730–830 после закалки и отпуска до 1100 НV
Комплексное лазерное и ультразвуковое упрочнение		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 поверхностей валов показали эффективность лазерного упрочнения (рис. 4.27 и 4.28 (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 HV666 ... 677, до упрочнения HV262.

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.

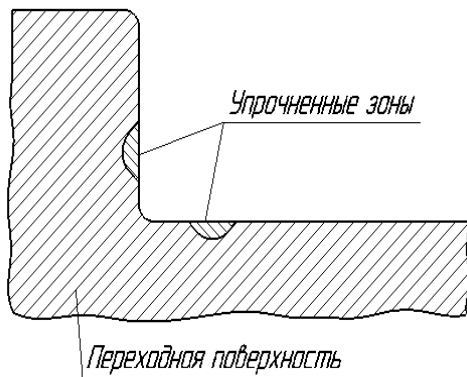


Рисунок 4.27 – Схема упрочнения галтелей валов

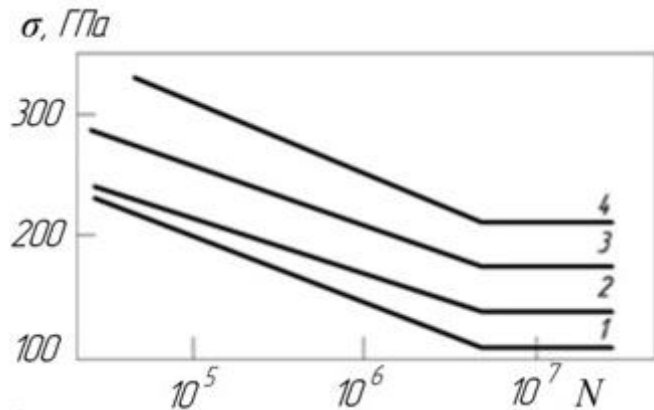


Рисунок 4.28 – Кривые усталости ступенчатых образцов из стали 45 в зависимости от вида упрочнения переходной поверхности вала

4.3.3 Нанесение покрытий

4.3.3.1 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 эрозийной стойкости, применяют различные способы нанесения металлических и неметаллических покрытий. Основные способы нанесения *гальванических покрытий* (рис. 4.29) приведены в таблице 4.13.

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.

Таблица 4.13 – 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 подслои 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 подслои при хромировании никелем покрывают также детали приборов, аппаратов, автомобилей

Окончание таблицы 4.13

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, находящихся 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 подслоя при серебрении, никелировании, лужении и других покрытиях



Рисунок 4.29 – 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* 1000–1100) 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 поверхно-

стью деталей, испытывающих значительные внутренние напряжения (например, в результате неправильной закалки).

В качестве электролита для хромирования обычно применяют хромовый ангидрид с добавками серной кислоты (табл.4.14). 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 4.14 – 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/дм^2 и температуре электролита $45\text{--}60 \text{ }^\circ\text{С}$ 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 дизелей 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, ре-

жущего 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 подвесного 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 пластикатом.

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 9Х13, Х9С2, а также сталям У 8, ШХ15, ХВГ, обработанным на высокую твердость.

4.3.3.2 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 сцепления 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/дм² 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 HRC₃57. 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 чугуну 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.

4.3.3.3 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 HV 2000–2500. 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.

4.3.3.4 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 микротвердостью 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.

4.3.3.5 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 4.15.

Таблица 4.15 – Состав ванны и режимы нанесения химических покрытий

Состав ванны и режим обработки	Покрытие			
	никелевое	хромовое	кобальтовое	никелько-бальтовое
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 гидравлических агрегатов из дуралюмина Д1. Химическое никелирование рекомендуется использовать для защиты деталей, работающих в условиях среднего и повышенного коррозионного воздействия, вместо много-

слоиных 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.

4.3.3.6 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). Рекомендуются 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 окрашиванию.

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 флю-

се; 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 4.16. 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 4.16 – 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 закаливающихся сталей) перед наплавкой	08	АН-348
Восстановление изношенных деталей	65Г	АН-60
Восстановление изношенных поверхностей деталей из стали 40X с твердостью <i>HВ</i> 300–400 до твердости <i>HВ</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	20X13, X20	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 метал-

ла 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.

Электродшлаковая 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). Электродшлаковая 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.

4.3.3.7 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. 4.30 и 4.31);

– напыление лазерным лучом – генерация процесса происходит с использованием оптико-квантового оборудования; локальное лазерное излучение позволяет проводить обработку сложных деталей (рис. 4.30 и 4.31);

– магнетронное напыление – выполняется при воздействии катодного распыления в плазменной среде для нанесения на поверхность тонких пленок; в технологии магнетронных способов обработки используются магнетроны (рис. 4.30 и 4.31);

– 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.

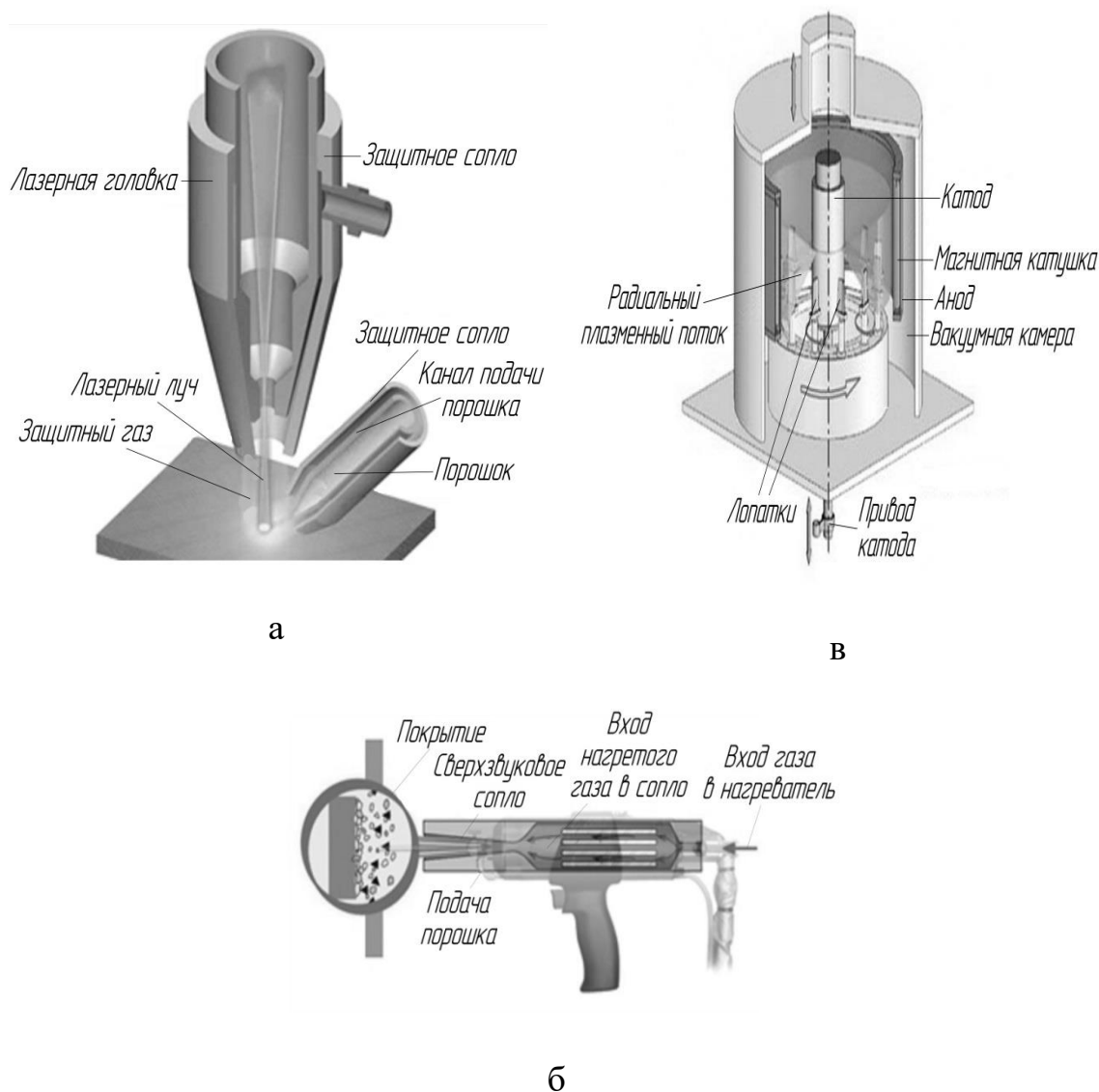


Рисунок 4.30 – Схемы напыления:
а – лазерного, б – газодинамического, в – магнетронного

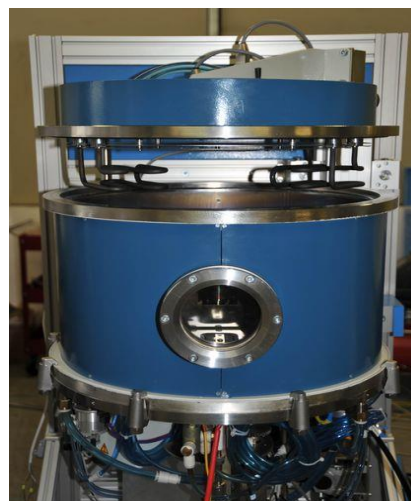
4.3.3.8 Покрытие деталей пластмассами

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.



а



в



б

Рисунок 4.31 – 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 – покры-

тие 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. 4.17).

4.3.3.9 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 4.17 – 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
Поливиниль-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.

4.4 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. Изобразите схему отделочно-упрочняющей обработки.
19. Какие Вам известны приемы обработки ППД?
20. Дайте определение понятию «дорнование».
21. На какие виды по источнику возникновения колебаний делится вибрационная обработка ППД?
22. Изобразите схемы деформирующих инструментов, работающих в условиях трения качения.
23. В чем суть комбинированной обработки при ППД?
24. Изобразите схемы формообразующего накатывания резьб, шлицев, зубчатых венцов.
25. Опишите суть и особенности дробеструйной обработки.
26. Опишите суть и особенности виброударной обработки.
27. Для чего применяется виброабразивная обработка?
28. В чем суть ионной имплантации?
29. Как ионная имплантация влияет на трение, изнашивание и твердость?
30. Какова эффективность обработки деталей ионной имплантацией?
31. Опишите процесс и область применения ионного азотирования.
32. Как температура влияет на глубину азотирования?
33. Изобразите график изменения твердости в зависимости от продолжительности процесса азотирования поверхности заготовки из стали.
34. В чем суть процесса лазерной обработки?
35. Назовите известные Вам комбинированные методы улучшения качества поверхности с помощью лазерной обработки и их результаты.
36. Перечислите основные виды гальванических покрытий и охарактеризуйте области их применения.
37. Опишите технологию и область применения хромирования.
38. Опишите технологию и область применения твердого никелирования.
39. Опишите технологию и область применения борирования.
40. Опишите технологию и область применения оксидирования и фосфатирования.
41. Опишите технологию и область применения никелевых, хромовых, кобальтовых и никель-кобальтовых покрытий.
42. Для чего применяется наплавка материала?
43. Какими способами производится напыление металлов?
44. В чем суть вакуумного и плазменного напыления металла?
45. В чем суть ионно-плазменного и магнетронного напыления?

46. Изобразите схемы установок газодинамического и магнетронного напыления.

47. Опишите технологию и область применения покрытия деталей пластмассами.

48. Какие требования применяются к лакокрасочным покрытиям?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Попок, Н. Н. Основы технологии машиностроения : учебное пособие / Н. Н. Попок, В. И. Абрамов. – Новополоцк : ПГУ, 2020. – 272 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. Попок, Н. Н. Основы технологии машиностроения. Практикум : учеб.-метод. пособие / Н. Н. Попок, Р. С. Хмельницкий, Е. В. Бритик. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2021. – 160 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. – 684с.
8. Научноёмкие технологии в машиностроении / А. Г. Суслов [и др.] ; под ред. А.Г. Суслова. – Москва : Машиностроение, 2012. – 528 с.
9. Технология машиностроения. Курсовое проектирование : учеб. пособие / М. М. Кане [и др.] ; под ред. М. М. Кане, В. К. Шелега. – Минск : Выш. шк., 2013. – 311 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. / В. Д. Мягков [и др.]. – 6-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Машиностроение. Ленингр. отделение, 1982. – Ч. I. – 543 с.
20. Допуски и посадки : справочник. В 2 ч. / В. Д. Мягков [и др.]. – 6-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Машиностроение, 1982. – Ч. II. – 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. / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1986. – Т. I. – 656 с.
25. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1986. – Т. II. – 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. Медве-

дев [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 ; 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. Мрочака. – 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. Фридлиндер [и др.] ; под общ. ред. И. Г. Фридлиндера. – 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. – 540с.

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. / В. А. Горохов, Н. В. Беляков, А. Г. Схиртладзе; под ред. В. А. Горохова. – Минск: Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2016. – Ч. 1. – 588 с.

101. Горохов, В. А. Материалы и их технологии: учебник : в 2 ч. / В. А. Горохов, Н. В. Беляков, А. Г. Схиртладзе; под ред. В. А. Горохова. – Минск: Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2016. – Ч. 2. – 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. Беленький, 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 : Интермет 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. – 200с.
118. Князева, С. И. Законы эволюции и самоорганизация сложных систем / С. И. Князева, С. П. Курдюшов. – Москва : Наука, 1994. – 325 с.
119. Siberleninka [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 : в 2 т. / С. В. Корнеев. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – Т. 1 – 336 с.

122. Корнеев С. В. Основы научных исследований. Эксперимент : в 2 т. / С. В. Корнеев. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – Т. 2 – 268 с.

123. Соловьев, В.П. Организация эксперимента / В. П. Соловьев. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 256 с.

124. Спириин, А. Н. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента : конспект лекций / Н. А. Спириин, 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. Теория вероятностей, статистика и анализ : в 2 т. / В. И. Романовский. – Москва : Машиностроение, 2011.– Т. 2 – 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.

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.	$O_{38} \angle \{O_n O_l\} \wedge O_{38} \angle O_l \vee O_n$
П ₃₀	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к двум плоскостям комплекта	$P_{30} \perp P_i \wedge \{O_n O_l\}$
П ₃₁	параллельности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта, образованного пересечением осей	$P_{31} // \{O_n O_l\}$
П ₃₂	параллельности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта	$P_{32} // P_i$
П ₃₃	перпендикулярности рассматриваемой плоскости оси комплекта	$P_{33} \perp O_l \vee O_n$
П ₃₄	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта и углового расположения к плоскости комплекта, образованного пересечением осей	$P_{34} \perp P_i \wedge P_{34} \angle \{O_n O_l\}$
П ₃₅	углового расположения рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта и перпендикулярности к плоскости комплекта, образованного пересечением осей	$P_{35} \angle P_i \wedge P_{35} \perp \{O_n O_l\}$
П ₃₆	углового расположения рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта, углового расположения к плоскости комплекта, образованного пересечением осей	$P_{36} \angle P_i \wedge P_{36} \angle \{O_n O_l\}$
П 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	$O_{47} \angle O_l \vee O_{47} \angle O_n$
Π_{40}	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к оси комплекта перпендикулярной плоскости комплекта баз	$\Pi_{40} \perp O_n$
Π_{41}	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к оси комплекта баз параллельной плоскости комплекта	$\Pi_{41} \perp O_l$
Π_{42}	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта баз и параллельности к оси комплекта параллельной плоскости комплекта	$\Pi_{42} \perp P_i \wedge \Pi_{42} // O_l$
Π_{43}	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта и углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта	$\Pi_{43} \perp P_i \wedge \Pi_{43} \angle O_l$
Π_{44}	углового расположения рассматриваемой плоскости к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта, и параллельности к оси комплекта, перпендикулярной плоскости комплекта	$\Pi_{44} \angle O_l \wedge \Pi_{44} // O_n$
Π_{45}	углового расположения рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта и параллельности к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта	$\Pi_{45} \angle P_i \wedge \Pi_{45} // O_l$
Π_{46}	углового расположения рассматриваемой плоскости к оси комплекта, перпендикулярной плоскости комплекта, и параллельности к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта	$\Pi_{46} \angle O_n \wedge \Pi_{46} // O_l$
Π_{47}	углового расположения рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта и углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта	$\Pi_{47} \angle P_i \wedge \Pi_{47} \angle O_l$
Π_{48}	углового расположения к оси комплекта, перпендикулярной плоскости комплекта, и углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта	$\Pi_{48} \angle O_n \wedge \Pi_{48} \angle O_l$

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

База	Наименование	Код	Обозначение на схеме установки		
			сбоку	сверху	снизу
1	2	3	4	5	6
<i>Установочная</i>	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.		—	—
<i>Направляющая</i>	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.	—	—	—
<i>Опорная</i>	Опора точечная неподвижная с плоской поверхностью	Тр 3.1.			
	Опора точечная неподвижная со сферической поверхностью	Тр 3.2.			
	Опора точечная неподвижная 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 клиновья	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.		–	–
	Центры: неподвижный и вращающийся	Тр 5.14.		–	–
	Центры: рифленый и вращающийся	Тр 5.15.		–	–
	Центры: плавающий и вращающийся	Тр 5.16.		–	–
	Трехкулачковый патрон и вращающийся центр	Тр 5.17.		–	–
<i>Тройная опорная</i>	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 – Состав баз № 1

Пра- вило	Содержание
1	2
O10	Если приоритетным является 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 приоритетным является допуск перпендикулярности относительно плоскости P_j либо плоскости P_k
O11	Если приоритетными являются допуск 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 тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_{j(i)}$ – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость P_k – одиночной (опорной). Аналогично определяются компоненты комплекта, если приоритетным является допуск параллельности оси относительно плоскостей P_i и P_k , P_j и P_k
O12	Если приоритетными являются допуск 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 тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_{j(k)}$ – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость $P_{k(j)}$ – одиночной (опорной). В том случае если численное значение допуска углового расположения меньше численного значения допуска параллельности, то в качестве тройной однонаправленной (установочной) базы назначается плоскость $P_{j(k)}$, двойной однонаправленной (направляющей) – P_i , одиночной (опорной) – $P_{k(j)}$. Аналогично определяются компоненты комплекта, если приоритетным является допуск параллельности оси относительно плоскостей P_j и P_k и углового расположения относительно $P_{i(k)}$ и $P_{i(j)}$

Окончание таблицы Г.1.

1	2
П10	Если приоритетными являются допуск 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 тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость P_j – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость P_k – одиночной (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 тройной однонаправленной (установочной) базы назначается плоскость P_j , двойной однонаправленной (направляющей) – P_i , одиночной (опорной) – P_k . Аналогично определяются компоненты комплекта, если приоритетным является допуск параллельности оси относительно плоскостей P_i и P_k , P_j и P_k
П11	Если приоритетным является 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 тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_{j(k)}$ – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость $P_{k(j)}$ – одиночной (опорной). Аналогично определяются компоненты комплекта, если приоритетным является допуск параллельности относительно плоскости P_j либо плоскости P_k
П12	Если приоритетными являются допуск 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 тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_{j(k)}$ – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость $P_{k(j)}$ – одиночной (опорной). В том случае если численное значение допуска углового расположения меньше численного значения допуска параллельности, то в качестве тройной однонаправленной (установочной) базы назначается плоскость $P_{j(k)}$, двойной однонаправленной (направляющей) – P_i , одиночной (опорной) – $P_{k(j)}$. Аналогично определяются компоненты комплекта, если приоритетным является допуск перпендикулярности плоскости относительно плоскостей P_j и P_k , углового расположения относительно $P_{i(k)}$ и $P_{i(j)}$

Таблица Г.2 – Состав баз № 2

Правило	Содержание
1	2
О20	Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси O_{20} относительно плоскости P_i , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость P_j – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_1 – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_1 назначается двойной разнонаправленной (двойной опорной) базой, а плоскость P_j – одиночной (опорной)

Продолжение таблицы Г.2

1	2
O21	Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси O_{21} относительно плоскости P_j , а допуск линейного размера относительно P_i меньше допуска линейного размера относительно O_i , то плоскость P_j назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость P_i – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_i – одиночной (опорной). Если допуск линейного размера относительно P_i больше допуска линейного размера относительно O_i , то плоскость P_j назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_i – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость P_i – одиночной (опорной) базами. В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_i , то ось O_i назначается четверной (двойной направляющей), базой плоскости P_j и P_i назначаются одиночными (опорными) базами
O22	Если приоритетным является допуск параллельности оси O_{22} относительно оси O_i , то ось O_i назначается четверной (двойной направляющей), базой плоскости P_i и P_j назначаются одиночными (опорными) базами. В частности, точка пересечения P_i и O_i может быть тройной разнонаправленной (тройной опорной) базой (в зависимости от возможной реализации), ось O_i – двойной разнонаправленной (двойной опорной), а P_j – одиночной (опорной)
O23	Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси O_{23} относительно O_i и параллельности относительно P_j , то плоскость P_j назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_i – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость P_i – одиночной (опорной)
O24	Если приоритетными являются допуск 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 тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_{j(i)}$ – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_i – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_i , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_i назначается двойной разнонаправленной (двойной опорной) базой, а плоскость P_i – одиночной (опорной)
O25	Если приоритетными являются допуск 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 тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость P_j – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_i – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_i , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_i назначается двойной разнонаправленной (двойной опорной) базой, а плоскость P_j – одиночной (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 тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость P_i – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_i – одиночной (опорной)

Продолжение таблицы Г.2

1	2
О27	Если приоритетными являются допуск параллельности оси O_{27} относительно плоскости P_j и допуск углового расположения относительно оси O_1 , то плоскость P_j назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_1 – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость P_i – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то ось O_1 назначается четверной (двойной направляющей) базой, а плоскости P_i и P_i – одиночными (опорными)
О29	Если приоритетными являются допуск 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 тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость P_j – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_1 – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то O_1 назначается двойной разнонаправленной (двойной опорной) базой, а плоскости P_j и P_i – одиночной (опорной) и тройной однонаправленной (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 тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость P_i – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_1 – одиночной (опорной)
П20	Если приоритетными являются допуск 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 тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость P_j – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_1 – одиночной (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 тройной однонаправленной (установочной) базы назначается плоскость P_j , двойной однонаправленной (направляющей) – P_i , одиночной (опорной) – ось O_1
П21	Если приоритетным является допуск параллельности плоскости Π_{21} относительно плоскости P_j , то плоскость P_j назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость P_i – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_1 – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то O_1 назначается четверной (двойной направляющей) базой, а плоскости P_j и P_i – одиночными (опорными)
П22	Если приоритетным является допуск параллельности плоскости Π_{22} относительно плоскости P_i , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость P_j – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_1 – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость P_j совпадает с осью O_1 , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_1 назначается двойной разнонаправленной (двойной опорной) базой, а плоскость P_i – одиночной (опорной)
П23	Если приоритетным является допуск перпендикулярности плоскости Π_{23} относительно оси O_1 , то ось O_1 назначается четверной (двойной направляющей) базой, плоскости P_i и P_j назначаются одиночными (опорными) базами

Окончание таблицы Г.2

1	2
П24	<p>Если приоритетным является допуск параллельности плоскости Π_{24} относительно O_1 и перпендикулярности относительно R_j, то плоскость R_j назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_1 – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость R_i – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость R_j совпадает с осью O_1, то O_1 назначается четверной (двойной направляющей) базой, а плоскости R_i и R_j – одиночными (опорными)</p>
П25	<p>Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости Π_{25} относительно плоскости R_j и допуск углового расположения относительно плоскости R_i, а численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости R_j больше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости R_i, то плоскость R_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость R_j двойной однонаправленной (направляющей), ось O_1 одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость R_j совпадает с осью O_1, то плоскость R_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_1 назначается двойной разнонаправленной (двойной опорной) базой, а плоскость R_j – одиночной (опорной). Если численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости R_j меньше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости R_i, то плоскость R_j назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость R_i – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_1 – одиночной (опорной)</p>
П26	<p>Если приоритетными являются допуск перпендикулярности Π_{26} относительно плоскости R_i и допуск углового расположения относительно плоскости R_j, а численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости R_i меньше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости R_j, то плоскость R_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость R_j – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_1 – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость R_j совпадает с осью O_1, то O_1 назначается двойной разнонаправленной (двойной опорной) базой, а плоскости R_j и R_i – одиночной (опорной) и тройной однонаправленной (установочной) соответственно. Если численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости R_i больше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости R_j, то плоскость R_j назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость R_i – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_1 – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость R_j совпадает с осью O_1, то O_1 назначается четверной (двойной направляющей) базой, а плоскости R_j и R_i – одиночными (опорными)</p>
П27	<p>Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости Π_{27} относительно плоскости R_j и допуск углового расположения относительно оси O_1, а численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости R_j меньше численного значения допуска углового расположения относительно оси O_1, то плоскость R_j назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_1 – направляющей, плоскость R_i – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость R_j совпадает с осью O_1, то ось O_1 назначается четверной (двойной направляющей) базой, а плоскости R_i и R_j – одиночными (опорными)</p>

Таблица Г.3 – Состав баз № 3

Пра вило	Содержание
1	2
О30	Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси O_{30} относительно плоскости P_i , то плоскость P_j назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, одна из осей – двойной разнонаправленной (двойной опорной), вторая – одиночной (опорной)
О31	Если приоритетным является допуск параллельности оси O_{31} относительно оси $O_{l(n)}$, то ось $O_{l(n)}$ назначается четверной (двойной направляющей) базой, ось $O_{n(l)}$ и плоскость P_i назначаются одиночными (опорными) базами
О32	Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси O_{32} относительно плоскости, проходящей через две оси $\{O_l O_n\}$, то ось, от которой приоритетным является размер до обрабатываемой оси, назначается четверной (двойной направляющей) базой, другая ось и плоскость назначаются одиночными (опорными) базами
О33	Если приоритетными являются допуск параллельности оси O_{33} относительно плоскостей P_i и плоскости проходящей через две оси $\{O_l O_n\}$, то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, одна из осей двойной разнонаправленной (двойной опорной), вторая одиночной (опорной)
О34	Если приоритетными являются допуск параллельности оси O_{34} относительно плоскости, проходящей через две оси $\{O_l O_n\}$, и допуск углового расположения относительно плоскости P_i , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, одна из осей – двойной разнонаправленной (двойной опорной), вторая – одиночной (опорной)
О36	Если приоритетными являются допуск параллельности оси O_{36} относительно плоскости $\{O_l O_n\}$ и допуск углового расположения относительно оси $O_{l(n)}$, то ось $O_{l(n)}$ назначается четверной (двойной направляющей) базой, одна из осей и плоскость P_i – одиночными (опорными)
П30	Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости Π_{30} относительно плоскости $\{O_l O_n\}$ и P_i и численное значение допуска перпендикулярности относительно P_i меньше численного значения допуска перпендикулярности относительно $\{O_l O_n\}$, то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, одна из осей, от которой приоритетным является размер, – двойной разнонаправленной (двойной опорной), вторая – одиночной (опорной). Если численное значение допуска перпендикулярности относительно P_i больше численного значения допуска перпендикулярности относительно $\{O_l O_n\}$, то плоскость $\{O_l O_n\}$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, P_i – двойной однонаправленной (направляющей), одна из осей, от которой приоритетным является размер – одиночной (опорной)
П31	Если приоритетным является допуск параллельности плоскости Π_{31} относительно плоскости $\{O_l O_n\}$, то одна из осей назначается четверной (двойной направляющей) базой, вторая ось и плоскость P_i назначаются одиночными (опорными) базами
П32	Если приоритетным является допуск параллельности плоскости Π_{32} относительно плоскости P_i , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, одна из осей – двойной разнонаправленной (двойной опорной), вторая – одиночной (опорной)

Окончание таблицы Г.3

П33	Если приоритетным является допуск перпендикулярности плоскости P_{33} относительно одной оси, то эта ось назначается четверной (двойной направляющей) базой, вторая ось и плоскость P_i назначаются одиночными (опорными) базами
П34	Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости P_{34} относительно плоскости P_i и углового расположения относительно плоскости $\{O_1O_n\}$ и численное значение допуска перпендикулярности относительно P_i меньше численного значения допуска углового расположения относительно $\{O_1O_n\}$, то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, одна из осей, от которой приоритетным является размер, – двойной разнонаправленной (двойной опорной), вторая – одиночной (опорной). Если численное значение допуска перпендикулярности относительно P_i больше численного значения допуска углового расположения относительно $\{O_1O_n\}$, то плоскость $\{O_1O_n\}$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, P_i – двойной однонаправленной (направляющей), одна из осей, от которой приоритетным является размер – одиночной (опорной)
П35	Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости P_{35} относительно плоскости $\{O_1O_n\}$ и углового расположения относительно плоскости P_i $\{O_1O_n\}$ и численное значение допуска углового расположения относительно P_i меньше численного значения допуска перпендикулярности относительно $\{O_1O_n\}$, то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, одна из осей, от которой приоритетным является размер, – двойной разнонаправленной (двойной опорной), вторая – одиночной (опорной). Если численное значение допуска углового расположения относительно P_i больше численного значения допуска перпендикулярности относительно $\{O_1O_n\}$, то плоскость $\{O_1O_n\}$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, P_i – двойной однонаправленной (направляющей) одна из осей, от которой приоритетным является размер – одиночной (опорной)

Таблица Г.4 – Состав баз № 4

Правило	Содержание
1	2
О40	Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси O_{40} относительно плоскости P_i , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_1 – двойной однонаправленной (направляющей), O_n – одиночной (опорной). В том случае, если ось O_1 лежит в плоскости P_i , то ось назначается четверной (двойной направляющей) базой, а другая ось и плоскость – одиночными (опорными)
О41	Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси O_{41} относительно оси O_1 и параллельности относительно плоскости P_i , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_1 – двойной однонаправленной (направляющей), O_n – одиночной (опорной). В том случае, если ось O_1 лежит в плоскости P_i , то указанная ось назначается четверной (двойной направляющей) базой, а другая ось и плоскость – одиночными (опорными)

Продолжение таблицы Г.4

1	2
О42	Если приоритетным является допуск параллельности оси O_{42} относительно оси O_1 , то ось O_1 назначается четверной (двойной направляющей) базой, O_n и P_i – одиночными (опорными). В частности, если плоскость совпадает с O_n , то O_n принимается в качестве двойной разнонаправленной (двойной опорной) базы
О43	Если приоритетным является допуск параллельности оси O_{43} относительно оси O_n , то ось O_n назначается четверной (двойной направляющей) базой, O_1 и P_i – одиночными (опорными). В частности, если плоскость совпадает с O_1 , то O_1 принимается в качестве двойной разнонаправленной (двойной опорной) базы
О44	Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси O_{44} относительно осей O_n и O_1 , а ось лежит в плоскости и численное значение допуска относительно $O_{n(l)}$ меньше численного значения допуска относительно $O_{l(n)}$, то ось $O_{n(l)}$ назначается четверной (двойной направляющей) базой, а $O_{l(n)}$ – двойной разнонаправленной (двойной опорной)
О45	Если приоритетными являются допуск параллельности оси O_{45} относительно плоскости P_i и углового расположения относительно оси O_1 , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_1 – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_n – одиночной (опорной). В том случае, если ось O_1 лежит в плоскости P_i , то указанная ось назначается четверной (двойной направляющей) базой, а другая ось и плоскость – одиночными (опорными)
П42	Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости Π_{42} относительно плоскости P_i и параллельности относительно оси O_1 , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_1 – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_n – одиночной (опорной). В том случае, если ось O_1 лежит в плоскости P_i , то указанная ось назначается четверной (двойной направляющей) базой, а другая ось и плоскость – одиночными (опорными)
П43	Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости Π_{43} относительно плоскости P_i и углового расположения относительно оси O_1 , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_1 – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_n – одиночной (опорной). В том случае, если ось O_1 лежит в плоскости P_i , то указанная ось назначается четверной (двойной направляющей) базой, а другая ось и плоскость – одиночными (опорными)
П44	Если приоритетными являются допуск параллельности плоскости Π_{44} относительно оси O_n и углового расположения относительно оси O_1 , а ось лежит в плоскости, и численное значение допуска параллельности плоскости относительно оси O_n меньше численного значения допуска углового расположения относительно оси O_1 , то ось O_n назначается четверной (двойной направляющей) базой, ось O_1 – одиночной (опорной). Если численное значение допуска параллельности плоскости относительно оси O_n больше численного значения допуска углового расположения относительно оси O_1 , то ось O_1 назначается четверной (двойной направляющей) базой, ось O_n – одиночной (опорной)

Окончание таблицы Г.4

1	2
П45	Если приоритетными являются допуск углового расположения плоскости Π_{45} относительно плоскости P_i и параллельности относительно оси O_i , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_i – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_n – одиночной (опорной). В том случае, если ось O_i лежит в плоскости P_i , то указанная ось назначается четверной (двойной направляющей) базой, а другая ось и плоскость – одиночными (опорными)
П46	Если приоритетными являются допуск параллельности плоскости Π_{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 четверной (двойной направляющей) базой, ось O_n – одиночной (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 четверной (двойной направляющей) базой, ось O_i – двойной разнонаправленной (двойной опорной)

Приложение Д

Таблица Д.1 – 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		
<i>Установочная</i>	<i>Тр 1.1.</i>	x	x	x			x	x					x	x		x		x	x	x		
	<i>Тр 1.2.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x		x		x	x	x		
	<i>Тр 1.3.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		x			x	x		
	<i>Тр 1.4.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		x		x				
	<i>Тр 1.5.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x		x				x		
	<i>Тр 1.6.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x			x	x		
	<i>Тр 1.7.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x		x		x		
	<i>Тр 1.8.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x				x				x		
	<i>Тр 1.9.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x			x	x	x		x		x	x		
	<i>Тр 1.10.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x			x	x	x		x		x		
	<i>Тр 1.11.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x		x		x	x		
<i>Направляющая</i>	<i>Тр 2.1.</i>	x	x	x			x	x					x	x		x		x	x	x		
	<i>Тр 2.2.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x			x	x	x		x		x	x		
	<i>Тр 2.3.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		x	x		x	x		
	<i>Тр 2.4.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x				
	<i>Тр 2.5.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x		x	x			x		
	<i>Тр 2.6.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x			x	x		
	<i>Тр 2.7.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x		x				
	<i>Тр 2.8.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x				x				x		
	<i>Тр 2.9.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x		x		x	x		
	<i>Тр 2.10.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		
<i>Опорная</i>	<i>Тр 3.1.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x			x		x	x		x		
	<i>Тр 3.2.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x				x		x	x	x			
	<i>Тр 3.3.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x				x		x	x		x		
	<i>Тр 3.4.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x				x		x			x		
	<i>Тр 3.5.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x				x		x		x			
	<i>Тр 3.6.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x			x		x			x		
	<i>Тр 3.7.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x		x	x		x	x		
	<i>Тр 3.8.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x		x	x		
	<i>Тр 3.9.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x			x	x	x			x	x		
	<i>Тр 3.10.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x			x	x	x		

Окончание таблицы Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
<i>Двойная опорная</i>	<i>Тр 4.1.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x	x	x	x	
	<i>Тр 4.2.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x		x		x	x	x	x	
	<i>Тр 4.3.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x		x	x	x	x	
	<i>Тр 4.4.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x			x	x	x	x	
	<i>Тр 4.5.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x			x	x	x	x	
	<i>Тр 4.6.</i>			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	
	<i>Тр 4.7.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	
	<i>Тр 4.8.</i>	x	x	x				x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	
	<i>Тр 4.9.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x			x	x	x	x
	<i>Тр 4.10.</i>			x	x	x	x	x	x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.11.</i>			x	x	x			x	x		x	x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.12.</i>			x	x	x			x	x		x	x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.13.</i>			x	x	x			x	x		x	x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.14.</i>			x	x	x			x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.15.</i>			x	x	x			x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.16.</i>			x	x	x			x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.17.</i>			x	x	x			x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.18.</i>			x	x	x			x	x			x	x		x		x	x	x	x
<i>Двойная направляющая</i>	<i>Тр 5.1.</i>					x	x		x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	
	<i>Тр 5.2.</i>			x	x	x			x	x	x		x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 5.3.</i>	x	x	x			x		x	x			x	x		x		x	x	x	
	<i>Тр 5.4.</i>			x	x	x			x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 5.5.</i>				x	x			x	x			x	x	x			x	x		
	<i>Тр 5.6.</i>			x	x	x			x	x			x	x		x		x	x	x	
	<i>Тр 5.7.</i>			x	x	x			x	x			x	x		x		x	x	x	
	<i>Тр 5.8.</i>			x	x	x			x	x			x	x		x		x	x	x	
	<i>Тр 5.9.</i>			x	x	x			x	x			x	x		x		x	x	x	
	<i>Тр 5.10.</i>			x	x	x			x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x
	<i>Тр 5.11.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x		x	x	x	
	<i>Тр 5.12.</i>			x	x	x			x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 5.13.</i>			x	x	x			x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 5.14.</i>	x	x	x	x	x	1/d>2	1/d>2	1/d>2	1/d>2	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
	<i>Тр 5.15.</i>	x	x	x	x	x	1/d>2	1/d>2	1/d>2	1/d>2	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
	<i>Тр 5.16.</i>	x	x	x	x	x	1/d>2	1/d>2	1/d>2	1/d>2	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
	<i>Тр 5.17.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
<i>Тройная опорная</i>	<i>Тр 6.1.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	
	<i>Тр 6.2.</i>	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

Пример проектирования универсально-сборного приспособления для оригинальной корпусной детали

На рисунке Е.1 показана геометрическая модель состояния заготовки детали «Рукав 422-240711» (ОАО «Вистан») на предварительном этапе, а также соответствующие графы. Деталь состоит из 6 функциональных модулей, образующих основную и вспомогательные сборочные базы, трех крепёжных и ряда объединительных функциональных модулей.

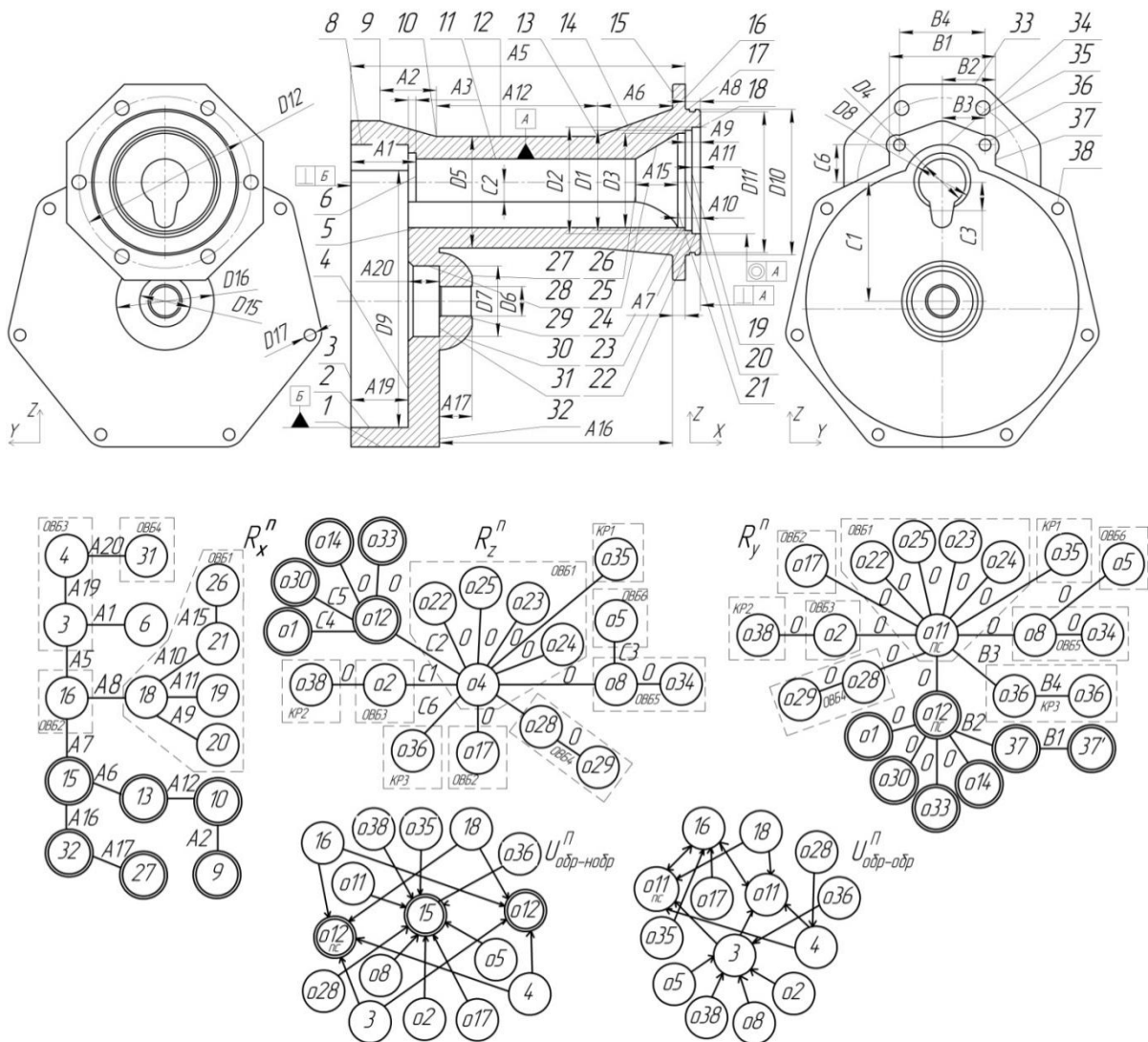


Рисунок Е.1 – ГМЗ на предварительном этапе

Фрагмент таблицы возможных составов баз ориентации для детали представленной на рисунке Е.1 приведен в таблице Е.1.

Таблица Е.1 – Фрагмент таблицы составов баз ориентации

o11 (o22, o23 ...)	o17	o8	o5	18	16	...
o12-o12пс-15	o11-o11пс-15	o11-o11пс-15	o8-o8-15	o12-o12пс-15	o12-o12пс-15	...
o12-o12пс-16	o11-o11пс-16	o11-o11пс-16	o8-o8-3	o11-o11пс-16	o11-o11пс-16	
o17-o17-15		o5-o5-15				
o17-o17-16		o5-o5-16				
o2-o2-15						
...						

Пусть необходимо спроектировать приспособление обработки функциональных модулей ОВБ1,2 и КР1 (поверхности o11 (o22, o23 ...), o17, 1618, o35) от комплекта баз o12-o12пс-15 (рисунок Е.1, таблица Е.1). Состав баз ориентации – две плоскости и ось, лежащая в одной из плоскостей. Определение числа связей (комплекта технологических баз) сводится к продукционной модели О22: если приоритетным является допуск параллельности (соосности) относительно оси O_1 , то ось O_1 назначается четверной (двойной направляющей) базой, плоскости P_i и P_j назначаются одиночными (опорными) базами (приложение Б).

На рисунке Е.2 представлена схема базирования для рассматриваемой заготовки.

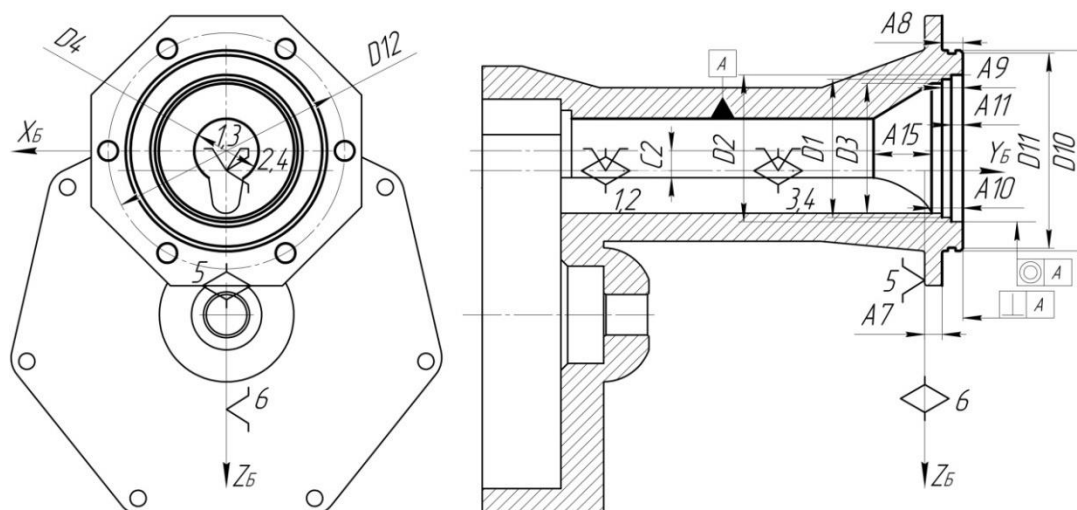


Рисунок Е.2 – Схема базирования

Схема установки для рассматриваемой заготовки может иметь вид, представленный на рисунке Е.3.

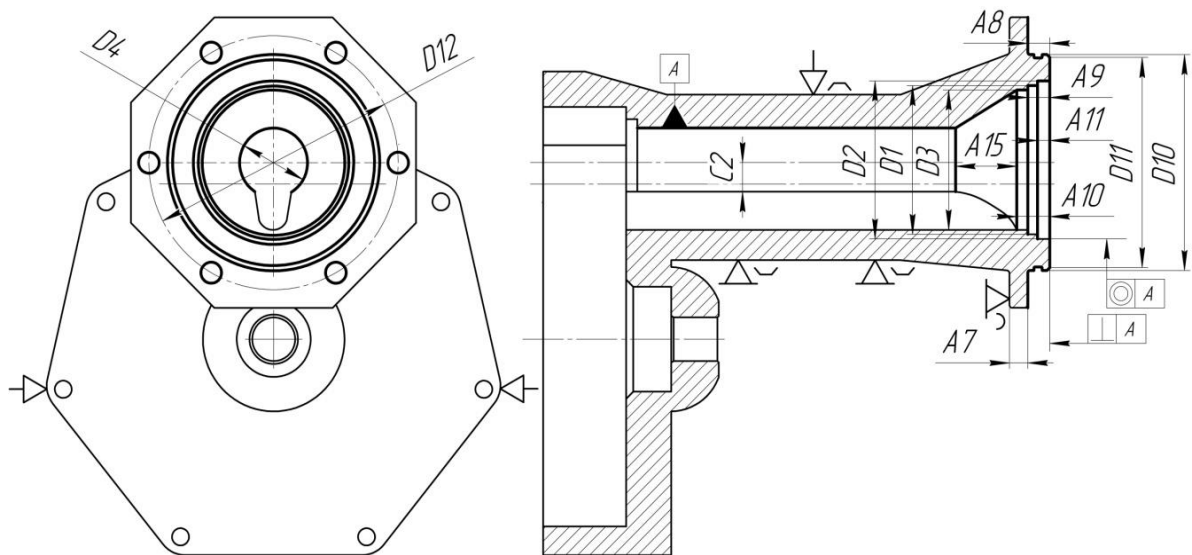


Рисунок Е.3 – Схема установки

\triangle , \triangle , \rightarrow – условные обозначения призматической опоры, точечной опоры со сферической поверхностью и точки приложения и направления силы закрепления

Схема установки является заданием на выбор или проектирование станочного приспособления (рисунки Е.4–Е.5).

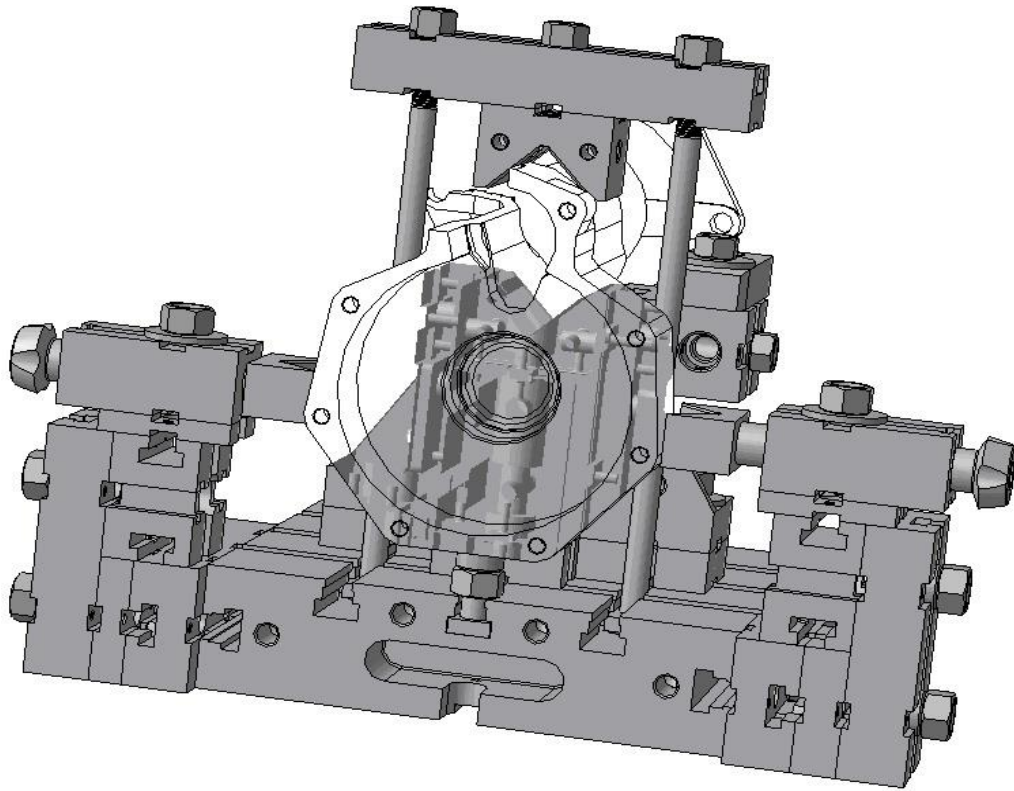


Рисунок Е.4 – Трехмерная модель приспособления спроектированная по разработанной схеме установки

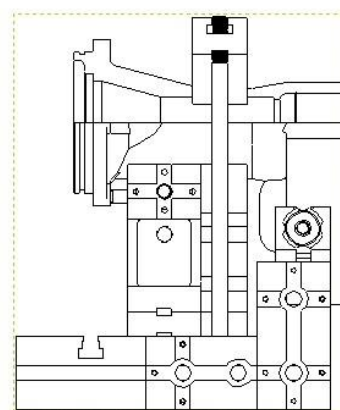
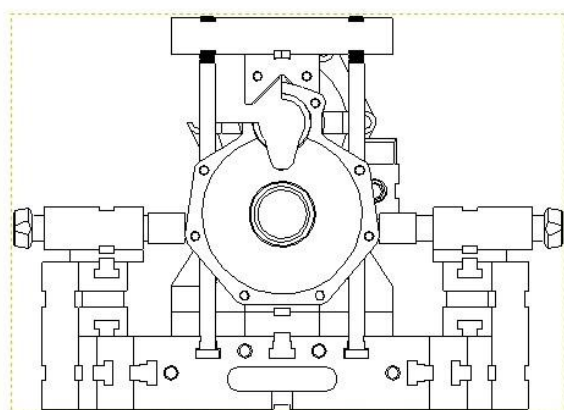
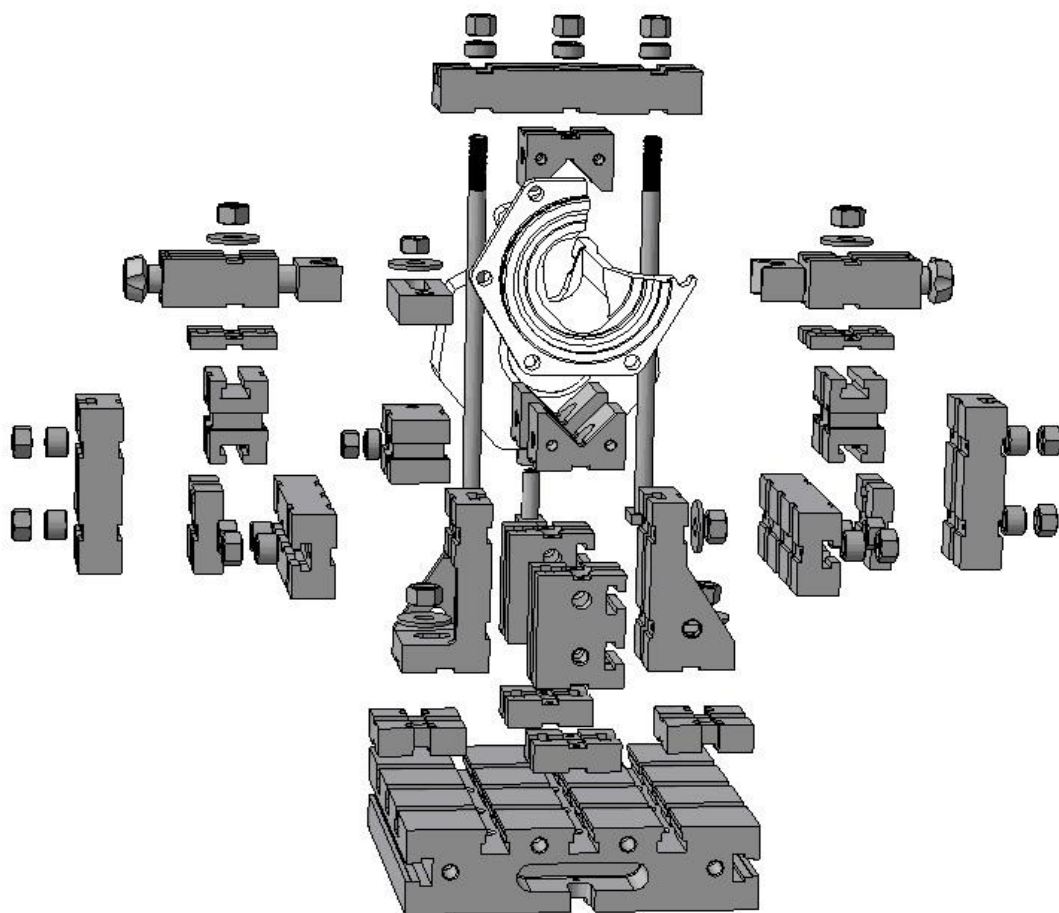


Рисунок Е.5 – Ассоциативные схемы сборки и контурное изображение универсально-сборного приспособления

Приложение Ж Качество поверхностей заготовок

Таблица Ж.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 Ж.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 Ж.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
От 180 до 500	1000	1500	1500	1250
От 500 до 1250	1500	2000	2000	1500
От 1250 до 3150	2000	2500	2500	-
От 3150 до 6300	2500	3000	3000	-
От 6300 до 10000	-	3500	3500	-

Таблица Ж.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 Черновая	11-12	32	32
	12	50	50
Отливки II класса точности			
Черновая Получистовая	14	100	100
	12	50	50
Отливки III класса точности			
Обдирочная Черновая Получистовая	16-17	320	320
	14-15	250	240
	11-12	100	100
Отливки I, II, III классов точности			
Чистовая Тонкая	10-11	25	25
	7-9	5	5
Литье в кокиль и центробежное			
Однократная Черновая Чистовая Тонкая	11	25	25
	12	50	50
	10	20	20
	7-9	5	5
Литье в оболочковые формы			
Однократная Черновая Чистовая Тонкая	10-11	25	25
	11	20	20
	10	10	10
	7-9	5	5
Литье по выплавляемым моделям			
Однократная Тонкая	10	15	20
	7-9	2,5	5
Шлифование отливок, получаемых различными способами			
Однократная Черновая Чистовая Тонкая	7	5	10
	8-9	10	20
	6-8	5	15
	5-6	0,63	-

Таблица Ж.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 Ж.6 – Качество поверхности поковок, изготавливаемых штамповкой

Масса поковки, кг	Rz	h
	мкм	
До 0,25	80	150
От 0,25 до 4	160	200
От 4 до 25	200	250
От 25 до 40	250	300
От 40 до 100	320	350
От 100 до 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 Ж.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 Ж.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 Ж.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 Ж.10 – Качество поверхности (мкм) поперечно-винтового проката

Диаметр проката, мм	Rz при точности прокатки		h
	повышенной	нормальной	
До 10	63	100	100
От 10 до 18	100	200	180
От 18 до 30	160	320	300
От 30 до 50	320	500	500
От 50 до 80	500	800	800
От 80 до 120	800	1250	1200
От 120 до 180	1250	1600	2000

Примечание. Качество поверхности поперечно-винтового проката указано после термической обработки (нормализации или улучшения).

Таблица Ж.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 Ж.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
		От 6 до 10		32	50
		От 10 до 18		40	60
		От 18 до 50		50	70
		От 50 до 80		63	80
Глубокое сверление специальными сверлами		От 3 до 10	12	16	25
		От 10 до 18		20	30
		От 18 до 30		32	40
		От 30 до 50		50	50
Зенкерование	однократное	До 80	10	32	40
		От 18 до 30		40	40
	черновое	От 30 до 80	11	50	50
		До 30		32	30
чистовое	От 30 до 80	10	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	От 6 до 80	7	0,63	-
	хонингование	До 80	6-7	0,16	-

Приложение И

Таблица И.1 – Допуски для размеров до 10000 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 10000	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 И.1

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 качества										
	40	64	100	160	150	400	640	1000	1600	2500

** Квалитеты 14–17 для размеров менее 1 мм не предусмотрены

Учебное издание

Шелег Валерий Константинович
Попок Николай Николаевич
Беляков Николай Владимирович

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

В трех томах

Том 2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Редактор *Р.А. Никифорова*
Корректор *А.В. Пухальская*
Компьютерная верстка *Н.В. Беляков*

Подписано к печати 03.01.2024. Формат 60x90¹/₁₆. Усл. печ. листов 23,4.
Уч.-изд. листов 30,1. Тираж 60 экз. Заказ № 4.

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 2014г.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №3/1497 от 30 мая 2017г.