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

Витебский государственный технологический университет

С.С. Клименков

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ И ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Учебник

Допущено
Министерством образования Республики Беларусь в качестве учебника для студентов учреждения высшего образования по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств (машиностроение и приборостроение)»

Витебск
2017

УДК 539.2
ББК 22.25
К 49

Рецензенты:

профессор кафедры «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета,
д.т.н. Каштальян И.А.;

зав. кафедрой «Технология машиностроения» Брестского государственного технического университета,
доцент, к.т.н. Медведев О.А.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 3 от 30.03.2017.

Витебский государственный технологический университет

Клименков, С. С.
К 49 Современные технологии в машиностроении и приборостроении : учебник / С. С. Клименков – Витебск : УО «ВГТУ», 2017. – 311 с.
ISBN 978-985-481-506-0

В учебнике рассмотрены новейшие электрофизические и физико-технические технологии обработки материалов: лазерная, плазменная, электроэрозионная, ультразвуковая. Изложены основы высоких технологий в области обработки металлов давлением, литейного сварочного производства, механической обработки.

Учебник предназначен для студентов машиностроительных специальностей, магистрантов, аспирантов, а также учащихся технических колледжей и слушателей системы повышения квалификации инженерно-технических работников.

УДК 539.2
ББК 22.25

ISBN 978-985-481-506-0

© УО «ВГТУ», 2017

Содержание

Введение 7
Глава 1. Электрофизические и физико-технические методы обработки материалов 8
1.1 Лазерная обработка 8
1.1.1 Принцип работы лазеров 8
1.1.1.1 Параметры и характеристики лазеров 9
1.1.1.2 Схемы и конструкции лазеров 11
1.1.1.3 Лазерные комплексы 17
1.1.2 Технологии лазерной обработки материалов 20
1.1.2.1 Лазерная резка металлов 20
1.1.2.2 Лазерная резка неметаллических материалов 27
1.1.2.3 Лазерная обработка отверстий 28
1.1.2.4 Лазерная термическая обработка 31
1.2 Плазменная обработка 33
1.2.1 Физическая сущность генерирования плазмы 33
1.2.2 Плазмообразующие среды 35
1.2.3 Ввод компонентов плазмообразующей среды в электрическую дугу 36
1.2.4 Устройство плазмотронов 37
1.2.5 Плазменная резка 39
1.2.6 Плазменная сварка 42
1.2.7 Плазменная наплавка 44
1.2.7.1 Плазменная наплавка проволокой 45
1.2.7.2 Плазменно-порошковая наплавка 47
1.3 Электроэрозионная обработка материалов 49
1.3.1 Физические основы электроэрозионной обработки материалов 50
1.3.2 Качество обработанной поверхности 53
1.3.3 Основные параметры электроэрозионной обработки 56
1.3.4 Виды электроэрозионной обработки 59
1.3.5 Электроды-инструменты 63
1.3.5.1 Особенности конструкций электродов-инструментов 63
1.3.5.2 Материалы для электродов-инструментов 64
1.3.6 Рабочие жидкости 65
1.3.7 Технологические основы электроэрозионной обработки 66
1.3.7.1 Последовательность операций при электроэрозионной обработке 66
1.3.7.2 Производительность 67
1.3.7.3 Качество поверхности при электроэрозионной обработке 70
1.3.7.4 Точность при электроэрозионной обработке размеров 71
1.3.7.5 Область технологического использования электроэрозионной обработки 72
1.4 Ультразвуковая обработка материалов 74

Витебский государственный технологический университет

1.4.1 Физические свойства и особенности распространения ультразвука 74
1.4.2 Принцип действия установок для генерации ультразвуковых колебаний 75
1.4.3 Физическая сущность ультразвуковой обработки 77
1.4.4 Ультразвуковая сварка 81
1.4.5 Применение ультразвука при электродуговой наплавке 84
1.4.6 Штамповка с применением ультразвука 86
1.4.7 Совмещенная ультразвуковая и электропластическая обработка 88
1.5 Основы технологий формообразования деталей и узлов методами послойного синтеза 90
1.5.1 Общие сведения о технологиях послойного синтеза (ТПС) 90
1.5.2 Лазерные технологии послойного синтеза 92
1.5.2.1 Лазерная стереолитография 92
1.5.2.2 Лазерное спекание 94
1.5.2.3 Лазерное ламинирование 95
1.5.3 Технологии струйной трехмерной печати 96
1.5.3.1 Струйная печать с использованием фотополимера 96
1.5.3.2 Струйная печать с использованием твердеющего материала 98
1.5.3.3 Струйная печать склеиванием 99
1.5.3.4 Применение технологий послойного синтеза 100
Глава 2. Высокоэффективные процессы деформации металлов и сплавов 102
2.1 Высокоскоростная штамповка листового материала 102
2.1.1 Штамповка взрывом 103
2.1.2 Электрогидроимпульсная штамповка 106
2.1.3 Магнитноимпульсная штамповка 110
2.2 Обработка материалов методами локальной пластической деформации 113
2.2.1 Ротационно-локальное формообразование изделий сложного профиля из листового материала 113
2.2.2 Ротационная вытяжка 118
2.3 Гидропластическая обработка материалов 122
2.3.1 Гидропластическая формовка трубчатых заготовок 123
2.3.2 Гидропрессование 126
2.4 Горячее прессование 131
2.5 Процессы прокатки материалов 137
2.5.1 Поперечно-клиновая прокатка заготовок 137
2.5.2 Поперечная накатка зубчатых колес 143
2.5.3 Процессы многовалковой прокатки 144
2.5.4 Совмещение непрерывных деформационных процессов 147
2.6 Объёмная штамповка на базе многоплунжерных гидравлических прессов 149
2.7 Обработка сплавов в состоянии сверхпластичности 152

Витебский государственный технологический университет

2.7.1 Газостатическая формовка листового материала в состоянии сверхпластичности 157
2.7.1.1 Негативная формовка 158
2.7.1.2 Реверсивная формовка 159
2.7.1.3 Позитивная формовка 160
2.7.2 Совмещенная сверхпластическая формовка и диффузионная сварка 161
2.7.3 Объёмная штамповка в режиме сверхпластичности 164
2.8 Обработка материалов с памятью формы 168
2.8.1 Механизмы образования эффекта памяти формы 168
2.8.2 Технология производства сплавов с эффектом памяти форм 170
2.8.3 Применение материалов с памятью формы 171
Глава 3. Технологические особенности высокоэффективных процессов литья 174
3.1 Вакуумная формовка 174
3.2 Производство высокоточных сложных отливок по разовым моделям 177
3.2.1 Литье по выплавляемым моделям 177
3.2.2 Литье по газифицируемым моделям 181
3.3 Суспензионное литье 185
3.4 Литье с направленной кристаллизацией 187
3.5 Производство отливок с монокристаллической структурой 191
3.6 Литье изделий с аморфной структурой 193
3.6.1 Аморфное состояние сплавов 193
3.6.2 Обозначение и свойства аморфных материалов 194
3.6.3 Способы получения аморфных металлических сплавов 196
3.6.3.1 Получение аморфной структуры методом закалки расплава 196
3.6.3.2 Физические методы получения аморфной структуры 200
3.6.4 Применение аморфных изделий 201
3.7 Литье под регулируемым давлением 203
3.7.1 Литье под низким давлением 205
3.7.2 Литье под высоким давлением 208
3.7.3 Литье с кристаллизацией под давлением 212
3.8 Электрошлаковое литье 215
3.9 Непрерывное литье монолитных заготовок 218
3.9.1 Непрерывное литье многослойных заготовок 223
3.10 Комбинирование процессов литейного производства и обработки давлением 225
Глава 4. Высокоэффективные процессы сварки в машиностроении 229
4.1 Фрикционная обработка материалов 229
4.1.1 Фрикционная резка 229
4.1.2 Сварка трением с перемешиванием слоев 230
4.2 Взрывные технологии 236
4.2.1 Общие сведения о явлении взрыва 236

Витебский государственный технологический университет

4.2.2 Взрывные технологии разделения конструкций 237
4.2.3 Сварка взрывом 238
4.3 Сварка прокаткой 245
4.4 Диффузионная сварка 247
4.5 Электронно-лучевая сварка 250
4.6. Электрошлаковая сварка 253
Глава 5. Прогрессивные технологии механической обработки 258
5.1 Высокоскоростная обработка резанием 258
5.1.1 Инструментальные материалы для высокоскоростной обработки 259
5.1.2 Особенности станков для высокоскоростной обработки 261
5.2. Комбинированные методы механической обработки 262
5.2.1 Деформационно-механическая обработка 262
5.2.2 Вибромеханическое резание 263
5.2.3 Электромеханическая обработка 265
5.2.4 Магнитно-абразивная обработка 266
5.3 Гидроабразивная обработка 269
5.3.1 Физические особенности гидроабразивной обработки 269
5.3.2 Струйно-абразивная обработка поверхностей 269
5.3.2.1 Применение струйно-абразивной обработки поверхностей 274
5.3.3 Гидроабразивная резка 275
5.3.3.1 Технологические основы гидроабразивной резки 275
5.3.3.2 Технологическое оборудование для гидроабразивной резки 280
Глава 6. Основы технологий формирования покрытия 286
6.1 Высокотемпературные покрытия 286
6.1.1 Материалы высокотемпературных покрытий 286
6.1.2 Технологические основы процессов газотермического напыления 288
6.1.3 Газопламенное напыление 290
6.1.4 Электродуговая металлизация 292
6.1.5 Вакуумное конденсационное напыления покрытий 293
6.1.6 Детанационно-газовые покрытия 295
6.1.6.1 Применение детонационных покрытий 297
6.2 Полимерные покрытия 299
6.2.1 Материалы покрытия 299
6.2.2 Способы нанесения полимерных покрытий 301
Рекомендуемая литература 306

Витебский государственный технологический университет

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроение и приборостроение являются важнейшими звеньями промышленного производства. Наметилась тенденция переориентации производства от стабильной узкой номенклатуры изделий к многономенклатурному производству с частой сменяемостью программы выпуска. Средняя продолжительность выпуска продукции уменьшается с 7…8 лет до 2…3 лет и меньше.

Современные достижения в области технологий, роботизации, вычислительной техники обеспечивают реальные предпосылки для организации полностью автоматизированных производств на базе малолюдной или безлюдной технологий, начиная от заготовительных производств и завершая сборкой.

Приоритетным фактором развития машиностроения и приборостроения является разработка и внедрение высоких технологий, базирующихся на новейших достижениях фундаментальных наук.

Целью данного учебника является системное последовательное изложение сущности и возможностей высоких технологий в области машиностроения и приборостроения.

Глава 1 посвящена электрофизическим и физико-техническим методам обработки, к которым относятся лазерная, плазменная, электроэрозионная, ультразвуковая обработка и др.

В главе 2 рассматриваются технологии, основанные на динамическом и статическом деформационном воздействии на обрабатываемый материал: высокоскоростная штамповка, гидро-газостатическая деформация, штамповка в режиме сверхпластичности.

Глава 3 посвящена специальным способам литья изделий с направленной, монокристаллической и аморфной структурой.

В главе 4 представлены высокоэффективные процессы резки и сварки трением, взрывом, прокаткой, а также диффузионной, электронно-лучевой, электрошлаковой сварки.

В главе 5 изложены прогрессивные технологии механической обработки: высокоскоростное резание; комбинированные методы лезвийной обработки; гидроабразивная обработка.

Глава 6 посвящена технологиям формирования высокотемпературных покрытий.

Учебник подготовлен в соответствии с программой по дисциплине «Высокие технологии в машиностроении и приборостроении» для специальности 1-53 01 01-01 «Автоматизация технологических процессов и производств (машиностроение и приборостроение)».

За основу принято учебное пособие с грифом Министерства образования Республики Беларусь автора С.С. Клименкова «Основы эффективных технологий формообразования» (г. Витебск, 1994).

Витебский государственный технологический университет

ГЛАВА 1
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

1.1 Лазерная обработка

1.1.1 Принцип работы лазеров

Лазер – это генератор когерентного электромагнитного излучения в оптическом диапазоне длин волн (10^{-2}–10^{-3} м), основанный на использовании индуцированных переходов (ГОСТ 15093-90). Слово «лазер» составлено из начальных букв английского словосочетания: усиление света посредством вынужденного испускания. В самом термине «лазер» отражена фундаментальная роль процессов вынужденного испускания, которую они играют в генераторах и усилителях когерентного света.

Принцип работы лазеров основан на поглощении и излучении атомами квантов света. В отсутствие внешних возмущений атом может находиться в стабильном состоянии с минимальной энергией. Все другие состояния нестабильны. Возбуждённый атом может пребывать в нестабильном состоянии короткое время порядка 10^{-8}с, после этого он переходит в одно из низших состояний, испуская квант света. На некоторых энергетических уровнях атом может пребывать значительно больше, порядка 10^{-3}с. Такие уровни называются метастабильными.

Переход атома в более высокое энергетическое состояние может происходить при резонансном поглощении фотона, энергия которого равна разности энергий в конечном и начальном состояниях. Кроме того, возможен переход возбуждённого атома на более низкий уровень с излучением двух квантов. Переход электрона с верхнего энергетического уровня на низший происходит под действием внешнего поля. Возникающее при этом излучение называют вынужденным или индуцированным. Именно индуцированное излучение является физической основой работы лазеров.

Если среда на нижнем уровне содержит большее количество атомов чем на верхнем, то преобладает поглощение и интенсивность светового потока падает. Если большее количество атомов содержится в верхнем уровне, то преобладает вынужденное излучение и среда усиливает проходящий свет. Усиление света может происходить только при отсутствии равновесия между верхним и нижним энергетическими уровнями. Такую среду называют средой с **инверсной заселённостью**.

При переходе электронов с верхнего уровня на нижний имеет место быстрое уменьшение избытка населённости верхнего уровня, и при достижении определённого уровня излучение прекратится.

Витебский государственный технологический университет

Возобновление излучения возможно при внешнем подводе энергии. Этот процесс называется **накачкой** лазера.

Способы накачки зависят от конкретной схемы энергетических уровней, а так же от свойств компонентов активной среды, называемой **рабочим** телом. В лазерных системах получили распространение оптический, газоразрядный, газодинамический и химический способы накачки.

С целью усиления светового излучения лазера используется эффект резонанса. Схема оптического резонатора представлена на рисунке 1.1. Рабочее тело размещается между двумя отражающими зеркалами 1, 3. При возбуждении световой накачкой электроны в рабочем теле испускают флуоресцентное излучение, часть которого пойдёт под разными углами к оси стержня, выйдет из него и будет безвозвратно потеряна. Другая часть, направленная вдоль оси рабочего тела, будет усилена за счёт вынужденного излучения при прохождении сквозь стержень многократно. Отразившись от зеркал, часть света снова пройдёт вдоль оси рабочего тела и приведёт к увеличению интенсивности светового потока.

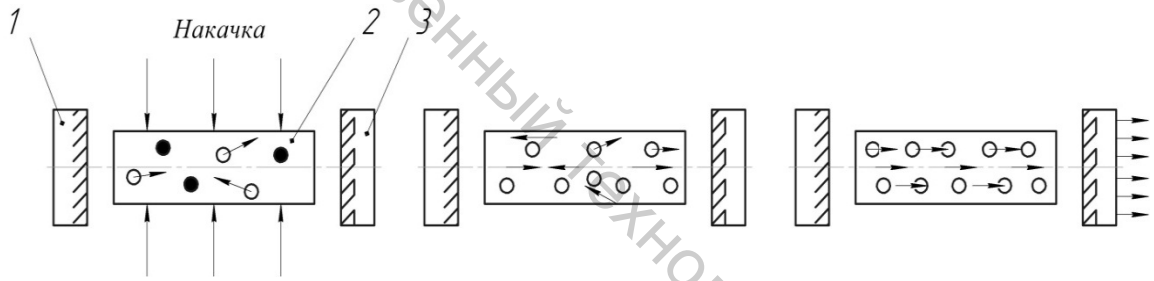


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема оптического резонатора:
○– возбуждённый атом; ● – не возбуждённый атом;
1 – отражающее зеркало; 2 – рабочее тело; 3 – отражающее полупрозрачное зеркало

1.1.1.1 Параметры и характеристики лазеров

Лазерное излучение характеризуется энергетическими и пространственно-временными параметрами. Для импульсных лазеров основными параметрами являются: энергия импульса E (Дж), длительность импульса τ (мс), f (Гц) – частота следования импульсов, пиковая мощность W_n (Вт), средняя мощность $W_{ср}$ (Вт).

При одном и том же значении энергии в импульсе средняя мощность зависит от длительности импульса. Например, лазер генерирует энергию в импульсе порядка 0,1 Дж. При миллисекундной длительности импульса $(10^{-3} - 10^{-2}\text{с})$ средняя мощность составит 10–

Витебский государственный технологический университет

100 Вт. В микросекундном диапазоне $(10^{-6} - 10^{-5}\text{с})$ она достигнет $10^4 - 10^5$ Вт. В наносекундном диапазоне $(10^{-9} - 10^{-7})$ это будет гигантская мощность $10^6 - 10^8$ Вт и окажется ещё более высокой в пикосекундном $(10^{-12} - 10^{-10}\text{с})$ диапазоне от $10^9 - 10^{11}$ Вт.

При рассмотрении импульсно-периодического режима работы лазера к характеристикам отдельного импульса добавляется ещё одна характеристика – средняя мощность последовательности импульсов. Это будет эквивалент энергетического потенциала лазера, принимаемый за мощность лазера.

Процесс лазерной резки требует не только достаточно большой мощности излучения, но также обеспечение реза с ровными гладкими кромками. Для этого необходимо сфокусировать лазерный луч в малоразмерное пятно.

Теоретически лазерный луч можно сфокусировать в пятно размером порядка длины волны, однако искажения, вносимые оптическими элементами, увеличивают радиус реального пятна фокусировки до r_0. Для различных методов обработки r_0 составляет: газовое пятно – 2 мм, электрическая дуга – 3 мм, световой луч – 1 мм; плазменная струя 0,05 мм; электронный луч 0,008 мм; лазерный луч – 0,0006 мм. Пятно фокусировки при лазерной обработке по сравнению с традиционными методами обработки имеет минимальные размеры, а значит, плотность мощности будет самая высокая.

Для импульсного излучения плотность мощности q (Вт/см^2) определяется из выражения

$$q = \frac{E}{S\tau},$$

где S – площадь пятна фокусирования (фокального пятна).

Для непрерывного излучения

$$q = \frac{W_{\text{ср}}}{S}.$$

Важным параметром лазера является длина волны излучения λ, которая определяет степень поглощения (отражения) лазерной энергии обрабатываемой поверхностью. С увеличением длины волны отражательная способность большинства металлов возрастает. Это означает, что лазеры с большой длиной волны по сравнению с лазерами с малой длиной волны отличаются повышенным расходом энергии, т. е. должны быть более мощными.

Монохроматичность лазерного излучения характеризует свойство лазера обеспечивать излучение в узком диапазоне длин волн. Это свойство очень важно при использовании технологий, основанных

Витебский государственный технологический университет

на селективном воздействии лазерного излучения на определённые компоненты обрабатываемого материала.

Когерентность лазерного излучения – это согласованность во времени и пространстве колебательных или волновых процессов. При этом волны имеют одинаковый период и неизменный сдвиг фаз колебаний в каждой точке. В результате пространственно-временной когерентности лазерные источники имеют узкую расходимость, что позволяет не только передавать энергию излучения на значительные расстояния с минимальным рассеиванием, но и фокусировать луч в пятно малого диаметра. Это свойство так же используют при создании многолучевых или многоканальных лазерных систем, представляющих собой набор большого числа пространственно-разнесённых лазеров, параллельные пучки которых с помощью фокусирующей системы собираются на обрабатываемом изделии в одно пятно. Если излучение на выходе всех лазеров когерентно и относительный сдвиг всех фаз равен нулю, то при сведении пучков вместе можно получить максимальную интенсивность, а, следовательно, достичь высоких технологических показателей лазерного комплекса.

1.1.1.2 Схемы и конструкции лазеров

Наиболее широкое применение получили четыре типа лазеров: газовые, твердотельные, диодные, волоконные.

Типичным газоразрядным лазером является гелий-неоновый лазер, в котором используется смесь гелия и неона в соотношении 10:1 при общем давлении в газоразрядной трубке около 80 МПа. Вынужденное излучение создается атомами неона, а атомы гелия участвуют лишь в передаче энергии атомам неона.

Достоинством гелий-неоновых лазеров является когерентность их излучения, малая потребляемая мощность и небольшие размеры. Основные недостатки – невысокий КПД и низкая выходная мощность.

Разновидностями газового лазера являются CO_2–лазеры на основе смеси газов $CO_2 - He - N_2$. Возбуждение смеси выполняется разными видами электрического разряда в газах. Самыми компактными и эффективными являются щелевые лазеры с накачкой высокочастотным разрядом, которые обеспечивают суперимпульсный режим (10–20 кГц) излучения. Гелий является труднодоступным и дорогим газом. Вместо гелия может быть использован воздух. Применение гелия и газов повышенной чистоты позволяет удвоить мощность лазера.

К достоинствам газовых лазеров относятся: относительная дешевизна вещества рабочей среды и возможность работы в непрерывном режиме, высокая энергетическая эффективность.

Витебский государственный технологический университет

Для технических целей применяют два типа лазеров: с диффузионным и конвективным охлаждением.

Лазер с диффузионным охлаждением рабочей среды (рис. 1.2) состоит из охлаждаемой водой разрядной трубки 4, внутри которой с помощью системы электродов 7 создается газоразрядная плазма. По торцам разрядной трубки размещены зеркала резонатора – отражающее зеркало 2 и полупрозрачное зеркало 5.

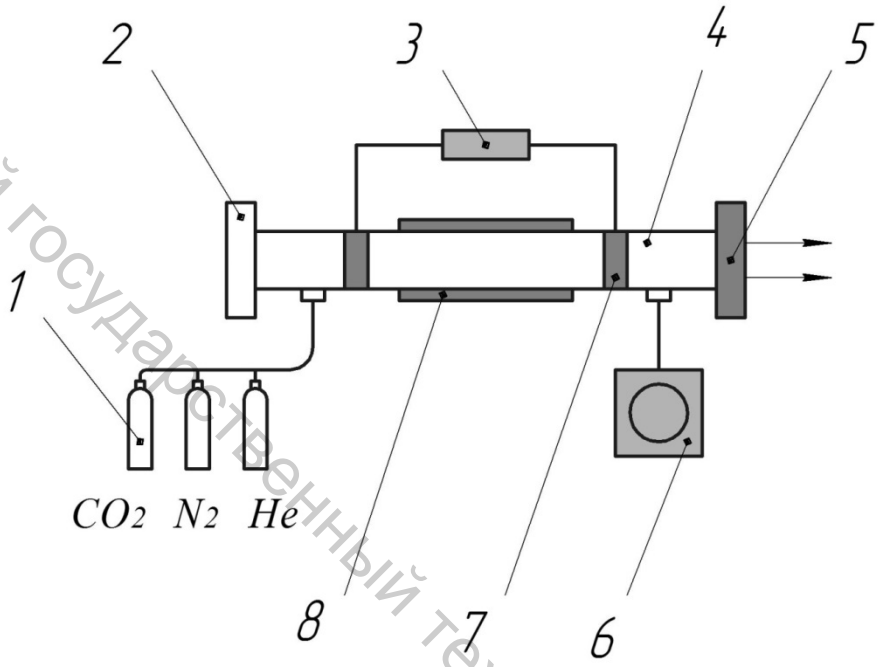


Рисунок 1.2 – Диффузионный газовый лазер с продольной прокачкой:
1 – баллоны с газом; 2 – отражающее зеркало; 3 – блок питания;
4 – газоразрядная трубка; 5 – полупрозрачное зеркало; 6 – насос;
7 – электроды; 8 – водяная рубашка охлаждения

В лазерах рассматриваемого типа прокачка газа обеспечивается в направлении оптической оси. Такие лазеры используют при прецизионной резке, размерной обработке, гравировке, прошивке отверстий, а так же сварке тонколистового металла и поверхностной термической обработке.

Недостатком газовых лазеров с продольной подачей являются большие габариты и ограниченная мощность 0,5…5 кВт. Лазеры с большей мощностью вследствие технологических сложностей и возможного ухудшения качества лазерного излучения использовать нецелесообразно.

Более перспективной для обеспечения повышения мощности лазера является схема с поперечной прокачкой газа (рис. 1.3). В этом случае ось резонатора лазера направлена перпендикулярно к вектору скорости прокачки газа и поэтому её увеличение не сопровождается

Витебский государственный технологический университет

снижением эффективности конвективного охлаждения, определяемой длиной разрядной зоны по направлению потока.

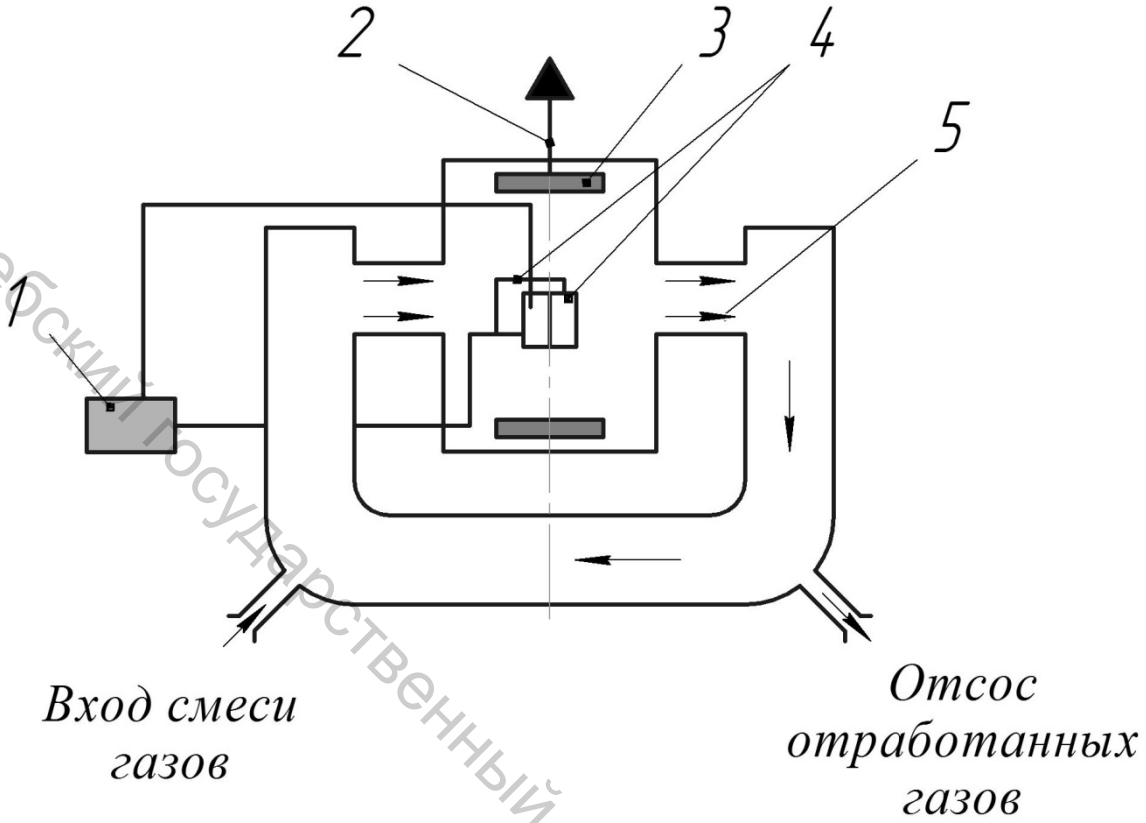


Рисунок 1.3 – Конвективный газовый лазер с поперечной прокачкой:
1 – блок питателя; 2 – лазерный луч; 3 – зеркала резонатора; 4 – электроды; 5 – газовый поток

Самыми компактными и эффективными являются щелевые CO_2 – лазеры с накачкой высокочастотным разрядом. Такие лазеры обеспечивают суперимпульсный режим излучения. Это значит, что световой поток состоит из импульсов частотой 10…20 кГц. При средней мощности в 500 Вт мощность импульса составляет 1000 …1500 Вт.

Твердотельные лазеры. Материал активного тела твердотельного лазера должен отличаться высокой теплопроводностью; обеспечивать высокий коэффициент усиления; быть технологичным в изготовлении и обеспечивать возможность механической или оптической обработки стержней больших размеров. В качестве материалов для изготовления активного тела применяются искусственно выращенные кристаллы рубина, стекла с примесью редкоземельного элемента неодима или кристалла алюмоиттриевого граната с добавкой 1…3 % неодима.

Рубиновые лазеры из-за возможности получения больших импульсных мощностей, а так же высокого оптического качества

Витебский государственный технологический университет

являются наиболее известными из твердотельных лазеров. Рубиновый кристалл состоит из молекул оксида алюминия. В его решетке вместо ионов алюминия внедрены ионы хрома.

Рубиновые кристаллы имеют стержневую форму диаметром 3…20 мм и длиной до 300 мм. Рубиновые кристаллы относительно легко изготавливать. Они имеют большую механическую прочность и высокую теплопроводность. Излучение накачки создается мощными стержневыми ксеноновыми или спиральными лампами. Излучение характеризуется большой мощностью при невысоком качестве излучения (неоднородное распределение по поперечному сечению).

Неодимовые стеклянные лазеры применяются для обработки материалов (сварка лазерным излучением, лазерная резка, обработка отверстий и др.). Стекло используется в качестве матрицы. В качестве активных ионов в стекло вводятся ионы Nd^3с массовым содержанием 0,5–8 %. В качестве материала матрицы используются силикатное, фосфатное или бариевое стекло. Преимущества стекла заключается в простоте изготовления активных элементов с большими размерами и хорошим оптическим качеством. Недостатки связаны с низким коэффициентом теплопроводности.

Принципиальная схема твердотельного лазера представлена на рисунке 1.4.

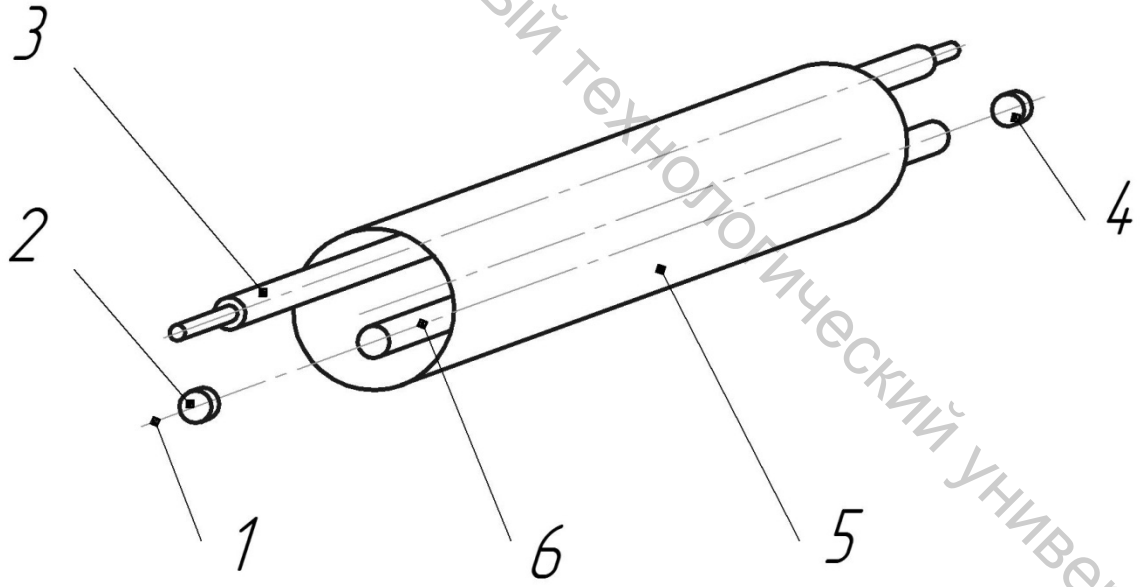


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема твердотельного лазера:
1 – луч лазера; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – лампа накачки;
4 – отражающее зеркало; 5 – отражатель; 6 – активное тело

Активное тело 6, выполненное в виде стержня, вместе с лампой накачки 3 помещаются внутрь отражателя 5 между зеркалами 2, 4. Накачка рабочего тепла производится газоразрядной лампой в непрерывном или импульсном режиме.

Витебский государственный технологический университет

Большинство твердотельных лазеров работают в режиме импульсного возбуждения, продолжающегося менее 1 мс. Несмотря на непрерывное возбуждение, излучение имеет вид отдельных пичков (неупорядоченная генерация) длительностью 1 мкс и интервалами между ними примерно 10 мкс.

Волоконные лазеры. Принцип работы волоконных лазеров основан на отражении света фотодиода в волокне большой протяженности (рис. 1.5). В качестве волоконного материала используется кварц, активизированный добавками редкоземельных элементов. Для мощных лазеров используют трёхслойное стеклянное волокно, включающее оптическое кварцевое волокно 2, активированное световедущее волокно 3 и светоотражающее покрытие 4.

С помощью такого лазера можно получить мощность до 100 Вт, при этом КПД лазера составляет 23 %, а тепловыделения весьма незначительно и составляет 8…10 Вт. Это позволяет использовать воздушное охлаждение и исключить применение сложных систем водяного охлаждения.

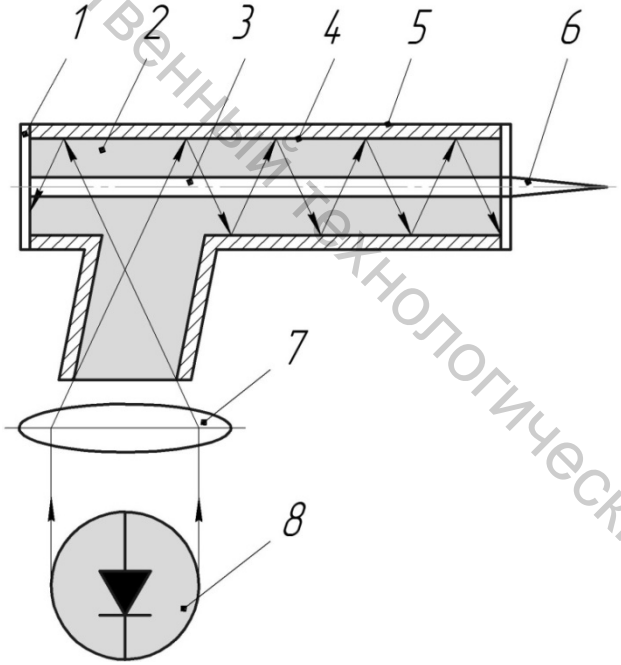


Рисунок 1.5 – Схема волоконного лазера с активированной боковой накачкой:
1 – торцевые зеркала; 2 – оптическое кварцевое волокно;
3– активированное световедущее волокно;
4 – светоотражающее покрытие;
5 – защитная оболочка; 6 – лазерный луч; 7 – фокусирующая линза;
8 – светодиоды

Для получения мощности 2…10 кВт существуют каскадные волоконные системы, включающие задающий волоконный лазер 1 и усиливающие ступени 4, 5 (рис. 1.6). Излучения отдельных волоконных

ВитебскийГосударственныйТехнологическийУниверситет

лазеров соединяются в отдельном лазере, что позволяет повысить мощность каждой ступени. Количество ступеней предопределяет конечную мощность.

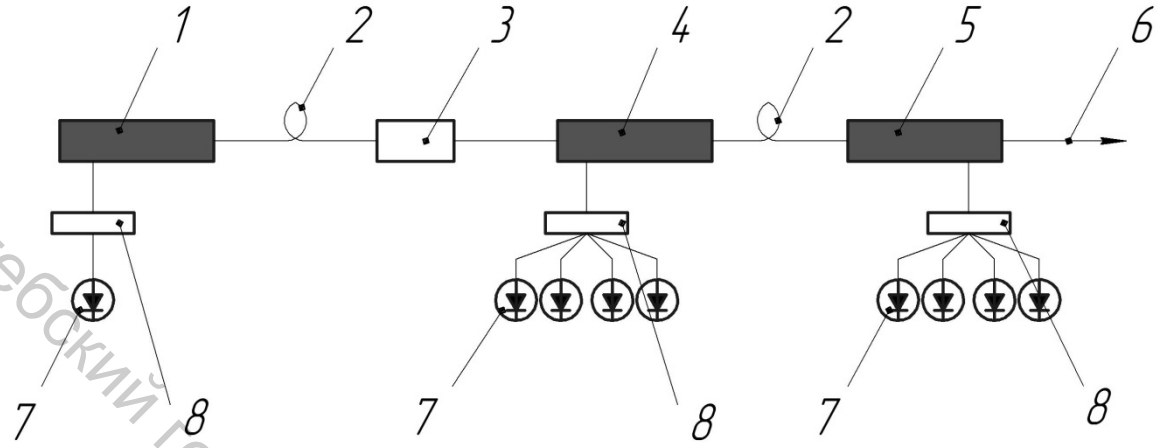


Рисунок 1.6 – Схема многокаскадного лазера:
1 – задающий волоконный лазер; 2 – соединяющее световое волокно;
3 – изолятор; 4 – усиливающий волоконный лазер первой ступени;
5 – усиливающий лазер второй ступени; 6 – лазерный луч;
7 – светодиоды; 8 – фокусирующие системы светодиодов

Диаметр сердцевины оптического волокна кабеля доставки мощностью 1кВт составляет 50…100 мкм, а мощностью 10 кВт составляет 200…400 мкм.

Эксплуатация волоконных лазеров по сравнению с газовыми и твёрдосплавными лазерами существенно упрощается, поскольку практически не требуется настройка, юстировка, чистка. Волоконные лазеры допускают размещение в обычных производственных помещениях, без выполнения специальных требований.

Волоконные лазеры оказались идеальными для использования в оптических системах телекоммуникации, позволили создать мощные лазерные системы для промышленного применения. Излучения в волоконных лазерах не соприкасается с окружающей средой, что обеспечивает высокую надежность, исключительную устойчивость к внешним механическим и климатическим воздействиям. Такие лазеры оказываются технологичными в изготовлении, имеют большой ресурс работы и практически не нуждаются в обслуживании при эксплуатации.

Суммирование выходного излучения одномодовых лазеров волоконных объединителей позволяет увеличивать выходную мощность излучения. Расходимость выходного излучения при этом увеличивается, но остается вполне приемлемой для большинства практических применений.

Параметры волоконного лазера YLR50000: максимальная мощность – 55 кВт; потребляемая мощность 170 кВт; диаметр волокна – 200 мкм; длина выходного волокна – 20 м.

Витебский государственный технологический университет

Волоконные лазеры обеспечивают высококачественную резку металлов со скоростью в 3–5 раз выше, чем CO_2-лазеры той же мощности.

1.1.1.3 Лазерные комплексы

Для реализации лазерной обработки материалов, кроме самих лазеров, необходимы системы фокусировки луча, устройства управления движением луча по поверхности обрабатываемого изделия или устройство для перемещения изделия относительно луча, оптические устройства наведения и позиционирования, программное обеспечение процессами управления.

В соответствии с технологическими задачами лазерные комплексы включают следующие виды оборудования: излучатели, системы формирования и перемещения излучения; координатные устройства, автоматизированную систему управления, систему подачи технологического газа; систему вентиляции и удаления продуктов реза. *Излучатель* генерирует лазерное излучение. В его состав входят элементы системы накачки, активная среда, зеркала резонаторов, устройство модуляции излучения.

Система формирования и перемещения излучения предназначена для передачи лазерного пучка от излучателя к обрабатываемой детали и формирования требуемых параметров лазерного луча. В состав данной системы входят: юстированный лазер, оптический затвор, оптические трансформаторы (объективы), поворотные зеркала, устройства вращения плоскости поляризации; фокусирующая система; система стабилизации положения фокальной плоскости зеркал.

Автоматизированная система управления (АСУ) предназначена для контроля и управления параметрами лазера, передачи команд на исполнительные модули координатного устройства и системы формирования и перемещения излучения. В состав АСУ входят: подсистема датчиков параметров лазера (температуры, давления, состава рабочей смеси и др.); подсистема датчиков параметров излучения; подсистема управления адаптивной оптикой; подсистема управления координатным устройством.

Координатное устройство обеспечивает относительное перемещение лазерного луча и детали. Оно содержит двигатель, привод, исполнительные механизмы и обеспечивает перемещение по двум, трём и даже пяти координатам.

Система подачи технологического газа включает компрессор при работе с воздухом или баллоны с сжатым технологическим газом, элементы масло- и влагоотделения, трубопроводы подачи газа в резак.

Витебский государственный технологический университет

Система вентиляции и удаления продуктов резки состоит из мощного вентилятора, обеспечивающего удаление продуктов резки из рабочей зоны и системы фильтров для улавливания твёрдых частиц.

Способы передачи лазерного излучения в зону обработки условно подразделяют на две группы: с постоянным и переменным направлением оптического тракта от излучателя лазерной обработки до зоны обработки.

Передача излучения с постоянным направлением оптического тракта может осуществляться поступательным или вращательным перемещением изделия, излучателя, либо одновременно того и другого. В простейшем случае передача выполняется с помощью фокусирующего объектива, установленного между неподвижным излучателем лазерной установки и обрабатываемой заготовкой (рис. 1.7).

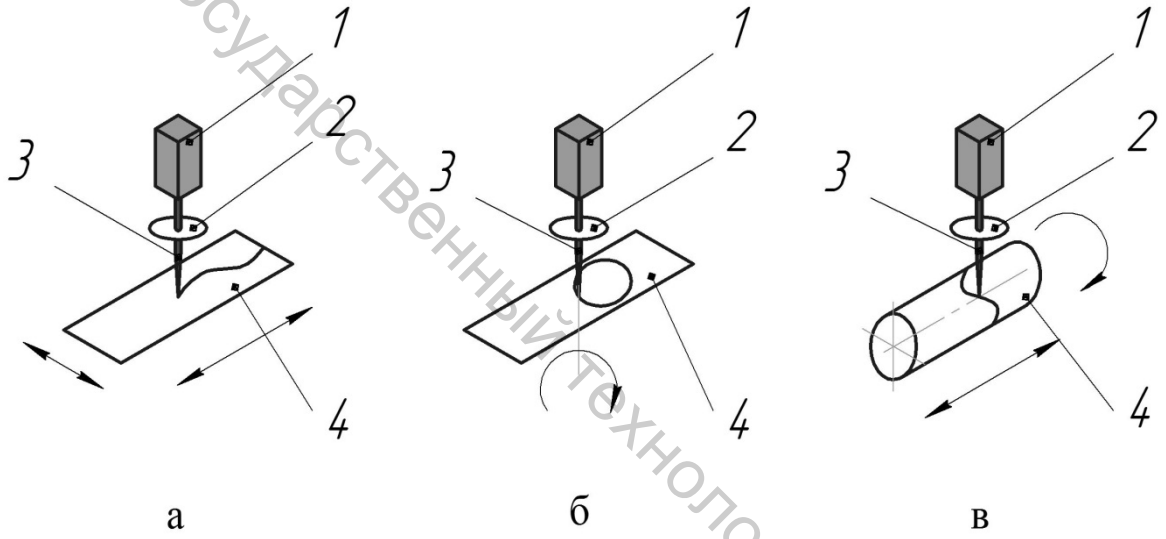


Рисунок 1.7 – Схемы передачи излучения при постоянном направлении оптического тракта:
а – поступательным перемещением заготовки; б – вращательным движением заготовки относительно оптической оси излучения;
в – поступательным и вращательным движением заготовки.
1 – излучатель; 2 – объектив; 3 – луч лазера; 4 – обрабатываемая заготовка

Перемещение крупногабаритных заготовок в процессе обработки технологически нецелесообразно. Перемещение излучателей ограничено системой кабелей высокого напряжения, шлангов для подачи газов, охлаждающей жидкости и т. д. При стационарном положении заготовки и излучателя целесообразно применение способа передачи лазерного излучения переменным направлением оптического тракта. Изменение направления лазерного луча осуществляется поворотными зеркалами и подвижными объективами (рис. 1.8).

Витебский государственный технологический университет

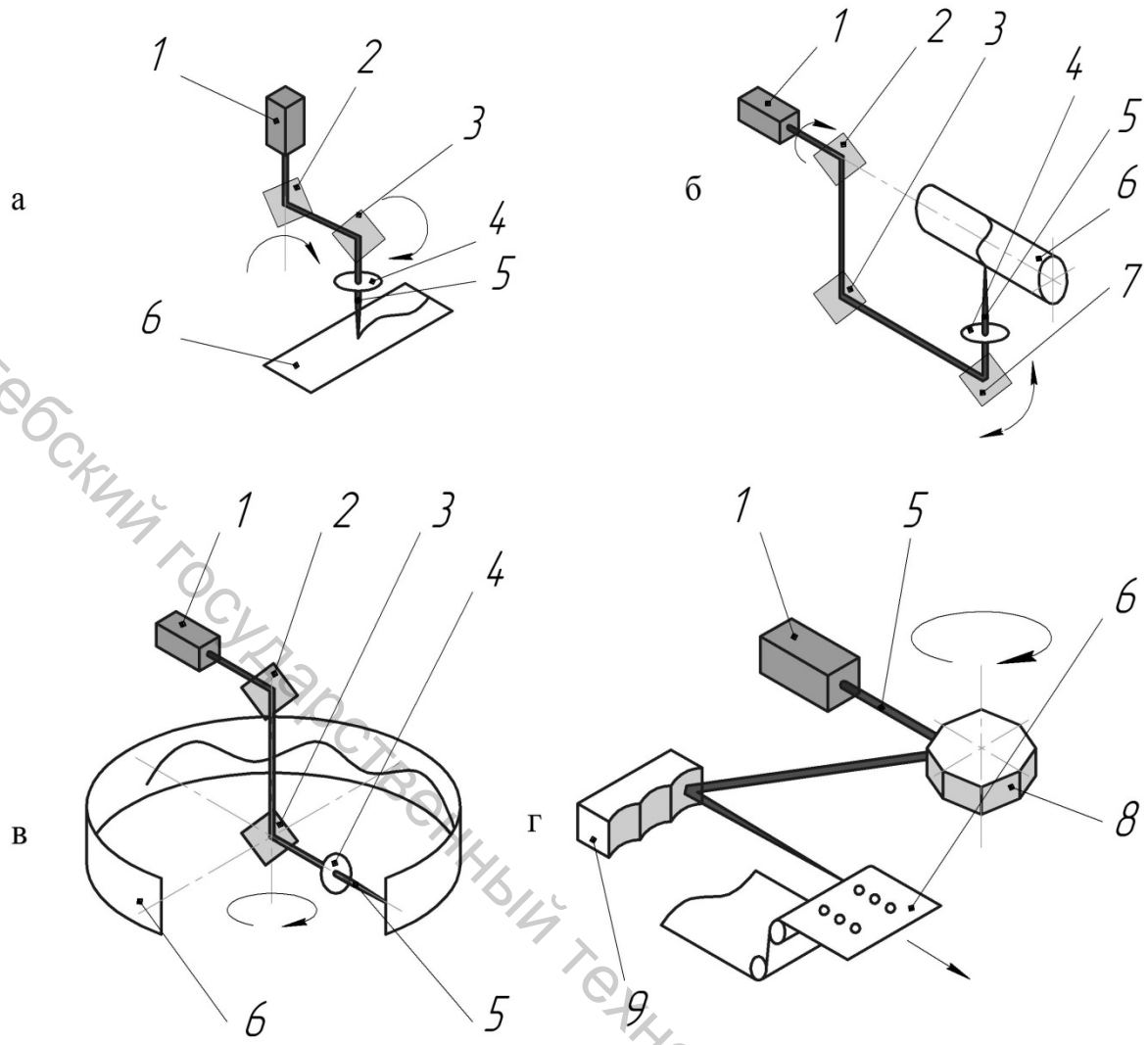


Рисунок 1.8 – Схемы передачи излучения при переменном направлении оптического тракта:
а – вращательным движением зеркал 2, 3 относительно оптической оси;
б – вращательным движением зеркал 2, 3, 7 и объектива относительно оптической оси излучения и оси заготовки; в – вращением зеркал 2, 3 и объектива 4; г – вращением зеркального барабана 8;
1 – излучатель; 2, 3, 7 – подвижные зеркала; 4 – объектив; 5 – луч лазера; 6 – заготовка; 8 – зеркальный барабан; 9 – система неподвижных зеркал

Обычно лазерные комплексы включают неподвижный стол, на котором закрепляют заготовки, подвижный портал с одной или двумя лазерными головками. Заготовка остаётся неподвижной, а лазерный луч перемещается по поверхности заготовки.

Повышение требований к надежности и качеству высокотехнологичной продукции, стремление к миниатюризации приборов привели к росту спроса на лазерные комплексы для прецизионной микрообработки. Лазерные технологии микрообработки позволяют осуществлять микросварку, резку, сверление сверхмалых отверстий в матрицах и фильерах из сверхтвёрдых материалов,

Витебский государственный технологический университет

фрезерование и формообразование, размерную обработку, изготовление сверхплотных масок и трафаретов, послойное удаление плёнок, реструктуризацию и многие другие технологии микро- и нанообработки.

Спрос на лазерную микрообработку вырос в связи с развитием ещё одного перспективного направления – энергосберегающих технологий, в том числе фотоэлементов нового поколения. В производстве фотоэлементов лазерные технологии используются при резке, структурировании поверхности, прошивке отверстий, изоляции краёв.

Для решения этих задач возможностей традиционных комплексов недостаточно. Хотя средняя мощность лазеров в технологических комплексах для микрообработки, как правило, не превышает 100 Вт, пиковые её значения должны составлять от единиц до десятков и более мегаватт, а плотность мощности в лазерном пятне должна быть достаточной для испарения (возгонки) материала. При этом следует обеспечить быстрое взаимное перемещение объектов обработки и лазерного луча с субмикронной точностью.

1.1.2 Технологии лазерной обработки материалов

К наиболее общим достоинствам лазерных технологий можно отнести следующие.

Отсутствие механического воздействия при обработке со стороны инструмента на обрабатываемую деталь. Это позволяет обрабатывать тонкие, легкодеформируемые миниатюрные изделия без опасения их повреждения.

Высокая концентрация подводимой энергии и локальность. Это позволяет произвести обработку только локального участка материала без нагрева остального объёма, нарушения его структуры и свойств. Высокая локализация обеспечивает выполнение уникальных прецизионных операций микрообработки материалов.

Высокая технологичность лазерного луча, проявляющаяся в возможности управления параметрами луча и его положением в пространстве, открывает широчайшие перспективы для применения (резка, обработка отверстий, термическая обработка, наплавка, маркировка и др.).

1.1.2.1 Лазерная резка металлов

Лазерной резкой называется такой вид лазерной обработки, при котором сфокусированное излучение разрушает материал, а струя

Витебский государственный технологический университет

сжатого газа выдувает продукты с образованием узкого канала – реза. Механизмы разрушения материала включают процессы нагрева, плавления, испарения, химические реакции.

Значительное влияние на интенсивность процессов нагрева оказывает поглощающая способность металла, зависящая от температуры поверхности, теплопроводности, длины волны, угла падения луча на поверхность.

Разрушение материала путём плавления и последующего испарения связано с достаточно высоким энергопотреблением. Существенное снижение энергозатрат достигается при использовании газа для удаления расплавленного металла из зоны резания.

Простейшая конструкция лазерного резака представлена на рисунке 1.9. Для подачи газа в зону резки между линзой 5 и заготовкой размещено сопло 6 в виде усечённого конуса. Газ, выходящий под давлением из сопла, кроме технологических функций, обеспечивает защиту линзы от продуктов обработки.

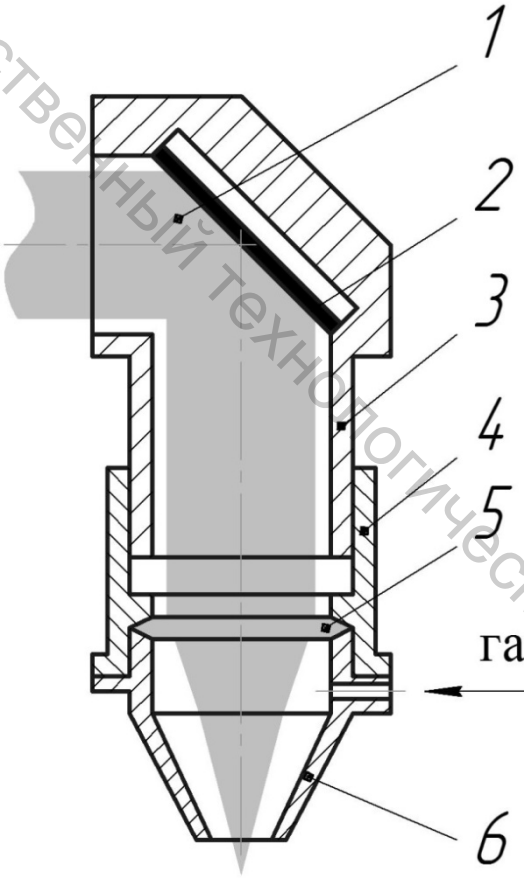


Рисунок 1.9 – Схема конструкции лазерного резака:
1 – луч лазера; 2 – зеркало; 3 – корпус; 4 – тубус;
5 – линза; 6 – сопло

При газолазерной резке металлов различают стационарный режим разрушения, когда жидкая ванна расплава существует по всей длине канала реза и, нестационарный, характеризуемый периодическим выносом расплавленного металла из зоны обработки.

Витебский государственный технологический университет

Стационарный режим разрушения достигается в том случае, когда скорости плавления металла в направлении реза и удаления расплавленного металла равны в каждом сечении канала.

Скорость *V* резки будет определяться выражением

$$V = \frac{L}{t} = \frac{n \cdot Do \cdot K_{п}}{t},$$

где *t* – время обработки; *L* – длина реза, *n* – количество импульсов; *Do* – диаметр элементарной лунки, $K_{п} = \frac{T}{Do}$; *T* – шаг обработки.

Нестационарный режим осуществляется путём периодического плавления металла до достижения определённого объёма ванны, которая уносится из зоны обработки. Периодичность удаления жидкого металла является причиной образования на поверхности неровностей в форме борозды.

При резке в импульсном периодическом режиме скорость резки *V* будет определяться частотой следования импульсов *f*

$$V = Do \cdot K_{п} \cdot f.$$

Приведенная зависимость скорости резания справедлива при небольшой толщине разрезаемого материала, когда образуется сквозное отверстие (рисунок 1.10 *а*)

С увеличением толщины материала каждое элементарное отверстие образуется под воздействием нескольких импульсов. После перемещения луча в направлении обработки на величину шага *T* передний край светового пятна, попадая на верхнюю кромку материала, образует очередное элементарное отверстие (рисунок 1.10 *б*). Одновременно остальная часть излучения углубляет ранее образованное элементарное отверстие. При этом полная глубина реза зависит от количества подводимых импульсов в каждое элементарное отверстие в процессе движения луча. Количество импульсов *n* зависит от шага обработки

$$n = [(D_0 + b)/2T] + 1 \approx 1/K_{п}.$$

ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

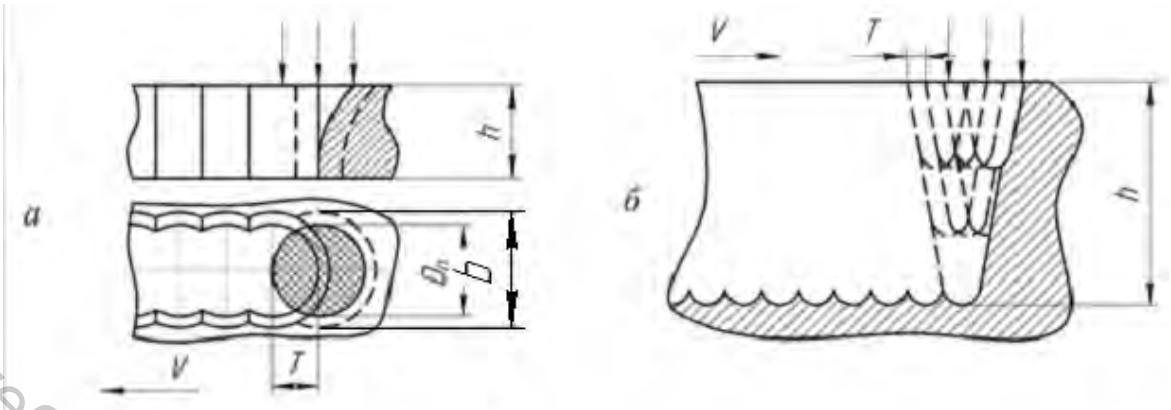


Рисунок 1.10 – Схемы формирования сквозного (а) и глухого (б) реза

Глубина h и ширина b при обработке импульсным излучением соответственно равны:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{D_0}{2\,\mathrm{tg}\,\gamma}\right)^3 + \frac{3E}{\pi \cdot K_{\text{п}} \cdot \mathrm{tg}^2\gamma \cdot E_u}} - \frac{D_0}{2\mathrm{tg}\gamma};$$

$$b = 2 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{D_0}{2}\right)^3 + \frac{3E}{\pi \cdot E_u}\mathrm{tg}\gamma},$$

где E – энергия излучения; E_u – энергия материала; γ – половинный угол светового конуса.

Глубина реза растёт с увеличением энергии излучения и уменьшением скорости резания, однако беспредельно увеличиваться глубина реза не может. Это происходит вследствие уменьшения плотности энергии излучения по мере проникновения вглубь реза. При снижении этого параметра до некоторого порогового значения q_n дальнейший рост реза вглубь прекращается. Предельно достижимая глубина резания равна

$$h_{max} = \frac{1}{\mathrm{tg}\gamma}\left(\sqrt{\frac{E}{\pi} \cdot q_{\text{п}} - \frac{D_0}{2}}\right).$$

Максимально возможная скорость обработки, при которой ещё будет происходить формирование реза, может быть найдена из условия $K_{\text{п}} = 1$, а $T = D$

$$V_{max} = 2f\left[\left(\frac{D_0}{2}\right)^3 + \frac{3E}{\pi \cdot E_u}\mathrm{tg}\gamma\right]^{1/3}.$$

Витебским государственным технологическим университет

Скорость резания зависит от вида материала, его толщины, мощности излучения и составляет порядка нескольких метров в минуту (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Ориентировочные соотношения между параметрами лазерной резки

Металл	Толщина, мм	Мощность излучения, Вт	Скорость резания, м/мин
Малоуглеродистая сталь	1,0 0,5 1,2	100 250 400	1,6 0,635 4,6
Инструментальная сталь	2,2 3,0 1 0,5	850 400 100 250	1,8 1,7 0,94 2,6
Нержавеющая сталь	1,3 2,5 3,2 9,0 4,7	400 400 400 850 20000	4,6 1,27 1,15 0,35 1,27
Титан	1,0 0,5	600 850	1,50 3,2

Лазерная резка подразделяется на три вида: лазерная резка с нейтральным или инертным газом, лазерная резка с кислородом и гибридная кислородная резка с поддержкой лазерного излучения.

Лазерная резка с нейтральным или инертным газом (табл. 1.2.) обычно применяется в тех случаях, когда нежелательно окисление кромок реза, например, при резке нержавеющей стали, титана, алюминия и его сплавов.

Таблица 1.2 – Параметры лазерной резки нержавеющей стали CO_2-лазером с азотом

Толщина листа, мм	Мощность лазера, Вт	Зазор, мм	Диаметр сопла, мм	Давление N_2, атм	Скорость резки, м/мин
1,0	1500	0,3-0,6	1,2-1,5	6,0	7,0
2,0	1500	0,3-0,6	1,2-1,5	9,0	4,0
4,0	3000	0,3-0,8	2,0-2,5	13,0	3,0
6,0	4000	0,5-1,0	2,5-3,0	14,0	1,5
9,0	4000	0,5-1,0	2,5-3,0	16,0	1,0
12	4000	0,5-1,0	2,5-3,0	18,0	0,5
20	5000	0,5-1,0	2,5-3,0	22,0	0,4
25	6000	0,5-1,0	2,5-3,0	22,0	0,25

Витебский государственный технологический университет

Продувка реза при резке нержавеющей стали осуществляется азотом, при резке титана – аргоном. Излучение фокусируется на нижнюю поверхность листа; расстояние между соплом и листом 0,3–1,0 мм. Стандартный диапазон толщин при использовании CO_2-лазера мощностью 1,5–5 кВт составляет 1–1,6 мм, а при использовании волоконного лазера 1–4 мм.

Лазерная резка с кислородом характеризуется наличием дополнительного источника тепла, который появляется в результате горения металла на поверхности фронта реза по линии действия луча. Этим объясняется увеличение скорости резки в кислороде в 2–3 раза по сравнению с резкой в нейтральном газе при прочих равных условиях (табл. 1.3).

Таблица 1.3 – Параметры лазерной резки нержавеющей стали CO_2-лазером с кислородом

Толщина листа, мм	Мощность лазера, Вт	Зазор, мм	Диаметр сопла, мм	Давление O_2, атм	Скорость резки, м/мин
0,5	500	0,3-0,6	0,6-0,8	0,5-6,0	15,0
1,0	800	0,3-0,6	0,6-0,8	3,5-6,0	11,0
2,0	1000	0,3-0,8	0,6-1,2	2,5-4,0	7,0
4,0	1000	0,3-0,8	0,6-1,2	2,0-4,0	4,0
6,0	1000	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-3,0	2,5
8,0	1500	0,5-1,0	1,2-1,5	1,5-3,0	2,0
12	1500	0,5-1,0	1,2-1,5	1,0-2,0	1,0
18	2000	0,5-1,0	1,2-1,5	0,5-1,0	0,5
25	4000	0,5-1,0	1,5-2,0	0,5-0,7	0,5
25	6000	0,5-1,0	2,0-2,3	0,5-0,7	0,9

Образующиеся оксиды в виде шлака одновременно удаляются из разреза этой же струей газа. Диаметр струи значительно превосходит диаметр сфокусированного луча и обычно составляет 0,8–2,5 мм.

Гибридная кислородная резка с поддержкой лазерного излучения. В судостроении для резки толстолистовой стали применяют технологию, при которой лазерный луч лишь подогревает поверхность металла до температуры около 1000 ºС, перед тем как на поверхность попадает сверхзвуковая струя кислорода. При этом канал реза формируется струей режущего кислорода. Лазерное излучение играет вспомогательную роль, которая сводится к прогреву локальной области, взаимодействующей с кислородной струей на верхней поверхности листа и обеспечивает инициирование и стабильное протекание процесса горения железа в струе кислорода. Резка обеспечивается за счёт тепла, выделяющегося при горении металла в кислороде. Доля лазерного

Витебский государственный технологический университет

излучения в тепловом балансе мала и составляет 5–10 %. Толщина разрезаемого листа возрастает до 50–70 мм, что значительно превышает возможности традиционной кислородной газолазерной резки. Глубина реза при этом значительно в несколько раз возрастает по сравнению с традиционной лазерной резкой с кислородом. Поэтому указанный способ предназначен для раскроя особо толстых стальных плит до 50 мм толщиной и выше.

Характерные особенности гибридной кислородной резки с поддержкой лазерным лучом:

– после достижения условия достаточного прогрева поверхности дальнейшее увеличение мощности лазера не оказывает существенного влияния;

– ширина реза сравнима с выходным диаметром сопла лазерной головки;

– для формирования сверхзвуковой струи требуется достаточно высокое давление кислорода (6…15 МПа);

– скорость резки не превышает 0,5 м/мин.

В таблице 1.4 приведены отдельные результаты лазерной резки толстолистовых материалов.

Таблица 1.4 – Характерные показатели лазерной резки типовых металлов

Наименование параметра	Лазерная резка с нейтральным или инертным газом		Лазерная резка с кислородом	Гибридная кислородно-лазерная резка
	Нержавеющая сталь	Титан	Малоуглеродистая сталь	Малоуглеродистая сталь
Мощность W, кВт	4,5	4,0	3,2	1,6
Скорость резки Vc, м/мин	0,2	0,1	1,1	0,2
Толщина листа L, мм	14-20	30	16-20	40-50
Ширина реза h, мм	0,3	0,64	0,4	2,6
Вспомогательный газ	Азот	Аргон	Кислород	Кислород
Давление газа p, МПа	12	5	1,5	8
Шероховатость Rz, мкм	Менее 40	Менее 50	Менее 40	Менее 30

Витебский государственный технологический университет

1.1.2.2 Лазерная резка неметаллических материалов

Лазерный луч с большим успехом применяется для резки неметаллических материалов, таких как пластмасса, стеклопластики, резина, асбест; композиционные материалы на основе бора, углерода, керамики и др. Ассортимент неметаллических материалов, как правило, обладает меньшей теплопроводностью, чем металлы и поэтому удельные энергозатраты снижаются.

В процессе лазерной резки решающую роль играет выдувание из зоны резки мелкодисперсной и капельной фракции. С целью повышения эффективности резки, применяют поддув в зону резания активного или нейтрального газа, который выдувает испаренные капельные фракции и производить охлаждение локального участка, позволяя резать материалы с малым обугливанием и оплавлением.

Исключения составляют материалы на основе фенолформальдегидных смол. Эти материалы под воздействием лазерного излучения превращается в вязкую окисленную массу, которую трудно удалить из реза с помощью газовой струи. Поэтому требуются большие энергозатраты на испарение продуктов разрушения.

Газолазерная резка позволяет получать чистый срез диэлектриков с хорошим качеством кромки. При наличии достаточной мощности излучения лазера можно осуществлять процесс лазерной резки стекла и кварца. При этом качество резки высокое, но со стороны входа и выхода луча кромки слегка оплавлены.

Лазерный метод резки исключает появление в стекле дополнительных напряжений благодаря отсутствию контакта режущего инструмента со стеклом. Положительным моментом является отсутствие искажающих элементов, возможность контроля и регулировки степени воздействия на стекло лазеров для резки тонкостенного трубчатого стекла. При вращении трубки с частотой порядка 20 сек$^{-1}$ на поверхности создаётся кольцевой источник тепла, при котором благодаря термоупругим напряжениям, превышающим предел прочности стеклянной трубки, возникает разделяющая трещина.

В таблице 1.5 приведены параметры процесса резки некоторых неметаллических материалов.

Таблица 1.5 – Скорость резания неметаллических материалов в зависимости от вида материала, его толщины и мощности излучения

Материал	Скорость резания, м/мин	Толщина, мм	Мощность излучения, Вт
Асбоцемент	0,0025	6,3	200
Картон	0,1	19,0	200
Кварц	1,0	2,0	400
Стекло	1,52	9,53	20000

Витебский государственный технологический университет

Окончание таблицы 1.5

Оргстекло	3,0	1,5	400
	4,6	12,7	20000
Стеклопластик	0,635	2,4	200
Фанера	0,5	17,0	500
	1,5	25,4	8000
Нейлон	5,0	0,8	200
Кожа	0,635	3,2	200

Витебский государственный технологический университет

1.1.2.3 Лазерная обработка отверстий

В ряде отраслей машиностроения и приборостроения серьёзной проблемой является повышение производительности и точности изготовления отверстий глубиной до 10 мм, диаметром менее 1 мм. Выполнение таких отверстий традиционным сверлением связано с определёнными трудностями вследствие частой поломки свёрл, дефицитностью свёрл малых диаметров, сложностью их заточки. Эта задача ещё более усложняется при выполнении отверстий в труднообрабатываемых материалах или отверстий, расположенных на криволинейных или наклонных к оси свёрла поверхностях. Для обработки таких отверстий представляет значительный интерес применения принципиально новых технологических процессов, отличных от традиционных процессов резания. К таким технологическим процессам относятся электрофизические и электрохимические методы обработки, в частности, электроэрозионная, электрохимическая, ультразвуковая и электронно-лучевая обработка. Однако эти методы обладают рядом недостатков при реализации операций обработки отверстий миллиметрового диапазона, и, в частности, не обеспечивают высокую производительность процесса. Например, время прошивки отверстий диаметром 0,025–0,8 мм при электроэрозионной обработке составляет 0,5–5 мин, при электрохимической обработке – 4-16 мин, при лазерной обработке – 0,001–10 с. Наиболее производительной является лазерная обработка, хотя по удельному расходу энергии она уступает механическим и электрофизическим методам.

Основными процессами, протекающими при обработке отверстий лазерным лучом, являются плавление и испарение. В глубину отверстие увеличивается, в основном, за счёт испарения, а по диаметру - за счёт плавления стенок.

Основным способом обработки отверстий является многоимпульсная обработка, сущность которой заключается в том, что отверстия формируется с помощью серии импульсов излучения лазера

определенной энергии и длительности, последовательное воздействие которых позволяет получить необходимые размеры отверстий.

При многоимпульсной обработке в результате послойного испарения материала каждым импульсом глубина отверстия определяется суммарной энергией серии импульсов, а его диаметр – усреднёнными параметрами отдельного импульса излучения. Кроме того, диаметр отверстия зависит от размера светового пятна в зоне обработки.

Особенности импульсной обработки заключаются в возможности получения отверстия серией коротких импульсов, период следования которых значительно больше времени остывания материала. В этом случае характерный размер зоны термического влияния определяется длительностью отдельного короткого импульса. В сочетании с высокой плотностью энергия каждого импульса в таком режиме способствует резкому снижению доли расплава в продуктах разрушения.

Использование импульсов малой длительности позволяет обрабатывать отверстия в хрупких материалах без их растрескивания (по отношению к одноимпульсной), что обусловлено более равномерным распределением остаточных напряжений по толщине материала.

К отверстиям деталей ответственного назначения предъявляются жёсткие требования к физическим свойствам приповерхностного слоя, а так же макро- и микрогеометрии поверхности. Для металлов характерно образование дефектного слоя с увеличением твёрдости в 1,2–1,5 раза. Толщина этих слоёв составляет 5…10 мкм. На поверхности отверстий, полученных в керамике, формируется стекловидный слой из расплавленного материала, имеющий твёрдость, близкую к твёрдости исходной структуры. Размеры зоны термического влияния соизмеримы с диаметром отверстия.

Наиболее характерной формой искажения макрогеометрии поверхности отверстий являются волнистость, наплывы, впадины. Эти искажения особенно значительны при обработке глухих отверстий. При обработке сквозных отверстий, когда процесс их формообразования сопровождается выбросом материала в двух взаимно противоположных направлениях относительно оси детали, количество рассматриваемых отклонений существенно снижается. Макрогеометрия поверхности не зависит от материала и формы обрабатываемого отверстия, имеет минимальные искажения в центральной части отверстия и максимальные на его входе и выходе. В целом, чем больше энергия излучения и меньше длительность импульса, тем выше качество поверхности.

С целью снижения искажения поверхности обрабатываемого отверстия на торцевую поверхность детали накладывают экран в виде пластины. Толщину экрана подбирают таким образом, чтобы

Витебский государственный технологический университет

коническая часть отверстия формировалась в пластине. При этом радиусы скруглений на наружной поверхности детали на входе в отверстия отсутствуют. Использование такого технологического приёма позволяет устранить наплывы на поверхности отверстий.

Микрогеометрия оценивается параметрами шероховатости поверхности. Обычно шероховатость поверхностей, обработанных лазерным лучом, оценивается высотой неровностей Rz = 0,08…8,0 мкм. При этом наименьшая шероховатость поверхности наблюдается в центральной части отверстия; на входе и выходе шероховатость увеличивается.

На шероховатость поверхности отверстий влияют в основном три параметра: энергия излучения, длительность импульса и количество импульсов. С повышением энергии импульса высота микронеровностей увеличивается, при увеличении длительности импульса, наоборот, высота микронеровностей уменьшается.

При обработке высококачественных отверстий в труднообрабатываемых материалах (керамика, алмаз) рекомендуется применение лазерной технологии на черновых операциях с последующей калибровкой полученных отверстий вольфрамовой проволокой, абразивной суспензией, ультразвуковой обработкой.

Лазерную обработку преимущественно применяют для получения отверстий диаметром до 0,5 мм и глубиной до 5 мм. Применение многоимпульсной обработки позволяет расширить технологические возможности и получать отверстия с соотношением $h/d_{отв} \leq 50$. Точность диаметров отверстий, полученных лазерным излучением, соответствует 8-му квалитету.

Лазерная технология по сравнению со сверлением обладает определёнными преимуществами в результате исключения операции разметки, зенкования входной части, снятие заусенцев на внутренней поверхности. Значительно сокращается вспомогательное и машинное время, увеличивается скорость позиционирования, и в целом повышается производительность.

Лазерную обработку целесообразно использовать для получения отверстий одинакового диаметра с большой плотностью их размещения на поверхности листовой заготовки. Такая необходимость возникает при изготовлении различного рода сит, фильтров и т. п. Поскольку толщина материала обычно не превышает 1…2 мм, прошивка возможна в моноимпульсном режиме. При больших габаритах заготовки целесообразно применять сканирование луча, что позволяет повысить производительность обработки, а так же использовать многолучевую обработку.

Наибольшие трудности возникают при получении отверстий диаметром менее 30 мкм в диафрагмах из танталовой, молибденовой или медной фольги. Традиционная технология изготовления таких отверстий заключается в накалывании фольги пуансоном с

Витебский государственный технологический университет

последующим травлением в кислотах до «вскрытия» отверстия. Такая технология отличается значительной трудоёмкостью, большими затратами ручного труда, низкой производительностью.

Лазерным лучом могут быть получены отверстия диаметром 8…13 мкм в вольфрамовой и танталовой фольге толщиной 50 мкм и диаметром 20…30 мкм в молибденовой фольге толщиной 100 мкм. Отверстия имеют правильную геометрическую форму. Эти изделия используют в качестве измерительных диафрагм для анализаторов электронных пучков.

Широкое применение лазерная обработка нашла в производстве алмазных волок и часовых камней. Для волочения проволоки диаметром от 10 мкм до 1,2 мм применяют волоки из естественных и синтетических алмазов. Их стойкость в сотни раз превышает стойкость волок из твёрдых сплавов. Возможность прошивки отверстий в керамике обеспечивает применение лазера в электронной промышленности. Типичные значения диаметра отверстий, полученных в глиноземной керамике толщиной около 0,6 мм с помощью CO_2 – лазера находятся в пределах 0,13…0,25 мм с допуском приблизительно 13 мкм. Помимо этого лазеры используют для прошивки отверстий в пластике, предназначенном для обшивки стен в салонах самолётов, для обработки дозирующих устройств в аэрозольных соплах и др.

1.1.2.4 Лазерная термическая обработка

При направлении лазерного луча на поверхность материала эффективность полезного использования энергии зависит от соотношения поглощенного и отраженного излучения. Поглощенная часть энергии проникает на небольшую глубину материала и преобразуется в тепло.

Поглощение энергии лазерного излучения и переход её в тепловую происходит практически мгновенно и приводит к резкому возрастанию температуры материала в зоне лазерного воздействия. Одновременно происходит отток тепла вглубь материала.

В зависимости от интенсивности излучения в поверхностном слое могут быть реализованы следующие процессы: нагрев до температур, не превышающих температуру плавления, но достаточных для структурно-фазовых превращений; нагрев до температур, превышающих температуру плавления, но ниже температуры испарения; интенсивное испарение.

Тепловые процессы можно разделить на две группы. К первой группе следует отнести процессы, которые не вызывают оплавления поверхности и связаны только с нагревом поверхностного слоя обрабатываемого материала с последующим самоохлаждением.

Витебский государственный технологический университет

Ко второй группе целесообразно отнести процессы, связанные с оплавлением поверхности: лазерное термическое упрочнение с оплавлением; аморфизация поверхности; лазерное микролегирование, лазерная наплавка.

Лазерное термическое упрочнение с оплавлением основано на локальном нагреве участка поверхности под воздействием луча и последующего охлаждения этого участка путём теплоотвода во внутренние слои. Скорости охлаждения для большинства сплавов превышают 200 С°/с. Сверхвысокие скорости охлаждения локальных участков вызывают специфические особенности при формировании структуры.

При лазерном упрочнении в сталях образуются те же структуры, что и при обычной закалке: мартенсит, цементит, остаточный аустенит. Однако высокие скорости и локальность нагрева вызывают большую неоднородность и как следствие, дефектность структуры. Происходит увеличение плотности дислокации и рост напряжений в кристаллической решётке. Микротвёрдость в 1,1–5 раз превышает микротвёрдость структуры основы. Глубина упрочнённого слоя в зависимости от режимов облучения может достигать 0,05-3 мм.

С оплавлением поверхности имеет место более выраженная неоднородность структуры поверхностного слоя. Происходит нарушение исходной шероховатости поверхности, что требует последующей финишной механической обработки.

Аморфизация поверхности – процесс, при котором с помощью лазерного облучения в режиме интенсивного оплавления в поверхностном слое материала создается максимально возможный градиент температур. Скорости охлаждения в слое толщиной 0,02 … 0,05 мм. могут достигать 10^6–10^7 С°/с. Этого достаточно для перевода металла в аморфное состояние.

Лазерное легирование заключается в расплавлении поверхностного слоя материала и введения в образовавшийся расплав легирующих элементов. Легирующие элементы в результате действия гидродинамических сил и наличия температурных градиентов, механически перемешиваются с материалом основы.

Наряду с механическим перемешиванием имеет место взаимная диффузия в жидкой фазе с образованием твёрдых растворов.

Лазерная наплавка – заключается в том, что на предварительно подготовленную поверхность одновременно с лазерным излучением подаётся наплавляемый порошок. Под действием лазерного излучения происходит расплавление порошка и частичное оплавление материала основы, что обеспечивает хорошую адгезионную прочность покрытия.

Витебский государственный технологический университет

Рекомендации по применению

Использование на операциях, предшествующих финишной обработке. Метод можно применять для повышения износостойкости поршневых пальцев, распределительных колец гидроагрегатов, шеек коленчатых валов, шпинделей станков, штоков гидроцилиндров, направляющих, кулачков, шкивов, обкаточных роликов, полуосей вагонных колёс, контактных поверхностей металлических уплотнений, седел клапанов, быстроизнашивающихся поверхностей деталей из сплавов на основе алюминия, деталей, полученных методами порошковой металлургии.

Поверхностное микролегирование

Повышение эрозионной и коррозионной стойкости, вибропрочности лопаток газовых турбин на основе легких сплавов. Повышение износостойкости и жаропрочности поршней двигателей внутреннего сгорания, изготовленных из сплавов на основе алюминия, обработка форм для литья под давлением, штампов горячего деформирования, впускных и выпускных клапанов, седел клапанов, крышек блока цилиндров двигателей. Изготовление металлообрабатывающих инструментов на основе недефицитных низкосортных конструкционных сталей.

Лазерная наплавка

Восстановление изношенных в результате эксплуатации различных деталей машин – валов, полуосей вагонов кранов, шнеков полимерных машин, распределительных валов, седел клапанов, толкателей, регулировочных винтов двигателей внутреннего сгорания, поворотных цапф автомобиля.

Изготовление ножей грануляторов, скребков и других инструментов, используемых в химическом и полимерном машиностроении, а также в горной промышленности.

1.2 Плазменная обработка

1.2.1 Физическая сущность генерирования плазмы

Плазма – это частично или полностью ионизированный газ. Источником ионизации являются электрические разряды (дуговой, искровой, тлеющий и пр.). Степенью ионизации называют отношение числа ионизованных атомов к полному их числу в единице объёма плазмы. В зависимости от степени ионизации различают слабо, сильно и полностью ионизированную плазму. Степень ионизации плазмы зависит от многих факторов и прежде всего от температуры. Различают низкотемпературную плазму $T \leq 10^5$ °К и высокотемпературную $T > 10^6 \ldots 10^8$ °К.

Витебский государственный технологический университет

Существование плазмы поддерживается непрерывно протекающим процессом ионизации. Интенсифицировать процесс плазмообразования можно путём обдува соосным потоком газа. Если часть столба электрической дуги поместить в узкий канал с охлаждаемыми стенками, то будет достигнута дальнейшая интенсификация плазмообразования. Это связано с тем, что в узком канале столб дуги сжимается, особенно при обдуве её соосным потоком газа. С увеличением электрического тока столб дуги из-за ограничивающего действия стенок канала расширяться не может, температура газа и степень ионизации резко повышаются. Практически весь газ, проходящий сквозь столб сжатой дуги ионизируется и превращается в плазму.

Различают плазменные дуги прямого и косвенного действия.

В дуге прямого действия (рисунок 1.11) в качестве анода используется обрабатываемый материал. В этом случае плазменная струя совмещена со столбом дуги по всей длине, начиная от входного среза канала сопла и кончая анодным пятном на фронтальной поверхности полосы реза. Тепловая энергия вводится в разрезаемый металл струей плазмы и столбом дуги. При этом коэффициент полезного действия (КПД) прямой плазменной дуги составляет 60–70 %. Недостатком дуги прямого действия является невозможность обработки диэлектрических материалов.

Дуга косвенного действия возбуждается и горит между электродами, которые не связаны с обрабатываемым материалом. Катодом служит электрод плазмотрона, а в качестве анода используется его формирующее сопло. Объект обработки не включен в электрическую цепь. Столб дуги расположен внутри плазмотрона. Плазмообразующий газ контактирует со столбом дуги на коротком участке, протяженностью от торца электрода до выходного среза канала сопла. Далее плазма существует независимо от столба дуги. Вследствие этого температура и скорость истечения струи плазмы по мере удаления от выходного среза сопла резко уменьшается, а КПД при использовании дуги косвенного действия не превышает 30–40 %.

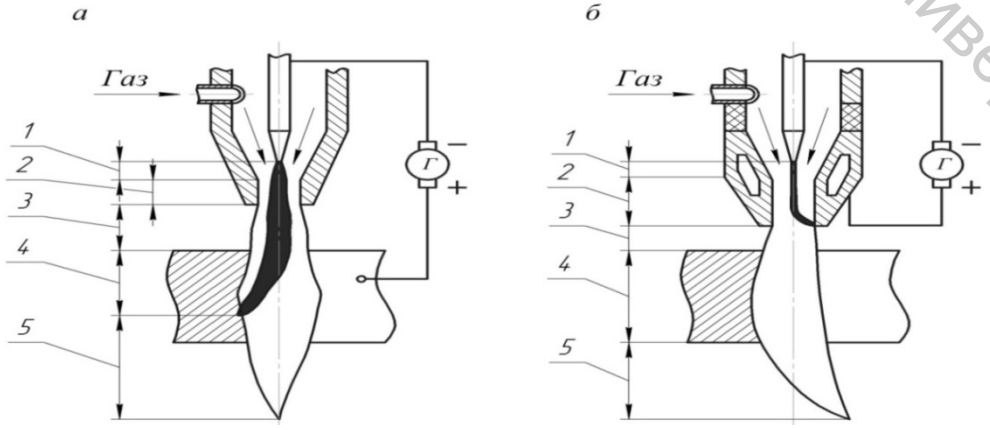


Рисунок 1.11 – Элементы схем плазменных дуг прямого (а) и косвенного (б) действия и их участки:

Витебский государственный технологический университет

1 – закрытый; 2 – сжатый; 3 – открытый; 4 – рабочий;
5 – факел; Г – генератор тока

1.2.2 Плазмообразующие среды

В качестве плазмообразующих сред применяют аргон, гелий, азот, воздух, водород, воду.

Аргон – химически инертный газ с низкой теплопроводностью, поэтому он хорошо защищает от перегрева и разрушения электрод и сопло. Однако, аргон малоэффективен для преобразования электрической энергии дуги в тепловую. Он обладает самой низкой напряженностью поля столба дуги, т. е. аргоновая плазма вызывает значительное падение напряжения на дуге. Это означает, что при одинаковом токе в аргоновой плазме выделяется минимальное количество энергии по сравнению с другими плазмообразующими газами.

Гелий – в отличие от аргона обладает большей теплопроводностью. В случае его применения для плазменной резки происходит быстрый нагрев и разрушение сопла. Гелий обеспечивает высокую напряженность дугового столба примерно в четыре раза более высокую, чем у аргоновой плазмы. Гелий, в отличие от аргона, является более эффективным преобразователем энергии дуги в тепло и применяется в смеси с аргоном.

Азот является наиболее приемлемым газом для стабилизации плазменной дуги. Теплоёмкость азотной плазмы в пять раз выше аргоновой. Напряженность поля столба дуги в азоте более высокая, чем в аргоне. Поэтому использование азота в качестве плазмообразующего газа эффективно для преобразования электрической энергии в тепловую.

Воздух является сильным окислителем металлов. При использовании воздуха по сравнению с азотом скорость резки углеродистых и низколегированных сталей при тех же параметрах дуги возрастает более, чем в 1,5 раза.

Водород обеспечивает высокую напряженность поля дугового столба. Диссоциация и ионизация водорода происходит при более низких температурах, чем аргона и гелия. Теплоёмкость водородной плазмы несколько ниже азотной, но в четыре раза выше аргоновой. Водород обладает высокой теплопроводностью и является эффективным преобразователем энергии дуги в тепло. Использование водорода в качестве плазмообразующего газа приводит к быстрому разрушению сопла в результате интенсивного нагрева. Поэтому водород применяют как добавку к аргону или азоту.

Витебский государственный технологический университет

Вода может использоваться в качестве плазмообразующей среды самостоятельно, в виде пара или как добавка к рабочему газу. Применение воды обеспечивает интенсивное охлаждение периферийных участков столба дуги и концентрирует его. В результате температура в ядре дуги возрастает, увеличивается его проплавляющая способность.

Анализ рассмотренных плазмообразующих сред показывает, что ни один из газов не может обеспечить самостоятельно весь комплекс положительных свойств идеальной плазмообразующей среды. Поэтому используют смеси из различных газов. Хорошо зарекомендовали себя смеси аргона и азота в сочетании с водородом. В сочетании с азотом и воздухом применяется вода. Плазмообразующая среда оказывает существенное влияние на изменение фазового состава металла прилегающего к поверхности реза, на его химический состав и механические свойства.

1.2.3 Ввод компонентов плазмообразующей среды в электрическую дугу

Способы ввода плазмообразующей среды в электрическую дугу можно разделить на четыре группы: аксиальный (осевой), тангенциальный (вихревой), распределённый, транспирационный (рис. 1.12).

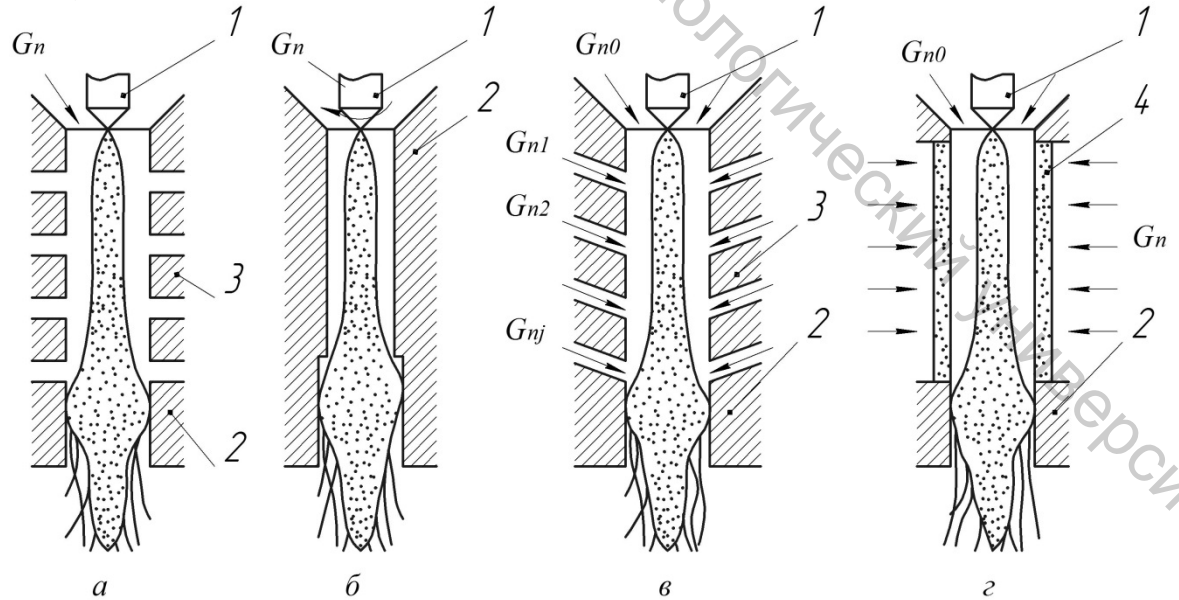


Рисунок 1.12 – Схемы ввода плазмообразующей среды в дуговой разряд:
а – аксиальный; б – тангенциальный; в – распределённый;
г – транспирационный; 1, 2 – электроды; 3 – межэлектродные вставки;
4 – пористая стенка; G_{n0} – стабилизирующий газ;
$G_n, G_{n1}, \ldots G_{nj}$ – плазмообразующие газы

Витебский государственный технологический университет

Аксиальный ввод используется в различных плазменных устройствах, применяемых в основном для обработки дисперсных материалов, для сварки, плавки, рафинирования металлов, требующих аксиального потока плазмы. Он позволяет обеспечить хорошую стабилизацию разряда, снижения турбулентных пульсаций в плазме, возможность получения ламинарных потоков, повышение однородности прогрева газа в разряде, равномерность его распределения по сечению канала.

Тангенциальный ввод используется для повышения термоизоляции плазмы. Газ подается в разрядную камеру по специальным каналам, в результате чего образуется газовый вихрь, обдувающий столб дуги и генерируемую плазменную струю. Слой холодного газа под действием центробежных сил располагается у стенки, предохраняя её от контакта с дугой.

Плазмотроны с тангенциальным вводом газа, в отличие от аксиального, имеют больший термический КПД; более высокую эффективность преобразования электрической энергии в тепловую; хорошую пространственную стабилизацию разряда.

К недостаткам данного способа относятся: образование вихревой плазменной струи с повышенным рассеиванием мощности; сложности ввода исходного материала в плазменный поток; невозможность получения ламинарных потоков; высокий уровень шума.

Распределённый ввод во многом аналогичен аксиальному вводу газа. В этом случае повышается термоизоляция плазмы от стенок канала и возможно создание плазмотронов с высоким термическим КПД (более 80 %). Длина дуги может быть значительно увеличена, и в связи с этим достигнута необходимая мощность плазмотронов при высоких напряжениях и низких токах дуги.

Недостатками данного способа являются: усложнение конструкции плазмотрона; трудность равномерного распределения газа по сечению разрядного канала; низкое теплосодержание потока плазмы в связи с большим расходом газа.

Транспирационный ввод – это способ ввода газа через пористую стенку. При этом имеет место интенсивное взаимодействие газа со стенкой. Поэтому разрядные каналы с пористыми стенками обеспечивают высокий термический КПД более 90 %. Кроме того обеспечивается равномерность ввода газа в дугу и улучшается её стабилизация.

1.2.4 Устройство плазмотронов

Плазмотрон – это устройство, предназначенное для генерации плазмы. Применяется множество конструкций плазмотронов, схема одного из них представлена на рисунок 1.13.

Витебский государственный технологический университет

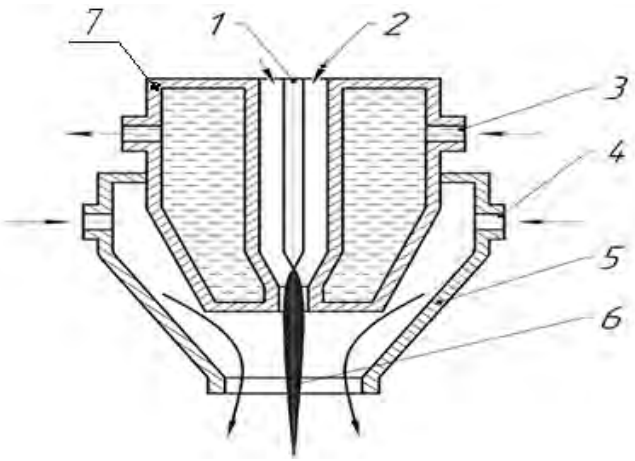


Рисунок 1.13 – Схема конструкции плазмотрона:
1 – электрод; 2 – вход плазмообразующего газа; 3 – водяное охлаждение; 4 – вход защитного газа; 5 – сопло;
6 – факел плазмы; 7 – корпус

Для каждой конструкции плазматрона существует вполне определённая конструкция дуговой камеры. Различают конструктивные и технологические параметры плазмотронов.

К конструктивным параметрам относятся: диаметр канала плазмотрона; длина канала плазмотрона; форма разрядной области; угол оформляющей части входного электрода; диаметр, длина, угол раскрытия выходного электрода; расстояние между рабочей поверхностью входного электрода и входной частью канала.

К технологическим параметрам относятся: ток дуги; расход плазмообразующей среды; способ ввода плазмообразующей среды в плазмотрон; КПД плазмотрона.

Электроды плазмотрона по типу и конструкции зависят от состава плазмообразующей среды. В качестве материала для электродов, работающих в окислительных средах, используют гафний, так как его соединения обладают высокими эмиссионными свойствами, устойчивы к термическим колебаниям токового и газового режимов, а так же условиям охлаждения.

Теплофизические константы гафния и его соединений существенно ниже соответствующих теплофизических констант вольфрама – теплопроводность в три – четыре раза, а температура плавления – в два раза.

Электроды, работающие с нейтральными газами, чаще всего изготавливают из вольфрама. Преимущественно используется вольфрам, легированный окислами лантана и иттрия. Эти добавки существенно улучшают эмиссионные свойства вольфрама, повышая ресурс работы катода и надёжность плазмотрона.

Сопло является основным элементом плазмотрона, определяющим его технические характеристики и ресурс работы.

Витебский государственный технологический университет

Назначение сопла – формирование геометрических и энергетических параметров дуги.

Сопло выполняет так же роль электрода, обеспечивающего зажигание вспомогательной дуги. С её помощью осуществляется переход к возбуждению основной дуги, горящей между электродом плазмотрона и обрабатываемым изделием. К основным параметрам сопла относятся диаметр и высота канала, геометрия дуговой камеры плазмотрона. Диаметр и высота канала сопла устанавливаются в зависимости от величины рабочего тока, состава и расхода плазмообразующего газа. При этом находят наиболее благоприятные сочетания таких показателей, как технологические возможности и надежность работы плазмотрона, т. е. стойкость сопла и электрода.

1.2.5 Плазменная резка

Плазменная резка широко применяется для обработки конструкционных сталей всех марок толщиной 1-40 мм; коррозионностойких высоколегированных сталей толщиной 3-70 мм; алюминия и его сплавов толщиной 3-80 мм; меди и её сплавов толщиной 2-70 мм.

Процесс резки состоит в проплавлении мощным дуговым разрядом, локализованном на малом участке поверхности разрезаемого металла, с последующим удалением расплавленного металла из зоны реза высокоскоростным газовым потоком.

Струя плазмы формируется путём обжатия столба дуги в канале сопла. Под воздействием стенок канала сопла и струи плазмообразующего газа столб дуги сжимается, его поперечное сечение уменьшается, а температура в центральной части столба повышается до 10000-50000 ºС. В результате внутренний слой газа, соприкасающийся со столбом дуги, превращается в плазму, а наружный слой, обтекающий стенки канала сопла, остается сравнительно холодным, образуя электрическую и тепловую изоляцию между потоком плазмы и поверхностью сопла. Этот охлаждённый слой газа препятствует отклонению столба дуги от заданного направления и замыкания его на стенку канала сопла.

Напряжение сжатой дуги соответствует 60-200 В, что в 3-10 раз больше, чем в свободной дуге. Плотность тока сжатой дуги достигает 100 $А/мм^2$, т. е. на порядок больше, чем у свободной, а удельная мощность достигает $2 \cdot 10^6$ $Вт/см^2$.

Процесс плазменной резки, как правило, сопровождается водяной защитой (рис. 1.14). При этом используют резку листов, уложенных над поверхностью или на поверхности воды (*а, б*), погруженных в воду (*в*). Возможны сочетания одной из схем (*а–г*) с

Витебский государственный технологический университет

круговой водяной защитой. В этих условиях вода улучшает санитарно-гигиенические условия процесса; обеспечивает повышение качества кромок вырезаемых изделий; способствует снижению тепловых деформаций материала; поглощаются водой вредные выделения.

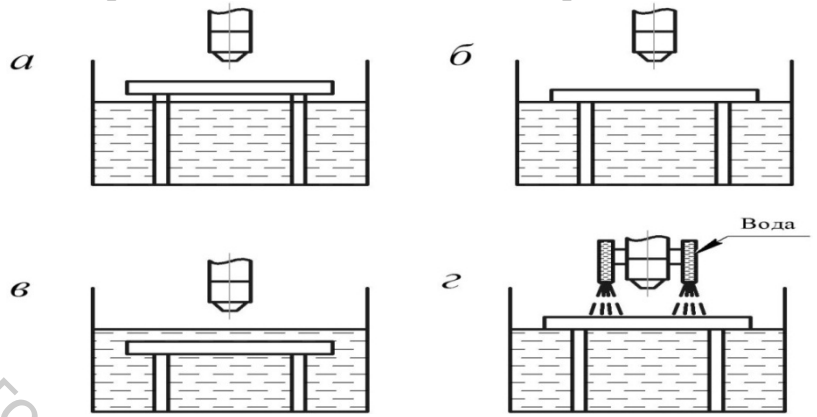


Рисунок 1.14 – Схемы плазменной резки с водяной защитой

На процесс плазменной резки оказывает влияние множество технологических факторов: сила тока, напряжение дуги, скорость резки, расход плазмообразующего газа, скорость его истечения из сопла, диаметр и длина канала сопла, плотность разрезаемого металла и др.

При резке углеродистых и низколегированных сталей толщиной 6-30 мм, исходя из нормальной стойкости электродов (около 2 ч горения дуги), силу тока дуги обычно выбирают в пределах 270±30 А. Уменьшение силы тока снижает скорость резки, увеличение – заметно ускоряет износ электродов.

Сила тока и напряжение режущей дуги не равноценны по интенсивности влияния на скорость резки. Экспериментально установлено, что повышение напряжения более эффективно влияет на скорость резки, чем увеличение силы тока.

Возбуждение дуги происходит при слабом потоке плазмообразующего газа при его расходе 3-5 л/мин. Повышение расхода сверх рекомендуемого приводит к обрыву дуги. Если расход слишком мал, плазменную дугу, горящую внутри резака, не удается выдуть наружу из сопла, или она столь коротка, что её длины не хватает для создания токопроводящего мостика между электродом и металлом. В этом случае режущая дуга не возникает.

После возбуждения дуги увеличение расхода плазмообразующего газа (60-90 л/мин) приводит к обжатию плазменного столба дуги, ширина реза уменьшается, скорость реза увеличивается, напряжение дуги повышается.

Ширину реза устанавливают с учетом суммарного воздействия ряда факторов: диаметра сопла, силы тока, скорости резки, состава и расхода плазмообразующего газа, расстояния от нижнего среза сопла до поверхности разрезаемого металла. В первом приближении ширину реза на верхней кромке можно принимать равной двум диаметрам сопла. Для

Витебский государственный технологический университет

обеспечения надежной работы при силе тока примерно 300 А и разрезаемой толщине 3-10 мм целесообразно использовать сопла диаметром 1-2 мм. Для стали толщиной 10-30 мм целесообразно использовать сопла диаметром 3 мм, для стали толщиной 31-50 мм применяют сопла с большим диаметром.

В таблице 1.6 приведены рекомендуемые режимы резки углеродистых и низколегированных сталей толщиной 6-30 мм. При этом сила тока составляет 270±30 А, расход газа 80-90 л/мин, расстояние от резака до поверхности металла 10-12 мм, ширина реза по нижней кромке 3-3,5 мм.

Таблица 1.6 – Параметры режимов плазменной резки углеродистых и низколегированных сталей

Параметр	Толщина разрезаемой стали, мм							
	6	8	10	12	14	16	20	30
Скорость резки, см/с	5-5,1	4-4,1	3,15-3,3	2,8-3,0	2,5-2,65	2,16-2,33	1,66-1,83	1,0-1,1
Напряжение дуги, В	140-145	145-150	150-155	155-160	160-165	160-165	165-170	170-175

Алюминий и его сплавы относятся к материалам, для которых применение плазменной резки наиболее эффективно, так как высокая скорость резки сочетается с хорошим качеством реза.

Наиболее полную защиту расплавленного алюминия от окисления и насыщения водородом достигают при использовании аргона в качестве плазмообразующего газа. Преимуществом аргона является так же способность поддерживать плазменную дугу при небольших напряжениях и малой силе тока. Аргоновую плазму обычно применяют при ручной резке листов из алюминиевых сплавов сравнительно небольшой толщины (до 12-20 мм). Недостаток аргоновой плазмы – относительно малая проплавляющая способность дуги и, как следствие скорость резки меньше, чем при использовании других плазмообразующих газов.

Скорость резки можно существенно повысить за счет добавки к аргону водорода. Аргона-водородные смеси, содержащие 35-50 % водорода, обеспечивают минимальную шероховатость реза. По мере увеличения толщины разрезаемого металла рекомендуют увеличивать содержание водорода в смеси, доводя его до 60-80% при толщине 80-100 мм. Для резки алюминиево-марганцевых сплавов и сплавов типа дуралюмина используют смеси с меньшим содержанием водорода, а так же азотно-водородные смеси.

Ориентировочные параметры режимов плазменной резки алюминиевых сплавов с применением аргона, азота, водорода приведены в таблице 1.7.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 1.7 – Ориентировочные параметры режимов плазменной резки алюминиевых сплавов

Толщина металла, мм	Диаметр сопла, мм	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Мощность, кВт	Расход газа, л/мин		Скорость резки мм/с
					аргона/ азота	водорода	
15	35	250	140-160	40	12/24	8,5	17
30			180-200			18	10
50	5	450	160-180	50	24	18	7,5
80					30	24	7,0

Медь и медные сплавы характеризуются высокой теплоемкостью и теплопроводностью. Поэтому при их резке используют более мощные дуги, чем при резке стали. В качестве плазмообразующего газа применяют воздух и азотно-водородные смеси с высоким содержанием водорода.

Титан и его сплавы хорошо подвергаются резанию плазменной дугой. Наибольшая производительность достигается при использовании воздуха и кислорода в качестве плазмообразующего газа. При резке воздушной плазмой кромки реза на глубине 0,1–0,2 мм содержат в 1,5 раза больше кислорода, чем основной металл, в 7–10 раз больше азота, в 4-8 раз больше водорода. Поэтому кромки титановых заготовок после плазменной резки подлежат механической обработке.

1.2.6 Плазменная сварка

Свойство плазменной дуги глубоко проникать в металл используется для сварки достаточно толстых (10-15 мм) металлов без предварительной разделки кромок и присадочного материала.

В качестве плазмообразующего газа обычно применяют аргон или его смеси с водородом или гелием, а для защиты металла сварочной ванны от окисления при сварке легированной стали, меди, никеля и сплавов на его основе – смесь аргона с 5-8 % водорода. При сварке низкоуглеродистой и низколегированной стали в качестве защитного газа можно применять углекислый газ.

Расход плазмообразующего газа устанавливают таким образом, чтобы истечение плазмы из сопла не было турбулентным, а силовое воздействие плазменной струи на поверхность сварочной ванны не приводило к разбрызгиванию расплавленного металла.

Плазменной дугой сваривают листы толщиной до 9,5 мм встык без разделки кромок и присадочного металла. В ряде случаев успешно

Витебский государственный технологический университет

сваривают за один проход листы толщиной до 13 мм. При сварке листов толщиной до 25 мм требуется V- или U-образная подготовка кромок. При плазменно-дуговой сварке количество присадочного металла снижается примерно в 3 раза. Наибольшее преимущество сварки плазменной дугой проявляется при соединении толстых листов без разделки кромок и использования присадочного металла.

Плазменно-дуговая сварка может быть выполнена практически в любом пространственном положении. Режимы сварки плазменной дугой некоторых металлов и сплавов приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Режимы сварки плазменной дугой стыковых соединений без присадочного металла

Металл	Толщина листов, мм	Скорость сварки, м/мин	Диаметр сопла, мм	Параметры дуги		Плазмообразующий газ		Фокусирующий и защитный газ	
				Сила тока, А	Напряжение, В	Состав	Расход, $\frac{м^3}{ч}$	Состав	Расход, $\frac{м^3}{ч}$
Коррозионно-стойкая сталь	2,4	0,97	–	160	31	Ar+7,5 % H_2	0,14	Ar+7,5 % H_2	0,99
	3,2	0,61		145	32		0,28		
	4,8	0,41		240	38		0,34		1,27
	6,4	0,36					0,5		1,41
	12,7	0,19	2,4	305	35	Ar	0,14		1,4
Титан	3,2	0,51	–	185	21		0,23	Ar	0,85
	4,8	0,38		190	26		0,34		1,27
	12,7	0,254	2,4	285	38		0,113		0,85
Инконель 600	3,5	0,4		180	27		0,34		1,13
Низкоуглеродистая сталь	6,4	0,254		305	35		0,057		1,4
Алюминий				85	27	He+Ar	0,085+0,028		0,85

Комбинированный процесс точечной плазменно-дуговой сварки. Дуговую точечную сварку нахлесточных соединений различных металлов и сплавов выполняют обычно плавящимся электродом с предварительным сверлением и зенковкой отверстий в верхнем листе. Диаметр отверстий превышает диаметр электрода не менее чем на 3-8 мм. Такая технология обеспечивает проплавление верхнего листа и уменьшение выпуклости электрозаклепочного шва. Однако сверление отверстий увеличивает трудоемкость работ, производимых перед общей сборкой и сваркой металлоконструкций. Более технологичным представляется комбинированный процесс

Витебский государственный технологический университет

точечной сварки (рис. 1.15), предусматривающий свободное проплавление листов с использованием плазменной горелки 1 и последующую заварку полученных отверстий дугой с плавящимся электродом 2.

Расстояние от оси горелки мундштука с плавящимся электродом регулируют в диапазоне 30-100 мм. Питание плазменного и дугового разрядов осуществляют от раздельных источников 3 и 5, управляемых программируемым устройством 4.

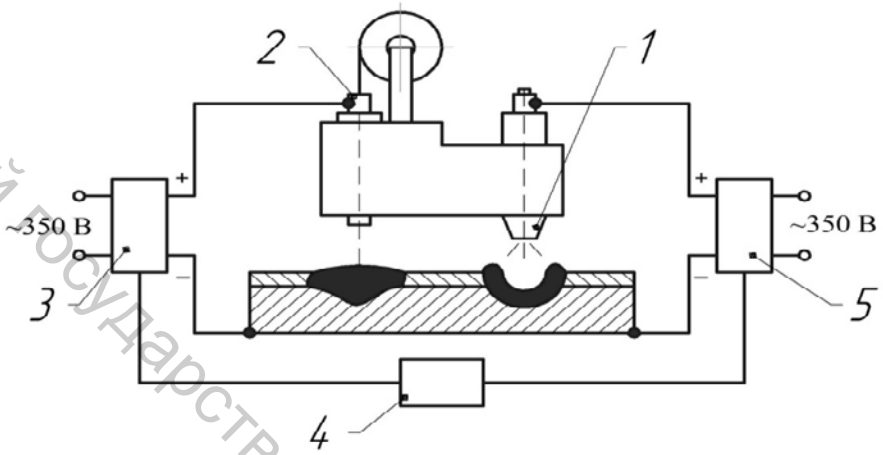


Рисунок 1.15 – Схема комбинированного процесса точечной плазменно-дуговой сварки

Внешний вид точечных соединений, полученных комбинированным способом плазменно-дуговой сварки, характеризуется равномерным формированием швов, стабильной глубиной проплавления.

1.2.7 Плазменная наплавка

Наплавка относится к наиболее эффективным методам нанесения защитных и упрочняющих покрытий. Наплавку используют преимущественно для восстановления изношенных или повреждённых деталей машин. На многих производствах наплавка является обязательным технологическим процессом, который применяют при изготовлении новых изделий. Корпуса атомных реакторов и химических установок, трубопроводная арматура, засыпные устройства доменных печей, буровой инструмент, клапаны двигателей внутреннего сгорания, шнеки экструдеров и другие изделия современного машиностроения не могут быть изготовлены без наплавки нержавеющими, износостойкими, жаропрочными или другими материалами с особыми эксплуатационными свойствами.

Изготовительная наплавка быстроизнашивающихся или наиболее тяжело нагруженных деталей позволяет увеличить срок их

Витебский государственный технологический университет

службы, избавить промышленность от необходимости производить большое количество запасных частей, повысить работоспособность и надежность машин, сократить расходы на их эксплуатацию. По этой причине применение изготовительной наплавки обеспечивает прогресс в различных отраслях машиностроения.

1.2.7.1 Плазменная наплавка проволокой

Плазменная наплавка осуществляется двумя способами: с боковой или осевой подачей присадочной проволоки. Присадочная проволока может быть токоведущей или нейтральной.

Принципиальная схема наплавки с боковой подачей токоведущей проволоки представлена на рисунке 1.16 *а*.

Дуга горит между вольфрамовым электродом и присадочной проволокой, подаваемой сбоку. Дуга между неплавящимся электродом и присадочной проволокой представляет собой независимый от изделия источник нагрева, что позволяет раздельно регулировать нагрев и плавление основного и присадочного металла.

Основной металл нагревается за счёт теплового воздействия струи плазмы и теплоты, переносимой каплями присадочного металла. Эффективная тепловая мощность такого источника нагрева зависит не только от силы тока электрической дуги, но и от расстояния между проволокой и поверхностью основного металла.

Так как энергия плазменной струи передается основному металлу через слой жидкого присадочного металла, то наплавку плазменной струей с токоведущей проволокой можно рассматривать как своеобразную заливку поверхности изделия перегретым присадочным металлом.

Этот способ наплавки обеспечивает высокую прочность соединения наплавленного и основного металлов.

Схема наплавки с боковой подачей нейтральной проволоки представлена на рисунке 1.16 *б*. С точки зрения нагрева основного металла плазменная дуга является более эффективным и более локальным тепловым источником, чем плазменная струя. Эффективный КПД нагрева основного металла плазменной дугой 50-75 %, а плазменной струёй 20-45 %.

При использовании этого способа плавления присадочного материала происходит за счёт теплоты, получаемой от столба дуги путем конвективного и лучистого теплообмена. Массовую скорость плавления определяют теплофизические и газодинамические параметры плазмы, их распределение по радиусу столба дуги и площади теплообмена. В зависимости от этих факторов присадочная проволока может плавиться на различном расстоянии от оси дуги, начиная от

Витебский государственный технологический университет

точки ввода проволоки в столб дуги и кончая точкой выхода из него. В первом случае скорость плавления проволоки минимальна, во втором – максимальна для данного режима горения дуги. Массовая скорость плавления возрастает не только с увеличением длины нагреваемого участка проволоки, но и при увеличении её диаметра или замены проволоки лентой, что увеличивает поверхность теплообмена.

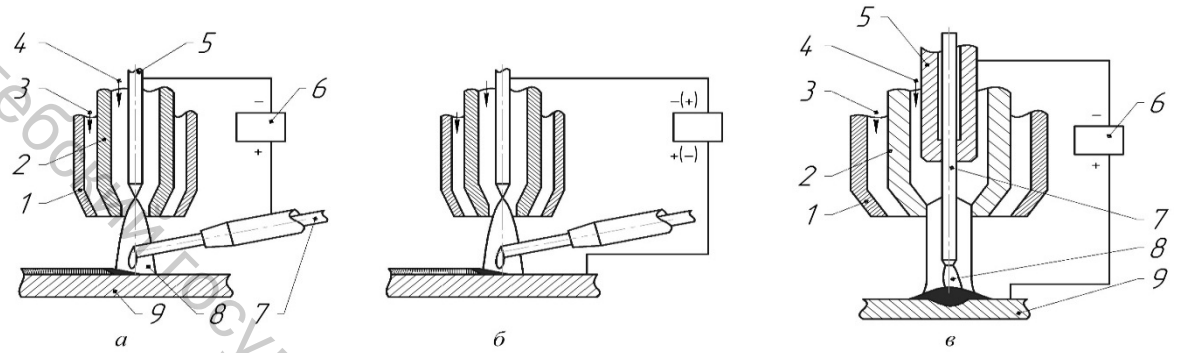


Рисунок 1.16 – Схемы плазменной наплавки с боковой присадочной проволокой (а, б) и осевой (в):
1 – защитное сопло; 2 – плазмообразующее сопло; 3 – защитный газ; 4 – плазмообразующий газ; 5 – электрод; 6 – источник питания дуги; 7 – проволока; 8 – плазменная дуга; 9 – изделие

Схема плазменной наплавки с осевой подачей токоведущей проволоки представлена на рисунке 1.16 *в*.

Процесс плазменной наплавки начинается с возбуждения электрической дуги, после чего в течение 0,1 с самопроизвольно возникает стабильная плазменная дуга между соплом и изделием.

В зависимости от силы тока дуги плавящейся проволоки возможны два вида переноса металла. При силе тока меньше некоторого критического значения столб дуги плавящегося электрода имеет цилиндрическую или слегка коническую форму, а перенос металла происходит каплями, движущимися вдоль оси дуги. Разбрызгивание отсутствует, однако глубина проплавленного основного металла значительна, так как тепловой поток дуги и капель сосредоточен на небольшой площади.

При больших тепловых потоках капельный перенос переходит во вращательно-струйный. Для него характерны большая длина расплавленной части электрода, изгиб её по спирали и вращение вокруг оси горелки. Например, конец стальной электродной проволоки диаметром 1,2 мм при силе тока 300 А описывает окружность диаметром около 8 мм.

Скорость вращения расплавленного конца электродной проволоки и дуги зависит от многих параметров режима (вылета электрода, силы тока и др.). Режимы наплавки с вращением дуги отличаются повышенной производительностью.

Витебский государственный технологический университет

Достоинствами плазменной наплавки проволокой, определяющими возможные области её применения, являются: малая глубина проплавленного слоя основного металла, что важно в тех случаях, когда разбавление основного металла в наплавленном приводит к ухудшению свойств наплавленного металла; отсутствие при наплавке технических проблем, связанных с плохой отделяемостью шлаковой корки; этот способ находит широкое практическое применение при наплавке сплавов на основе цветных металлов.

1.2.7.2 Плазменно-порошковая наплавка

Плазменная наплавка с присадкой порошка в наибольшей степени отличается от других способов наплавки применяемыми материалами. Порошки могут быть получены практически из любого пригодного для наплавки материала, независимо от твердости, пластичности, степени легирования и других свойств. Применяют в качестве присадки порошки (гранулы) размером от 2,5–3,0 мм до тонко измельченных частиц размером до 0,1 мм.

Порошковый присадочный материал могут распределять на поверхность изделия непосредственно перед наплавкой или вводить в дугу в процессе наплавки. Ввод порошка в дугу может осуществляться внутри плазмотрона или вне его.

На рисунке 1.17 представлена схема наплавки по слою гранулированной присадки. Присадочный материал в гранулах размером 0,5-3,0 мм заранее насыпают равномерным слоем по наплавляемой поверхности с помощью специального устройства. Расплавляют присадочный материал плазмотроном, который совершает поперечные движения, в соответствии с шириной насыпанного слоя. Тяжёлые крупные гранулы не раздуваются дугой и защитным газом. Поэтому нет необходимости закреплять их на поверхности каким-либо связующим веществом.

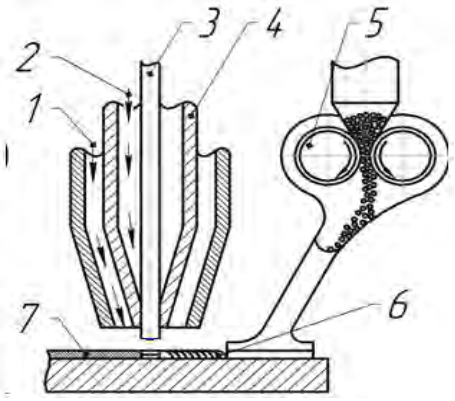


Рисунок 1.17 – Схема наплавки по слою гранулированной присадки:
1 – ввод защитного газа; 2 – ввод плазмообразующего газа;

Витебский государственный технологический университет

3 – электрод; 4 – сопло; 5 – питатель подачи крупки; 6 – слой крупки; 7 – наплавленный металл

Недостатки процесса – сложность наплавки криволинейных или цилиндрических поверхностей; необходимость применения формирующих приспособлений при наплавке кромок; невозможность наплавки тонких слоёв.

Схема наплавки порошком с внутренним вводом представлена на рисунке 1.18 *а*. Порошок вводится в дугу под углом 25-80º через воронкообразную щель между коническими поверхностями внутреннего и наружного сопел. В этом случае двухфазный поток транспортирующего газа и порошка концентричен дуге. Поэтому он не только смешивается, но и повышается его стабильность. Дуга косвенного действия горит между электродом и внутренним соплом и служит, в основном, для обеспечения устойчивой работы плазмотрона. Роль её в нагреве порошка незначительна. Более мощная дуга прямого действия обеспечивает необходимый нагрев поверхности изделия, плавление присадочного металла и образование сварочной ванны.

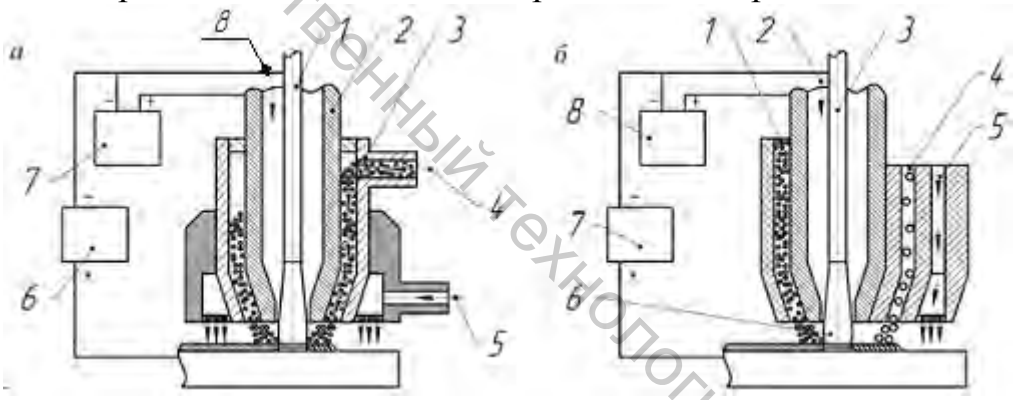


Рисунок 1.18 – Схемы плазменной наплавки с вводом присадочного порошка в дугу внутри плазмотрона (а) и снаружи (б):
а) 1 – электрод; 2, 3 – соответственно внутреннее и наружное сопла; 4 – ввод присадочного порошка транспортирующим газом; 5 – ввод защитного газа; 6, 7 – соответственно источники питания дуг прямого и косвенного действия; 8 – ввод плазмообразующего газа;
б) 1 – ввод присадочного порошка транспортирующим газом; 2 – ввод плазмообразующего газа; 3 – электрод; 4 – ввод дополнительного присадочного порошка; 5 – ввод защитного газа; 6 – плазменная дуга; 7, 8 – источники питания соответственно дуг прямого и косвенного действия

При плазменной наплавке с внешней подачей присадочного порошка (рис. 1.18 *б*), последний подают в зону наплавки через отверстие в торцах плазмотрона. При наплавке композиционных сплавов дополнительный канал служит для подачи упрочняющих частиц карбида вольфрама. Канал расположен сзади дуги и имеет угол, обеспечивающий попадание зерен карбида в сварочную ванну, минуя

Витебский государственный технологический университет

дугу. Это позволяет устранить или уменьшить их растворение в расплаве. Сварочная ванна образуется за счёт расплавления основного металла; защитного покрытия, нанесенного на зёрна карбида вольфрама; порошка сплава-связки, который подают вместе с карбидом либо отдельно от него по боковым каналам. В любом случае, наплавленный металл имеет гетерогенную структуру, состоящую из относительно легкоплавкой матрицы и нерасплавившихся зерен карбида.

Плазменно-порошковая наплавка обладает всеми достоинствами плазменной наплавки проволокой. Кроме того, применение в качестве присадочного материала порошка, который может быть получен практически из любого сплава, значительно расширяет круг сплавов, наплавляемых механизированными способами. Стоимость порошков на 10-30% ниже стоимости прутков и проволоки аналогичного состава. Качество порошков, в частности, их химический состав, контролировать легче, чем качество порошковой проволоки. Порошки можно смешивать для получения требуемого состава.

Важными достоинствами плазменной наплавки порошком является небольшая толщина слоя (при необходимости) и хорошее его формирование, благодаря чему снижаются расход наплавочных материалов и трудоёмкость механической обработки наплавленных изделий.

1.3 Электроэрозионная обработка материалов

Электроэрозионные технологии получили широкое распространение. В первую очередь это связано с новыми конструкторскими решениями ряда изделий сложнейшей формы, малых и больших размеров, деталей из сверхпрочных материалов, обладающих высокой твердостью, большой вязкостью, плохой обрабатываемостью резанием.

В целом ряде процессов механической обработки достигаемые технологические параметры близки к предельно возможным. Дальнейшее повышение производительности при получении требуемых качественных характеристик у обработанных деталей путем совершенствования механической обработки уже не представляется возможным.

Одна из альтернатив механической обработке – электроэрозионная обработка.

Электроэрозионные технологии применимы во всех отраслях промышленности. При этом прогресс некоторых отраслей напрямую связан с активным применением электроэрозионных процессов на этапах не только технологической подготовки производства, но и при

Витебский государственный технологический университет

серийном производстве различных деталей. Но особенно эффективны технологии электроэрозионной обработки в инструментальном производстве, поскольку для производства любого изделия необходима технологическая оснастка: штампы, пресс-формы, формы для литья, специальный инструмент. Изготовление такой оснастки на обычном металлорежущем оборудовании чрезвычайно трудоемко и сопряжено с использованием дополнительно дорогих ручных слесарно-доводочных работ.

1.3.1 Физические основы электроэрозионной обработки материалов

Электроэрозионная обработка заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под воздействием электрических разрядов в результате электрической эрозии (ГОСТ 25331-82). Под электрической эрозией понимают разрушение поверхности электродов, сопровождающееся съемом металла при прохождении между электродами электрических разрядов. При этом различают электрод-инструмент и электрод-заготовку. Для осуществления процесса между электродами всегда должен быть зазор, который определяется как межэлектродный промежуток.

Съем металла при электроэрозионной обработке осуществляется рабочими импульсами тока. Рабочий импульс – импульсный разряд, производящий съем металла вследствие электрической эрозии и характеризующийся прохождением через межэлектродный зазор импульса электрического тока под напряжением, изменяющимся во время импульса.

Обработка материала может осуществляться в газовой среде или жидкости. Выделяют следующие основные процессы, протекающие при электроэрозионной обработке: электрические, тепловые, газодинамические, термомеханические.

Обработка материала в *газовой* среде происходит под действием микроразрядов, возникающих при сближении электрода-инструмента с заготовкой.

Первой стадией электрического процесса является проба газовой среды в результате образования зоны с высокой напряженностью электрического поля. Наибольшая напряженность поля имеет место на участках поверхностей, характеризующихся наличием выступов, шероховатостей на инструменте и заготовке.

Вторая стадия процесса характеризуется образованием канала проводимости. Вырывающиеся электроны из наиболее выступающих участков поверхности катода устремляются к аноду, т. е. образуется электрический ток. При столкновении электронов с молекулами газа

Витебский государственный технологический университет

происходит ионизация газовой среды в узкой цилиндрической области (канал проводимости), содержащей ионы и электроны. Лавина электронов несёт значительное количество энергии, которая высвобождается на материал анода (заготовки) в виде тепловой энергии на поверхности заготовки, в результате чего образуется лунка.

Третьей стадией процесса электрической эрозии будет прекращение электрического тока. Межэлектродное пространство наэлектризовывается для очередного разряда.

Процесс электроэрозии в *жидкой* среде имеет свои особенности. Около канала проводимости образуется газовый пузырь из паров жидкости и металла. Вследствие высокого давления ($2 \cdot 10^7$ Па) канал проводимости стремится расшириться, сжимая окружающую жидкую фазу. Вследствие инерции газовый пузырь и окружающая жидкость неподвижны. Затем начинается их расширение. Граница поверхности канала проводимости движется с высокой скоростью, которая может достигать 150…200 м/с. На наружной границе канала образуется фронт уплотнения, в котором давление скачкообразно меняется от исходного в жидкости до высокого на границе. Температура в канале проводимости может достигать 40 000 °С.

Заключительной стадией является прекращение электрического тока, отрыв ударной волны от газового пузыря и продолжение его расширения по инерции. Ударная волна гасится окружающей жидкостью. В углублениях (лунках) электродов остаётся жидкий металл, который вытекает и выбрасывается.

Весь процесс электроэрозионной обработки характеризуется сложными явлениями различного характера: процессами в канале разряда и на электродах; тепловыми процессами; газо- и гидродинамическими явлениями; термомеханическими процессами и др. И все это обеспечивает получение за каждый разряд единичного следа на обрабатываемой поверхности – единичной лунки (рис. 1.19).

Единичные лунки характеризуются радиусом R_0, глубиной $h_л$и их соотношением $K = R_0/h_л$.

Условно можно допустить, что после первого прохода на поверхности Д (рис. 1.19 *а*) появляется волна углублений (лунок) с радиусом R_0. При этом удаляется материал заготовки в объеме каждой лунки, определенной глубиной $h_л$.

При втором проходе (рис. 1.19 *б*), если разряды приходятся на вершины первоначальной волны, происходит уже съем слоя металла величиной Z с образованием поверхности с шероховатостью

$R_{max} = R_0 - Z_в$.

Размер образуемой лунки во многом зависит от энергии воздействующего импульса. Для определения параметров шероховатости Rz при массированном воздействии разрядов можно использовать эмпирическую формулу

Витебский государственный технологический университет

$$R_z = \frac{\beta^2}{3k\sqrt[3]{W_u}}, \text{мкн},$$

где β – коэффициент перекрытия лунок; k – коэффициент, зависящий от материала электрода и длительности импульса; W_u– энергия импульса, Дж.

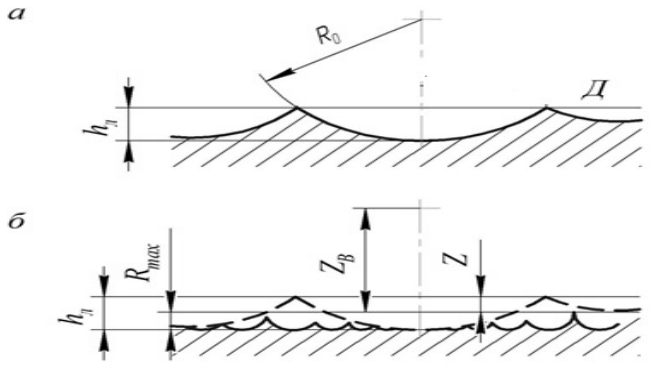


Рисунок 1.19 – Параметры лунки, полученной при единичном разряде в процессе первого (а) и второго (б) проходов

Обработку поверхности материала при электроэрозии можно представлять как последовательное воздействие на эту поверхность электрических импульсов различной мощности, в результате которого удаляются последовательно слои материала (рис. 1.20 *а, в, г*).

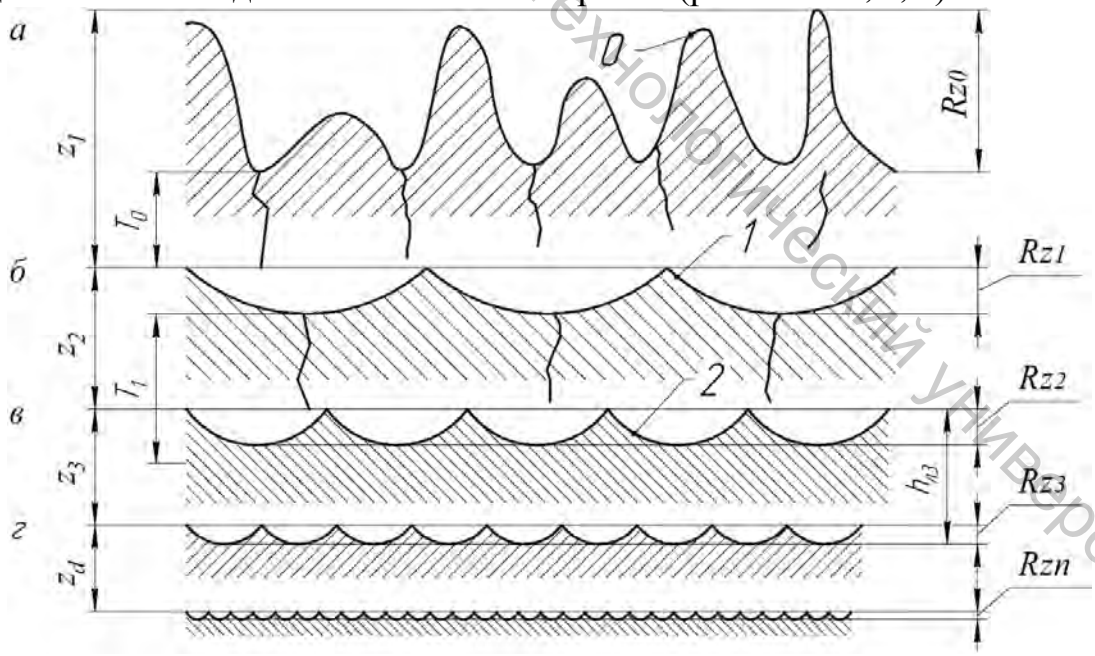


Рисунок 1.20 – Схема удаления материала заготовки последовательными проходами

При электроэрозионной обработке используются два вида разряда: **искровой** и **дуговой**. При искровой обработке удаление материала происходит за счет серии импульсов, действующих на смежные участки. Поэтому форма и размеры лунки будут отличаться от

Витебский государственный технологический университет

углубления после единичного разряда. Диаметр канала проводимости при искровом разряде меньше, чем при дуговом. Поэтому при искровом разряде концентрация энергии выше и металл с поверхности удаляется в результате плавления и испарения. Искровой разряд используется чаще всего при чистовой обработке.

С увеличением частоты электроискровые разряды сливаются и возникает электрическая дуга. При дуговом разряде температура в канале проводимости ниже на $5 \cdot 10^3 – 6 \cdot 10^3$ °С по сравнению с искровым зарядом. В результате резко снижается перегрев материала и переход его в парообразное состояние. Удаление материала при дуговом разряде происходит в капельножидком состоянии. Дуговой разряд применяется при черновой обработке.

1.3.2 Качество обработанной поверхности

Качество поверхности деталей, подвергнутых электроэрозионной обработке, характеризуется шероховатостью, физико-химическими и физико-механическими свойствами поверхностного слоя.

В общем случае поверхностный слой после электроэрозионной обработки условно можно разделить на следующие зоны (рис. 1.21): 1 – зону насыщения элементами рабочей жидкости; 2 – зону отложения материала электрода-инструмента; 3 – белый слой, образованный из расплавленного материала-заготовки; 4 – зону термического влияния; 5 – зону пластической деформации.

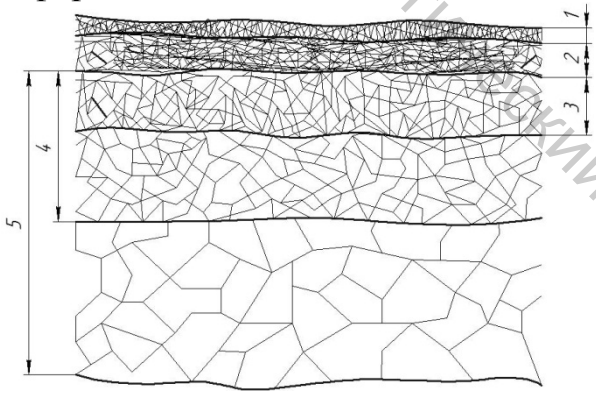


Рисунок 1.21 – Схематичное расположение зон поверхностного слоя, подвергнувшегося электроэрозионной обработке

Между зонами нет четкой границы. В большинстве случаев зоны перекрывают друг друга. Каждая зона имеет свои особенности. При этом каждая зона, даже незначительной толщины, играет весьма важную роль.

Зона 1 – зона насыщения элементами рабочей жидкости. Вследствие мощного теплового воздействия при выделении

Витебский государственный технологический университет

электрической энергии рабочая жидкость разлагается. Отдельные её элементы проникают в поверхностный слой, диффундируют в него и образуют химические соединения.

Вследствие хрупкости и неравномерной плотности поверхностный слой может быть дефектным. Он является причиной снижения прочностных свойств основного металла. При механических знакопеременных нагрузках именно в поверхностном слое возникают трещины, которые могут распространяться в глубь детали.

При изготовлении деталей, работающих с большими нагрузками, этот слой необходимо удалять одним из способов отделочной обработки.

Зона 2 – зона отложения материала электрода-инструмента. Образование этой зоны вызвано переносом частиц материала электрода-заготовки парами на поверхность обрабатываемого изделия. Материал электрода-инструмента может не только концентрироваться на поверхности изделия, но и диффундировать в более глубокие слои и образовывать там различные фазы – твердые растворы, соединения и т. д.

При использовании электрода-инструмента из графитизированного материала углерод диффундирует внутрь обрабатываемой детали и образует там карбидные соединения. При использовании медных электрод-инструментов поверхность может быть покрыта тонким слоем меди. Кроме того, медь может проникать в зону расплавленного материала, образуя отдельные включения.

Зона 3 – белый слой. После удаления микропорций металла на поверхности заготовки остается зона со структурой, резко отличающейся от исходной. Белый слой имеет мелкозернистую структуру, обладающую высокой химической стойкостью. На микрошлифах этот слой имеет вид белых полос, откуда он и получил свое название. Толщина слоя колеблется от десятых долей до 1,5 мм.

Зона 4 – зона термического влияния значительно по размерам превышает белый слой. На её структуру значительное влияние оказывает материал обрабатываемой заготовки, его исходное состояние, свойства рабочей среды, а так же режим обработки. Глубина структурных изменений определяется толщиной слоя металла заготовки, температура в которой превышает температуру структурных изменений. Зона термического влияния имеет закаленные участки с мелкозернистой структурой, участки вторичной закалки, которые зачастую чередуются с участками отпуска.

Зона 5 – зона пластической деформации. В процессе электроэрозионной обработки поверхность металла испытывает значительные ударные воздействия, связанные с перемещением волны напряжений от расширения и сжатия металла при нагреве и охлаждении заготовки под воздействием электрического разряда; от давления газа, образовавшегося в результате испарения рабочей жидкости; от

Витебский государственный технологический университет

возникающих электростатических и электромагнитных сил, а так же от протекающих структурных изменений и других факторов.

Зона пластической деформации проявляется в виде измельчения зерен, образования больших дислокаций, а так же изменения параметров кристаллической решетки.

Глубина зоны пластической деформации зависит так же от химического состава.

Микротвердость поверхностного слоя. Рассмотренные изменения структуры поверхностного слоя и связанные с ним пластические деформации оказывают существенное влияние на степень наклёпа и микротвердость.

На изменение микротвердости поверхностного слоя, а так же толщины наклепа значительное влияние оказывают свойства рабочей жидкости, охлаждающей поверхность лунки после прохождения импульса тока.

Установлено, что с ростом вязкости рабочей жидкости уменьшается скорость отвода тепла от охлаждающей поверхности. Кроме того, при использовании различных масел на охлаждаемой поверхности единичных лунок образуется газопаровая пленка, обусловливающая пленочное кипение. При последующем понижении температуры до комнатной наступает теплообмен с умеренной скоростью охлаждения (75-10 ºС/с).

Для получения высокой однородной твердости необходимо быстрое охлаждение поверхности единичной лунки при её высоких температурах. Этим требованиям может удовлетворять смесь масла с водой.

При температуре поверхности единичной лунки ниже температуры кипения масла, но выше температуры кипения воды, масло конденсируется и покрывает охлаждаемую поверхность. В этот период скорость охлаждения нагретой поверхности будет определяться охлаждающей способностью масла. В итоге микротвердость поверхностного слоя будет соответствовать микротвердости, полученной после электроэрозионной обработки в воде.

При нагреве в процессе электроэрозионной обработки имеет место интенсивный локальный нагрев поверхностного слоя, качество которого будет определяться величиной внутренних напряжений, возникающих в результате значительного градиента температур, и структурными превращениями. При определённых условиях напряжения могут превышать предел прочности обрабатываемого материала, что приведёт к образованию микротрещин.

При охлаждении поверхностного слоя заготовки существенно меняется структура и свойства. Возможности воздействия на качество поверхности определяются подбором состава рабочей жидкости, а так же условиями осуществления процесса электроэрозии.

Витебский государственный технологический университет

1.3.3 Основные параметры электроэрозионной обработки

Основными параметрами импульса являются: длительность, амплитуда, частота энергии импульсов; мощность обработки, износ электродов.

Длительность импульса τ_u – это время действия импульса электрического тока. При электроэрозионной обработке используются импульсы продолжительностью 10^{-7}–10^{-1} с. Длительность импульса при черновой обработке стали $\tau_u = 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-4}$с., при чистовой обработке $\tau_u = 5 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-4}$ с. При обработке твёрдых сплавов длительность импульсов сокращается на 2…3 порядка.

Пауза $\tau_п$ – промежуток времени между двумя последовательными импульсами.

Период Т – промежуток времени, через который наблюдается повторение начала или окончания импульсов

$$T = \tau_u + \tau_п.$$

Концентрация энергии определяется величиной скважности, которая представляет отношение периода повторений импульсов Т. к длительности импульсов τ_u

$$q = \frac{T}{\tau_u}.$$

При $q = 1$ импульсы тока действуют непрерывно и поэтому непрерывно тепловая энергия подводится к обрабатываемому материалу. Целесообразно, чтобы процесс образования отдельной лунки заканчивался несколько раньше начала воздействия следующего импульса. Поэтому диапазон скважностей обычно находится в пределах 1–30. При $q > 30$ считают, что на обрабатываемую поверхность действуют не периодичные, а одиночные импульсы.

Оптимальная длительность импульса равна

$$\tau_u = 1{,}27 \cdot \frac{\left[К_м \cdot С \cdot \rho \cdot t_{пл} \cdot \left(1+\frac{q_{пл}}{C \cdot t_{пл}}\right)^2\right]}{{B_0}^2} \cdot {W_i}^{2/3},$$

где $К_м$ – коэффициент, зависящий от свойств материала см/дж; С – теплоёмкость, Дж/К; ρ – плотность, кг/м^3; $t_{пл}$ – температура плавления материала, °С; $q_{пл}$ – тепловой поток, Вт; B_0 – коэффициент, зависящий от теплофизических констант; W_i – энергия импульса, Дж.

Амплитуда импульса силы тока колеблется в широком интервале от долей ампера до десятков тысяч ампер. Амплитуда

Витебский государственный технологический университет

колебаний напряжения импульса изменяется в более узком диапазоне от десятков до нескольких сотен вольт.

Частота f импульсов определяется количеством импульсов в единицу времени

$$f = \frac{1}{T}.$$

При электроэрозионной обработке диапазон частот изменяется в диапазоне $10^2 \ldots 2 \cdot 10^6$ Гц.

Для осуществления электроэрозионной обработки импульсные разряды должны соответствовать определённой форме: неполярные, симметричные и несимметричные знакопеременные. В каждой из приведённых групп различают импульсы синусоидальные, трапецеидальные, прямоугольные, треугольные и т. д. (рис. 1.21).

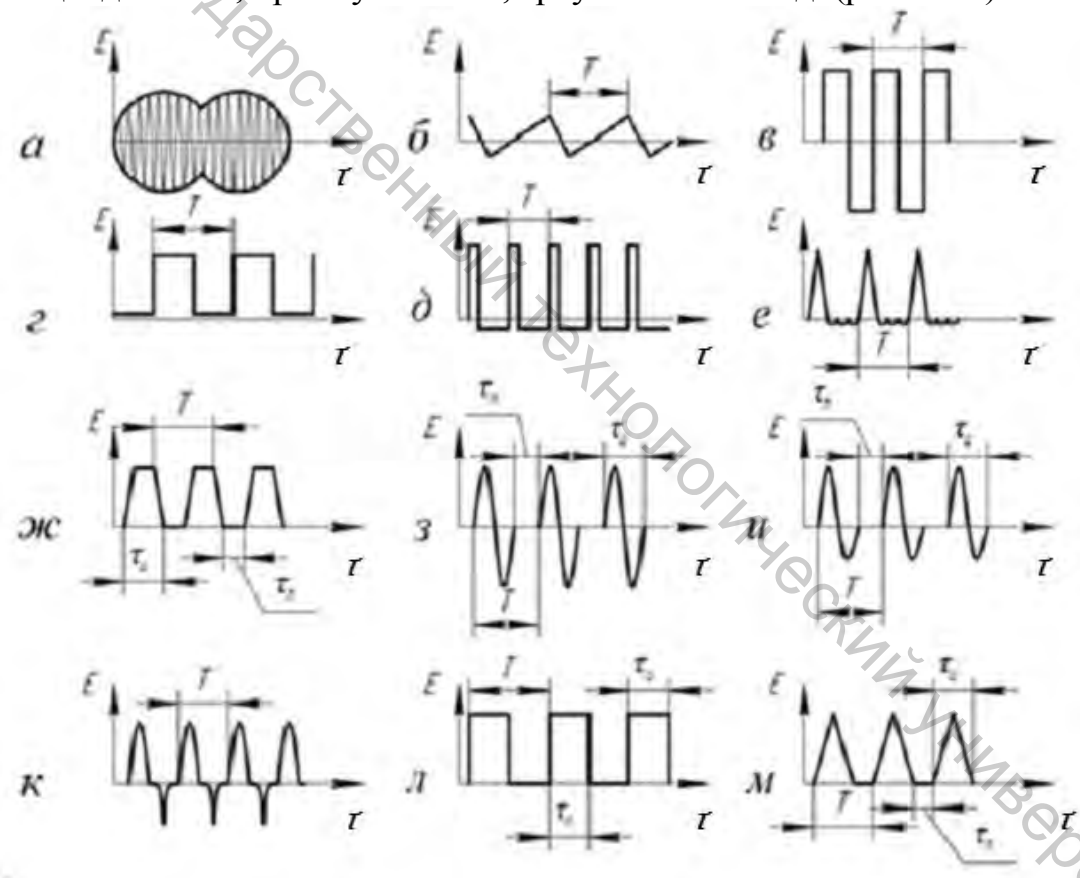


Рисунок 1.21 – Формы электрических импульсов:
а – высокочастотные импульсы, модулированные по синусоидальному закону; б – пилообразные импульсы; в – прямоугольные импульсы; г – прямоугольные импульсы с постоянной составляющей; д – несимметричные знакопеременные прямоугольные импульсы; е – несимметричные знакопеременные импульсы; ж – синусоидальные трапецеидальные униполярные импульсы; з – симметричные знакопеременные импульсы; и – несимметричные знакопеременные импульсы; к – знакопеременные симметричные несинусоидальные

Витебский государственный технологический университет

импульсы; л – синусоидальные прямоугольные униполярные импульсы;
м – синусоидальные треугольные униполярные импульсы;
E – напряжённость электрического поля; τ – время; T – период повторения импульсов; τ_u – длительность импульса; τ_n – время паузы

Энергия импульса – это работа Ai, совершаемая единичным импульсом, которая изменяется в пределах от 1,001…50 Дж.

Мощность обработки W численно равна произведению энергии импульса W_i на частоту их следования f, т. е.

$$W = W_i \cdot f.$$

Скорость съёма Q процесса электроэрозионной обработки оценивается объёмом или массой материала, удаляемого в единицу времени. В зависимости от величин, выражающих количество материала (объём или масса) различают объёмную или массовую скорость съёма.

В общем случае скорость съёма можно представить в виде зависимости от энергии импульсов

$$Q = k \cdot f \cdot W_i, \text{мм}^3/\text{мин},$$

где k – коэффициент, учитывающий теплофизические свойства обрабатываемого материала.

В зависимости от режимов электроэрозионной обработки (отделочной, чистовой, черновой) скорость съёма может изменяться в довольно широких пределах. Так, при малых энергиях и длительности импульсов, высокой частоте, характерных для отделочных и чистовых режимов, скорость съёма составляет 20–800 мм^3/мин; при работе на черновых режимах (большие энергии и длительность импульсов, меньшая их частота следования) скорость съёма значительно возрастает и составляет 12000–25000 мм^3/мин.

Износ электрода – количество материала, отделившееся от электрода-инструмента в процессе электроэрозионной обработки. В зависимости от величин, выражающих количество материала (объём, масса, длина), различают следующие виды износа: объёмный, массовый, линейный.

Относительный объёмный износ электрода-инструмента – отношение износа электрода-инструмента, к количеству материала, удаляемого за это же время с электрода-заготовки

$$V_{\text{об}} = \frac{V_{\text{эи}}}{V_{\text{эз}}} \cdot 100\ \%,$$

Витебский государственный технологический университет

где $V_{эи}$ – объём износа электрода-инструмента; $V_{эз}$ – объём удалённого металла электрода-заготовки.

Относительный линейный износ, %

$$V_{лин} = \frac{\Delta l_{эн}}{l_{отв}} \cdot 100\ \%,$$

где $\Delta l_{эн}$ – изменение линейного размера электрода-инструмента; $l_{отв}$ – глубина прошитого отверстия.

Износ электроэрозионных инструментов зависит от материала, из которого он изготовлен, от параметров электрического импульса, площади обрабатываемой поверхности, скорости прокачки жидкости. При обработке медными или латунными электродами относительный износ может составлять 45…140 %. При обработке медно-графитовыми электродами относительный износ составляет 0,1…4 %.

1.3.4 Виды электроэрозионной обработки

В соответствии с технологическими признаками установлены следующие основные виды обработки: отрезка, вырезание, объёмное копирование, прошивание, шлифование, доводка, маркирование, упрочнение (ГОСТ 25331-82).

Отрезка – электроэрозионная обработка, при которой заготовка разделяется на две части. Отрезка осуществляется плоским электродом, диском, проволокой или лентой. Отрезка плоским электродом производится путём поступательного перемещения электрода-инструмента со скоростью $V_{п.эи}$ в направлении электрода-заготовки, которая остаётся неподвижна (рис. 1.22 *а*). Отрезку плоских заготовок целесообразно осуществлять до половины высоты, затем заготовку переворачивают на 180° и дальнейшую обработку выполняют с противоположной стороны.

Отрезка плоским диском (рис. 1.22 *б*) производится в результате поступательного движения электрода-инструмента при его одновременном вращательном движении. Электрод-заготовка неподвижно закреплена на рабочем столе или совершает вращательное движение.

Отрезку круглых заготовок целесообразно осуществлять при их вращательном движении. Это позволяет существенно повысить производительность. Диски из листовой стали толщиной до 1 мм имеют наружный диаметр до 1000 мм. Для предотвращения коробления дисков в конструкции станков предусматриваются направляющие. Время получения одной заготовки из жаропрочных сплавов снижается по сравнению с механическим резаньем в 8-10 раз.

Витебский государственный технологический университет

При отрезании проволокой или лентой (рис. 1.22 *в*) удаётся снизить ширину паза по сравнению с резкой плоским электродом. Для мелких деталей используют латунную ленту толщиной 0,1 мм; для крупных применяют стальную ленту толщиной не более 0,3 мм.

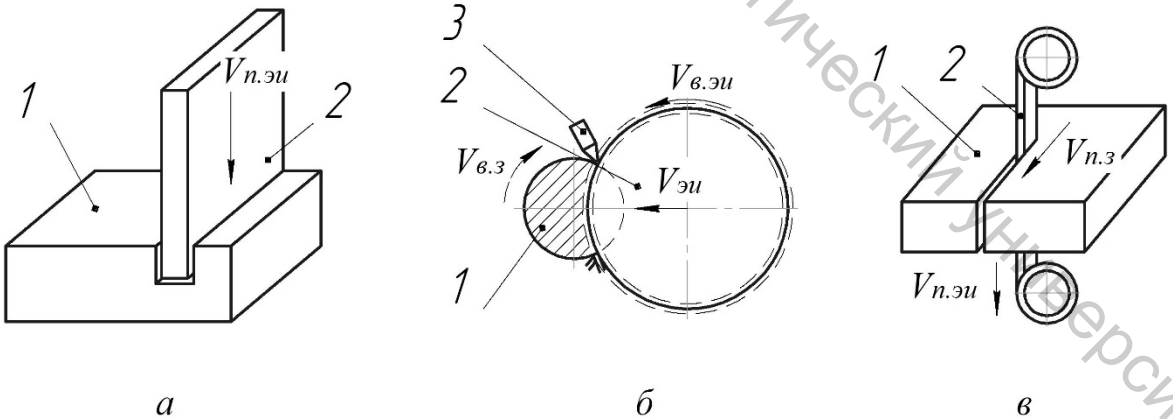
Процесс отрезки выполняется в ванне, заполненной жидкостью, или жидкость подают в ванну поливом из сопла. Применяется электроэрозионная отрезка для получения заготовок из труднообрабатываемых материалов.

Электроэрозионное вырезание – процесс, при котором электрод-инструмент в виде непрерывно перемещающейся проволоки при движении подачи осуществляет обход заготовки по заданной траектории, образуя поверхность заданного контура (рис. 1.23).

Применяется вырезание при изготовлении деталей для вакуумной и электронной техники; в инструментальном производстве при изготовлении матриц, пуансонов, копиров, шаблонов, цанг, лекал, фасонных резцов и т. д.

Электроэрозионное прошивание – обработка, при которой электрод-инструмент, углубляется в электрод-заготовку, образует отверстие постоянного сечения. Прошивание круглых прямолинейных отверстий (рис. 1.24 *а*) осуществляется в процессе поступательного движения электрода-инструмента или электрода-заготовки. Для стабилизации процесса на электрод-инструмент дополнительно может накладываться вибрация.

Прошивание отверстий с криволинейной осью в общем случае обеспечивается поступательной подачей вдоль криволинейной оси электрода-инструмента. На рисунке 1.22 представлена схема прошивания отверстия с осью, изогнутой по окружности.



а *б* *в*

Рисунок 1.22 – Схемы отрезки плоским электродом (а), плоским диском (б), проволокой или лентой (в):
1 – заготовка; 2 – электрод-инструмент; 3 – сопло;
$V_{п.эи}$, $V_{п.з}$ – соответственно скорости поступательного движения электрода-инструмента и заготовки; $V_{в.эи}$, $V_{в.з}$ – соответственно скорости вращательного движения электрода-инструмента и заготовки

Витебский государственный технологический университет

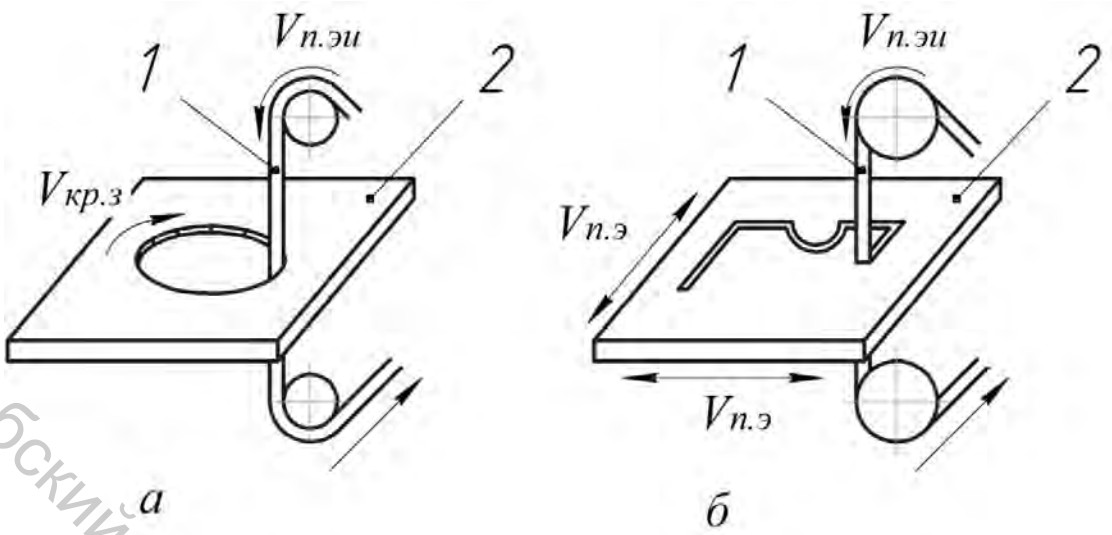


Рисунок 1.23 – Схемы вырезания проволокой круглого (а), профильного отверстия (б):
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; $V_{п.эи}$, $V_{п.з}$ – соответственно скорости поступательного перемещения электрода-инструмента и заготовки; $V_{кр.з}$ – скорость кругового движения заготовки

При обработке внутреннего контура в заготовке должно быть выполнено технологическое отверстие для ввода проволочного электрода-инструмента.

Применяется прошивание для получения отверстий, щелей, каналов сложного профиля в заготовках из труднообрабатываемых материалов.

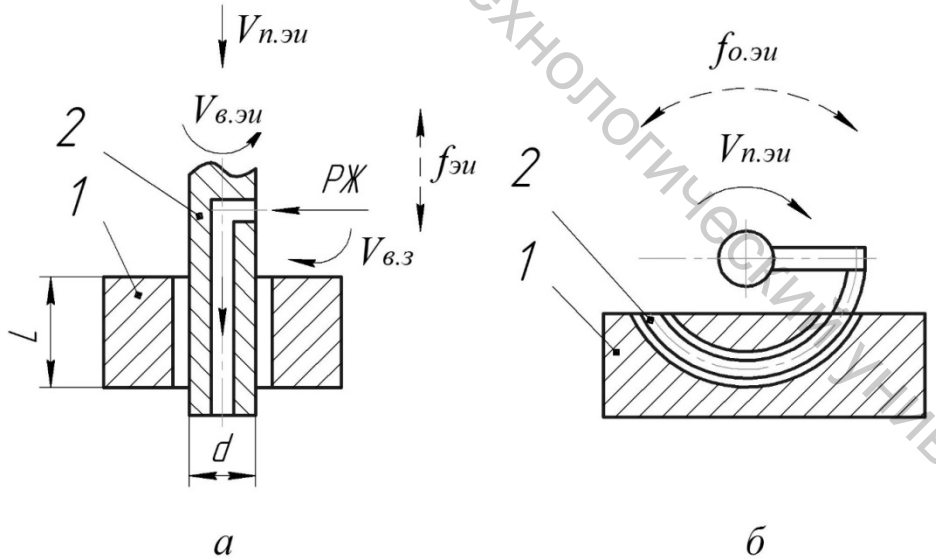


Рисунок 1.24 – Схемы прошивания круглых (а) и криволинейных (б) отверстий:
1 – заготовка; 2 – электрод-инструмент;
$V_{п.эи}$ – скорость поступательного движения электрода инструмента;
$V_{в.эи}$, $V_{в.з}$ – соответственно скорости вращательного движения электрода-инструмента и заготовки; $V_{о.эи}$ – скорость осцилляции электрода-инструмента; $f_{о.эи}$ – частота колебаний электрода-инструмента

Витебский государственный технологический университет

Электроэрозионное объёмное копирование – обработка, при которой на электроде-заготовке отражается форма поверхности инструмента. Объёмное копирование осуществляют по одноконтурной или многоконтурной схемам. Обработку мелких деталей производят по одноконтурной схеме (рис. 1.25 *а*). Подача электрода 2 осуществляется поступательно. Для стабилизации обработки электроду дополнительно может сообщаться вибрационное или осциллирующее движения.

Обработку крупногабаритных изделий осуществляют по многоконтурной схеме. Электроды могут состоять из отдельных секций, изолированных друг от друга прокладкой (рис. 1.26 *б*). При раздельном расположении секций электродов процесс реализуется на многошпиндельных станках с автоматическими регуляторами подач, вибраций и осцилляций (рис. 1.25 *в*).

Объёмное копирование применяется в инструментальном производстве для обработки формообразующих элементов ковочных штампов, литейных форм, пресс-форм и т. д.

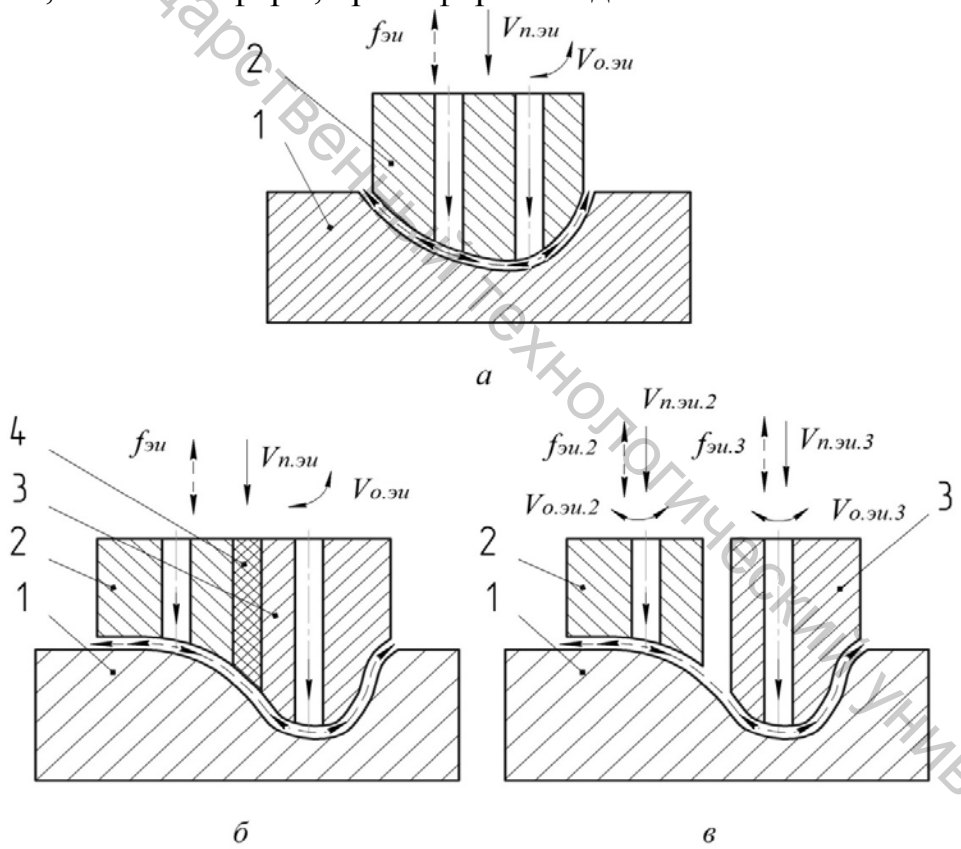


Рисунок 1.25 – Схемы объёмного копирования по одноконтурной схеме (а) и многоконтурной (б, в):
1 – заготовка; 2,3 – электроды-инструменты; 4 – прокладка;
$V_{п.эи}$, $V_{п.эи.2}$, $V_{п.эи.3}$ – скорости поступательного перемещения электродов;
$V_{о.эи}$, $V_{о.эи.2}$, $V_{о.эи.3}$ – скорости осцилляции электродов;
$f_{эи}$, $f_{эи.2}$, $f_{эи.3}$ – частоты колебаний электродов

Витебский государственный технологический университет

1.3.5 Электроды-инструменты

1.3.5.1 Особенности конструкций электродов-инструментов

В процессе изготовления инструменту придают форму, обратную форме поверхности обрабатываемой заготовки. Для подвода рабочей жидкости в электродах выполняют отверстия, которые располагают симметрично относительно оси детали (рис. 1.26 *а*). Если площадь обрабатываемой поверхности более $5 \cdot 10^3$ см^2, то для снижения массы электродов их выполняют пустотелыми (рис. 1.26 *б*).

При черновой обработке сквозных отверстий инструмент выполняют в виде стержней (рис. 1.26 *в*). При выполнении прецизионных отверстий черновую обработку осуществляют стержневой частью электрода, а чистовую обработку – ступенчатой частью электрода (рис. 1.26 *г*). Каждая ступень по мере внедрения инструмента в деталь последовательно переключается с режима на режим: черновой, чистовой, доводочный.

С целью уменьшения влияния боковых разрядов на точность отверстия электроды могут выполнять с обратным конусом (рис. 1.26 *д*). По этой же причине электрод может быть выполнен ступенчатым с минимальной высотой боковой поверхности (рис. 1.26 *е*).

Обработку отверстий малого диаметра осуществляют проволокой или ступенчатым электродом (рис. 1.26 *ж, з*). Формообразование решёток и сеток осуществляется выступами на торцевой части электрода (рис. 1.26 *и*).

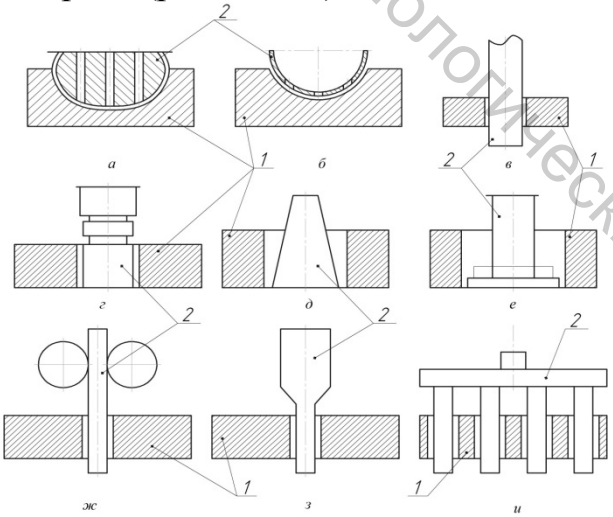


Рисунок 1.26 – Схемы формообразующих поверхностей электродов-инструментов:
1 – заготовка; 2 – инструмент;
а, б – глухих фасонных отверстий, пазов, канавок; в, г – сквозных отверстий, пазов с вертикальными стенками; д, е – схемы прошивания глубоких щелей, пазов; ж, з – отверстий малого диаметра; и – решёток, сеток

Витебский государственный технологический университет

1.3.5.2 Материалы для электродов-инструментов

Материалы для электродов-инструментов должны обеспечить устойчивость процесса обработки, получение изделий заданной геометрической формы требуемого качества, обладать высокой эрозионной стойкостью, низкой стоимостью, технологичностью при обработке.

Таким условиям удовлетворяют следующие материалы.

При отрезке и вырезке:

– латунная проволока, имеющая наиболее низкую из применимых материалов стоимость и малый износ;

– медно-цинковая проволока, позволяющая увеличить съём материала по сравнению с латунной проволокой благодаря более высокой теплопроводности медного покрытия;

– молибденовая проволока, обеспечивающая получение тонкого среза за счет высоких механических характеристик и эрозионной стойкости.

При прошивании и объёмном копировании:

– электролитическая медь, наиболее часто применяемая и обеспечивающая наилучшие условия для обработки за счет высокой теплопроводности;

– композиции меди с вольфрамом, имеющие высокую стоимость, но незаменимые при обработке твердых сплавов, титана, вольфрама благодаря высокой теплопроводности и эрозионной стойкости;

– медные сплавы, обладающие, по сравнению с чистой медью, более высокой обрабатываемостью резанием и улучшенными литейными свойствами;

– серый чугун – используемый при обработке твердосплавных заготовок вращающимся электродом-инструментом;

– первичный алюминий и алюминиевые сплавы, используемые для предварительной обработки отверстий и полостей из сталей жаропрочных материалов.

Из графитовых материалов и их композиций наиболее широко используются:

графит, обеспечивающий вследствие высокой эрозионной стойкости больший по сравнению с электродами из меди съём материала и более широкий диапазон шероховатости поверхности;

графито-полимерные композиции для изготовления сложных по форме электрод-инструментов.

При назначении материала подбирают такие пары материалов электрода и заготовки, которые обеспечивают максимальную эрозию материала заготовки при минимальном износе электрода-инструмента и максимальную производительность процесса. Широко используются

Витебский государственный технологический университет

следующие сочетания материалов электрода-инструмента и заготовки: медь-сталь; медь-медные сплавы; медь-жаропрочные сплавы на никелевой основе; углеродистая или низколегированная сталь; графит – жаропрочный или коррозионностойкие стали; алюминий-стали и жаропрочные сплавы на никелевой основе; мелкодисперсный графит-титан; мелкодисперсный графит-сталь; медно-вольфрамовые композиции – чугун-твёрдый сплав.

С точки зрения обеспечения стабильности эрозии материала заготовки, возможности подвода большой мощности к обрабатываемой поверхности для различных групп обрабатываемых материалов предпочтительным является чистая медь. Для изготовления электродов-инструментов используются прутки, трубы, листовые заготовки.

1.3.6 Рабочие жидкости

На рабочие жидкости возлагаются следующие функции: электроизоляция, ионизация, охлаждение и промывка. В соответствии с функциями, жидкости должны удовлетворять определенным требованиям: обеспечение высоких технологических показателей; стабильность свойств при термическом воздействии электрических разрядов; низкой коррозионной активностью к материалам электродов и заготовки; высокой температурой вспышки, низкой испаряемостью и хорошей фильтруемостью.

В качестве рабочих жидкостей используются жидкие нефтепродукты: трансформаторное и индустриальное масла, керосин, смесь керосина с различными маслами. Применяют рабочую жидкость, состоящую из воды и масла, которая готовится с помощью устройств ультразвукового или механического перемешивания. Применяются специальные рабочие жидкости на основе углеводородного сырья с самыми различными добавками, отвечающие всем требованиям электроэрозионной обработки и резко повышающие его качественные характеристики. Наиболее известны рабочие жидкости РЖ3, РЖ8, РЖ8у.

Вид и состояние рабочей жидкости оказывают существенное влияние на технологические показатели электроэрозионной обработки. Уже на стадии пробоя проявляется диэлектрическая прочность рабочей среды и её вязкость. Вязкость определяет время формирования токопроводных частиц в «мостик», по которому происходит пробой рабочей среды. На стадии электрического разряда, когда происходит съём металла, протекают процессы разложения рабочей среды, окисления, полимеризации и конденсации углеводородов, накапливаются слоистые и асфальтовые сгустки, сажа, различные соли, кислоты, частицы обрабатываемого материала и материала электродов.

Витебский государственный технологический университет

Испаряясь с поверхности электродов, химические элементы рабочей среды под действием разряда вступают в соединение с окисными пленками, покрывающими электроды, и образуют новые химические соединения. Эти новые образования имеют различную прочность, термостойкость и электрическую активность. Они изменяют тепловой баланс разряда, что сказывается на скоростях удаления материала с заготовки и эрозионном износе инструментов.

На стадии удаления продуктов эрозии и продуктов распада из зоны разряда, особое значение имеет вязкость рабочей среды. С увеличением вязкости степень захвата продуктов эрозии увеличивается и процесс их удаления улучшается.

Одновременно с помощью рабочей среды охлаждается рабочая зона и предотвращается оплавление поверхности электродов. С ростом температуры рабочей жидкости и изменением её свойств несколько изменяются и теплофизические характеристики электродов. Поэтому все современные станки обязательно имеют в своём составе: системы тщательной очистки рабочей жидкости; устройства охлаждения; системы контроля температуры и поддержки температуры в заданных пределах; устройства экспресс-контроля некоторых физических характеристик рабочей жидкости и др.

1.3.7 Технологические основы электроэрозионной обработки

1.3.7.1 Последовательность операций при электроэрозионной обработке

Электроэрозионную обработку применяют преимущественно на заключительных операциях чаще всего после термической обработки. Операции разделяются на черновые и чистовые. Каждая операция выполняется за несколько переходов. Количество переходов при черновой обработке зависит от предъявляемых требований к размерной точности и параметрами шероховатости поверхности после чистовой обработки. Количество черновых переходов выбирается с таким расчетом, чтобы обработка производилась в режиме максимальной производительности и с минимальным износом электрода-инструмента, и на последнем черновом переходе была достигнута шероховатость, которая при чистовой обработке будет соответствовать величине, установленной чертежом изделия. Для выполнения электроэрозионной обработки целесообразно использовать два электрод-инструмента, один из которых предназначен для черновой обработки, а второй – для чистовой.

Чистовая обработка выполняется за несколько переходов. Определяющим фактором является шероховатость поверхности.

Витебский государственный технологический университет

Количество переходов при чистовой обработке ограничивается 6–12. Чистовая обработка производится на мягких режимах последовательным переходом через ряд ступеней режимов в высокочастотный диапазон следования импульсных режимов.

В большинстве случаев при чистовой обработке изделия подвергаются полированию и выхаживанию. Количество переходов при доводке поверхностей заранее определить затруднительно. Ориентируются на достижение необходимого результата по шероховатости поверхности. Время обработки при доводке определяется технологическими возможностями применяемого оборудования.

Витебский государственный технологический университет

1.3.7.2 Производительность

Производительность процессов электроэрозионной обработки определяется объёмом или массой материала, удалённого с заготовки в единицу времени ($мм^3$/мин или г/мин). Производительность обработки зависит от обрабатываемости материала, подводимой мощности, площади обработки, характеристики импульсов.

Количественным критерием обрабатываемости при электроэрозионной обработке принят коэффициент обрабатываемости, определяемый отношением производительности обработки материала заготовки к производительности обработки стали 45 при одинаковых условиях реализации процессов. Значение коэффициентов обрабатываемости для различных материалов приведены в таблице 1.10.

Из приведённой таблицы следует, что при увеличении площади обрабатываемой поверхности параметры шероховатости увеличиваются. Это объясняется ухудшением условий удаления продуктов электроэрозии, а так же влиянием электростатического электричества, накапливаемого в заготовке.

Параметры микронеровностей для различных материалов после электроэрозионной обработки составляют:

– электроискровой режим при обработке твёрдых сплавов Ra 0,2 –0,3 мкм;

– электроискровой режим при обработке сталей Ra 0,3–0,6 мкм;

– электроискровой режим при доводке сталей Ra 0,04–0,08 мкм;

– электроимпульсный режим Ra 10–20 мкм и более.

Качество обработки поверхности определяется также глубиной дефектного слоя или слоя термического влияния. Возникающие вследствие термических эффектов микротрещины могут существенно влиять на эксплуатационные характеристики деталей из жаропрочных и твёрдых сплавов.

В процессе электрического разряда происходит проникновение элементов материала электрода-инструмента и рабочей среды в расплав обрабатываемого материала. Это приводит к микролегированию поверхностного слоя.

Глубина зоны термического влияния h определяет размеры толщины слоя обрабатываемого материала, подверженного воздействию тепла и термомеханических явлений:

$$h = 4\sqrt{\pi\lambda_{т}\tau_{и}/C\rho} - Rz, Вт/м \cdot к,$$

где $\lambda_{т}$ – коэффициент теплопроводности; $\tau_{и}$ – длительность импульса, мкс; C – теплоёмкость, Дж/К; ρ – плотность материала, кг/м^3; Rz – параметр шероховатости, мкм.

Если учесть остаточные напряжения и упругие деформации, то размеры зоны увеличатся.

В зависимости от режимов обработки размеры зоны термического влияния могут изменяться в пределах: отделочные и чистовые режимы 0,08–0,35; при черновой обработке 0,02–1 мм.

Глубина зоны термического влияния возрастает с увеличением длительности импульсов, амплитуды и уменьшается с увеличением частоты и скважности (табл. 1.9).

Таблица 1.9 – Основные параметры электроэрозионной обработки, определяющие производительность

Обрабатываемый материал	Полярность	Материал ЭИ	Форма импульсов	Коэффициент обрабатываемости	Удельный съём металла, мм^3/А×мин	Относительный износ ЭИ, %	Частота импульсов, кГц	Параметры шероховатости
Углеродистые, легированные коррозионностойкие стали и магнитные сплавы	обратная	медь	прямоугольная	1,05–1,15	8–10	10–120	≥3	0,5
			гребенчатая	–	6–8	0,2–10		
		графит	прямоугольная	1,1–1,25	10–12	0,1–40	≥8	–
			гребенчатая	–	6–8	0,05–0,5		
Алюминиевые сплавы	прямая	медь	прямоугольная	2,5–3	18–20	0,5–25	≥3	1,1–-1,3
			гребенчатая	2,3–2,8	10–15	0,5–3		
		графит		2,7–3,2 2,8–3,5	15–20 25–30	1–10 10–30		

Витебский государственный технологический университет

Окончание таблицы 1.9

Титано-вые сплавы	обратная прямая	медь графит	прямоуголь-ная	0,9–1 1–1,1	4–7 5–8	5–20 10–60	1–22 22–440	0,9–1,0
Твёрдые сплавы ВК	обратная прямая	медь медь латунь сплав мнб-3		0,3–0,35 0,2–0,25 0,3–0,35 0,4–0,5	1–2,5 1,3-1,5 1,5–2 2,6–3	25–40 80–200 120–500 35–50	 1–22	0,25 – 0,35
Туго-плавкие сплавы	прямая	медь латунь сплав мнб-3 графит		0,25–0,35 0,3–0,35 0,4-0,5 –	1–2 1,5–2,5 2,5–4 5–10	35–100 60–500 15–60 25–40	 3–22	 0,25 –0,3
Медь и медные сплавы		медь латунь графит		0,5–0,7 0,4–0,5 1–1,2	5–7 3–5 8–10	30–75 25–55 20–35	8–440 8–440 1–22	 0,4–0,5

Углеродистые конструкционные, инструментальные низколегированные стали как закалённые, так и незакалённые, обрабатываются практически с одинаковой производительностью.

Серые чугуны, не включённые в таблицу, обрабатываются несколько хуже сталей из-за включения графита, что приводит к локализации процесса эрозии на отдельных участках обрабатываемой поверхности.

Жаропрочные стали на основе никеля обладают лучшей обрабатываемостью по сравнению с углеродистыми сталями. Скорость съёма для ряда жаропрочных сталей на 30…200 % превышает аналогичный показатель углеродистых сталей.

Алюминий и его сплавы по обрабатываемости близки к сплавам на основе никеля (жаропрочным).

Обрабатываемость твёрдых сплавов по сравнению со сталями в несколько раз меньше.

На производительность существенное влияние оказывает форма и размеры обрабатываемой поверхности. При увеличении глубины обработки производительность уменьшается в 1,5 и более раза, и при некоторой глубине процесс обработки становится невозможным, например, при обработке глубоких узких пазов. Это связано с ухудшением условий удаления металла из глубоких пазов или отверстий.

Для повышения производительности электродам могут сообщаться вибрации. Продольно колеблющиеся в направлении подачи электроды с определённой частотой создают так называемый поршневой эффект, способствующий выдавливанию в обратном направлении жидкости содержащей шлак. Благодаря этому улучшаются условия подачи рабочей жидкости и удаления продуктов эрозии.

Витебский государственный технологический университет

Высокая производительность обработки в ряде случаев становится причиной возникновения геометрических погрешностей обработанной поверхности, на устранение которых потребуется значительное количество времени на чистовых, и особенно, доводочных режимах. Исправить погрешности можно лишь за счёт выполнения дополнительных проходов, что существенно повышает стоимость обработки. Поэтому вопрос о производительности необходимо решать в каждом конкретном случае при обработке той или иной поверхности.

1.3.7.3 Качество поверхности при электроэрозионной обработке

После обработки качество поверхности определяется макро- и микрогеометрией, структурой, упрочнением и остаточными напряжениями. Высота микронеровностей Rz преимущественно определяется энергией импульсов

$$Rz = \beta^2 \cdot k_{\text{м}} \cdot \sqrt[3]{Wi},$$

где β – коэффициент перекрытия элементарных лунок, численно равный отношению расстояний между центрами лунок электроэрозии ($2 \geq \beta \geq 1$); $k_{\text{м}}$ – коэффициент, зависящий от свойств материала, Wi – энергия импульса, Дж.

Параметр Rz возрастает с увеличением длительности импульса, амплитуды тока и снижается с увеличением частоты и скважности и не зависит от паузы между группами импульсов. На черновых режимах обработки Rz составляет 10…40 мкм. На чистовых и отделочных режимах параметр Ra в зависимости от вида материала и может изменяться в пределах 0,3–0,6 мкм. Достижимая шероховатость Ra = 0,03 мкм.

На параметры шероховатости обработанной поверхности оказывает влияние площадь поверхности обработки материала электрода-инструмента и заготовки (табл. 1.10).

Таблица 1.10 – Соотношения между параметрами шероховатости и площадью обработки

ЭИ – медь, заготовка сталь		ЭИ – графит (мелкодисперсный), заготовка сталь	
Площадь обработки S, $см^2$	Шероховатость, Rz, мкм	Площадь обработки S, $см^2$	Шероховатость, Rz, мкм
$S \leq 12$	0,8	$S \leq 5$	1,2
$12 < S \leq 40$	1,6	$5 < S \leq 10$	4,2

Витебский государственный технологический университет

Окончание таблицы 1.10

40<S≤75	3,2	10<S≤20	5,2
75<S≤100	4,2	20<S≤30	6,3
100<S≤300	6,3	30<S≤50	8,2
300<S≤500	8,2	50<S≤100	10
500<S≤1000	10	ЭИ – графит (крупный)	
S>1000	16	100<S≤300	10
		300<S≤500	16
		500<S≤1000	20
		S>1000	30

1.3.7.4 Точность при электроэрозионной обработке размеров

Под точностью понимают степень приближения формы и размеров к идеальным. Отклонение реальных размеров от идеальных называют погрешностью, которую в общем случае можно представить в виде

$$\Delta_{сум} = \Delta_{ст} + \Delta_{т} + \Delta_{настр.} + \Delta_{пр},$$

где $\Delta_{ст}, \Delta_{т}$ – соответственно погрешности, вызванные неточностью изготовления станка и нагревом электрода-инструмента; $\Delta_{настр.}$– погрешности, вызванные неточностью расположения электрода-инструмента и заготовки; $\Delta_{пр}$– погрешность, обусловленная процессом обработки.

Погрешности, вызванные неточностью изготовления станка, оценивают по нормам геометрической точности. Современные электроэрозионные установки обеспечивают геометрическую точность обработки заготовки в пределах ±0,5 мкм.

Нагрев электрода-инструмента на некоторых режимах может достигать 400 °С. Обрабатываемые заготовки нагреваются до еще более высоких температур. Для устранения температурного влияния на точность обработки осуществляют межэлектродную циркуляцию жидкости, которую дополнительно охлаждают в специальных холодильниках. Благодаря этому удаётся стабилизировать температуру обработки в пределах ±2 °С относительно температуры помещения. В результате величина температурных погрешностей практически сводится к нулю.

В случае отсутствия возможности термостабилизации процесса обработки величина температурных погрешностей может быть определена по формуле

Витебский государственный технологический университет

$$\Delta_т = L \cdot (\alpha_{эи} - \alpha_з) \cdot (t_1 - t_2),$$

где $\Delta_т$ – тепловые погрешности; L – размер обрабатываемой поверхности заготовки; $\alpha_{эи}, \alpha_з$ – коэффициент линейного расширения материала электрода-инструмента и материала заготовки; t_1 – температура жидкости в конце процесса обработки; t_2 – температура помещения.

Погрешности, вызванные неточностью установки, базирования и закрепления электрода-инструмента и заготовки, сводятся к минимуму за счёт использования специальных приспособлений, обеспечивающих надёжную установку и фиксацию электрода-инструмента и заготовки. Данные о размерах заготовки, электрод-инструмента и его положения относительно заготовки автоматически вводятся в память ЧПУ эрозионного станка, и производится соответствующая коррекция процесса обработки.

1.3.7.5 Область технологического использования электроэрозионной обработки

Электроэрозионная обработка в искровом режиме происходит при относительно малой энергии импульсов. Объём металла, удаленный за каждый импульс невелик, а глубина лунки незначительна. Такой режим позволяет получить при невысокой производительности поверхность с высокой точностью и малой шероховатостью. Кроме того, процесс весьма энергоемок. Энергоемкость оценивают отношением расхода электрической энергии к массе удаленного с заготовки металла. Энергоемкость при обработке на электроискровом режиме на порядок выше, чем при механической обработке на аналогичных операциях.

Обработка в электроимпульсном режиме характеризуется бóльшей энергией разряда – высота неровностей увеличивается. За счет повышения энергии разряда достигается увеличение производительности, которая в 15-20 раз превышает аналогичный показатель при электроискровом режиме. Обработку в электроимпульсном режиме можно рекомендовать для замены фрезерования крупных полостей сложной формы, углублений, каналов, где механической обработкой не удается достичь высокой производительности или где затруднен доступ инструмента в зону резания.

По сравнению с механической обработкой технологии электроэрозионной обработки имеют целый ряд существенных преимуществ:

Витебский государственный технологический университет

1. Процесс обработки не зависит от характеристик обрабатываемого материала: твердости, прочности, вязкости и др.

2. Электроэрозионные технологии применимы при изготовлении деталей из твердых сплавов, термообработанных, жаропрочных и нержавеющих и других материалов, обладающих электропроводностью.

3. Технологические показатели обработки (точность, качество поверхности) во многих случаях превосходят возможности механической обработки. При изготовлении сложнейших деталей электроэрозионной обработкой процесс сравнительно просто может обеспечить погрешность обработки ±0,001 мм при шероховатости поверхности $R_a = (0{,}02 - 0{,}08)$ мкм.

4. При электроэрозионной копировально-прошивочной обработке возможно копирование формы инструмента-электрода сразу по всей поверхности заготовки (в отличие от механической обработки резанием). Простая кинематика формообразования позволяет осуществлять операции, невыполнимые механической обработкой, например получение отверстий с криволинейной осью, в полости сложной конфигурации, в труднодоступных местах заготовки, глубокие отверстия сверхмалого диаметра и др.

5. Процессы не оказывают силового воздействия на деталь, что позволяет обрабатывать тонкостенные элементы различных деталей без их деформации, вырезать из тонкого материала (например, из фольги) элементы сложной формы с малыми перемычками, а также обрабатывать детали из хрупких материалов.

6. Применимы для обработки изделия любых размеров и назначений: от миниатюрных деталей радиоэлектронной аппаратуры до штампов массой в несколько тонн, т. е. можно использовать электроэрозионные технологии в самых различных отраслях.

7. Не требуют специальных инструментов, твёрдых сплавов, абразивных и других дорогостоящих материалов.

8. Определенные схемы электроэрозионной обработки обеспечивают возможность изменения в нужном направлении физико-механических и химических свойств поверхностной твердости, коррозионной стойкости и др.

9. Легкость автоматизации процесса электроэрозионной обработки, простота программирования выполнения на станках с ЧПУ сложнейших работ, возможность проводить работы на станках в безлюдном режиме.

10. Отсутствие заусенцев на деталях после обработки, что сокращает трудоемкость и ликвидирует ручной труд.

11. Исключительная эффективность в изготовлении сопрягаемых деталей типа матрица-пуансон и аналогичных с обеспечением микронного зазора в соединении. При этом их обработка на оборудовании с ЧПУ возможна по одной программе.

Витебский государственный технологический университет

1.4 Ультразвуковая обработка материалов

1.4.1 Физические свойства и особенности распространения ультразвука

Ультразвуковыми называются упругие колебания материальной среды с частотой, превышающий предел слышимости (15–20 кГц). Ультразвуковые колебания могут распространяться в любых упругих средах: жидких, твёрдых, газообразных. Различают три вида ультразвуковых волн – продольные, поперечные и поверхностные. В твёрдых телах могут распространяться волны всех трёх видов, в жидких и газообразных – только продольные волны разрежения – сжатия.

Ультразвук в газах, и в частности в воздухе, распространяется с большим затуханием. Жидкости и твердые тела представляют собой хорошие проводники, затухание в которых значительно меньше. Так, например, в воде затухание ультразвука в 1000 раз меньше чем в воздухе.

Малая длина ультразвуковых волн является основанием для того, чтобы рассматривать их распространение методами геометрической акустики. Физически это приводит к лучевой картине распространения. Отсюда вытекают такие свойства ультразвука, как возможность геометрического отражения и преломления, а так же фокусировка звука.

Следующая важная особенность ультразвука – возможность получения большой интенсивности даже при сравнительно небольших амплитудах колебаний. Ультразвуковые волны большой интенсивности сопровождаются рядом эффектов, которые могут быть описаны лишь законами нелинейной акустики.

Важной особенностью ультразвука является возможность концентрации энергии при сравнительно небольших амплитудах колебаний, так как плотность потока энергии пропорциональна квадрату частоты. Ультразвуковые волны большой интенсивности сопровождаются рядом эффектов. Так, распространению ультразвуковых волн в газах и жидкостях сопутствует движение среды, которое называется акустическим течением.

К числу важных явлений акустического течения относится кавитация, заключающаяся в росте в ультразвуковом поле пузырьков из имеющихся субмикроскопических зародышей газа или пара в жидкости, которые начинают пульсировать с частотой ультразвука и захлопываются в положительной фазе давления. При захлопывании пузырьков газа возникают большие давления, порядка тысяч атмосфер и образуются сферические ударные волны. Возле пульсирующих пузырьков возникают акустические микропотоки. Ультразвуковые явления в кавитационном поле используются при получении эмульсий, аэрации жидкостей, очистке поверхностей от загрязнений,

Витебский государственный технологический университет

обезжиривании и травлении, ультразвуковом диспергировании, акустическом эмульгировании и т. д.

Основными параметрами ультразвуковых колебаний являются: длина волны λ – расстояние между двумя смежными точками, находящимися в одной фазе; амплитуда колебаний *A* – наибольшее смещение колеблющейся точки от положения равновесия; частота колебаний *f* – количество колебаний в единицу времени; период колебаний *T* – время распространения волнового движения на расстояние, равное длине волны; средняя скорость колебательных движений *V*; скорость распространения звуковых волн *C*.

1.4.2 Принцип действия установок для генерации ультразвуковых колебаний

Ультразвуковые установки, используемые для размерной обработки материалов (рис. 1.27) содержат: генератор электрических колебаний; акустический преобразователь; ультразвуковую колебательную систему, систему подачи и отвода охлаждающей жидкости и суспензии с абразивом.

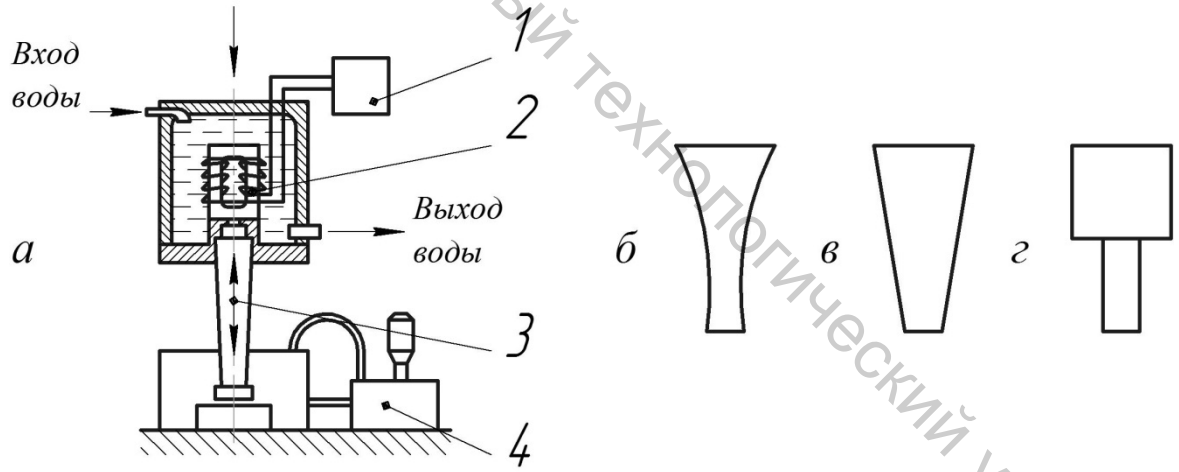


Рисунок 1.27 – Схема установки для ультразвуковой размерной обработки (а) и схемы концентраторов: экспоненциального (б), конического (в) и ступенчатого (г):
1 – генератор; 2 – акустический преобразователь; 3-ультразвуковая колебательная система; 4 – система подачи охлаждающей жидкости и суспензии с абразивом

Ультразвуковые генераторы предназначены для преобразования электрического тока промышленной частоты (50 Гц) в ток высокой частоты.

Акустический преобразователь предназначен для преобразования электрических высокочастотных колебаний в

Витебский государственный технологический университет

механические. Для целей размерной обработки преимущественно применяются магнитострикционные и пьезоэлектрические преобразователи.

В магнитострикционных преобразователях используется эффект продольной магнитострикции, заключающийся в изменении длины сердечника из ферромагнитного материала, помещенного в магнитное поле. Простейший магнитострикционный преобразователь представляет собой сердечник, выполненный в виде стержня или рамки с обмоткой возбуждения. При прохождении по обмотке переменного электрического тока в сердечнике наводится переменное магнитное поле, и возникают упругие деформации, вызывающие продольные колебания сердечника.

Для уменьшения потерь на токи Фуко металлические сердечники набирают из штампованных тонких пластин или наматывают из тонкой ленты. Магнитострикционные преобразователи выполняются с водяным охлаждением. Их максимальный электроакустический КПД в диапазоне частот 20…30 кГц составляет 50…70 %. С повышением частоты колебаний его значение уменьшается.

Магнитострикционные преобразователи изготавливают также из ферритов. Потери на вихревые токи у них практически отсутствуют. Поэтому сердечники из ферритов выполняют монолитными. Для их подмагничивания используют пластины ферритовых постоянных магнитов, которые вставляют или вклеивают в магнитопровод преобразователя. Электроакустический КПД ферритовых преобразователей достигает 80…85 %. Они не требуют высокого напряжения питания, принудительного водяного охлаждения.

В пьезоэлектрических преобразователях используется пьезоэлектрический эффект, сущность которого состоит в том, что в кристаллах с определённым типом решёток под действием электрического тока возникают внутренние напряжения, пропорциональные напряженности электрического поля. В результате размеры кристалла изменяются в соответствии с изменением электрического тока.

Все пьезоэлектрические материалы подразделяются на естественные и искусственные. Естественные – это кварц, сегнетовая соль, турмалин; искусственные – керамики титаната бария ЦТС-19 и титаната свинца ЦТС-23.

Преобразователи из кварца дорогие, а их размеры ограничены. Пьезокерамика значительно дешевле и требует меньших возбуждающих напряжений.

Колебательная система предназначена для передачи возникающих в преобразователе колебаний к рабочим узлам установки и в конечном итоге к обрабатываемой поверхности. В состав колебательной системы входят: волновод, концентратор, инструмент.

Витебский государственный технологический университет

Волновод – это стержень или труба постоянного сечения, соединяющая акустический преобразователь с концентратором.

Концентратор предназначен для увеличения амплитуды механических колебаний инструмента путём обеспечения резонанса частот вибратора (магнитострикционного или пьезоэлектрического) с исполнительным инструментом. Основные формы концентраторов представлены на рисунке 1.27 *б, в, г*.

1.4.3 Физическая сущность ультразвуковой обработки

Ультразвуковая обработка основана на ударном воздействии торца инструмента на вершины наиболее крупных абразивных зёрен. Этот метод состоит из двух основных процессов: ударного вдавливания абразивных зёрен, вызывающего появление трещин и отделение небольших частиц хрупкого материала; циркуляции и смены абразива в рабочей зоне. Происходит хрупкое разрушение обрабатываемых материалов и одновременно вязкое разрушение инструмента.

При ударе торца инструмента по абразивным зернам вершины зерен вдавливаются в поверхностные слои детали и инструмента (рис. 1.28 *а*). Внедрение частиц абразива в инструмент приводит только к пластическим деформациям, и в поверхностном слое обрабатываемой детали возникает сетка напряжений (рис. 1.28 *б*). Под влиянием напряжений, создаваемых последующими ударами торца инструмента, происходит расширение микротрещин и образование новых. Возникает зона разрушения от деления частиц в тот момент, когда максимальные касательные напряжения в зоне вдавливания превосходят сопротивление сдвигу. Несущая абразив вода расширяет микротрещины, облегчает образование сколов, доставляет новый абразив в зону обработки, а также охлаждает инструмент и деталь.

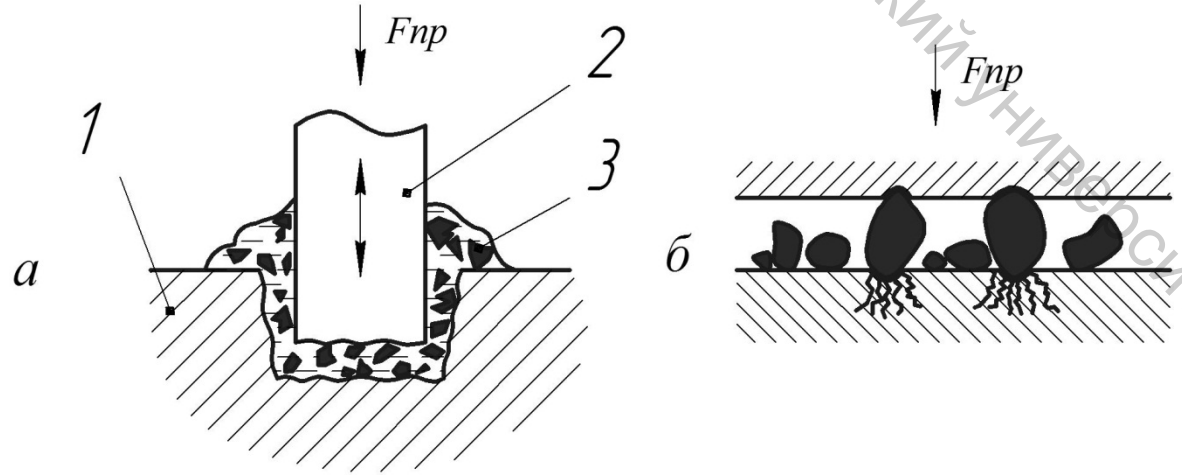


Рисунок 1.28 – Схемы процессов резания (а) и разрушения (б) при ультразвуковой обработке:
1 – деталь; 2 – инструмент; 3 – суспензия с абразивом

Витебский государственный технологический университет

Количественной оценкой целесообразности ультразвуковой обработки материала является критерий хрупкости

$$t_x = \varepsilon_p / \sigma_p,$$

где ε_p – сопротивление материалов сдвигу; σ_p– сопротивление на отрыв.

Наиболее эффективно обрабатываются материалы первой группы (табл. 1.11), у которых коэффициент хрупкости $t_x \geq 2$. Мягкие материалы: медь, свинец, стали и др., у которых коэффициент хрупкости $t_x < 1$ ультразвуковой обработке не подлежат.

Таблица 1.11 – Области применения ультразвуковой обработки

Группа материала	Материал	Критерий хрупкости	Вид деформации	Характер разрушения	Область применения
I	Стекло, ситалл, кварц, керамика, феррит, германий, агат и др.	$t_x \geq 2$	Упругая	Хрупкий	Изготовление деталей из керамики, стекла, кварца, ферритов, минералов. Обработка полупроводниковых материалов
II	Вольфрам и его сплавы, твёрдые сплавы, закаленные на высокую твердость, цементированные стали, титановые сплавы	$1 < t_x < 2$	Упруго-пластическая	Хрупкий после упрочнения в результате микропластических деформаций	Изготовление фильер штампов, высадочных матриц, деталей сложной формы из вольфрама и твёрдых сплавов
III	Медь, свинец, мягкие стали и др.	$t_x < 1$	Пластическая	Разрушение практически не наблюдается	Ультразвуковой метод нецелесообразен

Все технологические характеристики – производительность процесса, качество поверхности, точность обработки, износ инструмента - зависят от многих технологических и акустических параметров, физико-механических свойств обрабатываемого материала, зернистости абразива, кинематической схемы станка, площади поверхности инструмента, силы прижима, глубины обработки.

Витебский государственный технологический университет

Главное движение при размерной ультразвуковой обработке – колебания инструмента. Средняя скорость главного движения

$$V = 4fA/10^3, \text{м/с}.$$

Подача может быть продольной, поперечной, круговой. В зависимости от вида подач, а так же формы поперечного сечения инструмента, можно реализовать различные кинематические схемы ультразвуковой размерной обработки (рис. 1.29).

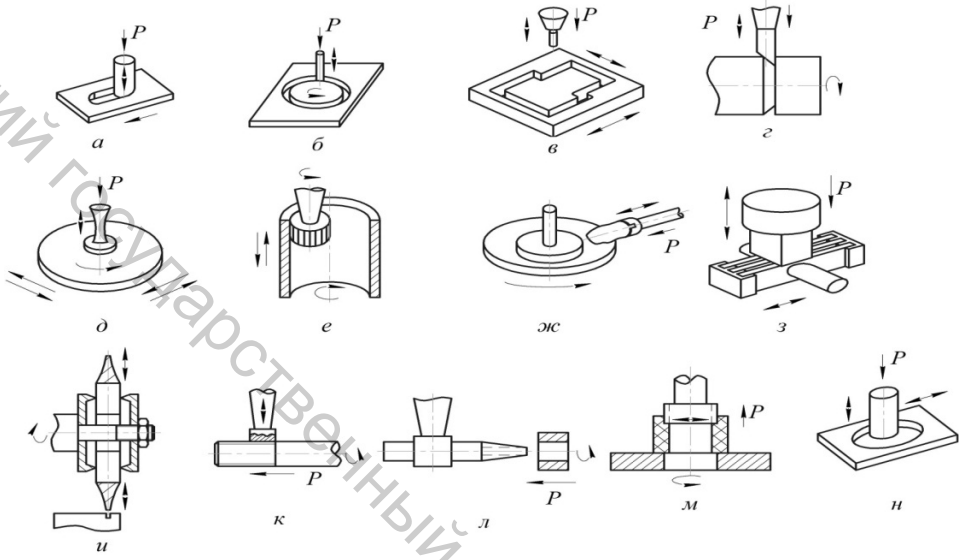


Рисунок 1.29 – Основные схемы выполнения технологических операций ультразвуковой и размерной обработки заготовок:
а – прорезание пазов; б – вырезание дисков; в – обработка заготовок сложного фасонного контура; г - точение; д – плоское шлифование торцом круга; е – внутреннее планетарное шлифование; ж – прорезание паза и разрезание вращающимся дисковым инструментом;
з – разрезание многолезвийным ленточным инструментом;
и – разрезание дисковым излучателем; к – нарезание наружной резьбы гребёнкой; л, м – нарезание внутренней резьбы; н – обработка эллиптического отверстия

Анализ схем показывает, что наложение ультразвуковых колебаний (УЗК) осуществляется на инструмент вдоль оси (рис. 1.29 *а, б, г, к*), либо на заготовку (рис. 1.29 *е, ж*), либо одновременно на инструмент и заготовку (рис. 1.29 *в, д, з, н*). Очевидно, наложение УЗК возможно при использовании специального технологического оборудования, оснащенного мощной ультразвуковой (УЗ) аппаратурой для наложения УЗК на шпиндель станка, либо коренной его модернизацией.

В зонах контактного взаимодействия формообразующего инструмента с заготовкой, как правило, всегда находится СОЖ, воздействие УЗК на которую вызывает кавитацию. Использование кавитации СОЖ возможно при шлифовании, сверлении, развёртывании,

Витебскийгосударственныйтехнологическийуниверситет

зенкеровании, а так же при обработке различных поверхностей заготовок другими методами с применением СОЖ.

Эффект воздействия УЗК на инструмент или заготовку в процессе резания может проявиться в следующем:

– периодическом изменении величины и направления вектора действительной скорости резания;

– периодическом изменении углов инструмента, толщины срезаемого слоя;

– изменении характера приложения нагрузки- зона, стружкообразования и режущий инструмент вместо статической испытывают знакопеременную динамическую нагрузку;

– изменении формирования поверхностного слоя детали в процессе обработки заготовки;

– улучшении условий проникновения СОЖ в зону резания;

– изменении контактных взаимодействий на рабочей поверхности режущих инструментов, приводящих к уменьшению деформаций в зоне стружкообразования и сил резания.

Наибольшее применение размерная ультразвуковая обработка получила при изготовлении деталей из стекла, кварца, флюорита, феррита и других металлокерамических материалов, а так же полупроводниковых материалов (германия, кремния) (табл. 1.12).

Таблица 1.12 – Технологические характеристики ультразвуковой обработки различных материалов

Обрабатываемый материал	Производительность *S*, мм/мин	Относительный износ инструмента *q*, %	Шероховатость *Ra*, мкм	Точность обработки, мм
Стекло, ситалл	5-20	0,5-1	1,25-5	0,02-0,1
Керамика 22ХС, ЦМ332	2-6	2-10	0,63-2,5	0,05-0,1
Твёрдые сплавы ВК	0,05-0,3	40-100	0,32-2,5	0,02-0,05
Германий, кремний, феррит	3-8	1-2	0,63-1,25	0,03-0,10
Закалённая сталь	0,05-0,1	120-200	0,32-2,5	0,03-0,10
Жаропрочные сплавы	0,02-0,03	150-200	0,63-2,5	0,08-0,10

Причинами, ограничивающими применение ультразвуковой обработки деталей из хрупких материалов, являются сравнительно небольшие глубина, площадь обработки, большой износ инструмента.

Витебский государственный технологический университет

Поэтому этот метод наиболее целесообразен при изготовлении неглубоких отверстий сложной формы. Глубокие отверстия подвергают ультразвуковой обработке специальным алмазным инструментом без подвода СОЖ.

1.4.4 Ультразвуковая сварка

При ультразвуковой сварке соединяемые поверхности прижимаются с небольшим давлением Рст и подвергаются сдвигу с ультразвуковой частотой одна относительно другой (рис. 1.30). В результате действия сдвиговых деформаций в микрообъёмах зоны контакта происходит пластическая деформация, дробление хрупких окисных плёнок на трущихся поверхностях и образование общих кристаллов, прочно соединяющих свариваемые изделия.

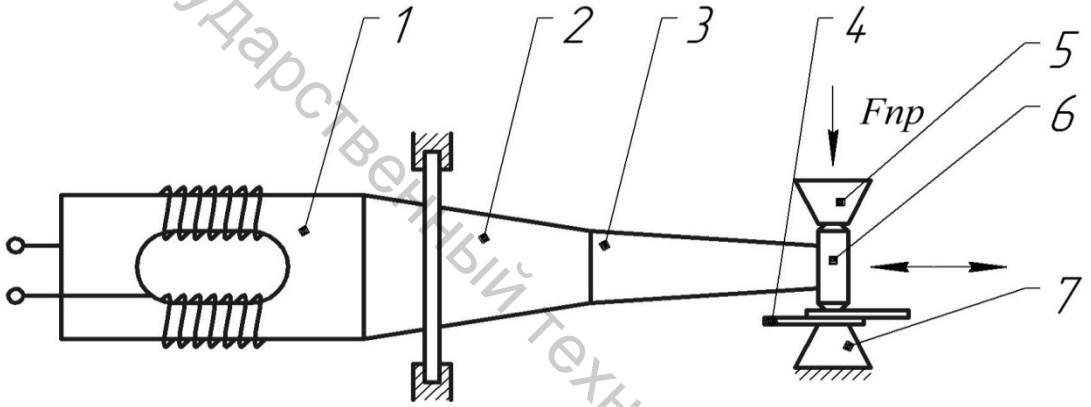


Рисунок 1.30 – Схема ультразвуковой сварки:
1 – преобразователь; 2 – концентратор; 3 – инструмент; 4 – соединяемые изделия; 5 – траверса; 6 – наконечник; 7 – опора

Для соединения пластмасс с металлами, а также сварки изделий из жестких пластмасс нашли применение схемы с продольно-крутильными или крутильными колебаниями (рис. 1.31). Статическое давление $P_{ст}$ приложено нормально к поверхности соединяемых материалов, а динамическое F имеет две составляющих, одна из которых F'совпадает с вектором $P_{ст}$, а другая составляющая F''является тангенциальной (рис. 1.31 *а, б*).

Схемы устройств для реализации продольно-крутильных колебаний представлены на рисунке 1. 31 *в, г*. В магнитострикционном преобразователе 1 на боковой поверхности излучателя по винтовой линии выполнены окна. В них размещена обмотка возбуждения (рис. 1.31 *в*). В процессе работы таких устройств создаются как крутильные, так и продольные колебания. Достоинством этих устройств являются малые габариты при высоком коэффициенте полезного действия преобразователя.

Витебский государственный технологический университет

Возбуждение крутильно-продольных колебаний возможно при использовании конструкции, в которой вращающий момент возникает благодаря присоединению инструмента со спиральной нарезкой (рис. 1.31 *г*). Особенностью такого устройства является его универсальность. При снятии инструмента с нарезкой в свариваемом изделии возбуждается только нормальные колебания.

Для повышения мощности крутильных колебаний могут использоваться два или более преобразователя, соединённых с волноводом (рис. 1.31 *д, е*).

В конструкции сварочной головки с крутильными колебаниями (рис. 1.31 *ж*) используются оба торца преобразователя. Волновод с загнутыми концами совершает продольные колебания. Оба торца преобразователя соединяют с волноводом-инструментом, которые совершает крутильные колебания. Статическое давление в этом случае прикладывают в центральной точке волновода – инструмента, совершающего крутильные колебания.

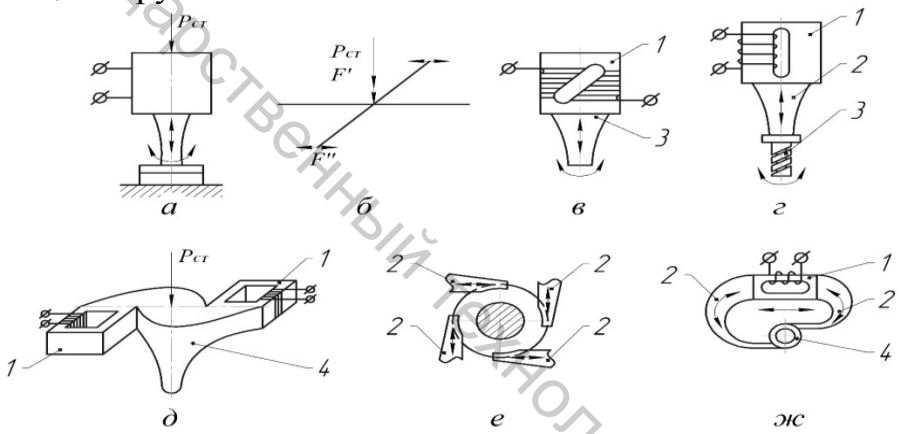


Рисунок 1.31 – Схемы: сварки (а), действия сил (б) и конструкций (в–ж) с продольно-крутильными и крутильными колебаниями волновода:
1 – преобразователь с обмоткой; 2, 3, 4 – волноводы

Ультразвуком можно сваривать почти все металлы и сплавы, применяющиеся в промышленности. Лучше всего свариваются пластичные металлы с близкими значениями предела прочности. Предпочтительно ультразвуковую сварку применять для соединения металлов, обладающих низким электрическим сопротивлением и высоким коэффициентом теплопроводности, сварка которых другими методами затруднена.

С помощью ультразвуковой сварки можно соединять неметаллические материалы, например, различные пластмассы и керамику. Возможна сварка неметаллических материалов с металлами.

Ультразвуком можно сваривать большое количество термопластичных пластмасс. Сварка термопластичных пластмасс происходит в вязко-текучем состоянии при температуре выше температуры размягчения, но ниже температуры разложения, при

Витебский государственный технологический университет

небольшом статическом давлении. Так как пластмасса обладает малой теплопроводностью, то она достигает вязко-текучего состояния только в тонком поверхностном слое. Поэтому сварка осуществляется за доли секунды. Полимерные материалы свариваются не только при малых толщинах, но и при толщине, превышающей 10 мм.

При помощи ультразвуковых колебаний можно сваривать метилметакрилат, полиэтилен, винипласт, хлорвинил, капрон, нейлон, фторопласт. Ультразвуковой сваркой можно соединять также разнородные пластмассы.

Одним из существенных достоинств ультразвуковой сварки является отсутствие нагрева значительных объёмов до температур плавления и сопутствующих изменений физико-химических свойств. Это позволяет получать сварные соединения со стабильными электро-и теплопроводностью, коррозионным сопротивлением, механическими свойствами. Структура зоны сварки в основном соответствует структуре свариваемого материала. Прочность соединения практически равна прочности основного металла либо превышает её.

Статические усилия при ультразвуковой сварке намного меньше усилий, применяемых при холодной сварке. Вследствие этого деформации образцов незначительны и составляют 5-10 % вместо 60-80 % при холодной сварке давлением. Поэтому с помощью ультразвуковой сварки можно соединять детали весьма малых толщин.

Наряду с достоинствами ультразвуковая сварка имеет ряд недостатков, основными из которых являются следующие:

1. Затруднительность сварки материалов толщиной более 2,5 мм. При одинаковой толщине свариваемых деталей качественная сварка получается при толщинах не более 2–2,5 мм.

2. Недостаточно удовлетворительная воспроизводимость показателей прочности соединения при всех одинаковых условиях.

Из экономических соображений ультразвуковую сварку применяют для соединения лишь определённых металлов. Целесообразность применения ультразвуковой сварки связана прежде всего с прочностными характеристиками получаемых соединений. Например, ультразвуковая сварка меди обеспечивает прочность соединения в 2 раза выше по сравнению с электроконтактной, при этом затраты энергии в 10 раз меньше.

Сваривают металлы толщиной, не более (мм): алюминий – 3, медь – 2, сталь – 1,3, латунь – 1. Металлы молибден, кобальт, тантал, вольфрам, бериллий толщиной 0,5–0,75 мм могут свариваться лишь в определённых условиях.

Хрупкие и тугоплавкие металлы, такие как бериллиевая бронза, твёрдая электролитическая медь, пружинная сталь некоторых марок, свариваются с трудом.

Большое место ультразвуковая сварка занимает в радиоэлектронике (ультразвуковая микросварка). Она имеет ряд

Витебский государственный технологический университет

преимуществ по сравнению с другими видами сварки при изготовлении полупроводниковых приборов и микросхем. Ультразвуковая микросварка позволяет получать соединения однородных и разнородных материалов, применяющихся в микроэлектронике. Ультразвуковая сварка применяется для соединения проволочных (диаметр 10 мкм) и ленточных (толщина 70–100 мкм) выводов из золота, алюминия и других металлов в самых различных полупроводниковых приборах и интегральных схемах.

Ультразвуковая микросварка используется в электровакуумной и электротехнической промышленности. Большую группу соединений составляют различные электрические выводы к изделиям, соединения медных деталей, контактов, реле, коллекторов.

1.4.5 Применение ультразвука при электродуговой наплавке

При электродуговой наплавке поверхностей металлов важным элементом процесса является каплеперенос расплавленного электродного металла. Эффективность каплепереноса электродного металла и производительность наплавки заметно повышаются при придании плавящемуся электроду поперечных колебательных движений. Поперечные колебания электрода способствуют изменению формы и структуры наплавленного слоя металла. Известно, что при электродуговой наплавке металл наплавленного слоя состоит из столбчатых кристаллов – дендритов, расположенных перпендикулярно к линии оплавления основного металла. При этом аустенитные зерна основного металла по линии оплавления являются основой для растущих дендритов, из-за чего число и размеры последних определяются величиной и количеством этих зёрен. Поэтому чем крупнее зёрна основного металла на участке перегрева зоны термического влияния, тем больше в структуре наплавленного слоя будут иметь место столбчатые кристаллы. Уменьшая длину слоя жидкого металла за счёт поперечных колебаний, можно сократить пребывание электрода в зоне перегрева. Это уменьшает величину зерна основного металла в зоне оплавления, а следовательно способствует формированию мелкозернистой структуры наплавленного металла. Известно, что четкая ориентация дендритов способствует повышенной хрупкости наплавленного металла, тогда как ультразвуковые колебания способствуют созданию прочной дезориентированной структуры наплавленного слоя.

Схема технологической установки для наплавки с ультразвуком легирующей металлопорошковой присадкой в среде защитного газа представлена на рисунке 1.32.

Витебский государственный технологический университет

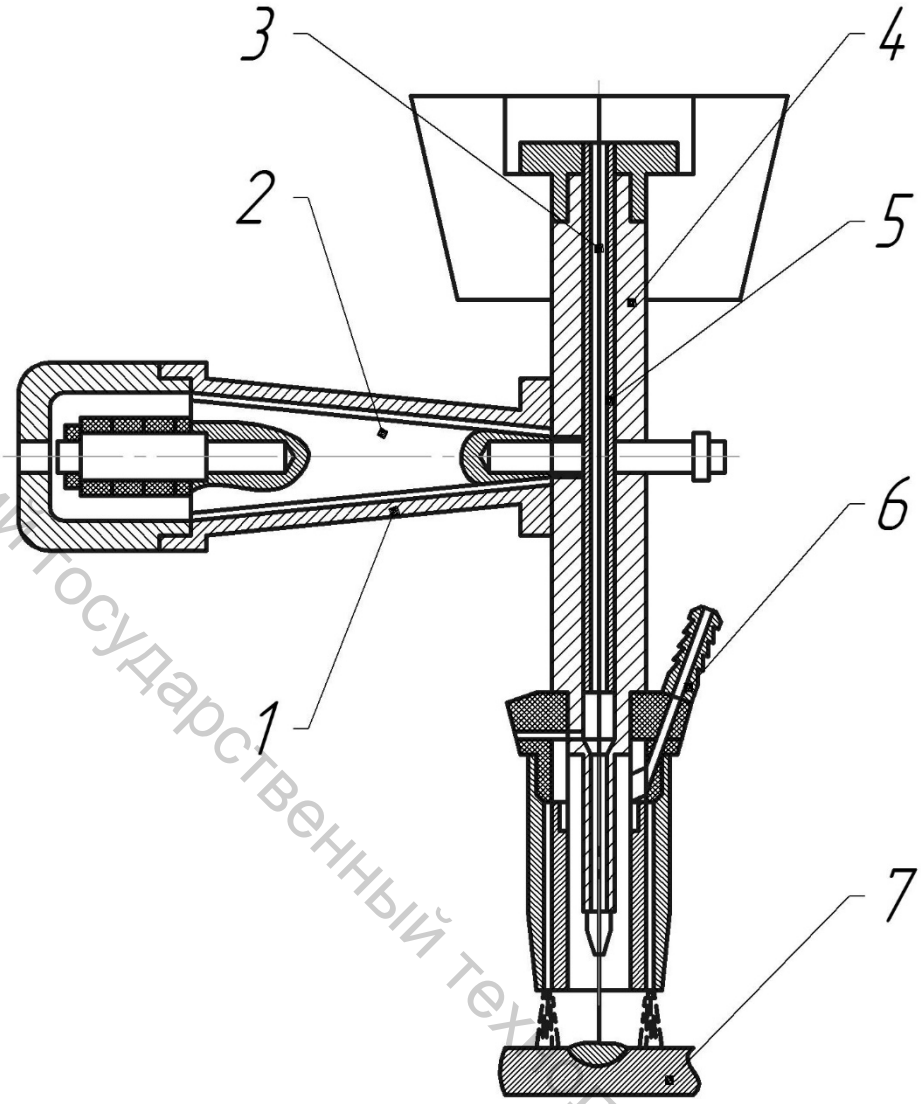


Рисунок 1.32 – Схема технологической установки для наплавки с ультразвуком и металлопорошковой присадкой:
1 – устройство для передачи ультразвуковых колебаний на электрод; 2 – волновод-концентратор; 3 – электродная проволока; 4 – корпус наплавочной головки; 5 – токовод; 6 – устройство для подачи газопорошковой смеси; 7 – наплавляемая поверхность

Установка работает следующим образом. Устройство 1 передает от генератора через волновод-концентратор 2 продольные ультразвуковые колебании тоководу 5, установленному в наплавочной головке. В направляющей трубке токовода 5 возбуждаются поперечные колебания, которые передаются наплавочной проволоке 3. Колебания электродной проволоки вызывают диспергирование капель расплава электрода на мелкие частицы, которые получив колебательные движения, попадают в сварочную ванну и, став дополнительными центрами кристаллизации, способствуют образованию однородной структуры.

Сравнительный анализ полученных структур показывает, что зернистость, плотность и качество слоя, наплавленного с применением

Витебский государственный технологический университет

ультразвуковых колебаний значительно больше, чем слоя, наплавленного без ультразвука. Причем при наплавке с ультразвуковыми колебаниями практически отсутствует граница раздела слоев: покрытие-основа, что характеризует их высокую сцепляемость и плавный градиент свойств. Ультразвуковые колебания активно способствуют процессам зарождения и образования кристаллов, препятствуют их росту и повышают однородность структуры.

При введении в расплав легирующего порошка, частицы которого под воздействием ультразвука находятся во взвешенном состоянии, смачиваются расплавом и, равномерно распределяясь в его объёме, становятся дополнительными центрами кристаллизации, а при затвердевании эта металлосуспензия фиксируется, образуя при кристаллизации композиционный сплав с разнообразными свойствами: антифрикционными, абразивными, износостойкими, коррозионностойкими и другими. При этом достигается увеличение производительности процесса электродуговой наплавки и повышение износостойкости наплавленного слоя в 1,5–1,7 раза.

Наплавленный слой получается качественным, без металлургических дефектов и с более высокой твёрдостью. Такой способ наплавки позволяет снизить градиент температуры по сечению наплавляемого слоя и повысить скорость кристаллизации, что понижает остаточные напряжения как в наплавленном слое, так и в зоне сцепления покрытия с основой.

1.4.6 Штамповка с применением ультразвука

Холодная штамповка с наложением ультразвука позволяет осуществить все виды формоизменений: осадку, выдавливание, листовую штамповку.

Сравнительный анализ изменения удельной деформирующей силы при объёмной штамповке в обычных условиях и с наложением ультразвука на пластически деформируемый металл свидетельствует о том, что в последнем случае деформирующая сила значительно снижается.

Например, при осадке с истечением в полость при наложении ультразвука удельная сила деформирования снижается в среднем в 4 раза для алюминия, для меди – в 3 раза и стали – в 2 раза.

Применение ультразвука в процессе безоблойной объёмной формовки снижает удельную силу для меди в среднем в 4,5 раза, причем величина абсолютного снижения удельной силы (табл. 1.12) возрастает с увеличением степени деформации.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 1.12 – Значения деформирующей удельной силы при безоблойной объёмной штамповке меди

Степень деформации, %	Удельная деформирующая сила штамповки, МПа		Абсолютное снижение удельной деформирующей силы ($\Delta p = p_1 - p_2$), МПа	Относительное снижение деформирующей удельной силы	
	в обычных условиях (p_1)	с наложением УЗК (p_2)		p_1/p_2	$(\Delta p/p_1)100$, %
1	105	30	75	3,50	71,6
10	160	32	128	6,00	80,0
15	205	35	170	5,85	83,0
20	240	40	200	6,00	83,3
25	275	52	223	5,30	81,1
30	310	64	246	4,85	79,4
35	355	87	268	4,08	75,5
40	875	240	635	3,64	72,5

Основными причинами снижения удельной силы трения при штамповке с наложением ультразвука являются уменьшение сил контактного трения и особенно – напряжений текучести деформируемого металла.

Применение ультразвука при глубокой вытяжке стаканов диаметром 6,4 мм обеспечивает значительное (в 2–3 раза) снижение деформирующей силы, при этом высота стаканчика увеличивается вдвое.

При вытяжке цилиндрических стаканчиков диаметром 14 мм из стали и меди, когда ультразвуковые колебания подводили к матрице, снижение деформирующей силы вытяжки составило для стали 15-20 %, а для меди – 40 %. При наложении ультразвука на пуансон снижение деформирующей силы, необходимой для вытяжки стаканчика из стали, составило 12-14 %.

Таким образом, в зависимости от способа подведения ультразвука к очагу деформации ультразвуковые колебания могут в большей или меньшей степени интенсифицировать процесс пластического течения металла.

1.4.7 Совмещенная ультразвуковая и электропластическая обработка

В основе электропластической обработки лежит эффект, возникающий при определённых условиях во всех случаях обработки металлов давлением. Такими условиями являются напряжения деформации выше предела текучести при дополнительном воздействии непосредственно на зону деформации импульсами электрического тока.

Витебский государственный технологический университет

Длительность импульсов тока не должна превышать $(1,5\text{-}2,5)10^6$ сек, а плотность тока должна быть не менее $(10^5\text{-}10^6)$А/см^2. При этом скорость деформации должна быть меньше или соизмерима со скоростью дрейфа Ve свободных электронов

$$Ve = \frac{j}{en},$$

где j – плотность тока в зоне деформации, А/см^2; e – заряд электрона, Кул.; n – концентрация свободных электронов, см$^{-3}$.

Электропластический эффект проявляется при различных видах силового нагружения под действием импульса тока в процессах обработки давлением электропроводящих материалов. В результате эффекта происходит резкое (на десятки процентов) снижение усилий деформации, а также повышение в 1,5 раза допустимых единичных обжатий. При этом отпадает необходимость в операциях промежуточных отжигов.

Общим для всех способов электропластической обработки металлов является подведение тока большой плотности непосредственно в зону деформации металла и минимизация области действия тока размерами зоны деформации.

Ограничением применения электропластического эффекта являются размеры поперечного сечения заготовок, так как пропускание тока плотностью $10^5 \ldots 10^6$А/см^2 через большие заготовки нерентабельно из-за дороговизны и громоздкости источника тока. Электропластическую деформацию целесообразно применять при сечениях заготовки не более 100 мм^2.

Целесообразно электропластическую деформацию использовать для интенсификации процессов штамповки, волочения, плющения.

Электропластический эффект успешно применяется для интенсификации процессов листовой штамповки металлов при изготовлении деталей летательных аппаратов. При оптимальном электроимпульсном воздействии без снижения пластических свойств повышается статическая прочность материала изделия, предел выносливости и ресурс циклического нагружения. Так, повышение статической прочности на 10-15 % имело место при обработке сталей 12Х18Н10Т, 30ХГСА; возрастание предела выносливости на 25-35 % при обработке титанового сплава ВТ-8; повышение циклической прочности на 700-800 % при обработке титанового сплава ОТ4.

Электроимпульсное воздействие позволяет увеличивать ресурс деталей летательных аппаратов, работающих в неблагоприятных атмосферных условиях за счёт повышения их коррозионной стойкости. Например, время до начала коррозионного растрескивания образцов из сплава Д16Т возрастает в три раза, а скорость коррозии сплава АМг3М снижается на порядок.

Витебский государственный технологический университет

В результате электроимпульсной штамповки происходит в 3-4 раза снижение величины остаточных напряжений и, как следствие, устраняется упругое пружинение.

Большой практический интерес представляет электропластическое волочение вольфрамовой и стальной проволоки, которое по сравнению с обычным волочением имеет ряд преимуществ:

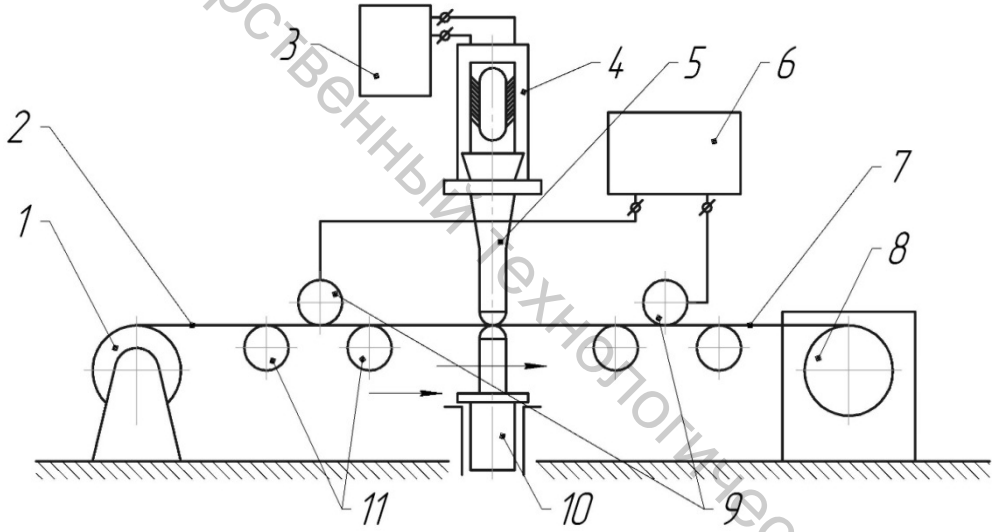
– увеличивается в 1,5 производительность;

– уменьшается сопротивление волочению на 25-30 %, а остаточная пластичность увеличивается на 20-30 %;

– отпадает необходимость в проведении промежуточных отжигов;

– уменьшается обрывность проволоки.

Особенно эффективно использование электропластического эффекта в сочетании с другими способами плющения в приборостроении. На рисунке 1.33 представлена схема ультразвуковой установки для обработки трудно обрабатываемых материалов способом электропластической деформации.



Рисунке 1.33 – Схема ультразвуковой электропластической установки для плющения металлов:

1, 8 – приёмно-сдаточный и укладочный механизмы;

2, 7 – соответственно исходная проволока, 4- сплющенная лента;

3 – генератор ультразвуковых колебаний; 4, 5 – преобразователь и концентратор ультразвуковых колебаний; 6 – генератор импульсного тока; 9 – токоподводящие ролики;10 – наковальня; 11 – опорные ролики

Плющение проволоки производится между концентратором ультразвуковых колебаний 5 и наковальней 10. Одновременно в зону деформации через токоподводящие ролики 9 от генератора 6 поступают импульсы тока. Частота ультразвуковых колебаний составляет 18–20 КГц, амплитуда колебаний 20–60 мкм. Плющение проволоки одними ультразвуковыми колебаниями приводила к нарушению её целостности

Витебский государственный технологический университет

(расслоение, расщепление). Обработка проволоки ультразвуком в сочетании с действием импульсного тока обеспечивала получение ленты высокого качества поверхности и боковых кромок. Амплитудная плотность тока составляла $(1{,}1-4{,}5)10^2 А/мм^2$. Формирование ленты осуществлялось без защитной атмосферы. За один проход получали единичные обжатия 88–90 %, а толщина ленты достигала микронных размеров.

В настоящее время на основе электропластического эффекта разрабатываются различные варианты эффективных энергосберегающих технологий. Создаётся новое оборудование, проектируются специальные генераторы импульсов тока низкого напряжения, системы контактов, не вызывающие электроэрозию инструмента и заготовок, модернизируется под электропластическую деформацию существующие металлообрабатывающие оборудование.

1.5 Основы технологий формообразования деталей и узлов методами послойного синтеза

1.5.1 Общие сведения о технологиях послойного синтеза (ТПС)

В процессе разработки новой продукции всегда возникает необходимость в опытных образцах, прототипах изделия или его отдельных деталей и узлов. Изготавливают прототипы по-разному: применяют сложные технологии, станки с ЧПУ, привлекают высококвалифицированный персонал. Но всё это требует задействования производственных мощностей, а главное, больших временных и материальных затрат.

Затраты на подготовку производства возрастают по мере продвижения к моменту выпуска изделия. Это связано с многочисленными корректировками конструкции деталей, оснастки, исправления ошибок и недоработок конструирования. Многократно сократить в 2–4 раза время подготовки производства и затраты возможно путём применения технологий послойного синтеза.

Можно выделить три основных направления применения технологий послойного синтеза:

– изготовление эскизных макетов, дизайнерских или инженерных образцов (прототипов);

– изготовление непосредственно инструмента для традиционных производственных процессов либо промежуточных средств для его производства;

– непосредственное изготовление функциональных деталей.

Прототипы, выполненные методами ТПС, могут быть изготовлены из различных материалов: из пластиков, жидких смол,

Витебский государственный технологический университет

специальных порошков, различных листовых материалов (бумаги, алюминия и др.). Процессы изготовления прототипов автоматизированы и позволяют получать качественные и сравнительно недорогие изделия в течение нескольких часов, а не дней или недель по традиционной технологии.

Технологии послойного синтеза позволяют изготавливать полностью завершенные изделия. Такие технологии являются идеальным решением в условиях мелкосерийного производства. При малых и средних объёмах производства с помощью технологии послойного синтеза можно изготавливать пресс-формы для литья по выплавляемым моделям. Прочность и жесткость полученных пресс-форм обеспечивает их успешное использование для вакуумного литья пластмассовых и гипсовых изделий.

Область применения технологии послойного синтеза весьма обширна (рис. 1.34).

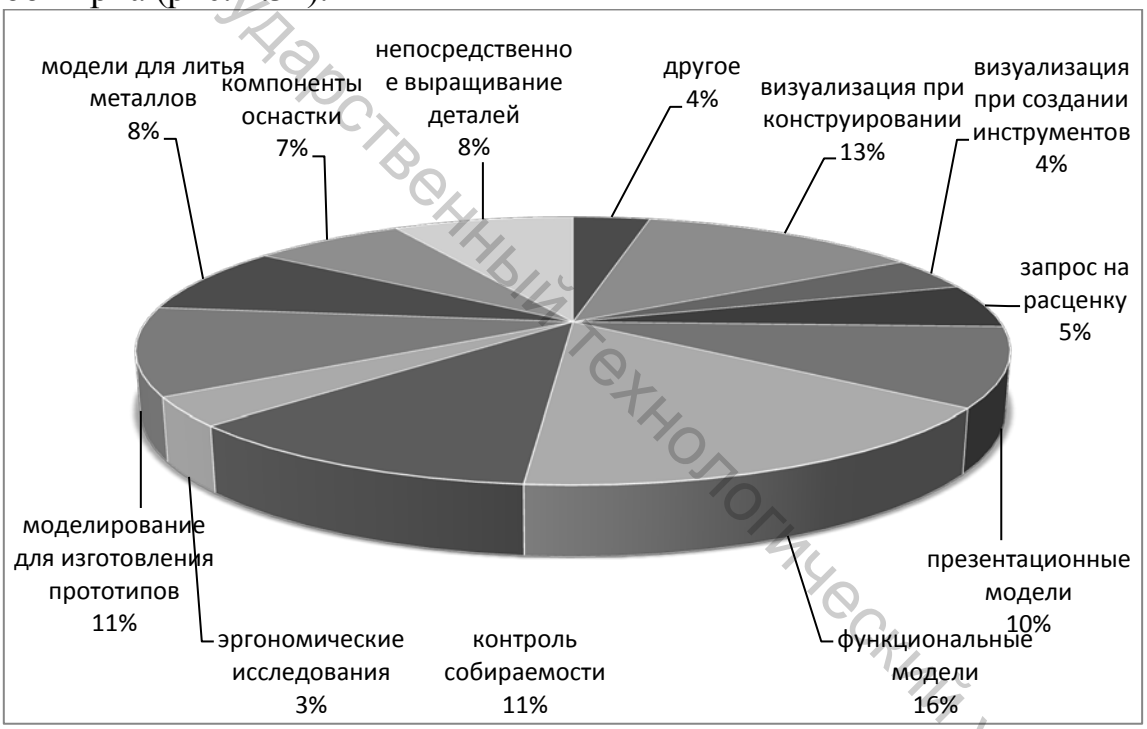


Рисунок 1.34 – Области применения технологий послойного синтеза

Основное отличие технологий послойного синтеза от традиционных заключается в том, что прототип или изделие создается не отделением материала от заготовки, а послойным наращиванием (добавлением) материала, составляющего изделия: пластиков, жидких смол, порошков, листов.

Процесс изготовления изделий методами послойного синтеза в упрощенном виде заключается в следующем:

– разрабатывается трехмерная математическая модель поверхности изделия;

– с помощью специальных программ трёхмерная модель пошагово разбивается на горизонтальные сечения (слои).

Витебский государственный технологический университет

– производится физическая реализация каждого слоя, при этом слои последовательно соединяются друг с другом до полного формообразования изделия.

Формообразование осуществляется методами: лазерной печати с использованием фотополимеров (лазерная стереолитография); лазерного ламинирования листового материала; струйной печати с использованием разогретого термопластика, или фотополимера; струйной печати склеиванием порошков.

1.5.2 Лазерные технологии послойного синтеза

1.5.2.1 Лазерная стереолитография

Основой стереолитографии является локальное изменение фазового состояния однородной среды, т. е. переход жидкости в твёрдое тело в заданном объёме путём фотополимеризации. Суть процесса состоит в создании с помощью лазерного излучения в жидкой реакционноспособной среде активных центров, которые, взаимодействуя с молекулами мономера, инициируют рост полимерных цепей, т. е. процесс полимеризации. Следствием полимеризации является образование твёрдого полимера. Поскольку активные центры появляются только в облученной области, то и полимеризация протекает в этой области, т. е. достигается пространственная селективная полимеризация.

Поглощение одного кванта энергии лазерного излучения приводит к полимеризации до 10000 молекул мономера, поэтому для полимеризации требуется невысокая мощность лазера.

Варьирование механических и физических свойств затвердевшего материала достигается изменением состава фотополимера.

Установки для лазерной стереолитографии включают следующие основные блоки: процессор построения сечений; управляющий процессор; камеру фотополимеризации и лазерный блок. Процессор построения сечений преобразует данные файла изделия в совокупность послойных сечений с заданным шагом. По данным этого файла управляющий процессор в течение всего процесса фотополимеризации контролирует перемещение механических узлов.

Схема установки для лазерной стереолитографии показана на рисунке 1.35. Камера фотополимеризации 1 представляет собой резервуар, заполняемый жидким полимером. Внутри него по командам управляющего процессора в вертикальном направлении перемещается подъёмник (элеватор) 6. В исходном состоянии зазор между рабочей поверхностью элеватора и поверхностью жидкого полимера равен толщине первого слоя отверждаемого полимера. С началом

Витебский государственный технологический университет

отверждения лазерный луч сканирует поверхность полимера в соответствии с текущими координатами изделия. После того, как лазерный луч полностью отсканирует первый слой, элеватор опускается на один уровень и процесс сканирования повторяется. После 8 завершения процесса отверждения по всей высоте изделие извлекается из резервуара и для обеспечения заданной прочности дополнительно обрабатывается мощным ультрафиолетовым облучением.

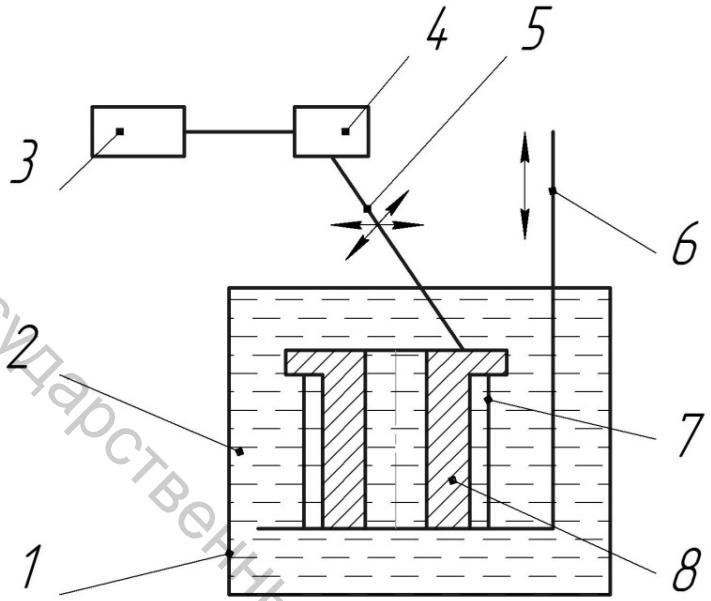


Рисунок 1.35 – Схема установки для лазерной стереолитографии:
1 – камера фотополимеризации; 2 – жидкий фотополимер; 3 – лазер;
4 – система сканирования; 5 – луч лазера; 6 – подъемник (элеватор);
7 – опорный элемент; 8 – изделие

В процессе отверждения материал переходит из жидкого состояния в твёрдое. При этом уменьшается объём материала. В результате в изделии возникают внутренние напряжения. Обычно они компенсируются прочностными свойствами самого материала. С целью минимизации внутренних напряжений необходимо избегать резких перепадов размеров изделия.

Вызывает технологические затруднения формообразование выступающих частей изделия. Толщина каждого слоя изделия составляет 0,15–0,025 мм. По сути это тонкая плёнка с незначительной прочностью и легко может быть разрушена даже гидродинамическими течениями фотополимера при движении подъёмника. Поэтому выступающие части формируются на специальных технологических подпорках 7, которые отверждаются лазером вместе с изделием в виде тонких поддерживающих стенок и предотвращают разрушение слоёв выступающих частей. Технологические подпорки после завершения изготовления удаляются.

Качество поверхности стереолитографических моделей весьма высокое, и часто изделие не требует доработки. Фотополимер хорошо

Витебский государственный технологический университет

обрабатывается, и поверхность изделия может быть доведена до зеркальной. Размеры изделий ограничиваются габаритами рабочей камеры и могут достигать величины 1500×750×50 мм. Для получения более крупных изделий изготовляют отдельные блоки с последующим склеиванием.

1.5.2.2 Лазерное спекание

Суть процесса состоит в использовании лазера в качестве источника нагрева и спекания частиц порошкового материала. Схема для реализации процесса представлена на рисунке 1.36. Луч лазера 7 через оптическую систему зеркал и линз 5, 6 направляется через центральное отверстие внутреннего сопла 4 на поверхность координатного стола 1.

Порошковый материал буферным газом транспортируется из бункера 9, систему трубопроводов 10 в наружное сопло 3 и распределяется на координатном столе 1. Одновременно через внутреннее сопло 4 в зону контакта луча лазера с порошком подается защитный газ, который экранирует зону спекания от атмосферного кислорода и обеспечивает высокую выравниваемость поверхности.

Изначально расстояние между торцом сопла и поверхностью координатного стола равно толщине слоя. Координатный стол управляется процессором построения сечений и перемещается относительно луча лазера в соответствии с текущими координатами. Под действием луча лазера происходит локальное спекание частиц порошка, которое распространяется на всю поверхность слоя. Затем координатный стол циклически опускается на толщину последующего слоя, и процесс продолжается до полного завершения спекания по всей высоте изделия.

Основным достоинством технологии является ее многофункциональность. В качестве порошковых материалов могут быть использованы: металлы (сталь, титан, медные сплавы и др.); полимеры (полистирол, нейлон); глауконитовые пески. Возможна вариативность: полное расплавление, частичное плавление, жидкофазное спекание.

По этой технологии изготавливают изделия весьма ответственного назначения, например, турбинные лопатки сложной внутренней структуры из жаропрочной стали.

Витебский государственный технологический университет

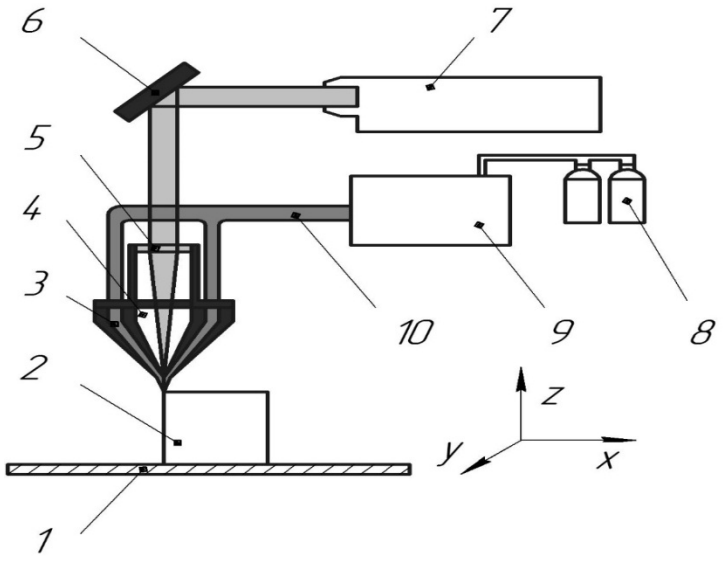


Рисунок 1.36 – Схема установки для послойного спекания порошковых материалов:
1 – координатный стол; 2 – изделие; 3 – наружное сопло; 4 – внутреннее сопло; 5 – фокусирующая линза; 6 – зеркало; 7 – лазер; 8 – баллоны с буферным газом; 9 – бункер; 10 – система трубопроводов

1.5.2.3 Лазерное ламинирование

Рабочим материалом при ламинировании служат листы бумаги с тонким полиэтиленовым покрытием, металлическая фольга, пластик и др. По аналогии с другими технологиями формообразование изделия производится послойно (рис. 1.37). Рабочий материал сматывается с рулона 3 и укладывается на подвижный стол 1.

Выравнивание материала на столе производится в процессе прокатывания разогретым валиком 4. Далее луч лазера 5 из управляющей головки 8 направляется на поверхность листа и вычерчивает контур сечения изделия, прорезая материал ровно на толщину одного слоя и процесс повторяется. Для упрощения удаления излишков бумаги выполняется сетка дополнительных разрезов между контуром детали и краями листа. После окончания процесса изделие оказывается заключенным внутри параллелепипеда из излишков бумаги. Эти излишки относительно легко удаляются вручную благодаря заблаговременно выполненной сетке дополнительных разрезов. Изделие по внешнему виду и механическим свойствам напоминают слоистый пластик или фанеру и легко обрабатываются.

Главным недостатком процесса является большое количество отходов, а так же необходимость ручной очистки готового изделия от остатков материала.

Витебский государственный технологический университет

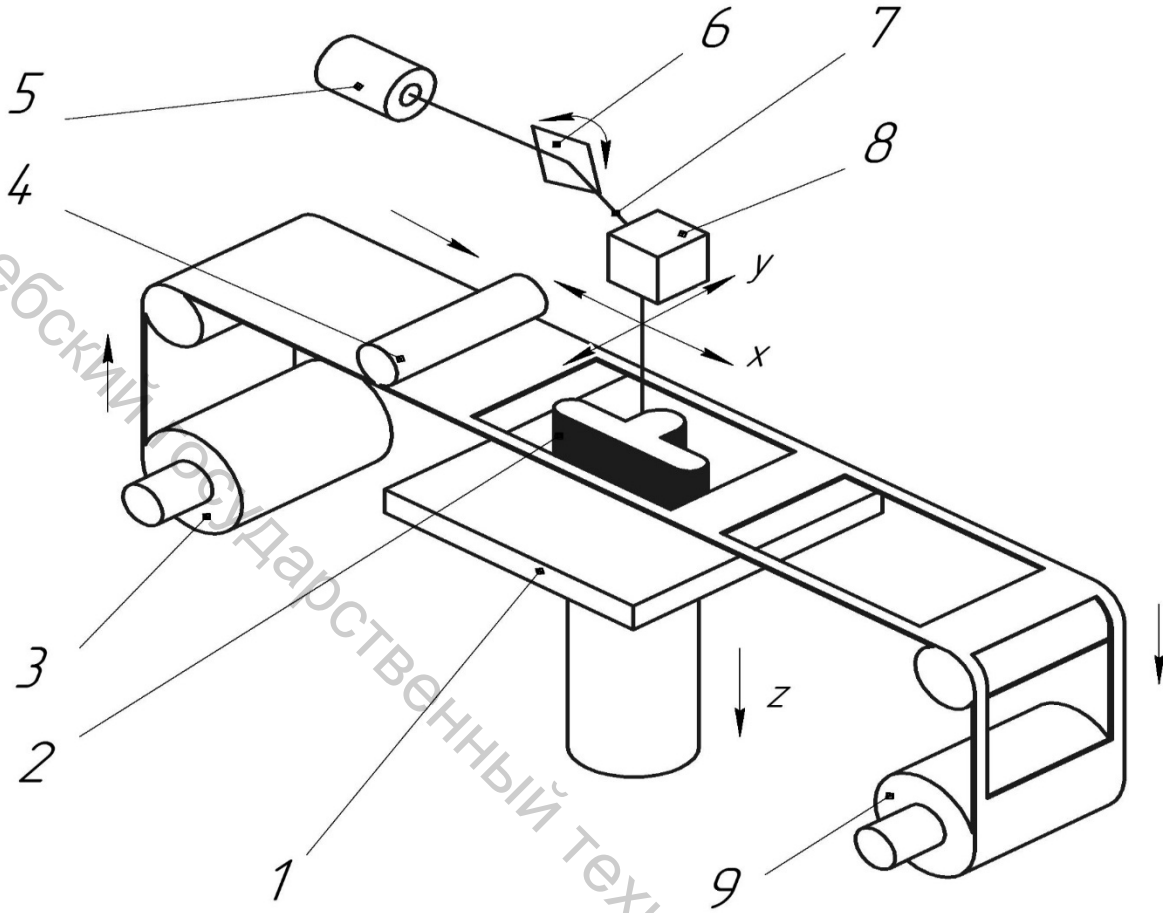


Рисунок 1.37 – Схема послойного лазерного ламинирования:
1 – подвижный стол; 2 – изделие; 3 – рулон исходного материала; 4 – валик; 5 – лазер; 6 – система зеркал; 7 – луч лазера; 8 – управляющая головка; 9 – рулон отходов

Достоинством изделий, полученных по технологии ламинирования, является надежность, устойчивость к деформациям, сравнительно низкая стоимость.

1.5.3 Технологии струйной трехмерной печати

1.5.3.1 Струйная печать с использованием фотополимера

В основу технологии положен принцип послойного нанесения двухкоординатной головкой 3 фотополимерных материалов (рис. 1.38). Первый слой наносится непосредственно на поверхность стола 1. Толщина слоя составляет порядка 16 мкм. Нанесённый слой полимеризуется ультрафиолетовой лампой, установленной на той же

Витебский государственный технологический университет

головке. Стол опускается на толщину последующего слоя и цикл повторяется.

Технология предполагает использование двух видов материалов: основного и поддерживающего. Основной материал предназначен для изготовления непосредственно изделия. Используются специально разработанные фотополимеры, акрилатные смолы с различными свойствами – жёсткие, эластичные, прозрачные, непрозрачные, цветные, а также материалы, пригодные для использования в медицинских целях.

Для построения нависающих частей изделия применяются поддерживающие структуры, которые после построения изделия удаляются струей горячей воды.

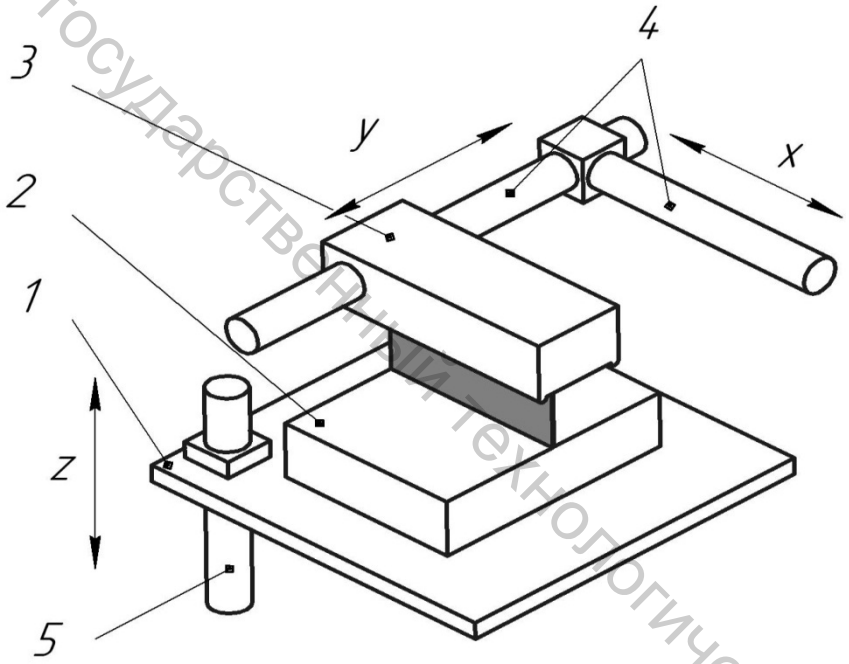


Рисунок 1.38 – Схема струйной печати
с использованием фотополимера:
1 – стол; 2 – изделие; 3 – струйная головка; 4, 5 – направляющие

Усовершенствованная технология позволяет использовать два различных типа фотополимеров одновременно. Двухкомпонентный процесс позволяет комбинировать материалы различными способами. При этом могут быть задействованы два различных твёрдых материала; два различных эластичных; комбинация прозрачных материалов и т. д. Две синхронизированные головки работают с каждым материалом, включая и материал поддержки. Заранее выбранная композиция компонентов наносится с помощью соответствующих сопел согласно расположению и типу материала. Это позволяет получать композиционный материал с заранее заданными свойствами.

Витебский государственный технологический университет

1.5.3.2 Струйная печать с использованием твердеющего материала

Процесс печати заключается в следующем: нити диаметром около 1,25 мм сматываются из бобин 2 и через направляющие ролики 4 подаются в отверстия нагревающей головки (рис. 1.39). Нить в головке нагревается, переходит в полужидкое состояние и в процессе построчного сканирования наносится на поверхность стола. Процессор 3 управляет перемещением головки по двум координатам в горизонтальной плоскости и перемещением стола 7 в вертикальной. Одновременно процессор регулирует температуру материала в головке.

Слои наносятся друг на друга, соединяются между собой, отвердевают и таким образом формируется изделие. В качестве материала может быть использован практически любой промышленный термопластик, поликарбонат, воск, эластомер.

Многие установки позволяют применять несколько материалов путём смены бобин. Причём сменой бобин управляет процессор. Технология позволяет с достаточно высокой точностью производить полностью готовые к использованию изделия довольно больших размеров.

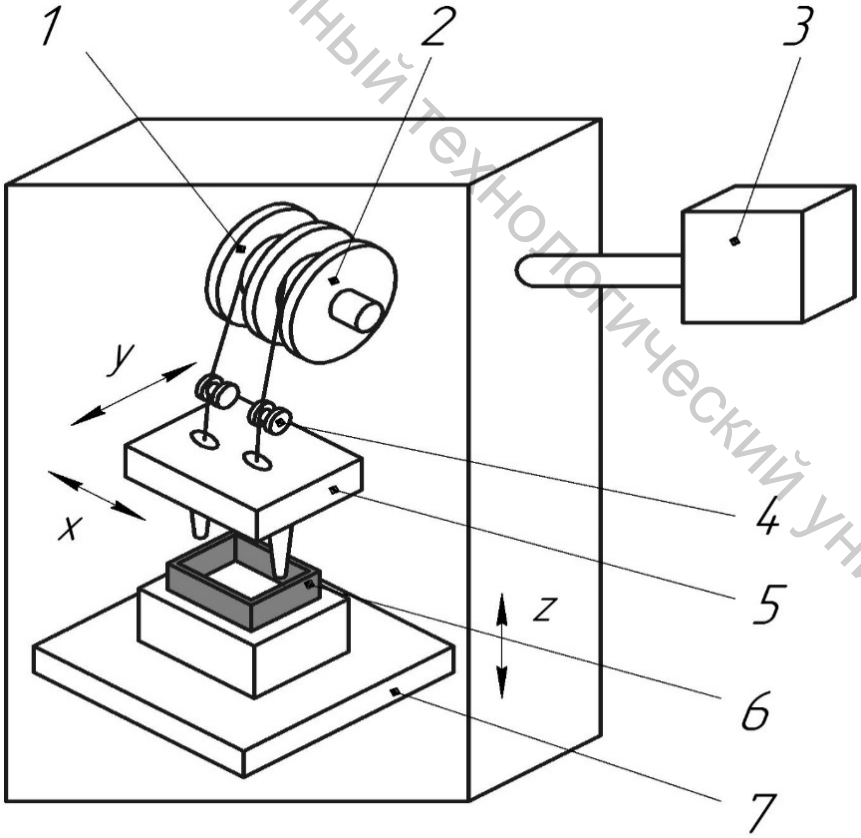


Рисунок 1.39 – Схема печати с использованием твердеющего материала:
1,2 – бобины соответственно с поддерживающим и конструкционным материалами; 3 – управляющий процессор; 4 – направляющие ролики; 5 – нагревающая головка; 6 – изделие; 7 – стол

Витебский государственный технологический университет

Полученное изделие отличается гладкой, чистой, без рисок и царапин поверхностью с сохранением мельчайших элементов. Технология предоставляет широкие возможности для изготовления тонкостенных изделий со сложными внутренними полостями. Кроме того, возможно параллельное изготовление нескольких изделий, если они вписываются в рабочую зону установки.

Оборудование для реализации технологий удобно в эксплуатации, недорогое в облуживании и позволяет изготавливать изделия в течение нескольких часов. Для размещения оборудования не требуется никаких специальных условий; можно располагать в непосредственной близости от рабочих мест конструкторов и технологов. В процессе работы нет необходимости в контроле со стороны оператора, поэтому установки могут работать в ночное время и в выходные дни.

1.5.3.3 Струйная печать склеиванием

Сущность технологии заключается в нанесении порошкового материала на поверхность, выравнивании порошкового слоя по толщине и склеивании частиц порошка между собой. Схема реализации процесса представлена на рисунке 1.40. Исходный порошковый материал загружается в бункер 2, донная часть которого имеет возможность перемещаться в вертикальном направлении. В момент загрузки донная часть находится в крайнем нижнем положении, обеспечивая тем самым заполнение порошком всего объёма бункера.

Бункер и подвижный стол 5 разделяются стенкой 4, которая одновременно выполняет функцию горизонтального уровня. В начальный момент стол 5 опускается относительно уровня на толщину первого слоя, а донная часть бункера наоборот поднимается вверх таким образом, чтобы порошок в бункере находился выше уровня стенки. Выравнивающий ролик 3 перемещает тонкий слой порошка на поверхность стола и равномерно распределяет по поверхности стола на одном уровне со стенкой 4. Струйная головка 6 каплями наносит связующее вещество на склеиваемые частицы порошка в соответствии с конфигурацией слоя. Затем формируется последующий слой, и процесс повторяется до полного завершения изготовления изделия.

По окончании процесса незадействованный порошок удаляется, а изделие очищается от его остатков.

Для повышения прочности и улучшения внешнего вида изделие может быть пропитано различными материалами, например, воском, эпоксидными смолами, полиуретанами, клеевым составом.

Витебский государственный технологический университет

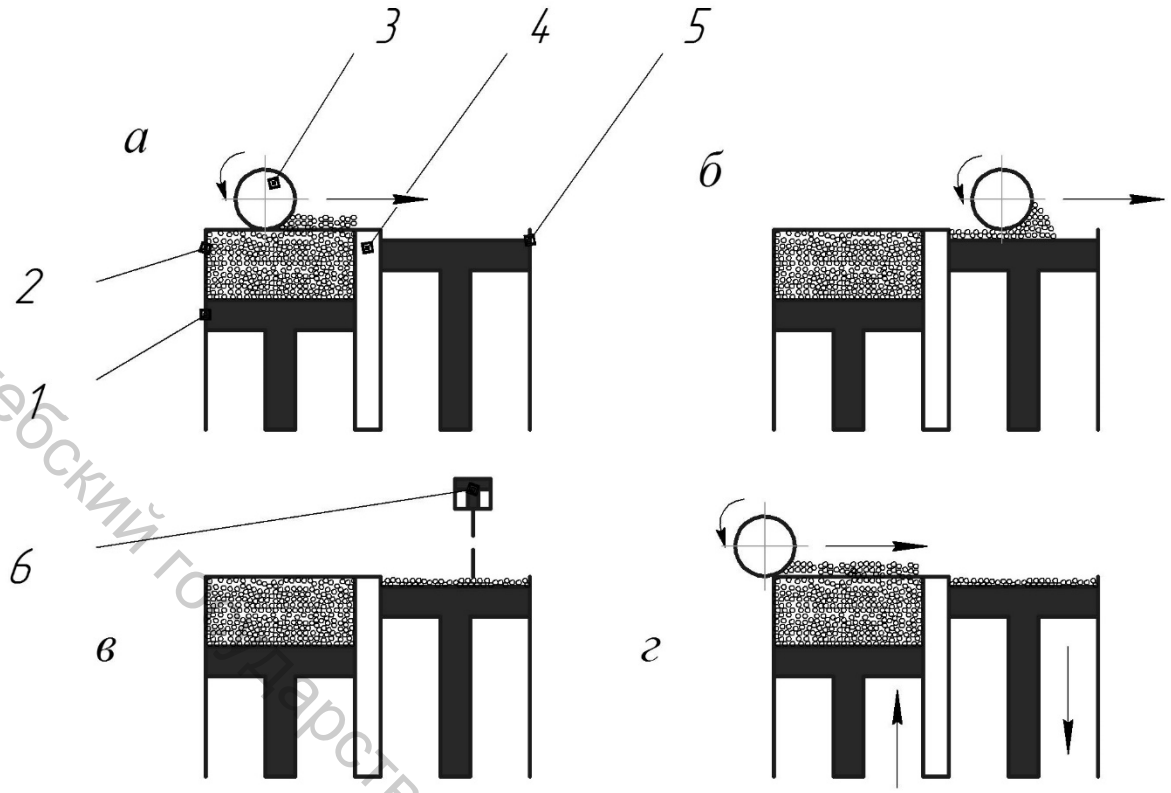


Рисунок 1.40 – Схема струйной печати склеиванием:
а – перемещение порошка из бункера на стол; б – выравнивание слоя порошка на столе; в – нанесение связующего вещества;
г – возвращение в исходное положение элементов установки;
1 – подвижная донная часть бункера; 2 – бункер; 3 – валик;
4 – стенка; 5 – стол; 6 – струйная головка

Рассматриваемая технология обеспечивает изготовление изделий сложной формы без поддерживающих структур, поскольку все нависающие элементы фиксируются несвязанным порошком. Технология позволяет получать полноцветные крупные изделия в натуральную величину для оценки их внешнего вида и проверки пригодности для сборки.

1.5.3.4 Применение технологий послойного синтеза

Технологии послойного синтеза – это принципиально новые технологии, позволяющие изготавливать изделия практически любой формы без традиционных станков, инструментов, оснастки. При этом они обеспечивают резкое сокращение всего цикла создания изделия от возникновения идеи до выхода изделия на рынок. Без преувеличения можно утверждать, что технологии послойного синтеза – это прорывные технологии, которые изменят жизнь. Возможности этих технологий безграничны.

Витебский государственный технологический университет

Авиация – ответственные детали компрессора газотурбинного двигателя, лопатки турбин и др.

Литейное производство.

Порошковая металлургия – изделия с постоянной и периодической (управляемой) пористостью; изделия с внутренними каналами охлаждения; функционально-градиентные изделия и др.

Изделия медицинского назначения: имплантат нижний челюсти с пористой структурой для насыщения лекарственными препаратами; модель коленного мениска; тазобедренный сустав и т. д.

Инструментальное производство в машиностроении: модели, оснастка, эластичные формы, металлополимерные формы и др.

Витебский государственный технологический университет

ГЛАВА 2
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

2.1 Высокоскоростная штамповка листового материала

Штамповка на обычных механических или гидравлических прессах осуществляется со скоростью 0,5…10 м/сек. Высокоскоростная штамповка реализуется со скоростью 50-400 м/сек.

При высоких скоростях деформирования изменяется механизм пластической деформации. Выделяющаяся теплота при высокоскоростной штамповке не успевает рассеиваться в окружающее пространство, в результате температура материала заготовки существенно повышается, что сказывается на пластичности.

Высокоскоростная деформация осуществляется преимущественно путём внутризеренного скольжения и двойникования; появляются дополнительные плоскости скольжения, количество которых увеличивается в 30-40 раз, а количество двойников возрастает в 3-4 раза. Прочностные характеристики предел текучести, временные сопротивления и др. – также возрастают.

По степени влияния скорости нагружения на пластические свойства все материалы разделяют на три группы.

К первой группе относятся материалы с высокой пластичностью при низкоскоростном нагружении и значительно повышенной пластичностью при высокоскоростном нагружении. Примером материалов первой группы может служить коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т, относительное удлинение которой при статическом нагружении составляет 55…57 %, а при высокоскоростном – 73…76 %. Материалы этой группы пригодны для высокоскоростного деформирования.

Ко второй группе относятся материалы со средней пластичностью при статическом нагружении и с такой же или незначительно большей пластичностью при высокоскоростном нагружении, у которых пластичность повышается не более, чем на 10…20 %. Эти материалы также пригодны для высокоскоростной обработки давлением.

К третьей группе относятся материалы с низкой пластичностью при статическом нагружении и такой же или незначительно большей пластичностью при высокоскоростном нагружении, например, большинство титановых сплавов, которые малопригодны для высокоскоростной штамповки.

При увеличении скорости нагружения до некоторого значения рост показателей пластичности прекращается и при критической

Витебский государственный технологический университет

скорости относительное удлинение становится равным нулю, т. е. наблюдается разрушение материала без пластической деформации. Это объясняется тем, что пластическая деформация начинается не одновременно по всему объёму заготовки, а распространяется с некоторой скоростью. Если скорость нагружения превышает скорость распространения пластической деформации, то последняя не успевает произойти и материал хрупко разрушается. Поэтому для всех материалов имеются оптимальные скорости нагружения, диапазон которых составляет 50…240 м/сек.

В качестве источников энергии при высокоскоростной штамповке используют энергию взрыва взрывчатых веществ, электрический разряд в жидкости и импульсное электромагнитное поле.

Высокоскоростные методы применяются в самых разнообразных процессах обработки давлением: вытяжке, формовке, вырубке, пробивке, объёмной штамповке, прессовании, калибровке, поверхностном упрочнении и т. п.

2.1.1 Штамповка взрывом

При штамповке взрывом формообразование осуществляется в результате воздействия на заготовку сверхвысоких давлений, передаваемых через различные среды, чаще всего через воздух или воду. Следует отметить, что коэффициент полезного действия (КПД) штамповки взрывом в воде в 8-10 раз больше, чем на воздухе. Поэтому в качестве передающей среды предпочтение отдается воде. Время детонации заряда составляет 20…30 мкс, а время деформации заготовки исчисляется миллисекундами. Давление взрыва действует на заготовку лишь в начальный момент, после чего металл движется до соприкосновения с матрицей под действием сообщенной ему кинетической энергии. По мере распространения ударной волны скорость и создаваемое давление быстро затухают.

В зависимости от размеров и формы штампуемых заготовок штамповка взрывом осуществляется различными способами: при больших габаритах заготовки – штамповкой в бассейнах (рис. 2.1); при небольших – штамповкой в наземных установках (рис. 2.2).

Высокая стоимость сооружения крупных бассейнов и недостаточная их стойкость при штамповке заготовок массой заряда свыше 3 кг ограничивают их применение.

Витебский государственный технологический университет

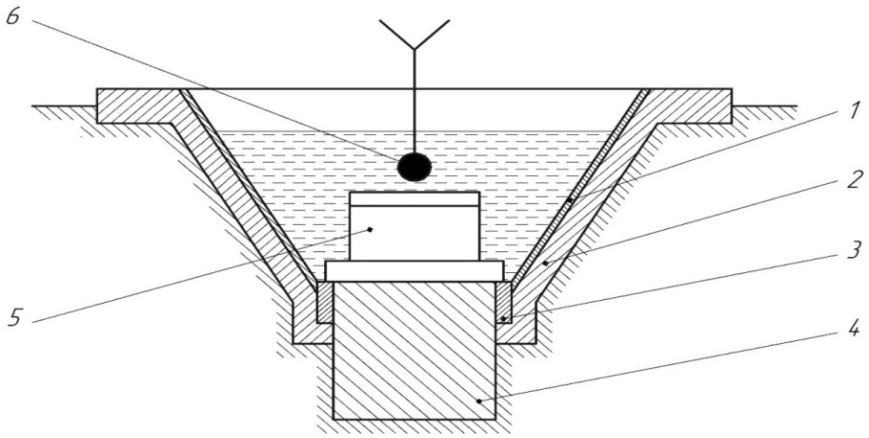


Рисунок 2.1 – Схема бассейна для штамповки:
1 – стальная обшивка; 2 – бетонированный бассейн;
3 – гидроизоляция; 4 – заглублённый фундамент; 5 – штамп;
6 –заряд взрывчатого вещества

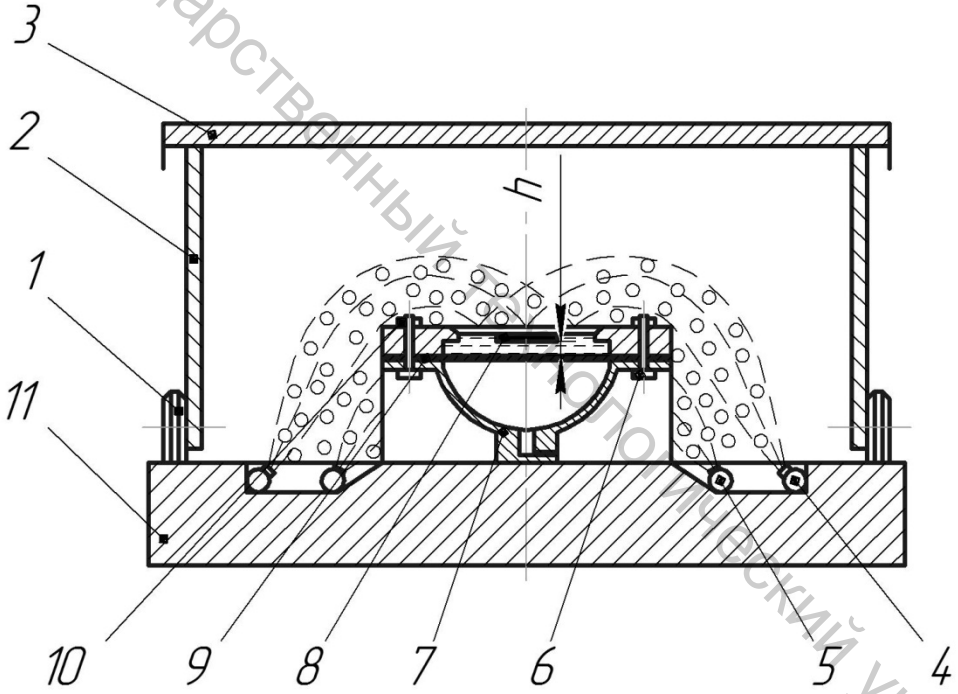


Рисунок 2.2 – Схема наземной установки для штамповки взрывом:
1 – направляющая; 2 – стенка; 3 – крышка; 4,5 – трубопроводы;
6 – прижимное устройство; 7 – матрица; 8 – плоский заряд;
9 – заготовка; 10 – кольцо; 11 – основание

Наиболее совершенными являются наземные установки (рис. 2.2). Штамп представляет собой матрицу, на которой сверху устанавливается прижимное кольцо 10. Заготовка 9 закрепляется между прижимным кольцом и матрицей. Полость отверстия прижимного кольца заполняется водой, а сверху закрепляется плоский заряд. Вся сборка штампа располагается внутри бронекамеры, состоящей из направляющей 1, стенок 2 и крышки 3. Стенки бронекамеры

Витебский государственный технологический университет

предохраняются от разрушения пузырьковой завесой. Вокруг матрицы уложены два трубопровода с большим количеством форсунок для образования воздушных пузырьков.

Форма и масса заряда определяют форму ударной волны и продолжительность действия давления на заготовку и тем самым оказывают существенное влияние на характер распределения внешней нагрузки. Изменяя её, можно влиять на распределение деформации по сечению и глубине заготовки.

Установлено, что плоская волна обладает большей силой, чем волны других форм. Плоскую волну можно получить при использовании зарядов в форме листов, лент или шнура, уложенного по спирали или кольцами. Заряд может иметь так же цилиндрическую или сферическую форму. Конкретный тип заряда выбирают в зависимости от характера операции, формы и размеров заготовки.

Дистанция взрыва оказывает влияние на профиль фронта ударной волны при её подходе к заготовке, а значит и на механизм формоизменения.

Для более выгодного использования энергии взрыва заряд следует располагать ближе к поверхности заготовки. Однако в этом случае может произойти локализация деформации, местное утонение и разрушение заготовки. Если увеличить расстояние от заряда до заготовки, то энергия взрыва может оказаться недостаточной для деформирования заготовки.

Оптимизация дистанции взрыва способствует меньшему утонению заготовки, более равномерной толщине стенки и получению годной детали заданной формы.

При штамповке с прижимом фланца расстояние от сосредоточенного заряда до заготовки для высокопрочных сталей и сплавов устанавливается в пределах 0,2…0,4 её диаметра и 0,3…0,5 диаметра заготовки для малоуглеродистых сплавов. При штамповке без прижима расстояние от заряда до заготовки составляет 0,1…0,3 диаметра заготовки.

Для штамповки взрывом изделий из высокопрочных и жаростойких сплавов повышенной хрупкости (титановые, молибденовые сплавы) получила применение горячая штамповка взрывом с подогревом заготовки. Передаточной средой при горячей штамповке обычно служит песок. При горячей штамповке иногда применяется дополнительный подогрев песка до температуры 900-1000 °С.

В ряде случаев штамповка взрывом имеет большие преимущества перед штамповкой на прессах благодаря высокой экономической эффективности и широким технологическим возможностям. Штамповкой взрывом можно изготовлять детали размерами от нескольких десятков миллиметров до десяти и более метров. Поскольку используется только одна часть инструмента –

Витебский государственный технологический университет

пуансон или матрица, то стоимость штампа относительно мала, а сроки его изготовления значительно короче сроков изготовления инструментального штампа.

Установки для штамповки взрывом стоят почти в 40 раз меньше, чем прессы такой же мощности, а подготовка производства занимает в 10-15 раз меньше времени, чем при обычных прессовых вариантах.

Благодаря равномерности распределения гидростатического давления пластичность материала заготовки значительно увеличивается, и поэтому можно штамповать многие высокопрочные и трудно деформируемые сплавы. Процесс обеспечивает высокую точность деталей, определяемую точностью формообразующей поверхности штампа. Это объясняется тем, что после контакта инструмента и заготовки в жидкости может быть создано высокое давление калибровки, уменьшающее упругую отдачу.

Штамповке взрывом присущи недостатки, например, необходимость расположения бассейнов на специальных полигонах, а установок – в специальных помещениях, имеющих соответствующую защиту персонала от взрыва; невысокая производительность, связанная с необходимостью подъема и опускания инструмента, его вакуумирования, подготовки заряда и т. д.

2.1.2 Электрогидроимпульсная штамповка

Сущность электрогидроимпульсной штамповки (ЭГШ) заключается в том, что энергия разряда электрической дуги в жидкости преобразуется в механическую энергию в виде ударной волны, которая вызывает пластическое формоизменение заготовки.

Принципиальная схема установки для ЭГШ представлена на рисунке 2.3 *а*. Установка включает источник питания 1, повышающий трансформатор 2, конденсаторную батарею большой ёмкости 3, разрядник 4, электроды 5, камеру с водой 6. От источника 1 через трансформатор 2 ток поступает в батарею 3, в которой происходит накопление электрической энергии. После замыкания разрядника 4 между электродами образуется электрическая дуга. В результате пробоя межэлектродного промежутка в жидкости возникает токопроводящий канал, появление которого начинается с образования нескольких или целой серии лидеров. Лидер – это ярко светящийся плазменный канал диаметром 0,1-2 мм. Лидеры образуют потоки электронных лавин. Когда один или несколько лидеров достигнут противоположного электрода, лидерная стадия разряда заканчивается и начинается вторая стадия разряда.

Витебский государственный технологический университет

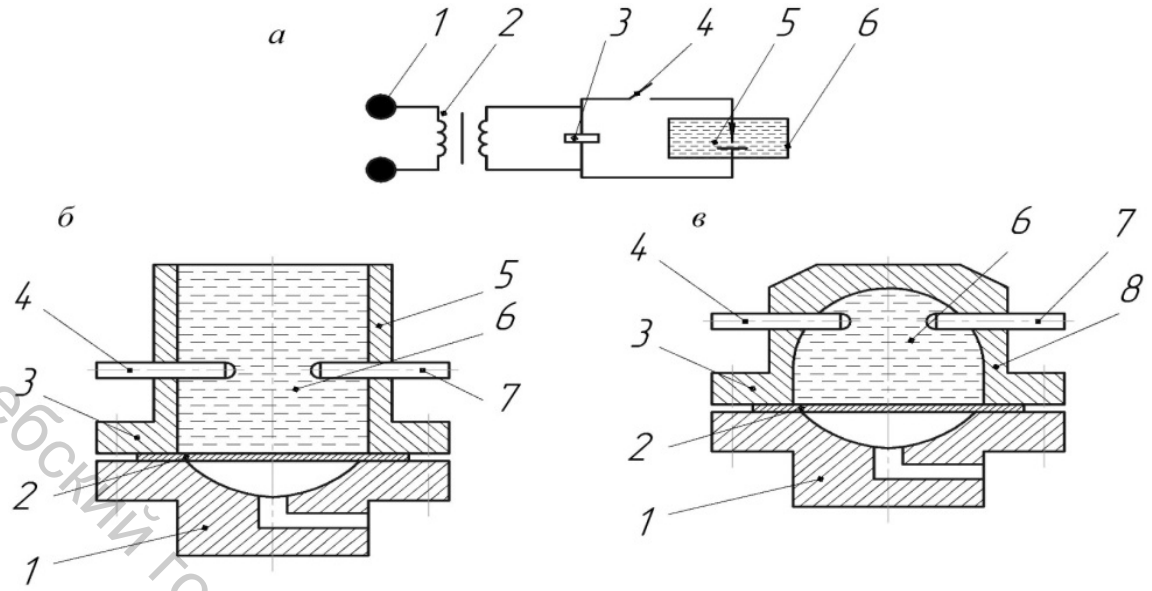


Рисунок 2.3 – Схемы электрогидроимпульсной штамповки:
а – принципиальная схема установки: 1 – источник напряжения, 2 – трансформатор, 3 – конденсатор, 4 – разрядник, 5 – электроды, 6 –камера с водой;
б и в – схемы технологических блоков соответственно с открытой и закрытой камерами: 1 – матрица, 2 – заготовка, 3 – зажим, 4 и 7 – электроды, 5 – камера открытая, 6 – жидкость, 8 – камера закрытая

На второй стадии происходит выделение в канале разряда большей части запасённой конденсатором энергии. В результате быстрого нарастания мощности температура плазмы в канале достигает 10000-15000 °К.

Интенсивный разогрев плазмы разрядным током приводит к расширению канала со скоростью 10^4 м/сек и повышению давления. Через 0,1-0,3 мкс с момента образования диаметр плазменного канала увеличивается до 1-3 мм.

Увеличение объёма канала плазмы вызывает в жидкости ударную волну. Фронт ударной волны, вначале неотделимый от канала, через 0,5-1,5 мкс отрывается от него. Давление ударной волны 100-140 Гпа. По существу и характеру протекания – это электрический взрыв, способный деформировать и разрушать различные материалы.

Применяют два способа превращения электрической энергии в механическую: разряд через зазор в жидкости и разряд через проволоку. В первом случае электроды разъединены жидкостью, а во втором – они соединены проволокой, называемой инициатором разряда. Рабочее напряжение при разряде через жидкость должно быть порядка 20-30 кВ, а при разряде через проволоку – 4-7 кВ.

Технологические схемы ЭГШ выполняются в открытой (рис. 2.3 *б*) и закрытой (рис. 2.3 *в*) камерах. Коэффициент полезного действия

Витебский государственный технологический университет

ЭГШ составляет 5-20 %. Наибольший КПД достигается в установках с замкнутым объёмом жидкости в закрытой камере.

Плоская заготовка характеризуется размером в плане (диаметром) и толщиной. В зависимости от размеров в плане плоские заготовки разделяются на три группы с максимальным размером в плане до 150 мм, от 150 до 300 мм и свыше 300 мм. Отличительным признаком разрядных камер для штамповки изделий из плоских заготовок является место образования канала разряда. Для штамповки деталей размером менее 150 мм рекомендуется использовать разрядную камеру с соосными электродами (рис. 2.4 *а*). Штамповка деталей в диапазоне 150-300 мм осуществляется обычно с помощью разрядных камер с угловым расположением электродов. При штамповке крупногабаритных изделий диаметром свыше 300 мм применяется схема локального нагружения (рис. 2.4 *в*)

Электрогидроимпульсной штамповкой можно выполнять все основные технологические операции листовой штамповки: вырубку, вытяжку, рельефную формовку, отбортовку, а также совмещать операции. Можно получать изделия размерами до двух и более метров из плоских заготовок толщиной до 3-5 мм.

Электогидроимпульская штамповка наиболее целесообразна при изготовлении изделий из пространственных заготовок диаметром от 40 до 350 мм и высотой до 900 мм. На рисунке 2.5 представлены схемы технологических установок для выполнения формообразующих операций. Матрица выполняется разъёмной и может быть помещена в цилиндрическую обойму (рис. 2.5 *а*) или установлена между запирающими конусами (рис. 2.5 *б*). Удаление воздуха осуществляется через отверстия, выполненные в матрице в наиболее труднодеформируемых местах. Количество отверстий зависит от объёма удаляемого воздуха, количества разрядов, скорости деформирования и выбирается индивидуально для каждого изделия (рис. 2.4).

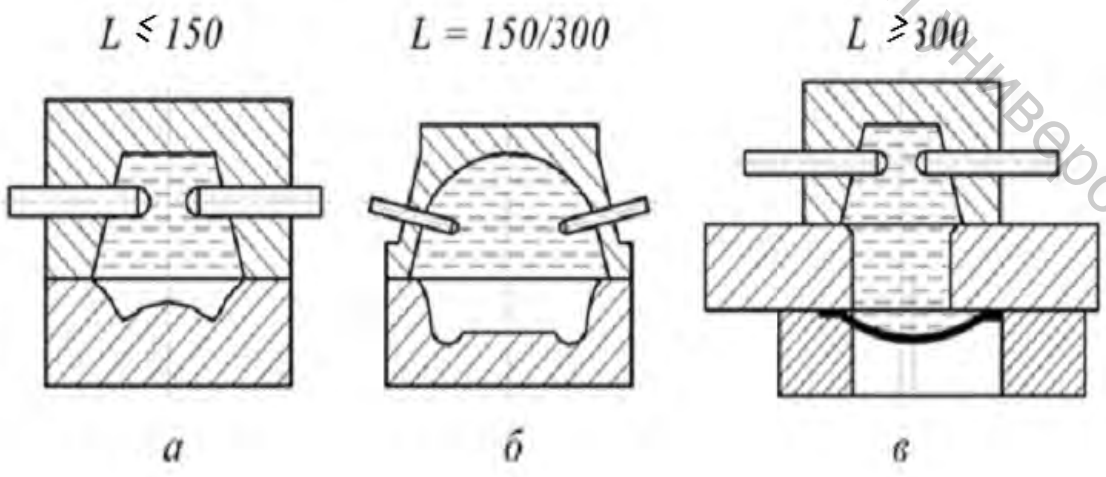


Рисунок 2.4 – Схемы разрядных камер для плоских заготовок

Витебский государственный технологический университет

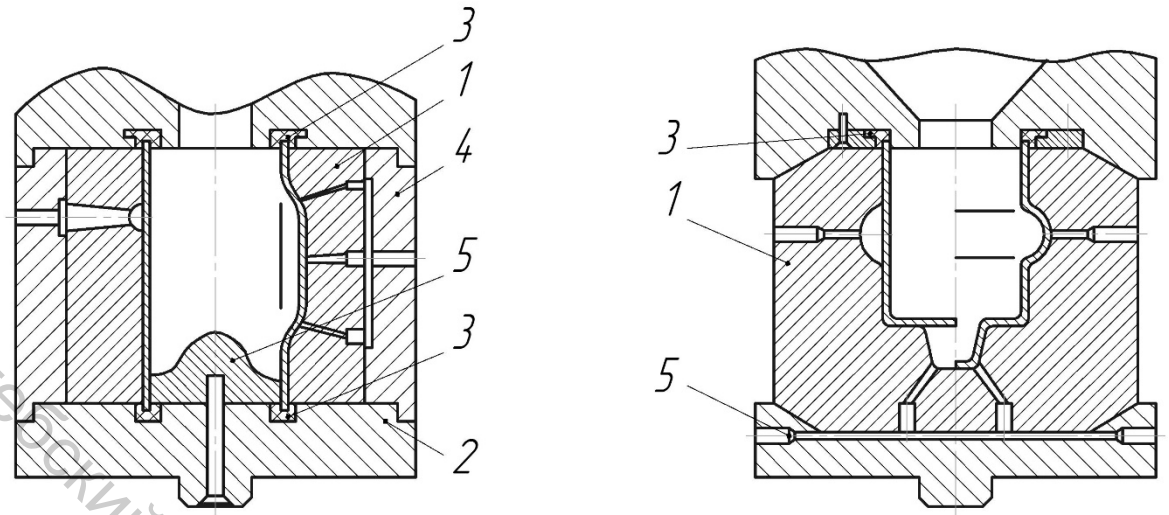


Рисунок 2.5 – Схемы технологических установок для формообразования пространственных заготовок:
а – крепление матрицы в обойме; б – крепление матрицы в конусах;
1 – разъёмная матрица; 2 – основание; 3 – уплотнительное кольцо; 4 – обойма; 5 – запирающий конус

Матрицы для электрогидравлической штамповки в большинстве случаев изготавливают из стали. Пригодны и другие материалы. Так, для штамповки небольших партий деталей употребляют матрицы из эпоксидных смол. Они выдерживают до 15-20 штамповок. Изготавливают матрицы так же из алюминиевых и цинковых сплавов. Но эти материалы не следует применять для изготовления изделий с жесткими допусками, так как матрицы могут деформироваться под действием высоких давлений, что отрицательно скажется на точности изделий.

Воздух из рабочей полости матрицы перед штамповкой обычно удаляется с помощью системы ваккумирования, для чего в матрицах предусматривают специальные отверстия и каналы.

Основным рабочим инструментом являются рабочие электроды. Количество и устройство электродов зависит от размеров и формы штампуемых изделий, параметров и конструкции установки. Наиболее часто штамповку осуществляют с помощью разряда между двумя электродами. При штамповке крупногабаритных изделий сложной формы в установке предусматривают несколько разрядных промежутков (многоконтурная схема разряда).

Электрогидравлическую обработку проводят на установках, состоящих из двух основных частей: электрической, называемой генератором импульсов тока, и технологической, к которой относятся рабочая ёмкость, оснастка, прижимные устройства и устройства для подачи и удаления заготовок.

Витебский государственный технологический университет

Технологический узел, энергетический блок и пульт управления, скомпонованные на одной раме, образуют электрогидравлическую штамповочную машину (электрогидравлический пресс).

Технологический узел включает в себя основание, механизм закрепления рабочей оснастки, насосную станцию, механизм выдвижения матрицы, систему заполнения и удаления воды из рабочей камеры и механизм закрытия защитного окна.

По сравнению с традиционной штамповкой ЭГШ обладает рядом преимуществ: упрощается и удешевляется технологическая оснастка, что способствует сокращению сроков подготовки производства; повышается точность изделий вследствие уменьшения пружинения, особенно при обработке труднодеформируемых материалов; расширяется возможность совмещения операций, выполняемых за один или несколько разрядов в штампе; возрастают значения критических степеней деформаций, достигаемых за один переход.

Электрогидравлическая штамповка имеет также ряд преимуществ перед штамповкой взрывом:

– лучшая управляемость процессом за счет варьирования количества импульсов и местоположения электродов;

– возможность изменения энергии импульса;

– возможность осуществления многократного разрядного импульса;

– возможность размещения электрогидравлических установок в производственных помещениях.

В условиях мелкосерийного и единичного производства, когда доля затрат на технологическую оснастку в структуре себестоимости и капитальных вложений имеет наибольший вес и достигает 80…95 %, применение электрогидравлической штамповки наиболее целесообразно. При массовом производстве электрогидравлическая штамповка экономически неэффективна.

2.1.3 Магнитноимпульсная штамповка

Сущность штамповки импульсом магнитного поля заключается в использовании электромеханических сил, возникающих в результате взаимодействия магнитных полей индуктора и заготовки, отталкивающих их друг от друга. Принципиальная схема установки для магнитноимпульсной штамповки аналогична электрогидроимпульсной. Отличие состоит в конструкции технологического блока, который включает индуктор, матрицу или пуансон (рис. 2.6 *а, б*). Индуктор может быть выполнен в виде соленоида (если заготовка круглая) или плоским.

Витебский государственный технологический университет

При разряде конденсаторной батареи на индуктор вокруг него возникает магнитное поле, наводящее вихревые токи в металлической заготовке. Взаимодействие магнитных полей индуктора и заготовки создает механическую силу, способную деформировать заготовку. Сила воздействия магнитных полей пропорциональна энергии, накопленной в батарее конденсаторов. Разряд происходит в течение 40-50 мкс. Давление на заготовку достигает 4000-50000 МПа. Заготовка получает ускорение и к моменту контакта с инструментом достигает скорости 200-300 м/сек.

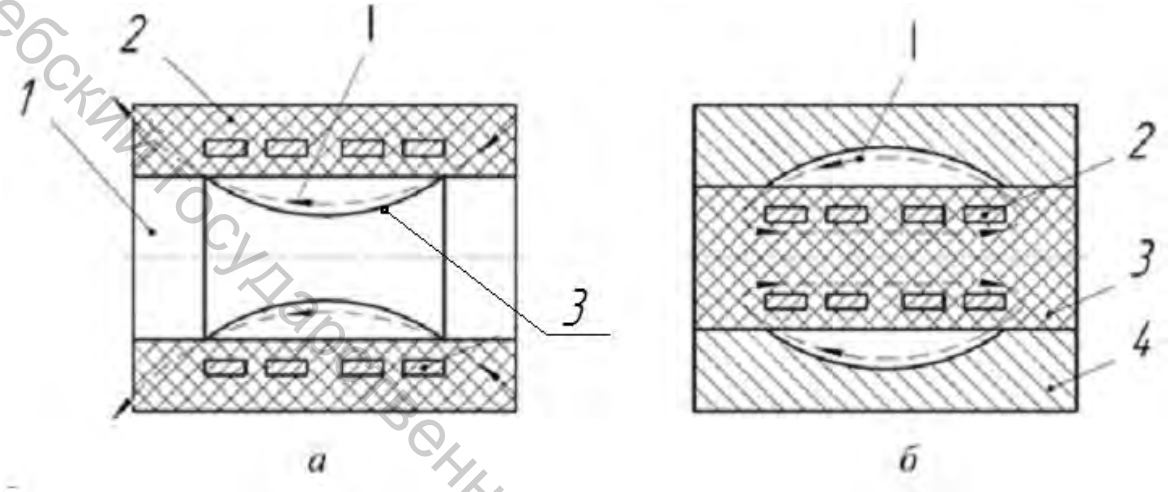


Рисунок 2.6 – Технологические блоки соответственно для обжима (а) и раздачи заготовок (б):
1 – пуансон, 2 – индуктор, 3 – заготовка, 4 – матрица, I – направление магнитных силовых линий

Штамповка труднодеформируемых металлов осуществляется путём предварительного нагрева заготовки и её последующей деформации. При этом нагрев и деформация заготовки осуществляются одним индуктором.

Наиболее слабым звеном в технологическом блоке являются индукторы, испытывающие большие динамические нагрузки, соответствующие создаваемым магнитным полям и давлению, действующему на заготовку. Индукторы изготовляют из медных трубок, ленты или проволоки круглого или прямоугольного сечения. Целесообразно изготовлять индукторы из стали, плакированной металлом высокой электропроводности. Такие индукторы обладают повышенной прочностью при высоких электрических показателях.

Выделение теплоты, происходящее при разряде, разогревает индуктор. Поэтому для увеличения срока службы индукторов их выполняют полыми для охлаждения проточной водой. Индуктор монтируют в специальном корпусе и заливают изоляционным материалом, который, кроме высоких электрических показателей, должен иметь достаточную механическую прочность.

Витебский государственный технологический университет

Стойкость индуктора резко возрастает (до 10^4…10^6 операций), если применяются концентраторы – специальные металлические вставки, концентрирующие магнитное поле индуктора на отдельных участках. Концентратор сжимает магнитный поток и увеличивает его напряженность на требуемых участках. Концентраторы представляют собой толстостенные втулки с радиальным разрезом и выполняются из высокопрочного материала, обладающего высокой проводимостью.

Область применения магнитноимпульсной штамповки обширна. С её помощью можно выполнять формообразующие, разделительные и сборочные операции (рис. 2.7).

Максимальный диаметр при обжиме и раздаче трубчатых заготовок может достигать 1200 мм при длине 1000 мм и толщине стенки до 6 мм. При пробивке диаметр отверстий может достигать 500 мм при толщине материала 0,2…1,5 мм.

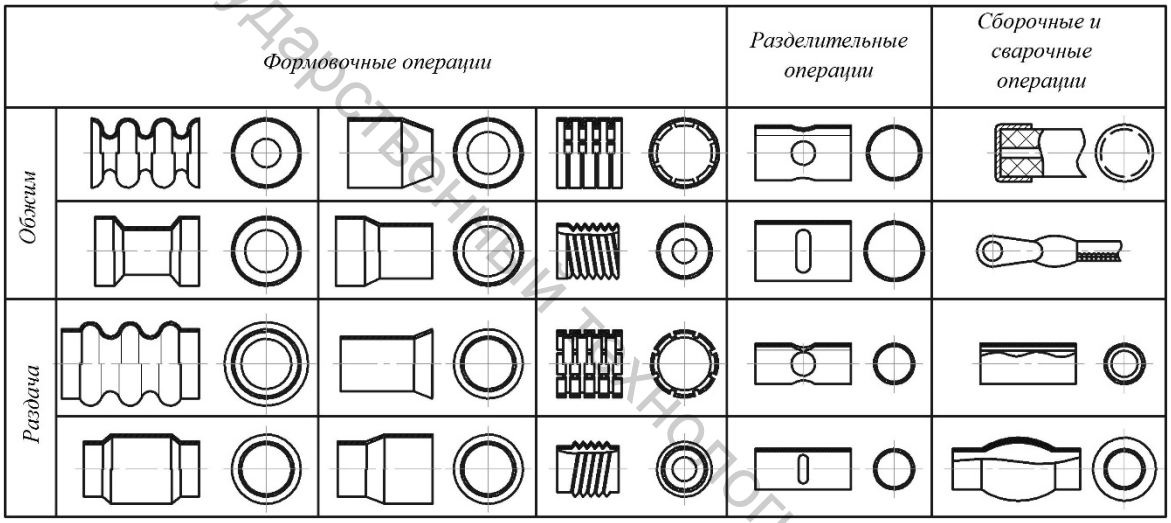


Рисунок 2.7 – Технологические операции, выполняемые по схемам «Обжим» и «Раздача»

Магнитноимпульсная штамповка имеет ряд преимуществ перед другими импульсными способами обработки. Давление на деформируемую заготовку создаётся непосредственным воздействием магнитного поля без участия промежуточной среды. Это позволяет штамповать детали из полированных и лакированных заготовок без повреждения поверхности. Кроме того, магнитноимпульсная штамповка обеспечивает: возможность точного дозирования мощности импульсного разряда; возможность деформирования заготовок за несколько разрядов, причем первые импульсы предназначены для разогрева заготовки и повышения её пластичности.

Недостатком магнитноимпульсной штамповки является низкий КПД (3–10 %), а также ограничения по форме и геометрическим размерам штампуемых изделий, а так же низкая стойкость при штамповке стальных заготовок.

Витебский государственный технологический университет

2.2 Обработка материалов методами локальной пластической деформации

Под локальными понимают такие способы деформирования, при которых очаг деформации в каждый момент времени меньше, чем подлежащая формоизменению часть заготовки, и постоянно перемещается относительно заготовки до тех пор, пока не будет достигнуто заданное изменение размеров и формы. Эти способы позволяют осуществить формоизменения крупногабаритных и высокопрочных заготовок при малых мощностях оборудования, так как деформируется не вся заготовка целиком, а только её часть, поэтому рабочие зоны обрабатывающих машин имеют меньшие габариты, чем размеры детали. При малой мощности обеспечивается возможность создания высоких относительных давлений, благодаря малой площади контакта инструмента и заготовки, что позволяет так же повысить пластичность материала.

Интенсивность нагрузки можно изменять в каждый момент времени. Поэтому можно добиться полного использования пластических свойств всех зон заготовок и увеличения благодаря этому общей степени деформирования.

Так как не вся заготовка одновременно обрабатывается, то форма рабочих поверхностей инструмента может отличаться от формы готовой детали. Это позволяет использовать один и тот же инструмент для штамповки разных по размерам и форме деталей, что уменьшает номенклатуру инструмента и стоимость подготовки производства.

Локальным способом обработки присущи следующие недостатки. Производительность обработки локальными способами ниже, чем при обработке заготовки сразу и целиком. Между деформированными и недеформированными частями заготовки возникают внутренние напряжения, что значительно сказывается на точности изделия. Как правило, обработка является многопроходной, а это в свою очередь, сопровождается снижением производительности.

2.2.1 Ротационно-локальное формообразование изделий сложного профиля из листового материала

Способ формообразования изделий сложного профиля из листового материала путем локальной деформации осуществляется следующим образом (рис. 2.8).

Листовая заготовка 1, предназначенная для изготовления изделия сложной формы, подвергается местному деформированию инструментом 2, который установлен с возможностью перемещения по

Витебский государственный технологический университет

трем координатам. Инструмент последовательно перемещается по заданным траекториям. В каждой точке инструмент располагается по касательной к траектории и перпендикулярно к поверхности заготовки. В этих направлениях под действием усилия *P* осуществляется локальная деформация. В очаге деформации возникает плоское напряженное состояние, а очаг деформации окружен упругодеформированными зонами.

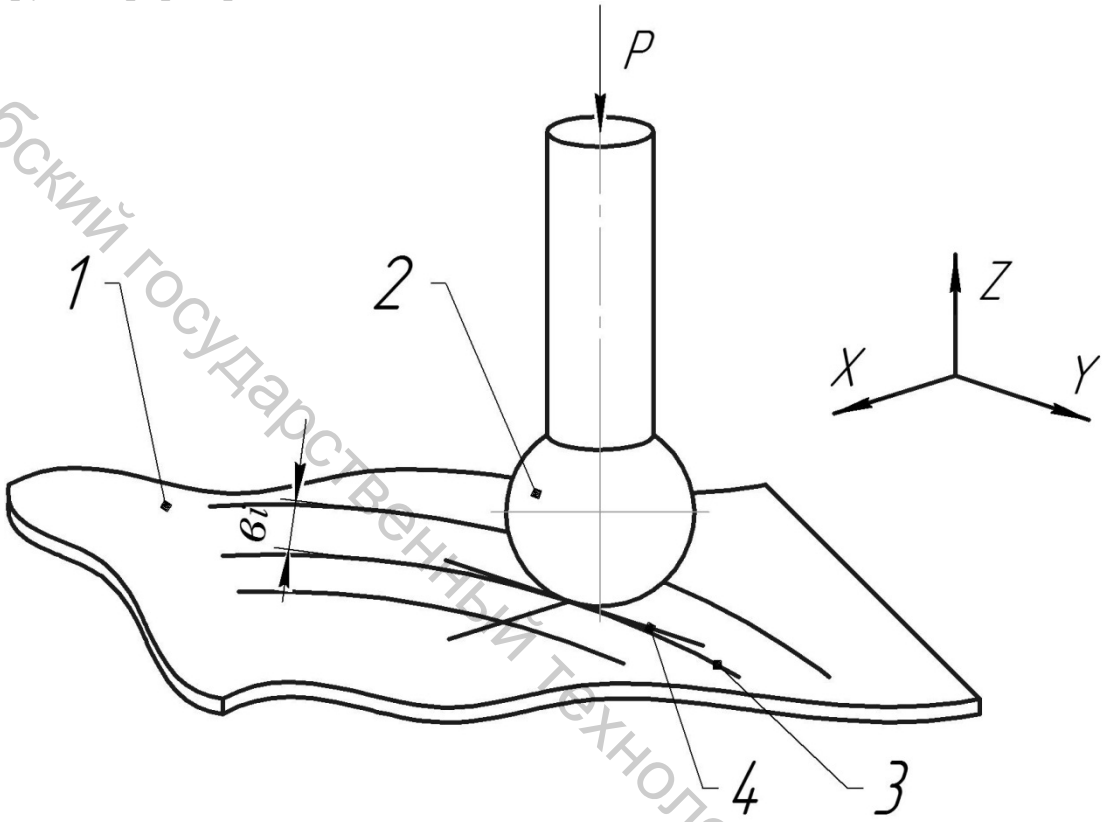


Рисунок 2.8 – Обобщённая схема реализации способа локальной обработки листового материала:
1 – листовая заготовка; 2 – инструмент; 3 – траектория перемещения инструмента; 4 – касательная к траектории

Локальная деформация может осуществляться: одним подвижным инструментом; между подвижным инструментом и неподвижной матрицей; между вращающейся оправкой и подвижным инструментом; между двумя подвижными инструментам (рис. 2.9). Обработка листовых материалов одним подвижным инструментом технологически ограничивается простыми по форме изделиями. Использование дополнительно стационарно закреплённой матрицы расширяет возможность способа локального деформирования, но стоимость технологической оснастки при этом возрастает. Широкое применение нашел способ локальной обработки листовой заготовки между вращающейся оправкой и подвижным инструментом (ротационная вытяжка). Интенсивно ведутся опытно-конструкторские и технологические исследования по разработке технологий и созданию

Витебский государственный технологический университет

оборудования для широкого использования двух подвижных инструментов.

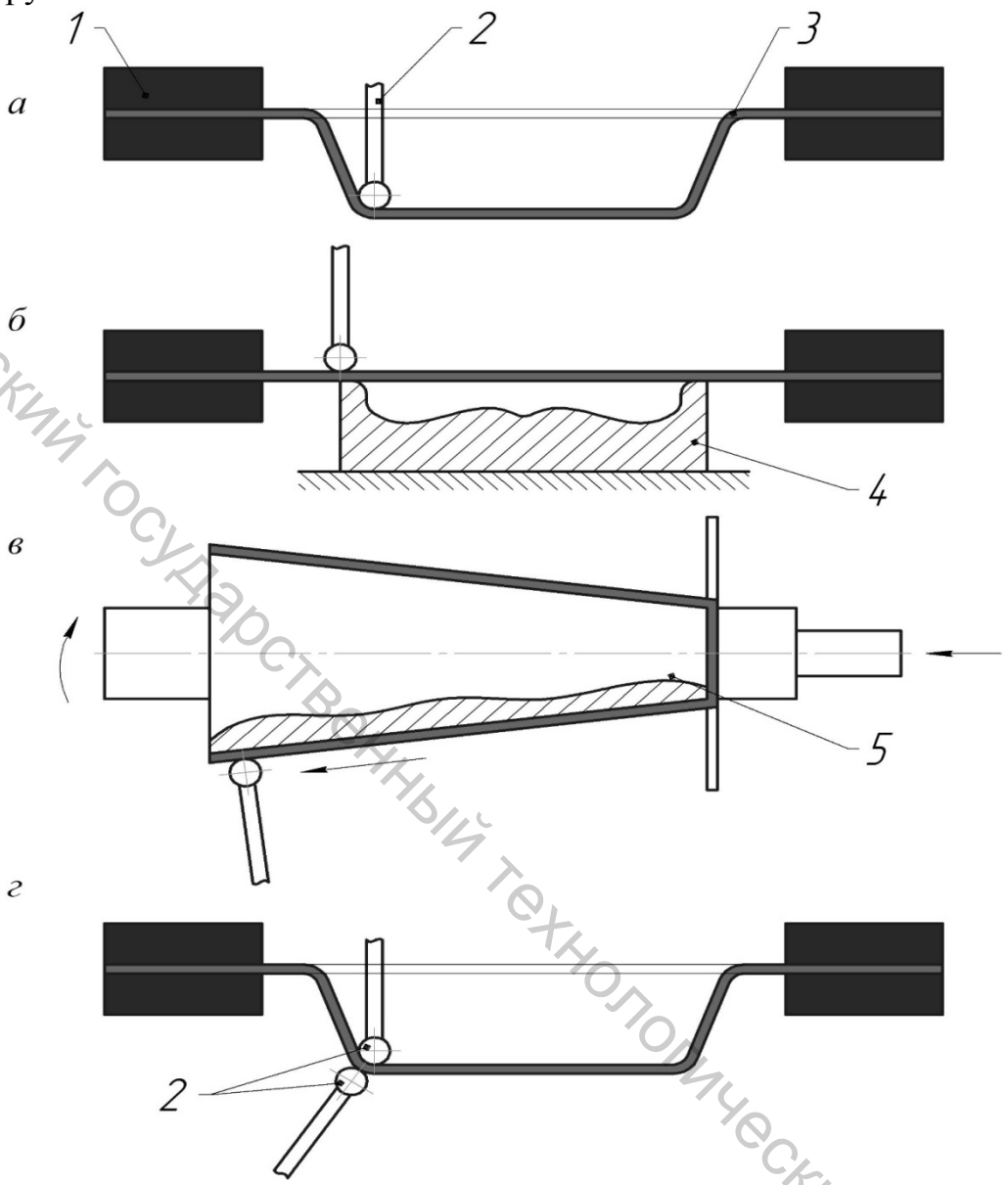


Рисунок 2.9 – Технологические схемы реализации процессов локальной обработки листового материала:
а – одним подвижным инструментом, б – между подвижным инструментом и неподвижной матрицей; в – между подвижной оправкой и подвижным инструментом (ротационная вытяжка);
г – между двумя подвижными инструментами;
1 – крепление; 2 – инструмент; 3 – заготовка; 4 – матрица; 5 – оправка

На рисунке 2.10 представлена конструктивная схема специализированной экспериментальной установки для формообразования изделий сложной формы двумя подвижными инструментами. Верхний 13 и нижний 10 подвижные инструменты устанавливаются соосно в С-образной раме 1 с возможностью вертикальных перемещений. С-образная рама закреплена на несущей каретке 7 и с помощью боковых кареток 3, 9 передвигается в

Витебский государственный технологический университет

горизонтальной плоскости по направляющим 5, 8. Силовое воздействие несущей каретки воспринимается шаровой опорой 6, установленной на фундаментной плите 4.

Листовая заготовка укладывается на горизонтальный стол и закрепляется прижимами 2. Верхний и нижний инструменты соответственно располагаются по обе стороны заготовки.

Формообразование поверхности заготовки осуществляется в процессе совместных движений С-образной рамы и инструментов. Задание траектории движения и режимов обработки производится автоматически.

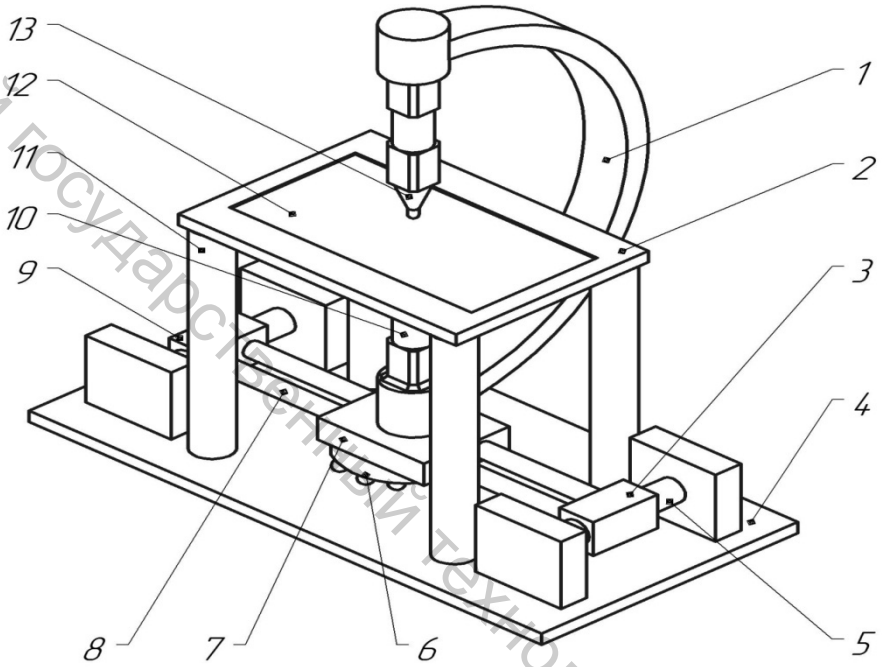


Рисунок 2.10 – Схема специализированной установки для двухстороннего формообразования:
1 – С-образная рама; 2 – прижим; 3, 9 – каретки; 4 – фундаментная плита; 5, 8 – направляющие по осям X, Y; 6 – шариковая опора; 7 – несущая каретка; 10, 13 – нижний и верхний инструменты; 11 – стол; 12 – листовая заготовка

Представляется весьма перспективным осуществлять ротационно-локальное формообразование в условиях действия электропластического эффекта. Для этого верхний и нижний подвижные инструменты подсоединяются к генератору импульсного тока. Инструменты сводятся навстречу друг другу и локально сжимают листовую заготовку. При достижении предела текучести материала заготовки через электроды пропускается импульсный ток с частотой 100 Гц, длительностью импульса 200 мкс, и силой тока порядка 2000…3000 А. Под действием импульсов тока происходит локальный нагрев и местное разупрочнение материала заготовок.

Витебский государственный технологический университет

В результате:

– устраняется пружинение заготовки за счет снятия внутренних напряжений;

– отпадает необходимость в промежуточных отжигах, а значит имеет место энергосбережение;

– уменьшается неравномерность деформации и устраняется образование трещин и разрывов;

– повышается остаточная пластичность материала заготовки.

С целью сокращения времени и средств на создание специализированных установок формообразование изделий сложной формы можно осуществлять с помощью двух роботов (рис. 2.11). Листовая заготовка 2 зажимами 3 закрепляется в вертикальном положении. Роботы 1, 4 размещены по обе стороны заготовки. В рабочих органах роботов закреплены обрабатывающие инструменты. Процесс формообразования осуществляется путем синхронных перемещений по сложной траектории обоих инструментов. Такая система формообразования требует точной наладки обоих роботов и координации их движений.

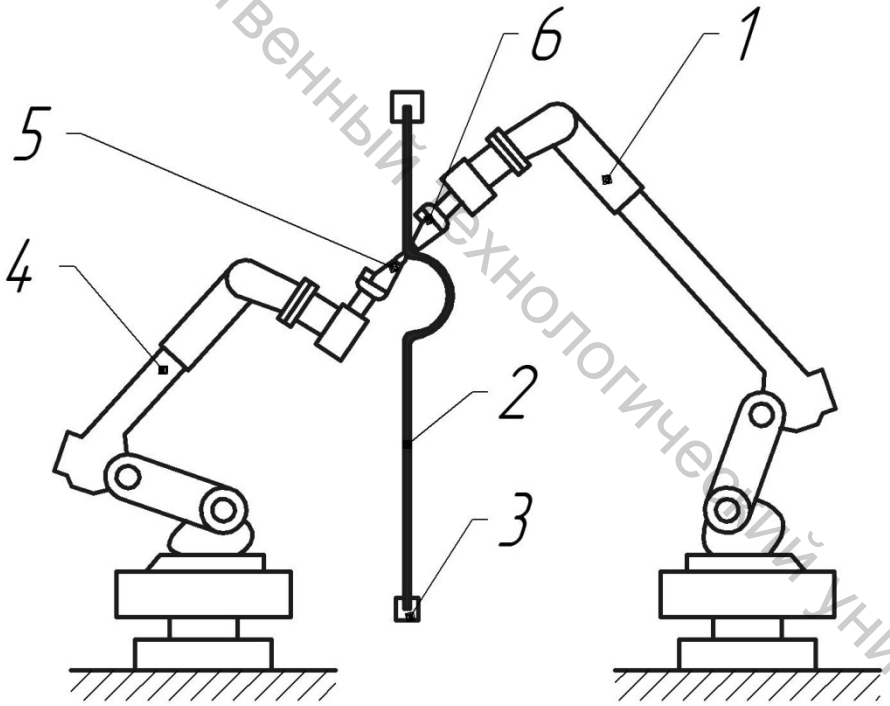


Рисунок 2.11– Схема формообразования двумя роботами:
1, 4 – роботы; 2 – листовая заготовка; 3 – зажим;
5, 6 – инструменты

Процессы формообразования изделий сложной формы методами локальной деформации находятся в стадии интенсивных исследований и опытно-конструкторских разработок. Полученные результаты открывают широкие перспективы для практического применения (рис. 2.12). Процессы успешно могут применяться для изготовления сложных по форме кузовов автомобилей, электропоездов, судов, самолетов и др.

Витебский государственный технологический университет

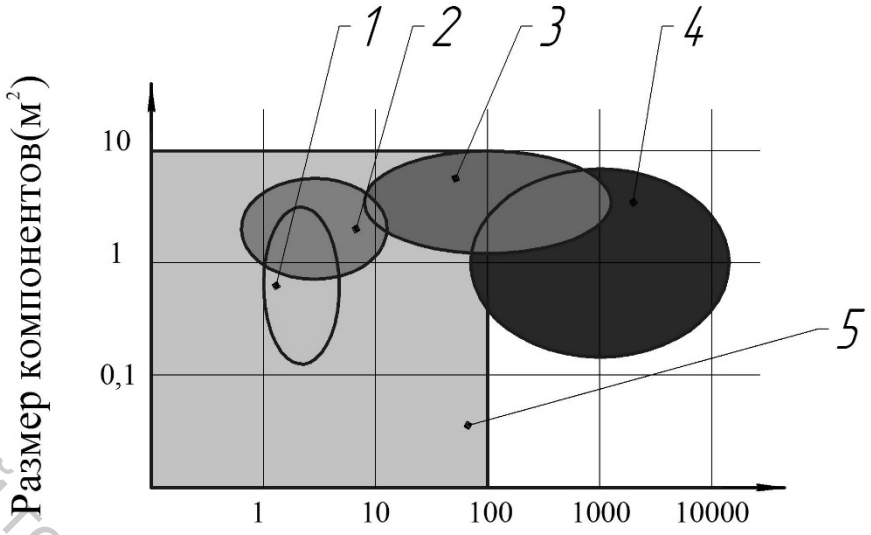


Рисунок 2.12 – Текущие и потенциальные области применения локального формообразования:
1 – прототипы и дизайн компонентов; 2 – запасные части;
3 – самолётостроение; 4 – автомобилестроение;
5 – экономическая и технологическая области применения локального формообразования

Применение технологий ротационно-локального формообразования по сравнению с обычной штамповкой ориентировочно позволит обеспечить:

– снижение энергоёмкости производства в 4–6 раз;

– снижение трудоемкости изготовления в 4–5 раз;

– снижение металлоёмкости производства в 17–30 раз;

– исключение применения штамповой оснастки;

– возможность полной автоматизации изготовления и контроля изделий.

2.2.2 Ротационная вытяжка

Ротационная вытяжка – это процесс локального формообразования изделий типа тел вращения путём вращательных и поступательных движений заготовки, формообразующего и деформирующего инструментов.

Формообразующий инструмент (оправка, шаблон) предназначен для формирования внутренних полостей изделия. Как правило, формообразующий инструмент совместно с заготовкой совершает вращательное движение. Дополнительно они могут совершать поступательное движение относительно деформирующего инструмента.

Витебский государственный технологический университет

Деформирующие инструменты – давильники, раскатники, роликовые и шариковые головки обеспечивают формообразование наружных поверхностей. При одноперехо́дной вытяжке деформирующий инструмент перемещается по траектории эквидистантной форме, образующих изделия. При многоперехо́дной вытяжке деформирующий инструмент на каждом переходе перемещается по сложной траектории, постепенно приближаясь к конечной форме готового изделия.

Различают два способа ротационной вытяжки: с утонением и без утонения стенок.

Схемы ротационной вытяжки конических и сферических деталей представлены на рисунке 2.13. Из схем видно, что каждый элемент объёма заготовки сдвигается параллельно оси вращения и остается при этом на том же расстоянии от оси изделия.

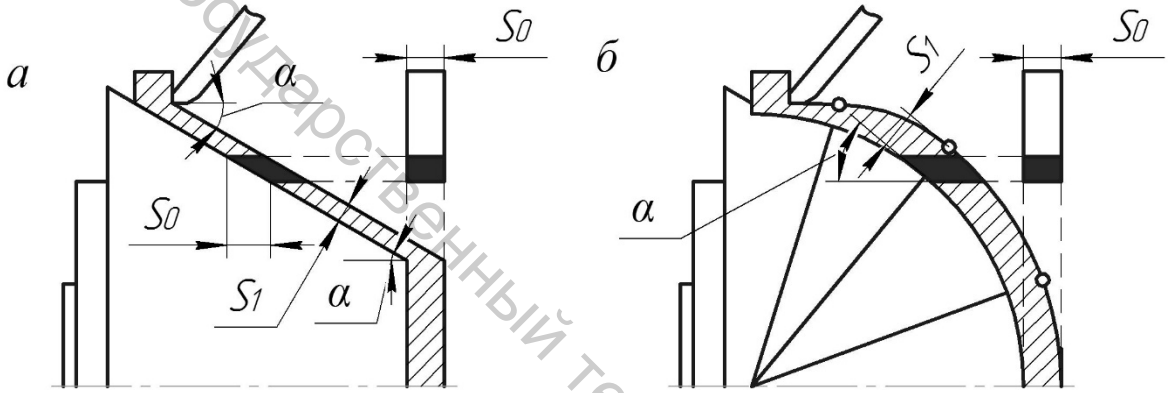


Рисунок 2.13 – Схемы ротационной вытяжки с утонением конического (а) и сферического (б) изделий:
S_0 – исходная толщина стенки заготовки; S_1 – текущая толщина стенки

Соответственно соотношение между толщиной исходной заготовки S_0 и текущей толщиной стенки S_1, измеренной в направлении, перпендикулярном образующей оправки, будет равно

$$S_1 = S_0 \cdot \sin\alpha.$$

Это выражение принято называть законом синуса. Изделия высокого качества могут быть получены только в тех случаях, когда процесс формообразования происходит в соответствии с законом синуса.

При ротационной вытяжке с утонением цилиндрических изделий исходной заготовкой является полое изделие: стакан или труба. Заготовка плотно надевается на оправку. Деформирующим инструментом являются ролики. Для уравновешивания усилий деформирования ролики располагают под углами α.

Различают прямой и обратный способы вытяжки с утонением (рис. 2.14). При прямом способе заготовка 3 прижимается к торцу оправки 1 прижимом. При перемещении роликов слева направо течение

Витебский государственный технологический университет

деформирующего материала осуществляется в том же направлении. В утоненной части заготовки возникают меридиональные растягивающие напряжения, ограничивающие предельное формоизменение.

При обратном способе заготовка надевается на оправку до упора в бурт оправки. Направление течения металла в этом случае противоположно направлению перемещения роликов. В недеформированной части заготовки возникают меридиональные сжимающие напряжения. При деформировании тонкостенных исходных заготовок возможна потеря устойчивости недеформированной части заготовки. При этом способе длина оправки может быть в несколько раз меньше длины полученного изделия. Поэтому при вытяжке длинномерных изделий целесообразно использование поддерживающих роликов.

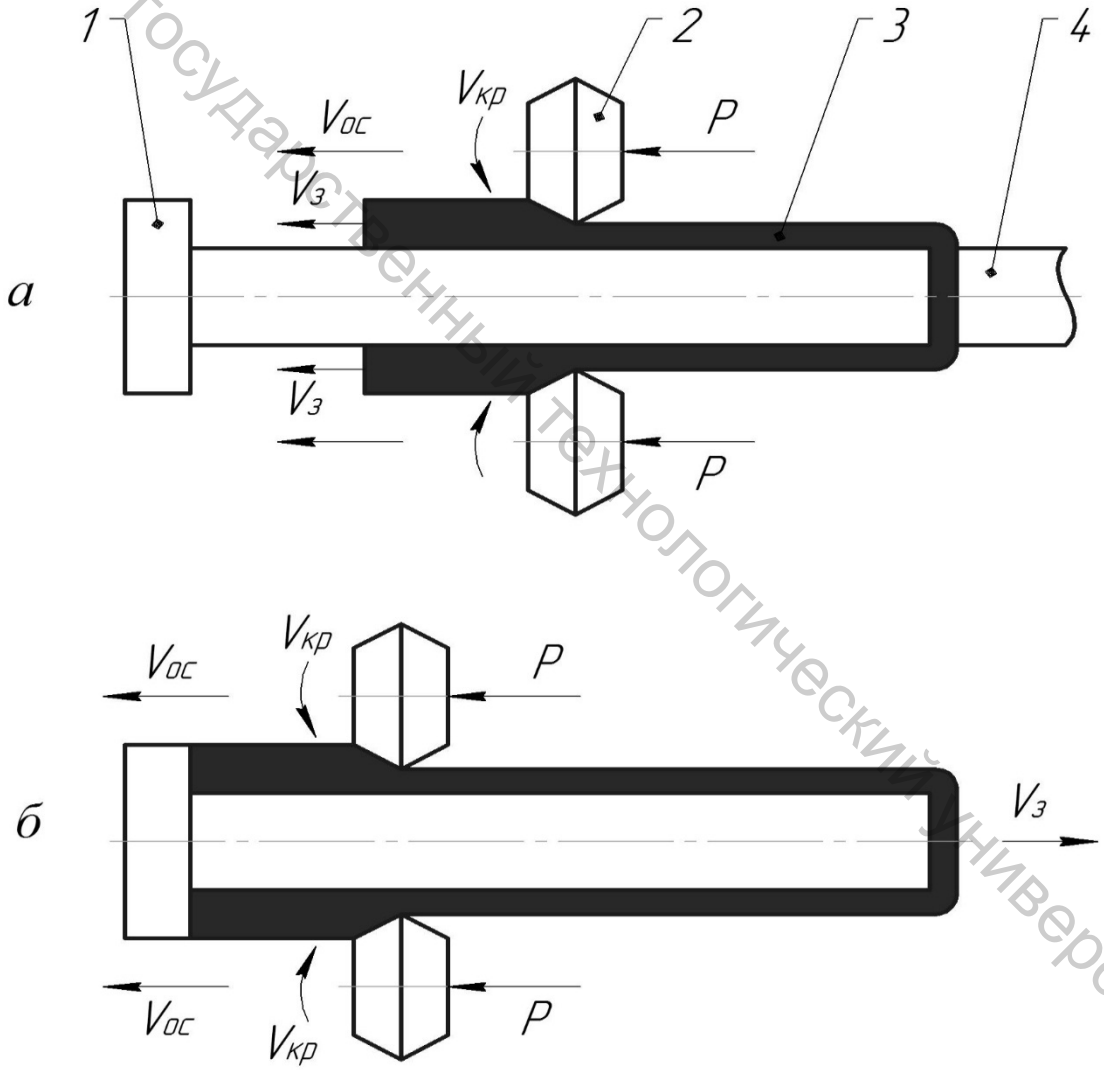


Рисунок 2.14 – Схемы прямого (а) и обратного (б) способов ротационной вытяжки:
1 – оправка; 2 – деформирующие ролики; 3 – исходная заготовка; 4 – прижим; $V_з$– скорость перемещения материала заготовки; $V_{ос}, V_{кр}$ скорости роликов – соответственно осевая и круговая

Витебский государственный технологический университет

С помощью ротационной вытяжки получают изделия с постоянной и переменной толщиной стенок, имеющие широкий диапазон размеров: диаметром 2…5000 мм, толщиной стенок 0,1…7,5 мм, длинной 10…6000 мм (рис. 2.15).

Ротационная вытяжка используется весьма успешно при изготовлении изделий из обычных малоуглеродистых коррозионностойких сталей, алюминиевых, медных и тугоплавких сталей и сплавов.

Возможность изменения в широких пределах геометрических параметров рабочего профиля деформирующего инструмента в сочетании с оптимальными режимами обработки позволяет регулировать качество изделий и получать высокую размерную точность и низкую шероховатость поверхности.

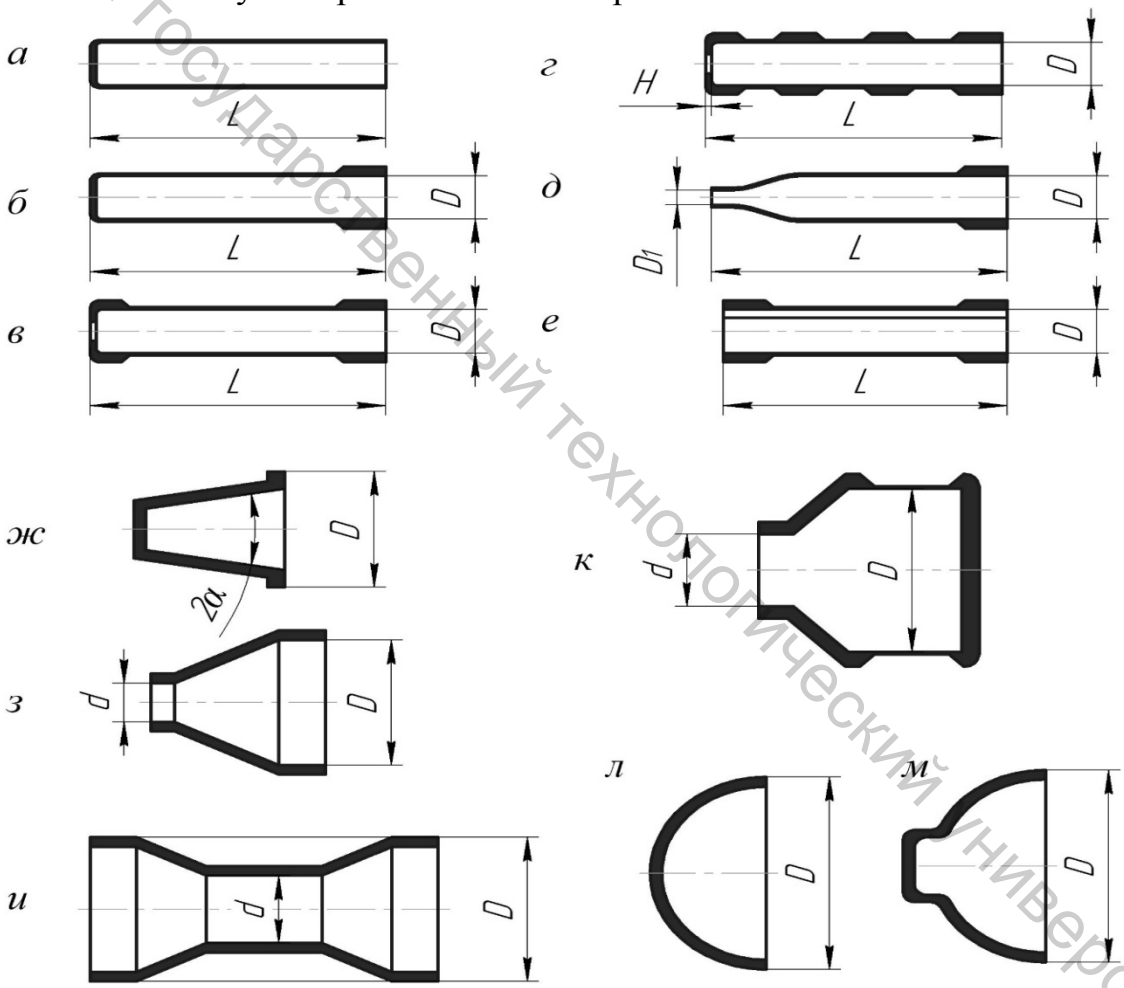


Рисунок 2.15 – Типы изделий, получаемых ротационной вытяжкой: цилиндрических (*а–е*), конических (*ж–л*) и с криволинейной образующей (*м*, *н*);

а – гладкие цилиндрические с закрытой концевой частью;

б – цилиндрические с дном и концевым утолщением;

в – цилиндрические с двумя концевыми утолщениями;

г – цилиндрические с концевыми и промежуточными утолщениями переменной толщины;

Витебский государственный технологический университет

д – цилиндрические с горловиной; е – цилиндрические с продольным сварным швом и открытыми концевыми частями; ж – конические с фланцем; з – конические с открытыми цилиндрическими участками; и – конические с двойным конусом; к – конические с дном и горловиной; л – полусфера; м – сферическо-цилиндрическая

Ротационная вытяжка позволяет:

– получать сложные по форме изделия при минимальном количестве операций;

– создавать легкие, прочные и жесткие конструкции при небольшом расходе материала;

– получать изделия из высокопрочных пластичных материалов;

– на одном и том же оборудовании выполнять черновые и финишные операции;

– автоматизировать процесс обработки простых и сложных изделий;

– минимизировать затраты на подготовку производства.

Основным недостатком ротационной вытяжки является ограничение формы изделий телами вращения.

2.3 Гидропластическая обработка материалов

Гидропластической обработкой называют процессы пластического изменения формы, при которых силовое воздействие создается жидкостью высокого давления на внутренние, наружные или одновременно на те и другие поверхности заготовки. В этих случаях жидкость является универсальным формообразующим инструментом, что позволяет избегать резкой концентрации напряжений, обеспечивает равномерность распределения деформирующих давлений и создавать условия всестороннего объемного сжатия. При этом изменяются свойства материалов, в частности, повышается пластичность. Изначально хрупкие материалы переходят в категорию пластичных, что кардинально изменяет технологию обработки.

Гидропластическая обработка обеспечивает более равномерное распределение структуры и свойств по сечению изделия, а так же улучшает физико-механические характеристики металла. Применительно к ряду материалов (тугоплавкие металлы, инструментальные стали и др.) появляется возможность формирования качественно новой структуры, обеспечивающей комплекс таких физико-механических свойств, которые невозможно получить другими методами обработки.

Витебский государственный технологический университет

2.3.1 Гидропластическая формовка трубчатых заготовок

Имеет место устойчивая тенденция использования отрезков труб в качестве исходных заготовок для последующей штамповки. Это объясняется экономичностью, высоким качеством, точностью и надежностью изделий, полученных из трубных заготовок. К таким изделиям относятся элементы трубопроводных соединений; корпуса гидроаппаратов, полые осесимметричные, эксцентриковые, кулачковые оси и валы; элементы рам велосипедов с одним, двумя и более отводами; детали с поперечными гофрами и др.

Все процессы гидропластической формовки можно разделить на две группы: гидропластическая формовка простым нагружением только жидкостью высокого давления и гидромеханическая формовка с дополнительным механическим нагружением.

Гидрпластическая формовка заготовок простым нагружением широко используется в промышленности. Пластическое формоизменение происходит в результате воздействия на полую заготовку давления жидкости, которая подаётся в полость заготовки источником высокого давления (рис. 2.16 *а*). В отдельных случаях высокое давление жидкости создают непосредственно в полости заготовки с помощью плунжера, сжимающего жидкость (рис. 2.16 *б*). Однако применение специального автономного источника высокого давления жидкости (мультипликатора или насоса высокого давления) существенно расширяет возможности гидростатической формовки, так как позволяет варьировать давлением в широких пределах и с достаточной точностью.

Как правило, простое нагружение заготовок применяют для выполнения операции раздачи, т. е. для увеличения поперечных размеров. Простое нагружение применяют так же для калибровки труб, выполнения операций формовки, сборки трубчатых заготовок с элементами конструкции.

Простое нагружение заготовки внутренним высоким давлением жидкости может быть дополнено наружным давлением на поверхность стенки заготовки (рис. 2.16 *в*). Противодавление создает условия для объемного сжатия, которое способствует повышению пластичности материала сжатой заготовки. Обычно противодавление создаётся жидкостной или эластичной средой.

Витебский государственный технологический университет

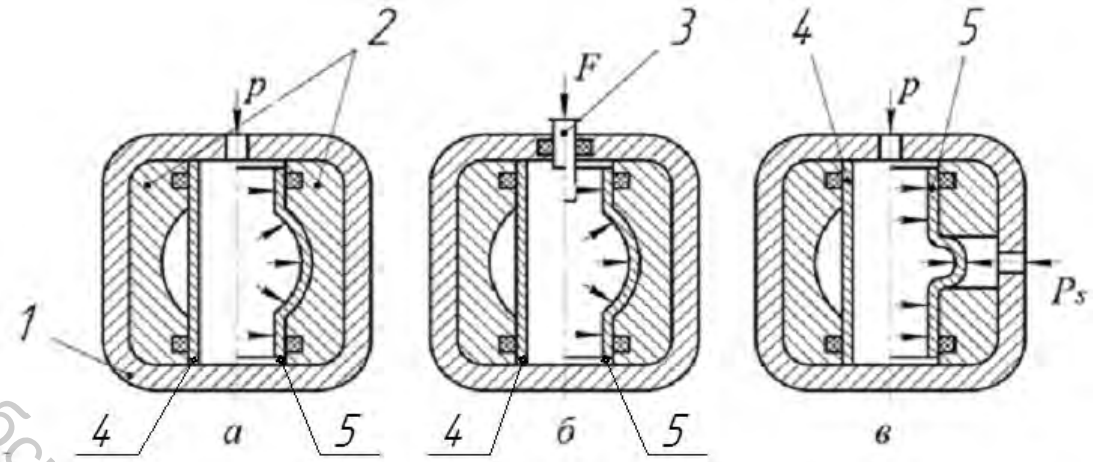


Рисунок 2.16 – Принципиальные схемы гидростатической формовки простым нагружением:
1 – обойма; 2 – полуматрицы; 3 – плунжер; 4 – исходная заготовка; 5 – конечное изделие

Гидромеханическая формовка с осевым сжатием заготовки значительно расширяет технологические возможности. Заготовка подвергается одновременно нагружению внутренним давлением жидкости и деформированию жесткими пуансонами в осевом направлении. Это позволяет перемещать в зону формообразования объёмы металла, необходимые для обеспечения изменения формы заготовки.

Схема для реализации процесса представлена на рисунке 2.17. Заготовку 1 помещают в полость жесткой разъемной полуматрицы 2, 3. Полуматрицы 2, 3 смыкают и сжимают некоторым усилием F_c, предотвращающим её раскрытие при формовке. Полость заготовки заполняют рабочей жидкостью. К торцам заготовки подводят осевые пуансоны 4, 5, которые вдавливаются в торцы и сжимают заготовку в осевом направлении с усилием $F_п$ при одновременной подаче в полость заготовки жидкости высокого давления Р.

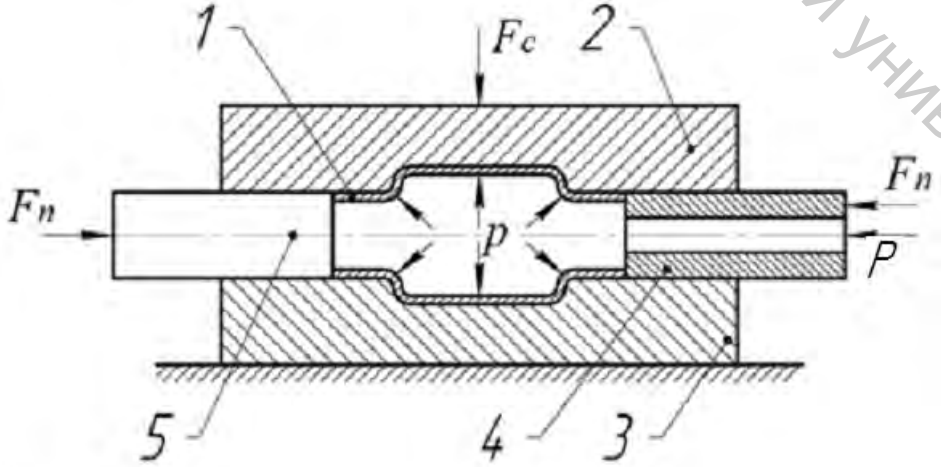


Рисунок 2.17 – Схема гидромеханической формовки с осевым сжатием заготовки:

Витебский государственный технологический университет

1 – заготовка; 2, 3 – полуматрицы; 4, 5 – осевые пуансоны

Под действием внутреннего давления Р и усилия осевого сжатия $F_{\text{П}}$ материал заготовки деформируется. Стенка трубы расширяется и принимает форму полости, образуемой полуматрицами.

Гидромеханическая формовка с поперечным сжатием заготовки осуществляется при нагружении трубчатой заготовки деформирующими усилиями в поперечном направлении относительно её оси. При этом, внутрь заготовки подают жидкость, а её полость герметизируют. Этот вид штамповки используется для формообразования продольно гофрированных оболочек и трубопроводов специального поперечного сечения (рис. 2.18). Трубчатую заготовку 1, расположенную в жесткой разъёмной матрице 2 подвергают одновременному нагружению изнутри жидкостью высокого давления Р и поперечному сжатию усилием F_f одним или несколькими жесткими пуансонами 3. Таким образом, форма поперечного сечения изделия зависит не только от формы ручья матрицы, но и от формы поперечного сечения пуансонов 3. Гидромеханическая формовка с поперечным сжатием заготовки должна сопровождаться обязательной подачей жидкости высокого давления в полость заготовки от автономного источника.

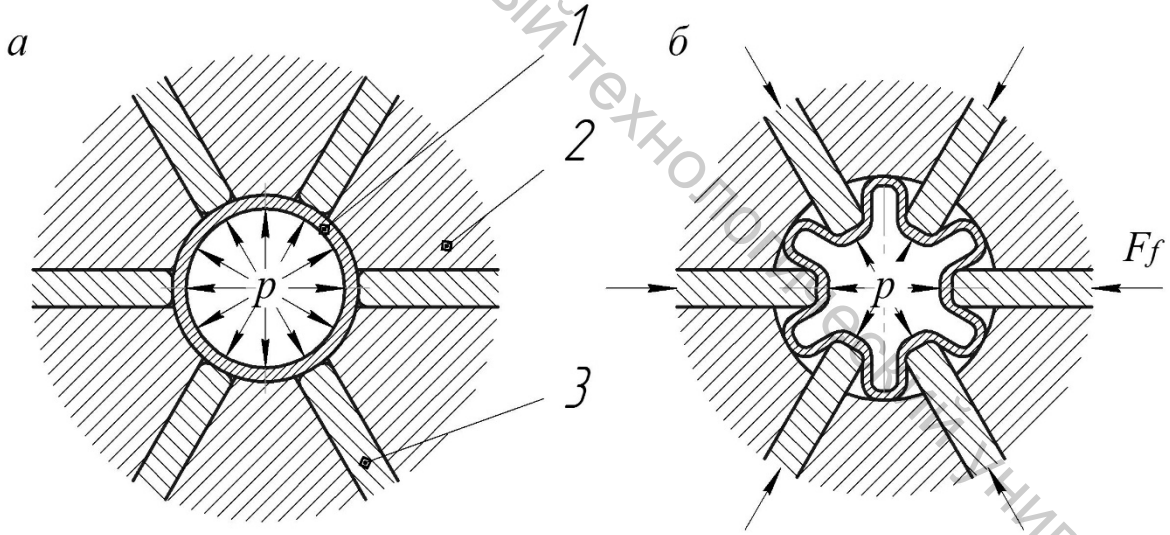


Рисунок 2.18 – Схемы гидромеханической формовки продольно-гофрированных оболочек:
а, б – соответственно исходное и конечное положения поперечных пуансонов;
1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – пуансоны

Гидромеханическая формовка с осевым сжатием и поперечным изгибом позволяет изготовлять полые изделия со ступенчатой осью (рис. 2.19). Заготовку 1 помещают в полость разъёмной матрицы 2. Конструкцией предусмотрены подвижные вкладыши 3, 5, которые могут перемещаться в направлении поперечном

Витебский государственный технологический университет

оси заготовки 1. В собранном исходном положении матрица 2 и вкладыши 3, 5 образуют цилиндрическую прямолинейную полость, в которую помещают заготовку 1. Затем полость заготовки заполняют жидкостью, герметизируют с помощью осевых пуансонов и создают внутри заготовки высокое давление *P*. После этого заготовку сжимают в осевом направлении пуансонами 4, усилием F_n, и одновременно сгибают с помощью вкладыша 5 усилием F_f. Изгибаемая часть заготовки поддерживается вкладышем 3 с усилием F_s.

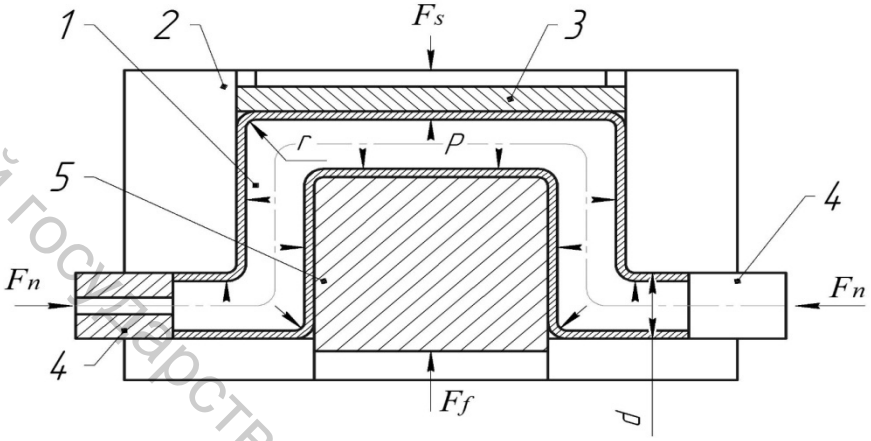


Рисунок 2.19 – Схема гидромеханической штамповки с осевым сжатием и поперечным изгибом:
1 – заготовка; 2 – разъемная матрица; 3, 5 – подвижные вкладыши;
4 – осевые пуансоны

Результаты исследований и производственный опыт показали, что детали, полученные гидропластическим формованием, надежно работают в экстремальных условиях, т. е. при высоких давлениях в агрессивных средах и в широком диапазоне высоких и низких температур, вплоть до криогенных. При этом масса деталей, полученных гидропластическим формованием, значительно меньше, чем у аналогичных деталей, изготовленных другими способами.

2.3.2 Гидропрессование

Одним из перспективных технологических процессов объемного пластического деформирования является выдавливание жидкостью высокого давления (гидростатическое выдавливание, гидропрессование, прессование жидкостью, гидроэкструзия), представляющее собой разновидность прямого прессования, при котором передача давления на деформируемую заготовку осуществляется через жидкую среду.

Процесс гидропрессования осуществляется следующим образом. Заготовку помещают в контейнер, и она заходным конусом перекрывает отверстие формообразующего инструмента – матрицы.

Витебский государственный технологический университет

Между боковыми поверхностями заготовки и стенками контейнера имеется зазор. Камеру контейнера заполняют рабочей жидкостью и перекрывают пуансоном (плунжером).

На плунжере и матрице установлены уплотнения. При перемещении плунжера давление жидкости возрастает, и при его определенном значении начинается истечение металла через отверстие матрицы. Давление жидкости на боковые поверхности заготовки обеспечивает осевую устойчивость заготовки.

Высокое давление в рабочей камере контейнера может создаваться как перемещением в ней плунжера, так и внешним источником жидкости высокого давления. Принципиального различия в силовом воздействии жидкости на заготовку между этими способами нет. Вместо жидкости могут применяться и другие, передающие давления среды (стеклосмазка, графит, бингамовские пластики, свинец и др.). Во всех случаях должно сохраняться основное условие, определяющее сущность гидропрессования: усилие на заготовку должно передаваться через жидкую или квазижидкую среду.

В основном применяется процесс холодного гидропресования. Хрупкие тугоплавкие металлы (молибден, вольфрам) деформируются при температурах теплого прессования.

Горячее гидропрессование применяется редко, что связано с трудностями в подборе рабочих жидкостей.

Большое значение для успешного протекания процесса гидропрессования имеет правильный выбор рабочих сред, смазок и смазочных покрытий.

Рабочая среда, передающая давление на заготовку, смазка и покрытие во многом определяют устойчивость процесса, рабочее давление и качество получаемых изделий. Применяемые при гидропрессовании рабочие среды можно разделить на три группы:

твердые (легкоплавкие металлы, порошки и др.);

жидкие (различные масла, вода и др.);

квазижидкие среды (твердые и газообразные) применяются, главным образом, при горячем гидропрессовании.

При холодном гидропрессовании или с незначительным подогревом заготовки (до 250-300 °С) используют жидкие среды. К рабочей жидкости предъявляются следующие требования: она должна обладать небольшой сжимаемостью при высоких давлениях, незначительно изменять вязкость при повышении давления; хорошо смазывать контактирующие поверхности; обладать антикоррозионными свойствами; быть нетоксичной и невоспламеняемой. Для технологических процессов прессования жидкостью высокого давления из всех свойств жидкостей наибольшее значение имеет стабильность вязкости и сжимаемость жидкости под воздействием высокого давления.

Витебский государственный технологический университет

Резкое возрастание вязкости жидкости при определенных давлениях и возможность при этом перехода жидкости в твердое состояние приводят к нестабильности процесса, прерывистости движения, ухудшению поверхности и даже полному разрушению изделия. Поэтому выбор рабочей жидкости, прежде всего, определяется тем давлением, при котором происходит изменение агрегатного состояния вещества.

При давлении $p < 800$ МПа могут быть применены трансформаторное, касторовое и индустриальные масла; при $p < 1500$ МПа – эти же масла с добавлением в различных пропорциях бензина, керосина, этилового спирта; при $p > 1500$ МПа – смесь глицерина с этиленгликолем. При деформировании с предварительным подогревом заготовки до 400–500 °С в качестве рабочей жидкости используют полиметилкилоксановые жидкости типа ПМС или вакуумное масло в смеси с бензином.

В процессе прессования стабильный гидродинамический режим трения на всей поверхности очага деформации наблюдается лишь в отдельных случаях. Чаще всего трение по длине очага деформации меняется от гидродинамического до граничного. Для предотвращения схватывания, налипания деформируемого металла на инструмент необходимо применять дополнительно технологические смазки. Хорошими смазочными свойствами обладает дисульфид молибдена (MoS_2). Для углеродистых сталей применяют гальванические покрытия: омеднение, фосфатирование, кадмирование, цинкование, алюминирование.

Задача выбора рабочей жидкости, смазки и покрытия должна решаться комплексно, с учетом температурно-скоростных условий деформации материала, геометрии изделия и требований к качеству поверхности получаемых изделий.

Основные способы гидропрессования показаны на рисунке 2.20. Простое гидропрессование (рис. 2.20 *а)* сравнительно легко осуществимо и может применяться для пластичных, малопластичных и даже хрупких материалов. Достижение больших деформаций при простом гидропрессовании высокопрочных материалов связано с необходимостью нагрева заготовок или повышения давления рабочей жидкости, которое в значительной мере ограничено прочностью контейнера. Следует также отметить, что при простом гидропрессовании иногда возникают определенные трудности в управлении процессом.

Витебский государственный технологический университет

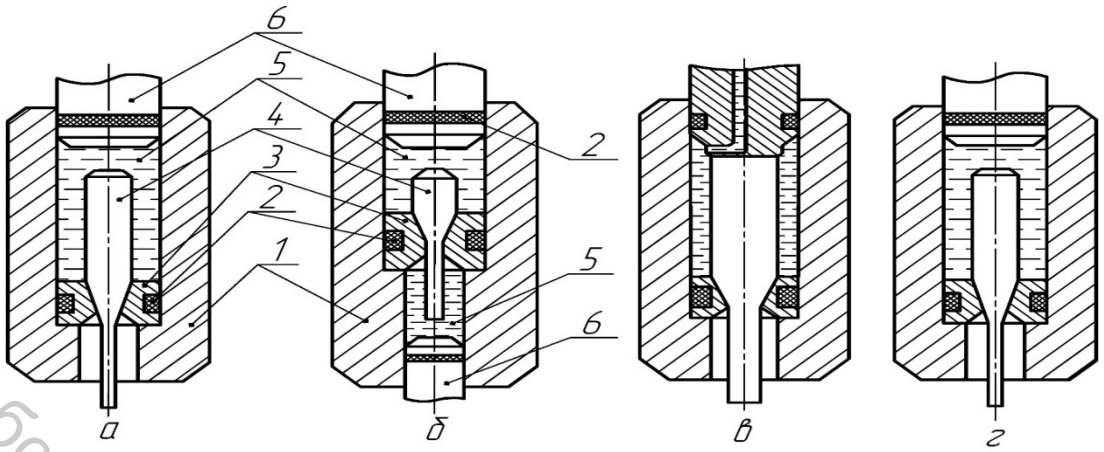


Рисунок 2.20 – Основные способы гидропрессования жидкостью:
а – простое гидропрессование; б – гидропрессование с противодавлением;
в – гидромеханическое прессование; г – гидропрессование с передним натяжением;
1 – контейнер; 2 – уплотнения; 3 – матрица; 4 – заготовка; 5 – жидкость; 6 – плунжер

Гидропрессование с противодавлением - это в сущности выдавливание жидкостью в жидкость (рис. 2.20 *б*) – характеризуется значительными трудностями в осуществлении из-за резкого возрастания давления в контейнере (на величину противодавления) и технической сложностью установок для ее осуществления. Этот способ можно рекомендовать только для хрупких материалов и в случаях, когда отсутствуют другие способы деформации.

Главное преимущество выдавливания с приложением дополнительного усилия к торцу заготовки со стороны плунжера - гидромеханического прессования (рис. 2.20 *в*) – состоит в том, что создается возможность управления процессом.

Однако применение этого метода ограничивается длиной заготовки из-за возможного продольного изгиба пуансона и заготовки при большой их длине. Этот способ можно рекомендовать для сравнительно коротких заготовок большого поперечного сечения.

Гидропрессование с передним натяжением - волочением (рис. 2.20 *г*) – позволяет устойчиво управлять процессом. По сравнению с гидромеханическим прессованием деформирование с волочением имеет следующие преимущества: более простую конструкцию установки; отсутствие ограничения на длину заготовки. По сравнению с простым гидропрессованием, при прочих равных условиях, прессование с натяжением происходит при меньшем давлении рабочей жидкости. Гидропрессование с натяжением применяется при производстве проволоки, труб и профилей.

Сортамент прессизделий весьма обширен: прутки диаметром 3–250 мм, трубы диаметром 20–400 мм с толщиной стенки 1–1,5 мм и

Витебский государственный технологический университет

более, сложные профили, которые часто невозможно получить другими способами обработки давлением.

Гидропрессование по сравнению с механическим прессованием имеет следующие преимущества:

1. Благодаря наличию по всей длине очага деформации или ее части, режиму жидкостного трения и отсутствию механического трения заготовки о стенки контейнера обеспечивается равномерное течение металла. Деформирование в условиях малых сил трения улучшает схему напряженно-деформированного состояния, снижает возможность появления зон с растягивающими напряжениями, что позволяет обрабатывать малопластичные и даже хрупкие материалы, способствует более полному использованию ресурса пластичности материалов.

2. Вследствие уменьшения сил контактного трения давление деформирования снижается на 20-40 %, и повышается стойкость инструмента, что позволяет обрабатывать материалы с высоким сопротивлением деформации.

3. Отсутствие контакта недеформируемой части заготовки с контейнером позволяет деформировать заготовки различных размеров поперечного сечения из одного контейнера (универсальность контейнера).

4. Отсутствие осадки в начале прессования, которая происходит при механическом процессе, очень важно для малопластичных материалов, у которых ресурс пластичности может быть полностью или в значительной степени использован уже на стадии подпрессовки.

5. Деформирование жидкостью обеспечивает более равномерное распределение структуры и свойств по сечению детали, а также улучшает физико-механические характеристики металла. Применительно к ряду материалов (тугоплавкие металлы, инструментальные стали и др.) появляется возможность формирования качественно новой структуры, обеспечивающей комплекс таких физико-механических свойств, которые невозможно получить другими методами обработки.

6. Возможность проведения деформирования в холодном и теплом состояниях (ниже температуры рекристаллизации), что особенно важно для химически активных металлов. Деформация в холодном (теплом) состоянии позволяет исключить окисление и газонасыщение металлов, а также снизить потери на угар.

Таким образом, деформация жидкостью позволяет более полно использовать пластические свойства материалов: расширяет технологические возможности процессов прессования, способствует улучшению свойств получаемых изделий. Методом прессования жидкостью получают профили самой различной конфигурации; с точностью диаметральных размеров, соответствующих 9–10-му квалитетам и с хорошим качеством поверхности (Ra = 0,32-1,25 мкм).

Витебский государственный технологический университет

Накопленный производственный опыт и результаты научно-исследовательских работ показывают, что применение процессов прессования жидкостью целесообразно в следующих случаях:

1. При деформировании малопластичных материалов (молибден, вольфрам и др.).

2. При получении изделий, у которых необходима максимальная равномерность и повышенный уровень физико-механических свойств.

3. При формообразовании изделий сложного поперечного сечения, которые другими методами обработки металлов давлением изготовить технически невозможно или экономически нецелесообразно. Методом гидропрессования получают сплошные и полые изделия со сложным наружным и внутренним профилем, в том числе и изделия со спиральными ребрами.

4. При изготовлении биметаллических изделий с тонким наружным слоем (например, алюминиевых шин или проволоки с медным покрытием); в этом случае малые силы трения в очаге деформации не разрушают напрессовываемый тонкий наружный слой покрытия.

5. При изготовлении тонкостенных труб и профилей из тонкостенных заготовок.

6. При гидроэкструзии тонкой проволоки, растягивающие напряжения в очаге деформации значительно меньше, чем при волочении, а значит, сокращается обрывность проволоки.

2.4 Горячее прессование

Прессованием называют процесс пластической деформации металла посредством выдавливания его из замкнутого объёма через канал, образуемый прессовым инструментом. В качестве разновидностей прессования можно выделить дискретное (прерывное), полунепрерывное и непрерывное. Наиболее распространённым является дискретное прессование на горизонтальных гидравлических прессах.

Основным видом напряженного состояния прессуемого металла в очаге деформации является всестороннее неравномерное сжатие. Некоторые участки обрабатываемого объема металла вследствие неравномерности деформации имеют другой вид напряженного состояния, характеризующегося растягивающими главными напряжениями. Тем не менее, при прессовании создаются более благоприятные условия нагружения, чем при других видах обработки металлов давлением. Поэтому прессовать можно даже такие металлы и сплавы, которые в условиях прокатки или свободной ковки малопластичны и практически не обрабатываются.

Витебский государственный технологический университет

В соответствии с видом взаимного перемещения прессуемой заготовки и контейнера различают прессование с прямым, боковым, обратным и совмещенным истечением. Наиболее распространено прессование с прямым истечением, которое применяется как для сплошных, так и для полых профилей (рис. 2.21).

Металл заготовки 3, заложенный в контейнер (приемник) 1, под действием сил, создаваемых движущимся в направлении стрелки пресс-штемпелем 2, выдавливается при прессовании сплошного профиля (рис. 2.21 *а*) в канал матрицы 4, а при прессовании полого профиля – в замкнутый кольцевой канал, образованный матрицей 4 и иглой или оправкой 6 (рис. 2.21 *б*). В результате получается заданное прессизделие 5 (сплошной или полый профиль), движущееся в процессе прессования в направлении, совпадающем с направлением движения пресс-штемпеля.

Основная особенность этого способа прессования – явно выраженное перемещение металла заготовки относительно неподвижного контейнера.

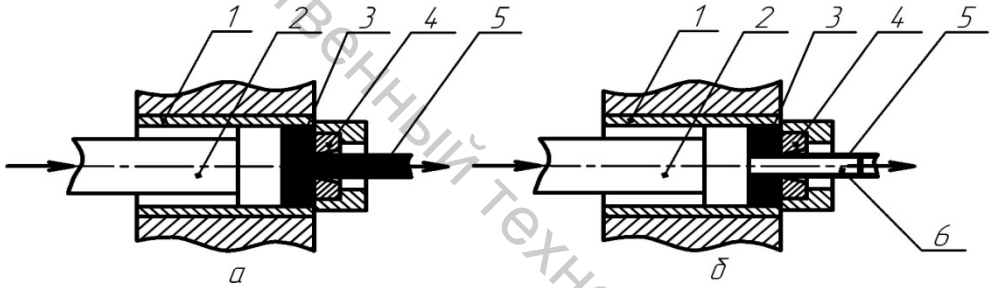


Рисунок 2.21 – Схемы прессования с прямым истечением:
а – сплошной профиль; б – полый профиль;
1 – контейнер; 2 – пресс-штемпель; 3 – заготовка; 4 – матрица;
5 – прессизделие; 6 – игла (оправка)

При прессовании труб или полых профилей по приведенной схеме в заготовке прошивают полость для оправки либо до ввода заготовки в контейнер, либо в самом контейнере прошивкой с образованием металлической «пробки», попадающей большей частью в отход.

Схемы процесса прессования с боковым истечением приведены на рисунке 2.22. Этот процесс отличается от процесса с прямым истечением только изменением направления истечения прессуемого металла примерно на 90^{o}. Такое изменение направления истечения преследует ряд технических целей, например, удобство приема прессизделия, удобство блокировки с последующим процессом при создании непрерывных поточных линий.

Прессование с обратным истечением применяется при изготовлении относительно коротких сплошных и полых профилей (рис. 2.23). Металл заготовки 3, заложенной в контейнер 1, под

Витебский государственный технологический университет

действием сил, создаваемых движущимся пресс-штемпелем 2, выдавливается при прессовании сплошного профиля в канал матрицы 4 (рис. 2.23 *а*); при прессовании гильзы с дном – в замкнутый кольцевой канал, образованный внутренней поверхностью контейнера и пресс-штемпеля 2 (рис. 2.23 *б*), а при прессовании трубы или полого профиля – в замкнутый кольцевой канал, образованный внутренней поверхностью матрицы 4 и наружной поверхностью оправки (иглы) 6 (рис. 2.23 *в*). В результате получается заданное прессизделие 5, которое по схемам (а) и (в) проходит через полый пресс-штемпель 2, а по схеме (б) формируется между контейнером и сплошным пресс-штемпелем 2.

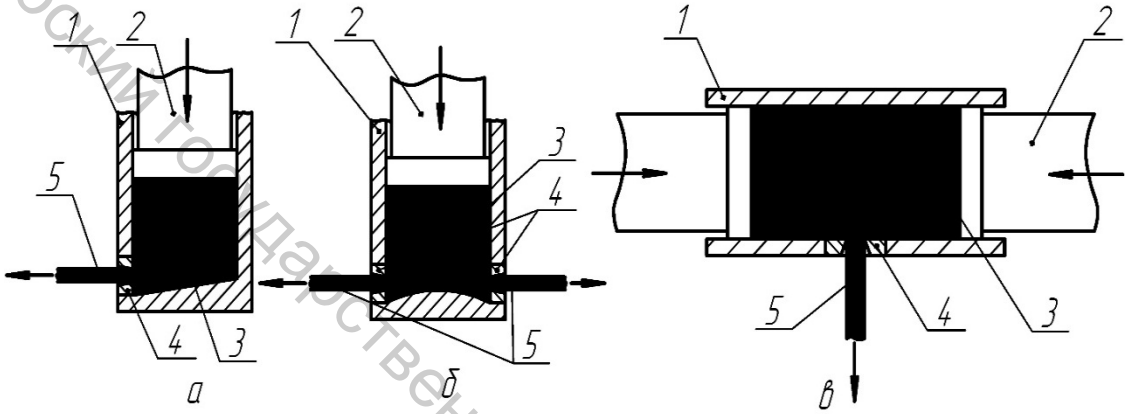


Рисунок 2.22 – Схемы прессования с боковым истечением:
а – с одноточным истечением; б – с двухниточным истечением;
в – с двусторонним прессованием;
1 – контейнер; 2 – пресс-штемпель; 3 – заготовка; 4 – матрица;
5 – прессизделие

В прессах некоторых конструкций движется не пресс-штемпель, а контейнер. В обоих вариантах прессизделие во время прессования движется в направлении, обратном направлению движения пресс-штемпеля относительно контейнера. Это послужило основанием для наименования процесса. Основная особенность этого способа прессования – отсутствие явно выраженного перемещения заготовки относительно контейнера.

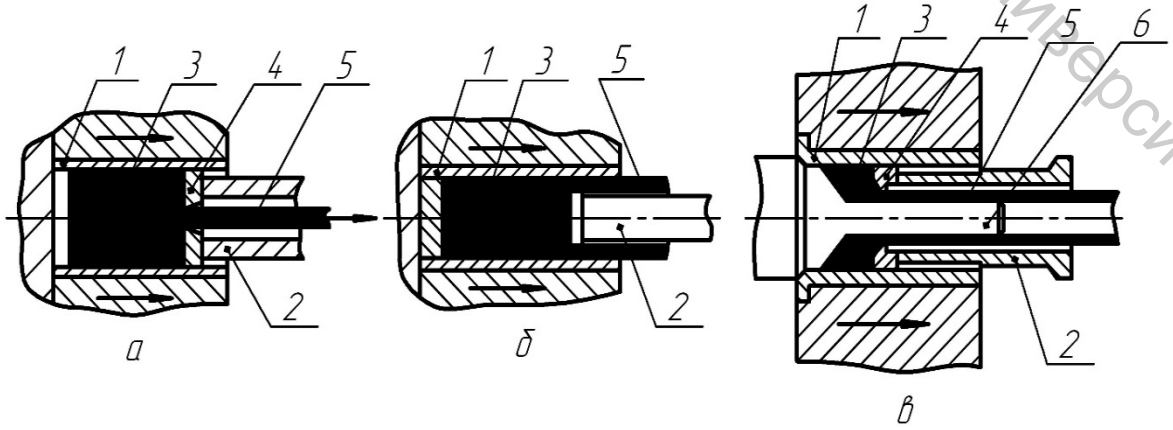


Рисунок 2.23 – Схемы прессования с обратным истечением:
а – сплошной профиль; б – гильза с дном; в – полый профиль;

Витебский государственный технологический университет

1 – контейнер; 2 – пресс-штемпель; 3 – заготовка; 4 – матрица;
5 – прессизделие; 6 – оправка

Оптимальная температура нагрева связана с пластичностью и прочностью металла, неравномерностью деформации, окислением поверхности, схватыванием (сваркой) металла с инструментом, скоростью остывания заготовки в контейнере и т. д. Температурный интервал прессования шире у однофазных сплавов и чистых металлов. Перед прессованием латуни, магниевых сплавов и др. применяется подогрев контейнера, матрицы и пресс-шайбы до 200-250 °С, а иглы- до 350 ^{0}С.

Скорости прессования (скорость движения пуансона) и скорости истечения (скорость выходящего прутка) изменяются в широких пределах: 0,2-50 мм/сек и 0,0017-17 м/сек соответственно. Как правило, с бо̀льшей скоростью прессуют пластичные металлы и сплавы и металлы с высокой температурой нагрева.

Технологическая смазка поверхности контейнера и пресс-шайбы уменьшает усилие прессования. Обычно в качестве смазки употребляют смесь графита с машинным маслом.

Сортамент прессизделий весьма обширен (рис. 2.24): прутки диаметром 3–250 мм; трубы диаметром 20–400 мм с толщиной стенки 1–1,5 мм и более; сложные профили, которые часто невозможно получить другими способами обработки давлением.

Особенно разнообразны профили из легких сплавов на основе алюминия и меди. Прессованием можно получать изделия с плавнопеременным и ступенчатым поперечными сечениями.

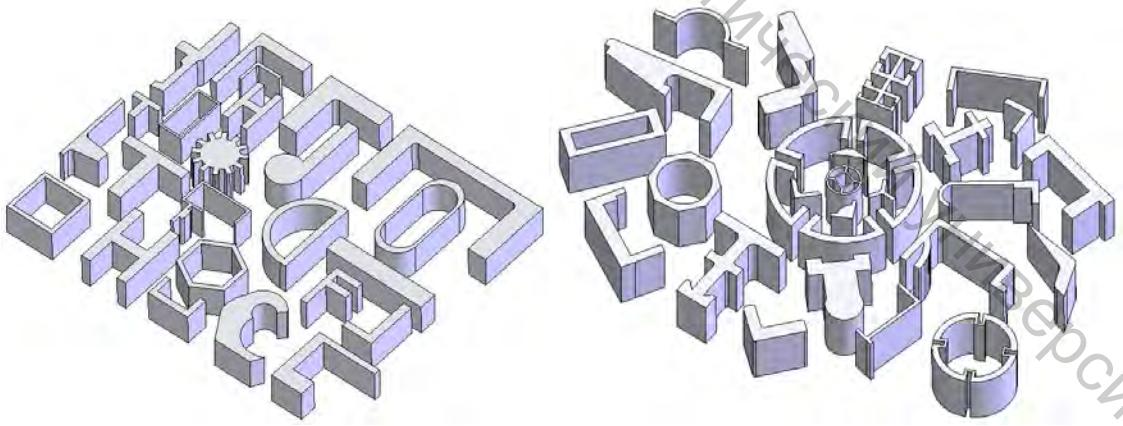


Рисунок 2.24 – Сортамент прессизделий

Полунепрерывное прессование является одним из основных процессов производства изделий из алюминиевых сплавов (рис. 2.25). Характерным для полунепрерывного прессования является совмещение процессов сварки и прессование.

Процесс осуществляется следующим образом.

Витебский государственный технологический университет

В контейнер 1 (рис. 2.25) последовательно одна за другой загружаются две или более исходные заготовки. Осевые усилие от плунжера гидравлического пресса через торцевые поверхности передается на заготовку, находящегося в полости матрицы 4. Заготовка обжимается в поперечном сечении и продавливается в полость инструментального блока 2. Одновременно соседняя состыкованная заготовка так же поступает в полость матрицы 4. В результате в матрице 4 постоянно деформируются две соседние заготовки. Плоские торцевые поверхности исходных заготовок в процессе деформирования приобретают куполообразную форму.

Контактируемые поверхности в процессе формоизменения под действием сил трения очищаются от оксидных пленок. Между оголенными поверхностями интенсивно протекают процессы диффузии. Одновременно в процессе поперечного обжатия двух заготовок имеет место проникновение и смешивание слоев материала двух заготовок. В результате пластической деформации двух заготовок образуется единое цельное сварное соединение. Полученное соединение в матрице 3 формируется в готовое изделие, длина которого практически не ограничена.

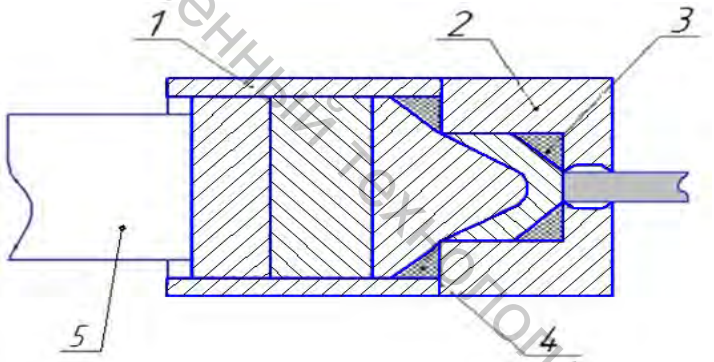


Рисунок 2.25 – Схема полунепрерывного прессования:
1 – контейнер; 2 – инструментальный блок; 3, 4 – матрицы, 5-пуансон

Основными способами **непрерывного** прессования являются Конформ, Лайнекс.

Способ Конформ основан на деформации заготовок между подвижным и неподвижным инструментами (рис. 2.26).

Витебский государственный технологический университет

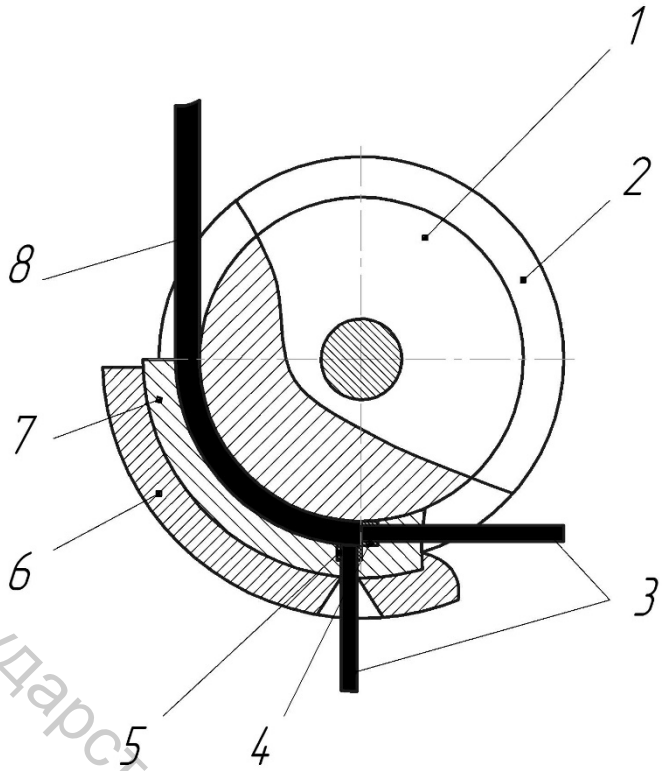


Рисунок 2.26 – Принципиальная схема реализации процесса непрерывного прессования по способу Конформ:
1 – рабочее колесо; 2 – кольцевая канавка; 3 – изделия; 4,5 – матрицы; 6 – башмак; 7 – кольцевая вставка; 8 – заготовка

В качестве заготовки используется пруток 8, который подается в кольцевую канавку 2, выполненную на рабочем колесе 1. В башмаке 6 установлены матрицы 4,5. При подаче прутковой заготовки в зазор между колесом и кольцевой вставкой 7 она продвигается в камеру прессования, образуемую поверхностями кольцевой канавки 2 и вставки. Непосредственно перед матрицами под действием сил трения заготовка подвергается интенсивной пластической деформации и заполняет все сечения канавки. По мере поворота колеса силы сжатия, приложенные к заготовке, возрастают и достигают значений, необходимых для выдавливания материала заготовки через отверстие в матрице, т. е. начинается процесс прессования. Зона неполного контакта заготовки с поверхностью канавки (зона первичного захвата) обеспечивает увеличение давления и заполнение объёма камеры прессования непосредственно перед матрицами. В качестве заготовки можно использовать обычную проволоку. Процесс её деформирования – втягивание в камеру прессования по мере поворота колеса, создание необходимого подпора и непосредственно прессование, которое осуществляется непрерывно. Способ позволяет прессовать изделия не только в направлении вращения колеса (тангенциальном), но и в перпендикулярном.

Способ Лайнекс основан на том, что давление, необходимое для реализации процесса прессования, создаётся силами трения, которые

Витебский государственный технологический университет

возникают между поверхностями звеньев бесконечных цепей 2 и верхней и нижней поверхностями заготовки (рис. 2.27). Этот способ применяют для производства алюминиевых шин или проволоки.

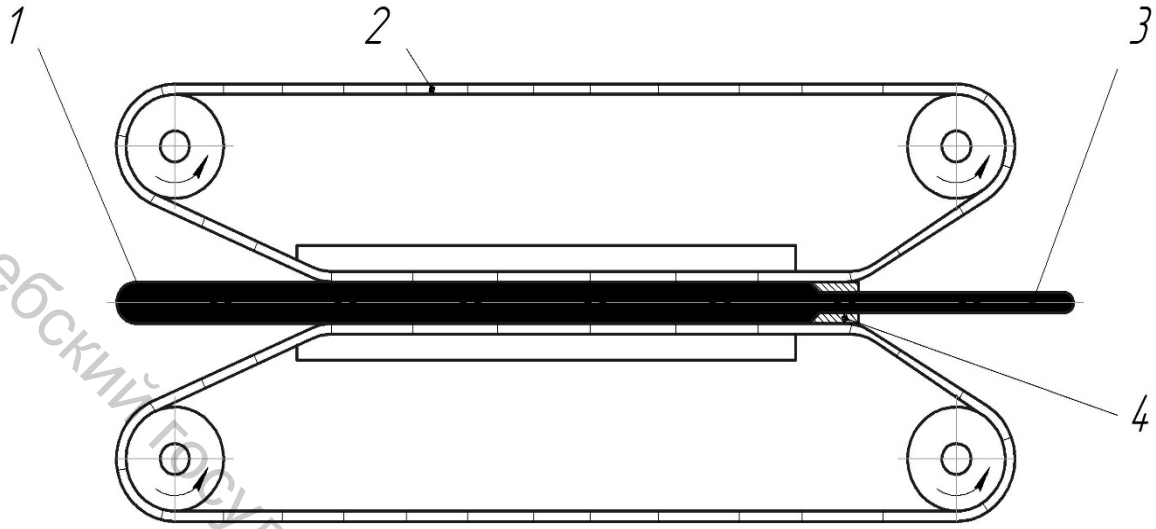


Рисунок 2.27 – Схема процесса непрерывного прессования способом Лайнекс:
1 – заготовка; 2 – приводные цепи; 3 – изделие; 4 – матрица

2.5 Процессы прокатки материалов

2.5.1 Поперечно-клиновая прокатка заготовок

Сущность процесса поперечно-клиновой прокатки заключается в следующем: штучная заготовка, как правило, отделенная от прутка, укладывается поперек заходной части неподвижного инструмента (рис. 2.28). Подвижный инструмент с аналогичным профилем, перемещаясь параллельно неподвижному, внедряется в заготовку, вызывая ее вращение.

Оба инструмента имеют наклонные боковые грани, которые заставляют перемещать избытки металла по направлению к торцам, тем самым, удлиняя заготовку. Положение наклонной боковой грани в пространстве определяется углами наклона α и заострения β. Непрерывно перекатываясь вдоль неподвижного инструмента, заготовка приближается к форме готового изделия. На заключительной стадии ножами, установленными по обе стороны инструмента, обрезаются избытки металла от окончательно оформленного изделия. Затем она удаляется, а подвижный инструмент возвращается в исходное положение. Цикл обработки, составляющий 3–10 с, повторяется с последующей заготовкой.

Витебский государственный технологический университет

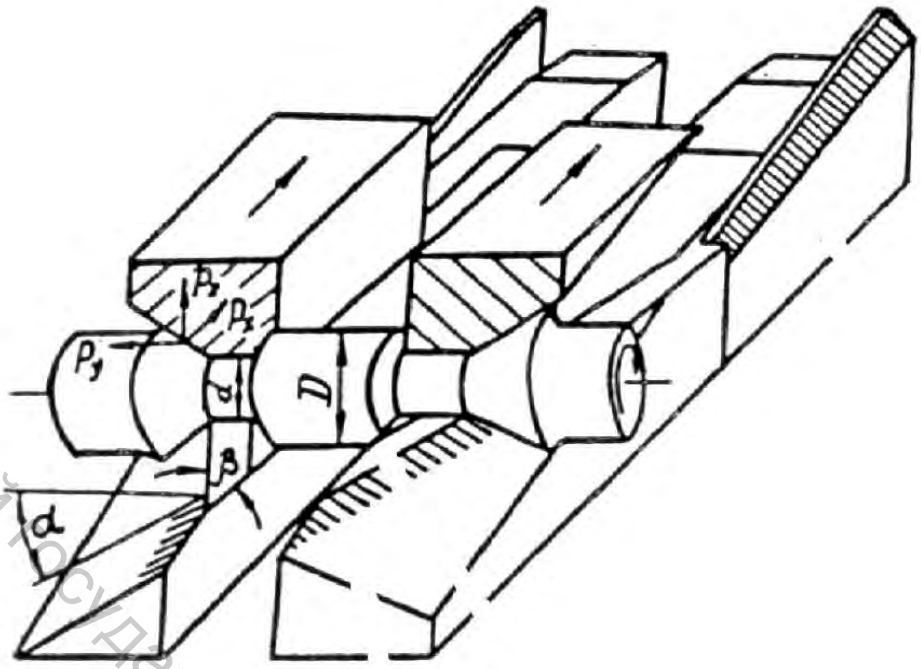


Рисунок 2.28 – Схема поперечно-клиновой прокатки

Деформационные усилия представляются тремя составляющими: усилием прокатки P_x, осевым – P_y и сжимающим – P_z. Усилие прокатки P_x определяет мощность привода станов поперечно-клиновой прокатки. Осевое усилие P_y характеризует величину растягивающих напряжений, возникающих в прокатываемой заготовке, которые не должны превышать предела текучести прокатываемого материала во избежание растяжения или разрыва стержня. Сжимающее усилие P_z оказывает распорное воздействие на прокатную клеть. Чтобы оно не повлияло на точность изделия, необходимо обеспечить достаточную жесткость клети, при этом величина упругих деформаций клети должна быть значительно меньше величины допусков прокатываемых изделий.

Интенсивность формоизменения при прокатке характеризуется степенью обжатия

$$\delta = \frac{D}{d},$$

где D – диаметр исходной заготовки; d – диаметр заготовки после прокатки в рассматриваемом сечении.

Основными технологическими параметрами клинового инструмента при прокатке цилиндрических участков являются углы наклона боковой грани α и заострения β. С увеличением угла α уменьшается длина очага деформации и потребное усилие прокатки P_x.

Витебский государственный технологический университет

Однако при этом возрастает осевое усилие P_y, которое при определенном значении обжатия может вызвать разрыв заготовки.

Угол β определяет скорость распространения очага деформации вдоль оси заготовки, длину инструмента, максимально достигаемую степень обжатия за проход и существенно влияет на силовой режим процесса прокатки. Правильность выбора углов α и β, степени обжатия δ регламентирует проведение процесса в устойчивом режиме, исключающем проскальзывание заготовки. Эти параметры существенно влияют на силовые, кинематические параметры, КПД процесса, напряженно-деформированное состояние.

Существует несколько схем поперечно-клиновой прокатки и соответствующих им конструкций станов (рис. 2.29). Каждая из указанных схем имеет как определенные преимущества, так и недостатки, в связи с чем наметилась некоторая специализация в их использовании. Так, одновалковая схема прокатки (рис. 2.29 *а*) не обеспечивает значительных обжатий, так как крутящий момент приложен к заготовке только на одном ее участке. Кроме того, распорные усилия приводят к изгибу заготовки. Все это ограничивает технологические возможности данной схемы прокатки. Двухвалковая прокатка (рис. 2.29 *б, в*) используется при массовом производстве и характеризуется чрезвычайно высокой производительностью, но вместе с этим и очень высокой стоимостью инструмента и сложностью отладки процессов. В двухвалковых станах заготовка удерживается в рабочей зоне направляющими проводками либо центрами. За счет трения заготовки по направляющим отдельные ее выступы могут искажать свою форму и снижать точность изделия. Использование центров приводит к перерасходу металла, так как участки на заготовке, контактирующие с центрами, как правило, подлежат последующей отрезке.

Достоинством одновалковых и двухвалковых станов является возможность прокатки изделий из прутка, что наиболее эффективно при прокатке коротких заготовок. Дело в том, что при прокатке из прутка штучные заготовки получаются излишне короткими и их транспортировку трудно автоматизировать. Кроме того, доля концевых отходов в объеме заготовки становится настолько значительной, что рентабельность прокатки резко снижается. Валковые станы также успешно используются при прокатке несимметричных деталей, поскольку при этом отпадает необходимость в выравнивании условий прокатки в различных частях заготовки.

Трехвалковые станы (рис. 2.29 *г*) создают качественно отличное напряженное состояние в очаге деформации и значительно снижают вероятность разрушения металла в осевой зоне заготовки, которым может сопровождаться поперечная прокатка. При прокатке тремя валками к заготовке может передаваться в 1,5 раза бóльший крутящий момент (три контактные площадки вместо двух), что позволяет в

Витебский ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

значительной мере интенсифицировать процесс прокатки. Недостаток данной схемы заключается в незначительных диаметрах валков и в ограниченных обжатиях, так как при сближении валки упираются один в другой, чем в значительной степени ограничиваются технологические возможности станов.

Валково-сегментные станы (рис. 2.29 *д*) отличаются предельной простотой и обеспечивают максимальную производительность процесса в связи с тем, что загрузка и удаление заготовок производятся без остановки вращения валка. Недостаток станов заключается в сложности изготовления и отладки сегментов инструмента и отсутствии регулировки расстояния между валком и сегментом, что отрицательно сказывается на точности изделия. Станы работают со штучной заготовкой.

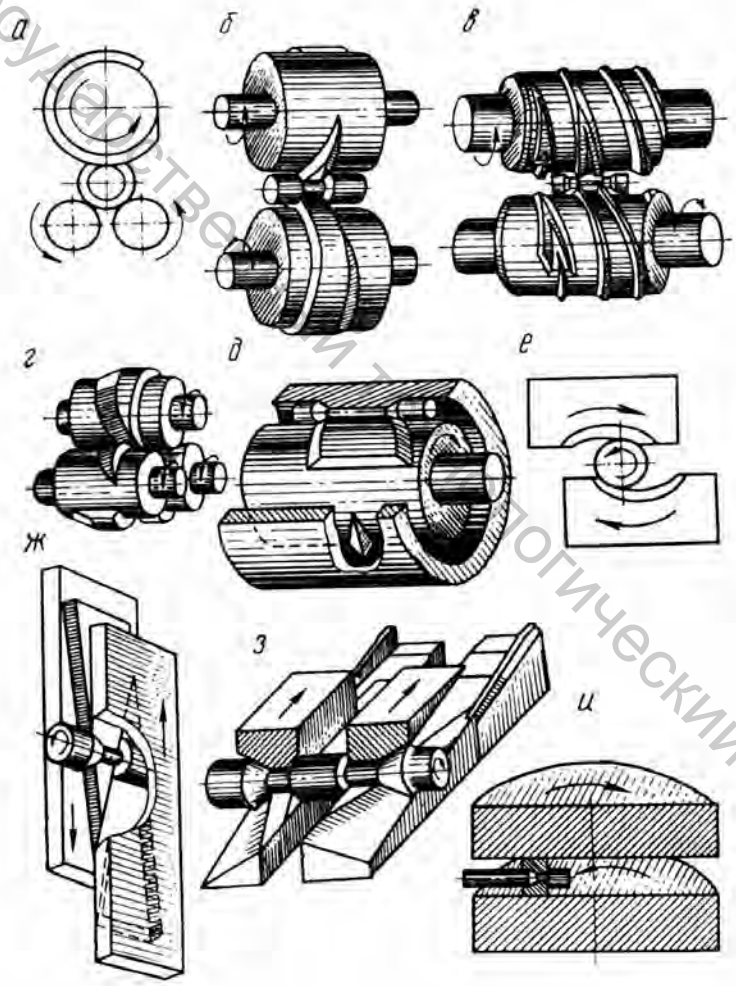


Рисунок 2.29 – Схемы станов поперечно-клиновой прокатки:
а – одновалковая; б – двухвалковая; в – двухвалковая с винтовыми калибрами; *г* – трехвалковая; *д* – валково-сегментная;
е – двухсегментная; ж – прокатка двумя подвижными плитами;
з – прокатка подвижной и неподвижной плитами; *и* – прокатка двумя дисками

Витебский государственный технологический университет

Двухсегментные станы (рис. 2.29 *е*) характеризуются незначительной производительностью и в основном используются для накатки шлицев и зубьев шестерен, однако могут применяться и для поперечно-клиновой прокатки валов. К недостаткам станов относится также и ограниченная длина инструмента.

Станы с двумя подвижными плитами (рис. 2.29 *ж*) отличаются простотой изготовления и ремонта сложного и высокоточного инструмента, чем обеспечивается высокая точность изделий и простота отладки новых технологических процессов. Недостаток заключается в невысокой производительности процесса в связи с двумя остановками плит (для загрузки и удаления заготовок) и холостым обратным ходом.

Станы с подвижной и неподвижной плитами (рис. 2.29 *з*) обладают вышеуказанными преимуществами и вместе с тем не требуют остановок для загрузки и удаления заготовки. Разработаны схемы, позволяющие использовать для прокатки и обратный ход подвижной плиты. Кроме того, за счет перемещения неподвижной плиты и положения инструмента на ней имеется возможность автоматически регулировать диаметральные и линейные размеры и тем самым повысить точность прокатанных деталей.

Недостаток данных станов заключается в невозможности прокатки от прутка и, следовательно, в нерентабельности изготовления коротких заготовок, длина которых не превышает 1–1,5 его диаметра.

Эксплуатация перечисленных станов в промышленных условиях определила целесообразные области использования каждой конструкции. Так, валково-сегментные станы наиболее эффективны в массовом производстве при вальцовке заготовок под последующую штамповку; станы с плоскими плитами – при изготовлении с частыми переналадками большой номенклатуры высокоточных деталей сложной конфигурации; валковые станы занимают промежуточное положение: они наиболее эффективны при прокатке одного-двух изделий, особенно коротких, с относительно невысокими требованиями к их точности.

Не применяется в промышленности схема прокатки двумя дисками (рис. 2.29 *и*), что вызвано сложностью изготовления клинового инструмента.

Из всех рассмотренных принципиальных схем поперечно-клиновой прокатки наибольшее применение получили двухвалковая и плоскоклиновая, на основе которых созданы соответствующие виды оборудования, позволяющие прокатывать заготовки диаметром 0,5-130 мм и длиной 5–630 мм.

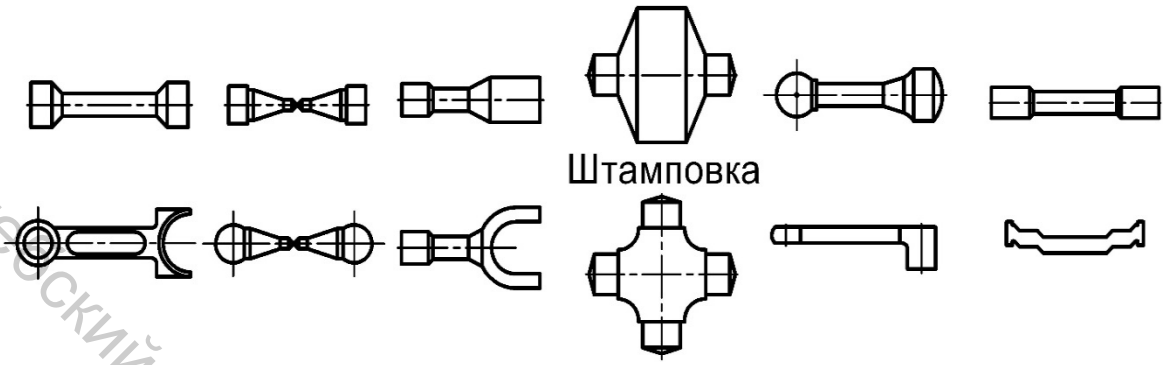
Конфигурация получаемых изделий весьма многообразна (рис. 2.30). Она включает цилиндрические, конические, сферические и другие формы, всевозможные канавки и выступы. Перепады диаметров могут быть значительными, допускается четырехкратное их уменьшение. Если в качестве исходной заготовки используется пруток с квадратным или

Витебский государственный технологический университет

шестигранным сечением, то эти элементы могут быть сохранены без изменений обрабатываемой детали.

Поперечно-клиновая прокатка

а



б

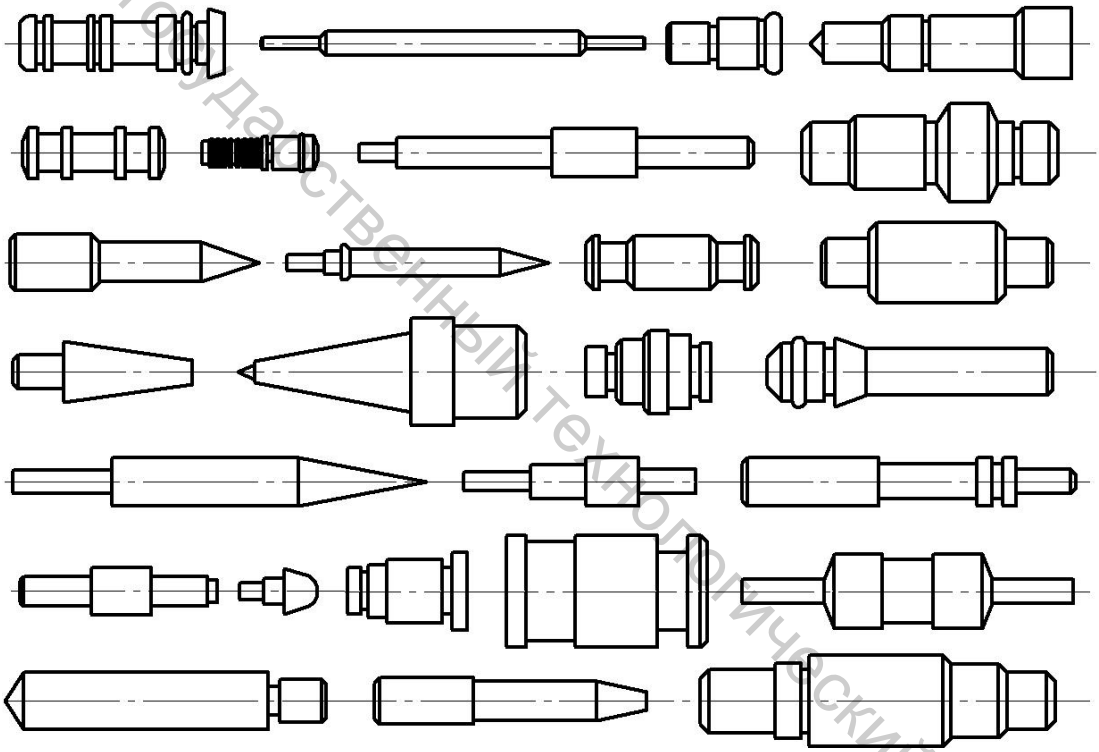


Рисунок 2.30 – Изделия, полученные поперечно-клиновой прокаткой для последующей штамповки (а) и механической обработки (б)

Поперечно-клиновая прокатка может использоваться в технологическом процессе для производства промежуточных профилированных заготовок под последующую точную штамповку или иные процессы пластического деформирования, а также под чистовую механическую обработку.

Поперечно-клиновой прокатке могут подвергаться практически все конструкционные стали, ряд инструментальных сталей и жаропрочных материалов, а также цветные сплавы на основе меди и алюминия. Точность прокатанных изделий соизмерима с точностью деталей, полученных на токарных автоматах. Детали сельхозмашиностроения получают без дальнейшей механической

Витебский государственный технологический университет

обработки. В других случаях используют окончательную шлифовку. Повышается износостойкость и усталостная прочность деталей.

Поперечно-клиновую прокатку целесообразно применять при изготовлении деталей с программой выпуска более 10000–25000 шт. в год, т. е. при крупносерийном и массовом производстве. Конкретная величина минимальной программы выпуска зависит от коэффициента использования металла, его стоимости и размеров изделия. Дорогостоящие материалы целесообразно переводить на метод поперечно-клиновой прокатки при программах выпуска более 500 шт. При программах производства в среднем 1000–10000 шт. изделий целесообразно использовать штамповку.

2.5.2 Поперечная накатка зубчатых колёс

Горячую накатку зубьев производят двумя способами: с осевой подачей заготовок и с радиальной подачей зубчатых валков (рис. 2.31).

Зубчатые колеса с модулем менее 4 мм накатывают при осевой подаче заготовки 1 двумя валками 2, имеющими коническую заборную и цилиндрическую калибрующую части (рис. 2.31 *а*). Зубчатые валки устанавливают на определенное межцентровое расстояние, а заготовки, нанизанные на стержень в виде стопки и зажатые гидравлическим устройством, располагают точно посередине между валками. Заготовки перед прокаткой нагревают в кольцевом индукторе 3. Скорость осевой подачи заготовок (2–10 мм/сек) выбирают так, чтобы за время прохождения через индуктор заготовка нагревалась до температуры накатки (1200 °С).

Этот технологический процесс обеспечивает изготовление зубчатого венца с прямыми и косыми зубьями с точностью до 10 степени. Его применяют в тех случаях, когда прокатанные шестерни работают при сравнительно невысоких скоростях.

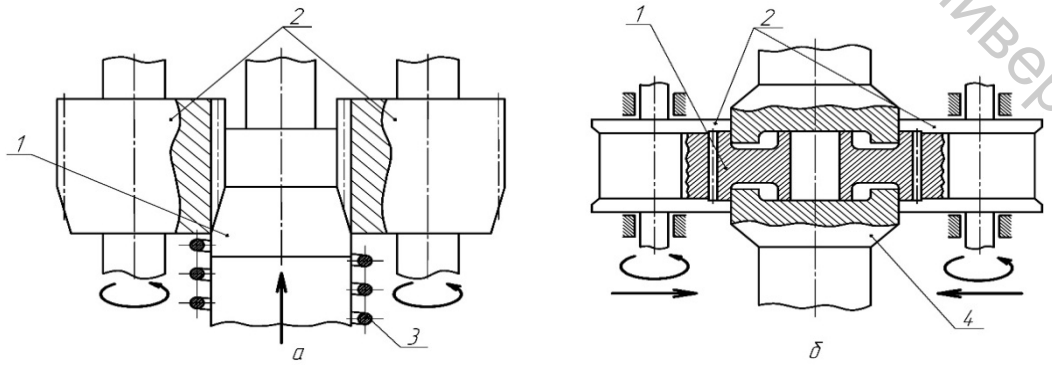


Рисунок 2.31 – Схемы накатки зубьев шестерен:
а - с осевой подачей заготовок, б - с радиальной подачей зубчатых валков;

Витебский государственный технологический университет

1 – заготовка; 2 – зубчатые валки; 3 – индуктор; 4 – опорные кольца

Колеса с модулем 5 мм и выше накатывают при радиальной подаче двух валков (рис. 2.31 *б*). Нагретая заготовка зажимается между парой опорных колец 4. Зубья накатывают с припуском на обработку 0,5–1,5 мм на сторону. В процессе накатки на валки подается технологическая смазка. Реборды валков препятствуют выдавливанию металла в торцы заготовки во время накатки.

2.5.3 Процессы многовалковой прокатки

Плиты, листы, полосы, ленты, фольга на основе тугоплавких металлов находят широчайшее применение во многих современных отраслях. Сплавы молибдена, вольфрама, ниобия, тантала, хрома используют в качестве конструкционных материалов в авиационной, космической, химической технике.

Качество выпускаемых полуфабрикатов регламентируется стандартами и специальными техническими условиями, которые определяют предельные отклонения на номинальные размеры, отклонения формы, механические характеристики.

На поверхности листов не допускаются трещины, раковины, расслой, вмятины, следы от валков, царапины и т. д.

Для холодной прокатки листов, полос, лент и тонкой фольги из тугоплавких металлов применяются многовалковые станы (рис. 2.32 *а*) обеспечивающие высокую точность плоского проката, высокое качество отделки поверхности листов и лент, возможность регулирования профиля прокатываемой ленты, сокращения количества промежуточных отжигов, отсутствие коробления и растрескивания боковых кромок полос и лент.

Двадцативалковые станы широко используют для прокатки тонких лент и особо тонкой фольги. На станах с рабочими валками диаметром 20 мм прокатывают ленту минимальной толщины 0,02 мм. Часто используют станы с рабочими валками диаметром 10 мм, на которых прокатывают ленту толщиной 0,003–0,007–0,01 мм. На станах с диаметром валков 6 мм прокатывают ленту до толщины 0,0018–0,0025 мм.

Многовалковые станы обладают высокой жёсткостью клетей. Они оснащены автоматическими системами контроля регулирования толщины и натяжения полосы, предварительной установки толщины, натяжения и скорости прокатки, контроль температур и другими средствами автоматизации процесса прокатки.

Это обеспечивает выполнение жестких требований на толщину проката. Так, для толщины проката 0,0025–0,0032, 0,1 мм допуски на толщину соответственно составляют ±0,000127, +0,00055 мм.

Витебский государственный технологический университет

Для горячей прокатки листов используют полупланетарные станы (рис. 2.32 *б*). Они предназначены для прокатки слябов размером 25х400х11000 мм. Толщина готовой полосы равна 1,6-6 мм.

Станы включают опорный валок диаметром 400 мм, который окружен 22 рабочими валками диаметром 70 мм. Диаметр верхнего обычного валка 600 мм. Рабочие валки совершают планетарное движение по поверхности опорного валка и опираются о поверхность башмака. Такая конструкция обеспечивает жёсткость планетарного комплекта, а в сочетании с верхним валком всего стана в целом.

Планетарные станы (рис. 2.32 *в, г*) обеспечивают высокое качество и хорошую плоскостность листов в результате благоприятных условий работы инструмента (каждый валок находится в контакте с нагретым металлом не более 6 % времени) и большей жесткостью валковой системы.

Применяются планетарные станы для горячей прокатки листовых заготовок, а так же пластин, прутков и проволоки из жаропрочных сплавов (рис. 2.32 *в, г*). Планетарные станы имеют по 20 пар рабочих валков, расположенных в сепараторах вокруг опорных валков. За один проход сляб толщиной 45 мм прокатывается в полосу толщиной 2,5 мм, шириной 2800 мм; скорость подачи сляба в валки 0,05 м/сек, выхода – 9 м/сек.

Высокая степень деформации приводит к существенным изменениям структуры и механических свойств металла. В процессе планетарной прокатки с большими обжатиями происходит сильное дробление зёрен и образование направленной ориентированной структуры.

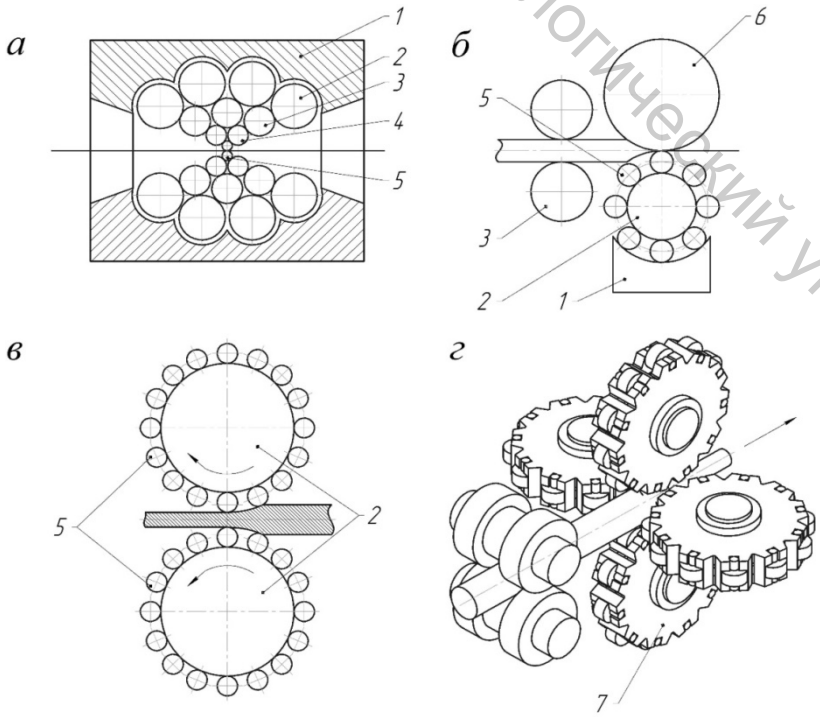


Рисунок 2.32 – Схемы конструкций прокатных станов:
а – многовалкового; б – полупланетарного; в, г – планетарных;

Витебский государственный технологический университет

1 – опорный башмак; 2 – опорный ролик; 3, 4 – соответственно направляющий и подающий ролики; 5, 6 – рабочие ролики; 7 – сепаратор

В процессе горячей прокатки на воздухе происходит интенсивное газонасыщение кислородом. Поверхностный слой содержит в 10–20 раз больше кислорода, чем исходный материал. Наличие повышенного содержания кислорода заметно понижает пластичность материала, а также интенсивно протекают окислительные процессы.

Создание безокислительных условий обработки позволяет исключить или свести к минимуму безвозвратные потери за счёт окисления; практически устранить газонасыщение металла в процессе обработки; использовать повышенные температуры пластической деформации, что увеличивает пластичность и снижает усилие деформации, а в целом повышает качество изделия.

Реализация безокислительных процессов обработки осуществляется на прокатных станах в вакууме или газовой среде с регулируемым составом (рис. 2.33)

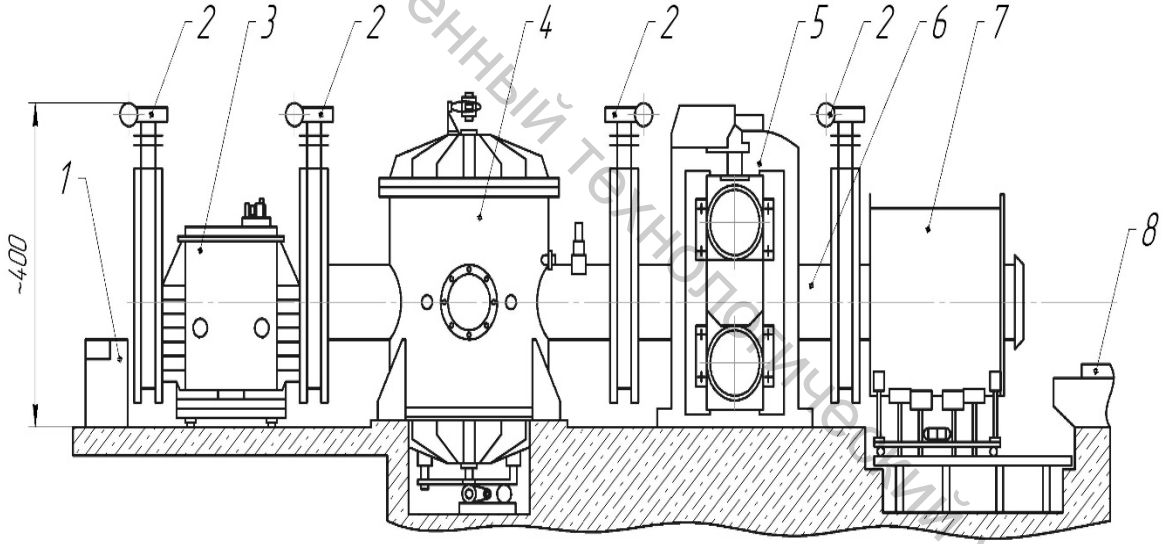


Рисунок 2.33 – Двухвалковый вакуумный стан продольной прокатки 600:
1 – приемный стол; 2 – вакуумные затворы; 3 – камера загрузки; 4 – нагревательная печь; 5 – рабочая клеть; 6 – рабочая камера; 7 – камера выгрузки; 8 – стол выгрузки

Эффективность прокатки в вакууме или газовой среде с регулируемым составом обусловлена следующими факторами: производством полуфабрикатов или изделий высокого качества с повышенными или новыми физико-химическими и механическими свойствами; увеличением выхода годного материала; устранением ряда операций технологического процесса по удалению окисленных и газонасыщенных слоев и повышением производительности.

Витебский государственный технологический университет

2.5.4 Совмещение непрерывных деформационных процессов

В области производства металлоизделий можно выделить две группы процессов: простые базовые и совмещенные. Под базовыми процессами понимают такие, которые включают один цикл обработки без смены направления течения металла или приложения нагрузок. К ним относятся волочение, непрерывное прессование по способам Конформ или Лайнекс, а также продольная прокатка.

Совмещенные процессы включают несколько операций в одном очаге деформаций, либо их комбинацию со сменой в одном очаге деформации нескольких схем нагружения.

На рисунке 2.34 представлена схема устройства для реализации процесса **Экстроллинг**, обеспечивающего совмещение в одном очаге деформации процессов прокатки и прессования. Устройство предназначено для получения длинномерных изделий сплошного сечения (прутков).

Для осуществления процесса исходная заготовка 3 подается в калибр 6 и обжимается в нём, что полностью соответствует стадии прокатки и прессуется в калибрующее отверстие матрицы 4, установленной на выходе из калибра.

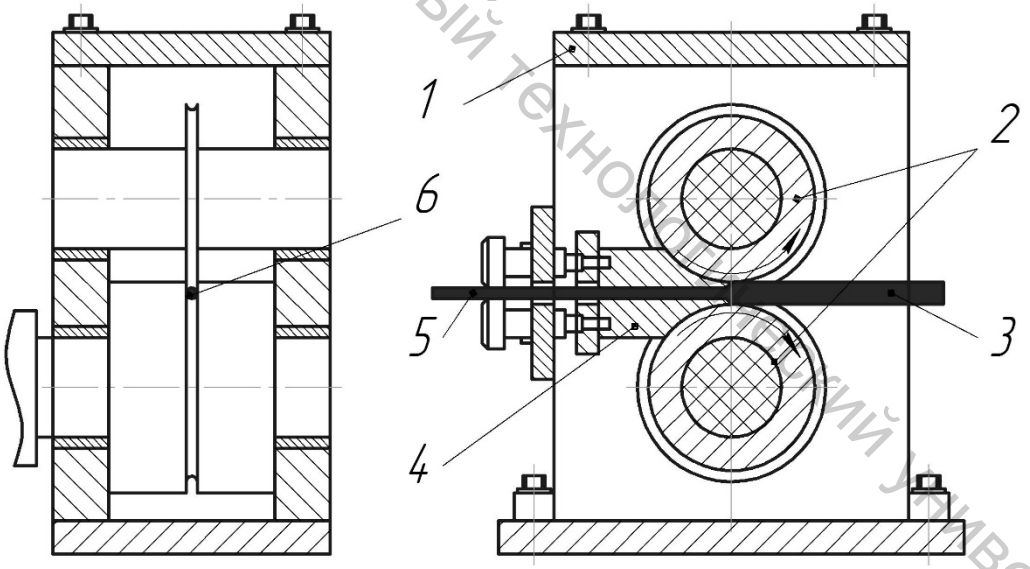


Рисунок 2.34 – Схема устройства для совмещения процессов прокатки и прессования прутковых изделий:
1 – клеть прокатного стана; 2 – валки; 3 – исходная заготовки;
4 – матрица для прессования; 5 – конечное изделие, 6 – калибр

Процесс реализуется при обработке в холодном и горячем состоянии заготовки и обеспечивает низкие потери на трение и малую продолжительность обработки, характерные для прокатки, и большие степени деформации, возможные при прессовании.

Таким образом, удается совместить достоинства процессов прокатки и прессования; сократить производственные расходы на

Витебский государственный технологический университет

оборудование, при этом существенно повысить производительность труда.

На рисунке 2.35 представлена схема устройства для формообразования трубчатых изделий.

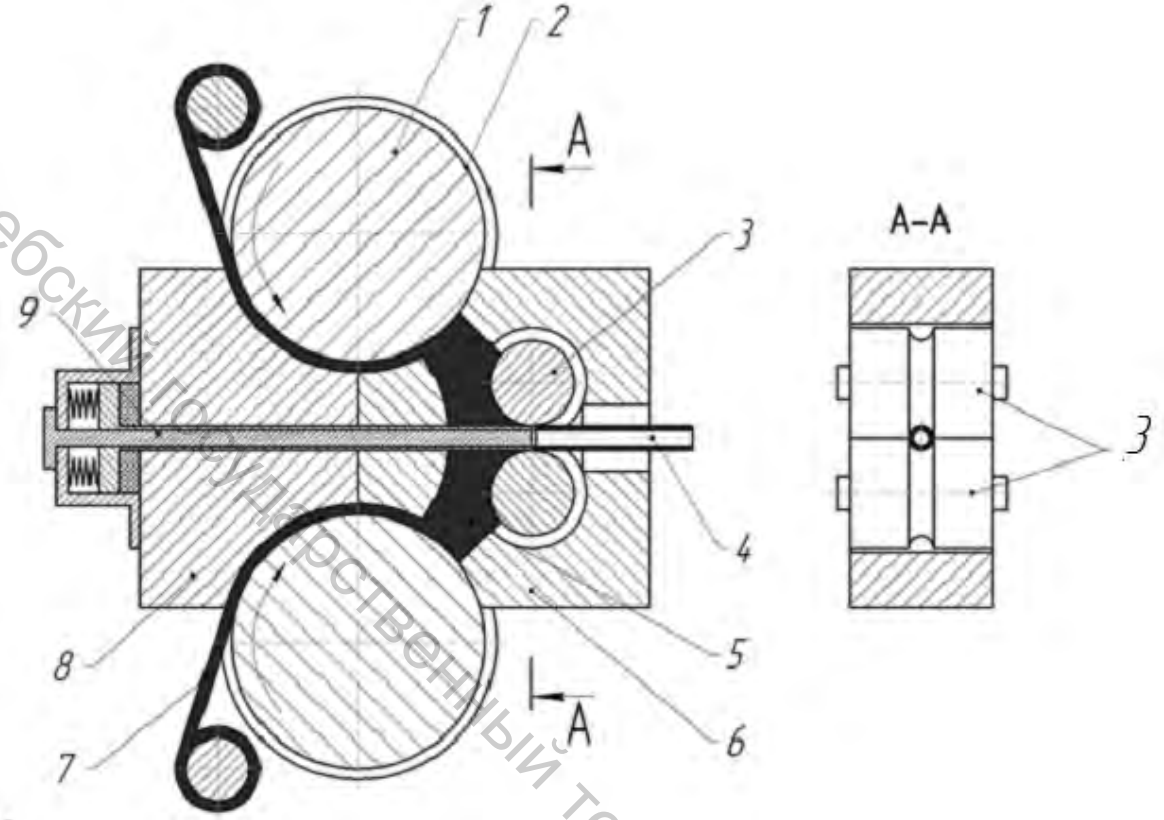


Рисунок 2.35 – Схема установки для совмещения непрерывных процессов прессования, сварки и прокатки:
1 – прессующие валки; 2 – канавки; 3 – прокатывающие валки; 4 – изделие; 5 – камера сварки; 6, 8 – соответственно запирающий и упорный инструментальные блоки; 7 – исходная заготовка; 9 – игла

На устройстве последовательно реализуются следующие процессы: прессование по методу Конформ; сварка давлением и прокатка. Прессование осуществляется валками 1, на которых выполнены канавки. Упорный 8 и запирающий 6 блоки образуют башмак в сборе. Прессование происходит в ручье, образованном поверхностями канавки 2 и сборного башмака.

Процесс обработки происходит при использовании одновременно двух заготовок 7, подаваемых в ручьи прессующих валков 1, где происходит их обжатие и продвижение в камеру сварки 5.

На прокатывающих валках 3 выполнены канавки, которые в сборе формируют наружную поверхность трубного изделия. Внутри блоков 6, 8 установлена игла 9, формирующая внутреннюю поверхность центрального отверстия. Спрессованная и соединенная сваркой трубчатая заготовка подается в прокатные валки 3, которые завершают процесс формообразования готового изделия.

Витебский государственный технологический университет

2.6 Объёмная штамповка на базе многоплунжерных гидравлических прессов

Конструкции многоплунжерных гидравлических прессов предполагают наличие вертикальных, горизонтальных ползунов, а при необходимости дополнительно могут устанавливаться и наклонные ползуны. Формообразование поковок осуществляется в закрытых (безоблойных) штампах с разъемными матрицами, в условиях всестороннего объемного сжатия материала. Разъем матриц может производиться по вертикальной, горизонтальной или одновременно по той и другой плоскостям.

Технологические возможности многоплунжерного пресса с возможностями штампов позволяют получать поковки сложной наружной формы с множеством внутренних полостей (рис. 2.35).

При многополостной безоблойной штамповке существенно повышаются качественные показатели поковок: однородная хорошо проработанная мелкозернистая структура; благоприятная ориентация волокон; более равномерное, чем при обычной штамповке, распределение механических свойств.

Важное преимущество этой технологии – высокий ресурс деталей в эксплуатации, большая экономическая эффективность. Многополостная безоблойная штамповка позволяет избавиться от потерь металла на образование облоя, приблизить форму и размеры поковок к форме и размерам чистовых деталей, снизить себестоимость изготовленных деталей. Коэффициент использования металла при изготовлении деталей сложной конфигурации повышается в 2–4 раза.

В зависимости от сложности конфигурации поковки формируют в штампах с вертикальным разъемом матриц (рис. 2.36 *а*), с горизонтальным разъемом матриц (рис. 2.36 *б*) и с разъемом матриц в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 2.36 *в*).

В первом случае после укладки заготовки в полость штампа и зажима полуматриц горизонтальными плунжерами производится деформирование главным пуансоном верхнего плунжера. После раскрытия полуматриц боковые плунжеры удаляют поковку из ручья штампа.

Во втором случае полуматрицы закрепляются на столе пресса и в вертикальном плунжере, а главные деформирующие пуансоны на боковых горизонтальных плунжерах. После укладки заготовки в полость штампа и зажима полуматриц производится формообразование поковки главными боковыми пуансонами. После раскрытия полуматриц вертикальные плунжеры выталкивают поковку из ручья штампа.

В третьем случае заготовка укладывается в нижнюю полуматрицу и зажимается верхней полуматрицей, а затем деформируется горизонтальными пуансонами. Окончательное

Витебский государственный технологический университет

формообразование поковки осуществляется верхним прошивным пуансоном.

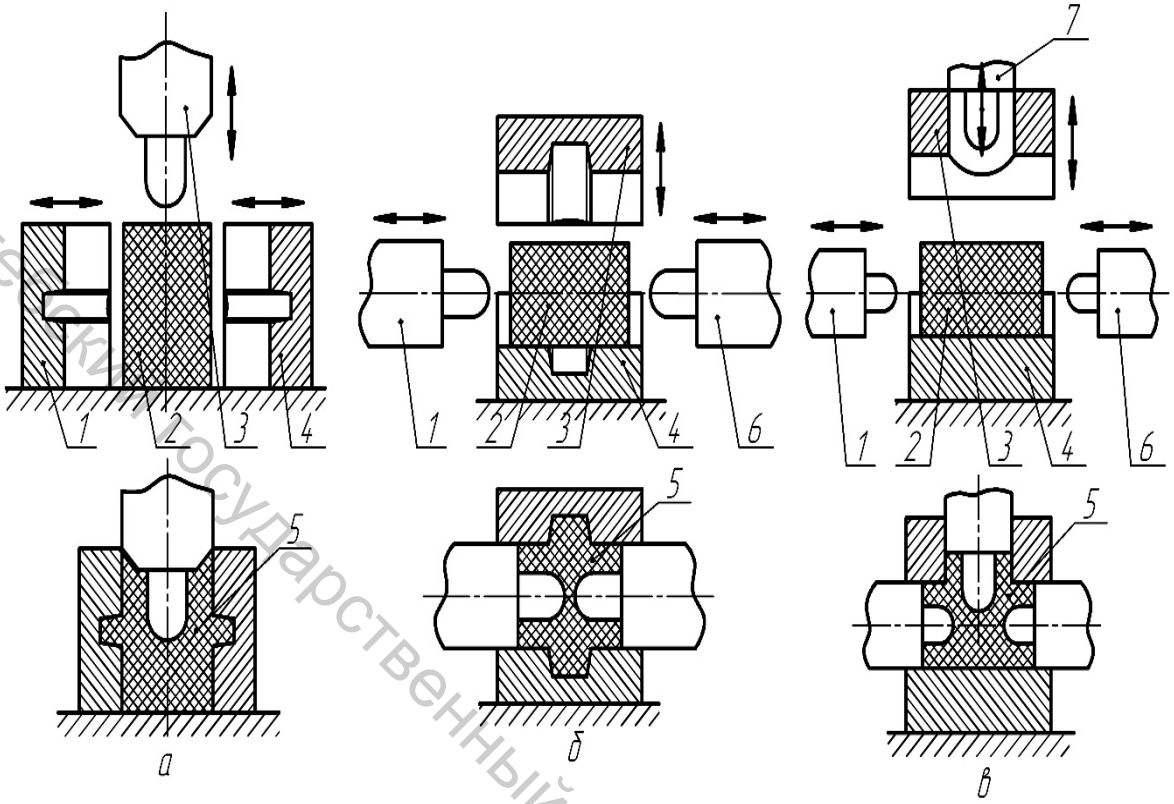


Рисунок 2.36 – Схемы штамповки поковок сложной формы в разъемных штампах на многоплунжерных прессах:
а – вертикальный разъем матриц; 1 – левая подвижная полуматрица; 2 – исходная заготовка; 3 – пуансон; 4 – правая подвижная полуматрица; б – горизонтальный разъем матриц; 1 – левый горизонтальный пуансон; 2 – исходная заготовка; 3 – верхняя подвижная полуматрица; 6 – правый горизонтальный пуансон; в – разъем в двух взаимно перпендикулярных плоскостях; 1 – левый горизонтальный пуансон; 2 – исходная заготовка; 3 – верхняя подвижная полуматрица; 4 – нижняя неподвижная полуматрица; 5 – правый горизонтальный пуансон; 7 – вертикальный пуансон

На рисунке 2.37 приведена классификация поковок, изготовляемых на многоплунжерных прессах.

I группа – поковки типа цилиндра или призмы постоянного или переменного сечения с утолщением, выступом или прямые. В подгруппу I-1 входят поковки с одним утолщением или выступом, которые могут быть получены прямым или обратным выдавливанием в неразъемной матрице. Подгруппа I-2 включает поковки с несколькими утолщениями или выступами, штамповать которые можно только в штампах с разъемными матрицами.

Витебский государственный технологический университет

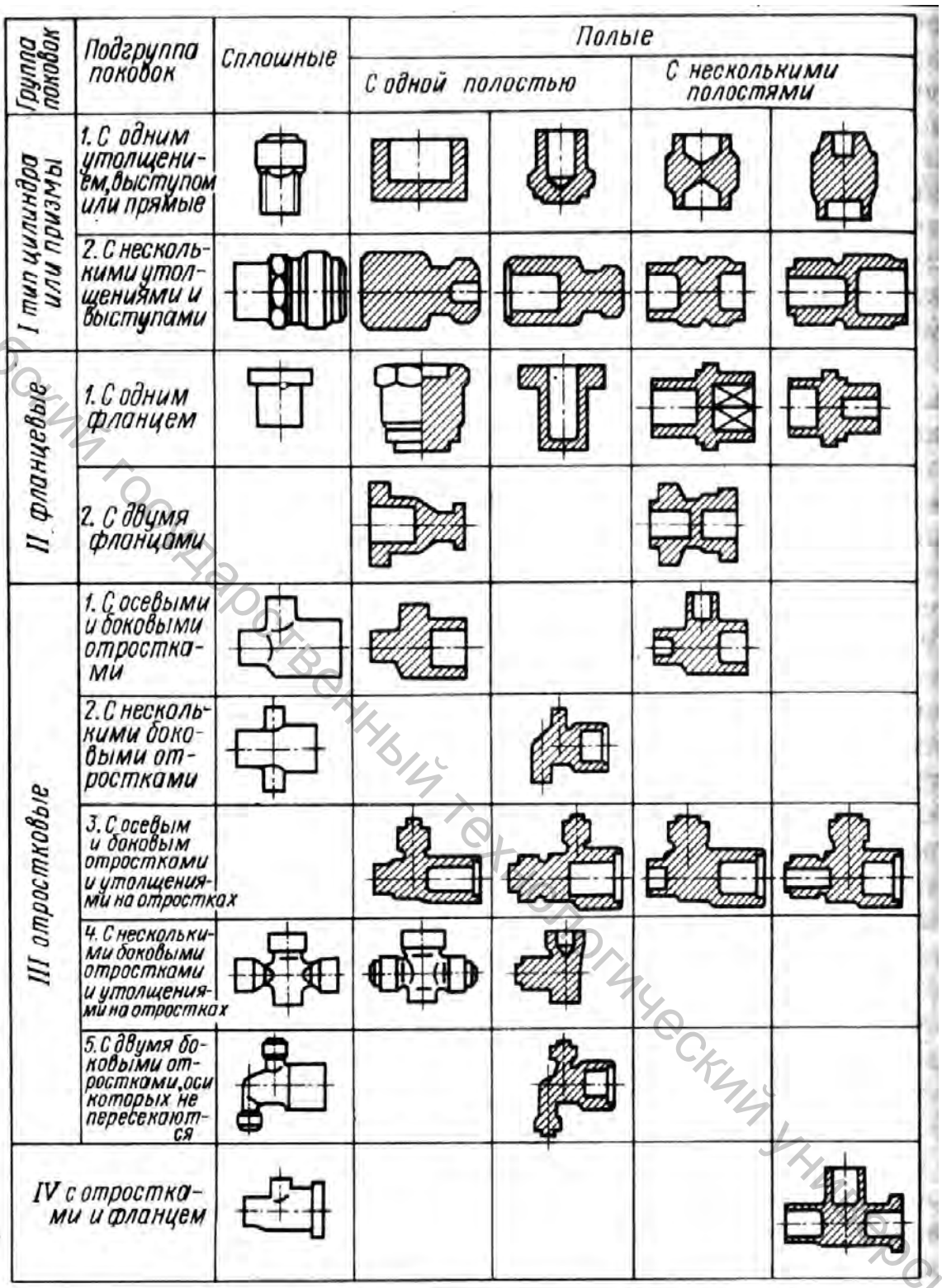


Рисунок 2.37 - Классификация поковок, штампуемых на многоплунжерных прессах

II группа – поковки типа крышек, осей с фланцами, ниппелей и других соединительных деталей трубопроводов, штампуемых в цельных и разъемных матрицах. К подгруппе II-1 относятся поковки с одним фланцем, к подгруппе II-2 – поковки с несколькими фланцами.

Витебский государственный технологический университет

III группа – отростковые поковки, которые штампуют в разъемных матрицах одним или несколькими пуансонами с обязательным применением бокового выдавливания; подгруппа III-1 – поковки с осевым и боковым отростками; подгруппа III-2 – поковки с осевым и несколькими боковыми отростками; подгруппы III-3, III-4, III-5 – поковки с осевым и боковым отростками и утолщениями на них, причем оси боковых отростков не пересекаются, но отростки расположены в одной плоскости.

IV группа – поковки с отростками и фланцем, сплошные или с полостями.

Многоплунжерная штамповка поковок сложной конфигурации характеризуется высокими показателями размерной весовой точности и производительности, что показывает экономическую целесообразность и широкие перспективы ее применения. Реализация технологии штамповки точных высококачественных поковок на многоплунжерных гидравлических прессах позволит расширить технологические возможности штамповочного производства и обеспечить в машиностроении значительную экономию материальных ресурсов.

2.7 Обработка сплавов в состоянии сверхпластичности

Состояние сверхпластичности определяется тремя основными признаками:

1. Аномально высокий ресурс деформационной способности ($\delta_{max} = 2100\ \%$).
2. Повышенная по сравнению с обычным пластическим состоянием чувствительность внутренних напряжений к изменению скорости деформации.
3. Напряжения течения материала в состоянии сверхпластичности в несколько раз меньше предела текучести материала, характеризующего пластическое состояние данного материала.

Перечисленные признаки состояния сверхпластичности проявляются в определенных условиях, из них принципиальное значение имеют: структурное состояние материала, температурные условия и скорость деформации.

Структурное состояние. Принято различать две разновидности сверхпластичности: одна разновидность проявляется у металлов и сплавов с особо мелким зерном (меньше 10 мкм), а вторая разновидность проявляется у металлов и сплавов в процессе фазовых превращений, при этом исходный размер зёрен не имеет значения. Отличительными особенностями первой разновидности являются зависимость эффекта сверхпластичности от размера зёрен и почти

Витебский государственный технологический университет

неизменное структурное состояние материала в процессе деформации. При этом необходимо, чтобы зёрна имели приблизительно равноосную форму, а в процессе нагрева до температуры деформации обладали достаточной устойчивостью против увеличения размеров.

Вторая структурная разновидность сверхпластичности наблюдается при деформации материала в процессе фазового превращения и характеризуется постоянным изменением фазового состава и структуры материала в процессе деформации.

Температурные условия. Интервал температур существования структурной сверхпластичности довольно широк. Он может находиться в пределах от температуры начала рекристаллизации, соответствующей $0{,}4\,T_{пл}$ до температур, близких к температуре плавления. Нижняя граница температурного интервала обусловлена ролью диффузионных процессов в механизме деформации сверхмелкозернистых материалов; верхняя граница соответствует температуре начала собирательной рекристаллизации, в результате которой начинается интенсивный рост зёрен. В любом случае температура должна поддерживаться постоянной по объёму деформируемого материала и в течение всего периода деформации.

Сверхпластичность, связанная с фазовыми превращениями, может быть реализована при различных температурных режимах: в процессе монотонно изменяющийся температуры при нагреве или при охлаждении; при термоциклировании в пределах температурной амплитуды, включающей интервал температур превращения; при фиксированной температуре вблизи температурного интервала превращения.

Скорость деформации для обеспечения состояния структурной сверхпластичности должна быть с одной стороны, достаточно малой, чтобы успевали в полном объёме протекать диффузионные процессы, а с другой стороны- достаточно высокой, чтобы в условиях повышенных температур не достичь значительного роста зёрен. Характерное уравнение, которое описывает сверхпластическое состояние записывают в виде

$$\sigma = \mathrm{K}v,$$

где К - константа; v - скорость деформации; m - показатель скоростного упрочнения (скоростная чувствительность); σ - напряжение деформации. Повышенная скоростная чувствительность напряжения течения сверхпластичных материалов обычно ограничено относительно невысокими скоростями деформации.

Для подавляющего большинства исследованных металлов и сплавов оптимальный интервал скоростей деформаций, соответствующий структурной сверхпластичности, составляет $10^{-2} -$

Витебский государственный технологический университет

$10^{-4}c^{-1}$, т. е. занимает промежуточное положение между интервалами скоростей высокотемпературной ползучести и скоростей деформации, используемых в традиционных процессах обработки металлов давлением.

Механизм деформации в состоянии сверхпластичности представляет собой результат сложного взаимодействия различных процессов движения: точечных, линейных объёмных кристаллической решетки и границ зёрен. Условно выделяют три стадии сверхпластической деформации.

На первой и второй стадиях деформация осуществляется в основном за счёт межзеренного скольжения. По мере перехода от второй стадии к третьей увеличивается вклад внутризеренной деформации, которая становится основным механизмом деформации. Межзеренное скольжение осуществляется за счёт движения зернограничных дислокаций; внутризеренная деформация – за счёт движения дислокаций решётки.

Экспериментально установлены следующие проявления зернограничного скольжения: взаимные смещения соседних зёрен по общей границе, их развороты и смена соседних зёрен.

При обычной деформации крупнозернистого металла удлинение образца создаётся в результате вытягивания каждого зерна. В условиях сверхпластической деформации форма зёрен меняется незначительно. В этом случае сверхпластичность достигается за счёт перемещения зёрен относительно друг друга.

Взаимное смещение зёрен может быть результатом локальной внутризеренной деформации в приграничных областях или представлять собой смещение одного зерна по другому, как жесткого целого.

При скольжении зёрен между ними неизбежно образуются пары и несплошности, без «залечивания» которых невозможно получение высоких удлинений. Залечивание очагов разрушения (аккомодационный механизм) осуществляется диффузионным путём. Условием протекания аккомодации является высокая температура и низкая скорость деформации. С повышением температуры ускоряются диффузионные процессы, способствующие развитию сверхпластичности, но одновременно укрупнение зерна может сильно ухудшить показатели сверхпластичности.

Если исходное зерно мелкое, но во время деформации быстро растёт, то через некоторое время материал может выйти из сверхпластического состояния. Временная сверхпластичность хотя и не позволяет получить удлинения на многие сотни процентов, но также может быть использована в отдельных технологических процессах.

Для перевода сплавов в состоянии сверхпластичности наметились два основных направления:

Витебский государственный технологический университет

1. Разработка и использование сверхпластичных сплавов, в которых межзеренная структура получается за счёт регулирования их химического состава.

2. Реализация процессов измельчения зёрен.

Эти процессы дополняют друг друга. Принимая во внимание, что выбор материалов определяется эксплуатационными требованиями деталей машин, а не условиями реализации эффекта сверхпластичности, то второй вариант является более предпочтительным.

Способы измельчения микроструктуры можно разделить на четыре группы:

1. Металлургические способы, основанные на варьировании условий кристаллизации.

2. Термомеханические способы измельчения зерен.

3. Горячая пластическая деформация.

4. Специальная группа способов, включающая порошковую металлургию, пакетную прокатку, электролитическое послойное осаждение.

В таблице 2.1 приведены некоторые данные, характеризующие состояния сверхпластичности отдельных сплавов, представляющих интерес для использования в различных отраслях машиностроения.

Таблица 2.1 – Характеристики некоторых сплавов в состоянии сверхпластичности

Основа сплава	Марка сплава	Средний размер зерен, мкм	$T_{\text{сп}}$ ºС	V, c^{-1}	σ, МПа	δ_{max}, %
Al	АЦ5К5	2,2	550	$1{,}0 \cdot 10^{-2}$	4,0	1000
	В96Ц	5,0	465	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$	5,0	850
	1420	5,5	450	$4{,}0 \cdot 10^{-4}$	5,0	700
Fe	03Х26Н6Т	2,5	950	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$	25,0	600
	12Х18Н10Т	2,0	780	$4{,}0 \cdot 10^{-3}$	80,0	280
Ni	ЖС6КП	5,5	1100	$1{,}7 \cdot 10^{-3}$	5,0	650
	ЖС6К	7,5	1125	$5{,}0 \cdot 10^{-3}$	5,0	420
Ti	ВТ3-1	1,2	870	$3{,}0 \cdot 10^{-3}$	5,0	2000
	ВТ-6с	1,5	900	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$	10,0	1800
	ВТ-9	2,0	950	$2{,}7 \cdot 10^{-3}$	29,0	1800
	ВТ-14	1,2	870	$5{,}0 \cdot 10^{-3}$	5,0	2000
ZrO2	Y-TZP	0,3	1150	$8{,}3 \cdot 10^{-5}$	9,0	800

Примечания.

1. $T_{\text{сп}}$ и V – соответственно температура и скорость сверхпластической деформации; σ – напряжение течения; δ_{max} – предельное относительное удлинение при испытании на растяжение.

Витебский государственный технологический университет

2. ZrO2 – двуокись циркония, стабилизированная окисью натрия; Y-TZP – конструкционная керамика.

Одним из серьёзных препятствий использования сверхпластичности в обработке металлов давлением являются очень малые скорости деформации, при которых это состояние проявляется. Однако имеются сообщения о проявлении признаков сверхпластичности у алюминиевых и медных сплавов при скоростях, существенно превышающих скорости деформации, характерные для любых традиционных процессов ОМД, включая и штамповку взрывом.

Эти результаты позволяют по новому оценить перспективы использования сверхпластичности в технологии обработки материалов давлением. Сопоставление указанных достоинств, а также обобщение имеющегося опыта использования сверхпластичности позволяет выделить ряд технологических задач, при решении которых наибольший эффект обеспечивает деформирование в состоянии сверхпластичности. К таким задачам, прежде всего, относят следующие:

1. Штамповка малопластичных и труднодеформируемых металлов и сплавов на основе никеля, титана, магния, алюминия, железа, тугоплавких металлов, которые отличаются высокой стоимостью, а их обработка – большой трудоёмкостью и многооперационностью. Увеличение деформационной способности материала в состоянии сверхпластичности позволяет существенно увеличить деформацию за один технологический переход и перейти к малооперационной технологии, что в значительной мере компенсирует уменьшение производительности за счёт малых скоростей деформации.

2. Штамповка или другие способы формирования изделий, отличающихся особо сложной формой, получение которых часто недоступно для традиционных методов обработки металлов давлением (например, тонкостенные детали сложной формы с оребрением, замкнутые ёмкости сферической и более сложной формы и т. д.). Это даёт возможность максимально приближать форму и размеры поковки к форме и размерам готовой детали; снижать до минимума или полностью исключить припуск на механическую обработку, добиваясь значительной экономии дорогостоящих металлов и сплавов, снижения трудоёмкости механической обработки.

3. Снижение требуемых усилий штамповки и мощности применяемого оборудования. Малые давления при деформировании в состоянии сверхпластичности способствуют существенному увеличению стойкости штампового инструмента и позволяют заметно уменьшить его стоимость.

4. Улучшение ряда показателей качества готовой продукции. Повышенная текучесть и малые давления при штамповке сверхпластичных материалов способствуют более качественному воспроизведению формы ручья штампа; повышению точности размеров и снижению шероховатости поверхности поковок; уменьшению

Витебский государственный технологический университет

разброса размеров в пределах партии. Высокая способность к релаксации напряжений материалов в состоянии сверхпластичности приводит практически к отсутствию внутренних напряжений в изделиях, а это обеспечивает стабильность размеров и форм готовых деталей; отсутствие короблений в процессе и после термообработки; повешенную стойкость металла детали против коррозии.

2.7.1 Газостатическая формовка листового материала в состоянии сверхпластичности

Материалы на основе титана, алюминия, магния имеют высокие эксплуатационные свойства, которые в сочетании с малой плотностью позволяют создавать долговечные изделия и конструкции. Однако обработка давлением этих сплавов сопряжена с трудностями, обусловленными их низкой технологической пластичностью и сравнительно высоким сопротивлением деформации.

При обработке таких сплавов перспективно использование сверхпластичности. Её практическое применение обеспечивает совершенствование традиционных, а так же создание новых технологических процессов обработки металлов давлением. Таким новым процессом является газостатическая формовка листового материала в состоянии сверхпластичности. Газостатической формовкой можно получать изделия сложной формы за один-два перехода без промежуточных отжигов на более простых по сравнению с прессами установках при сравнительно дешёвой оснастке с минимальными потерями металла.

Различают три основные схемы газостатической формовки: негативную, позитивную и совмещённую. Негативной называют формовку, при которой внутренняя поверхность изделия воспроизводит внутреннюю поверхность матрицы (копирование по матрице). Позитивной называют формовку, при которой материал изделия обтягивает поверхность пуансона (копирование по пуансону). Сочетанием негативной и позитивной формовок является комбинированная формовка, которая совмещает преимущества и частично устраняет недостатки позитивной и негативной формовок.

Процесс газостатической формовки осуществляется в следующей последовательности: листовую заготовку жестко зажимают по поверхности фланца; нагревают до температуры сверхпластичности и подвергают в изотермических условиях воздействию избыточного газового давления, обеспечиваемого за счёт подачи сжатого газа или вакуумирования внутренней поверхности матрицы. Характерными особенностями процесса являются статический характер приложения нагрузки и формообразование за счёт исключительно свободной части

Витебский государственный технологический университет

заготовки, находящейся под давлением газовой среды, т. е. без перемещения фланца.

2.7.1.1 Негативная формовка

Простейший вид газостатической формовки листа в состоянии сверхпластичности с использованием инструмента предполагает выдувку части материала, прижатого по его периферии в полость матрицы (рис. 2.38). Первая стадия процесса – выдувка купола. В результате возникает разнотолщинность деформированного листа с минимальной толщиной материала в полюсе. Разнотолщиность возрастает с увеличением глубины выпуклости. В результате действия сил трения в момент касания листом поверхности матрицы утонение затормаживается. При этом деформирующая поверхность стремиться блокировать материал на матрице так, что последующая деформация ограничивается областями листа, не касающимися матрицы. Поскольку углы матрицы заполняются последними, то наибольшее утонение происходит именно в этих зонах.

По мере того как радиус скругления между боковыми стенками и донной частью детали уменьшается, так же уменьшается и минимальная толщина в зоне угла.

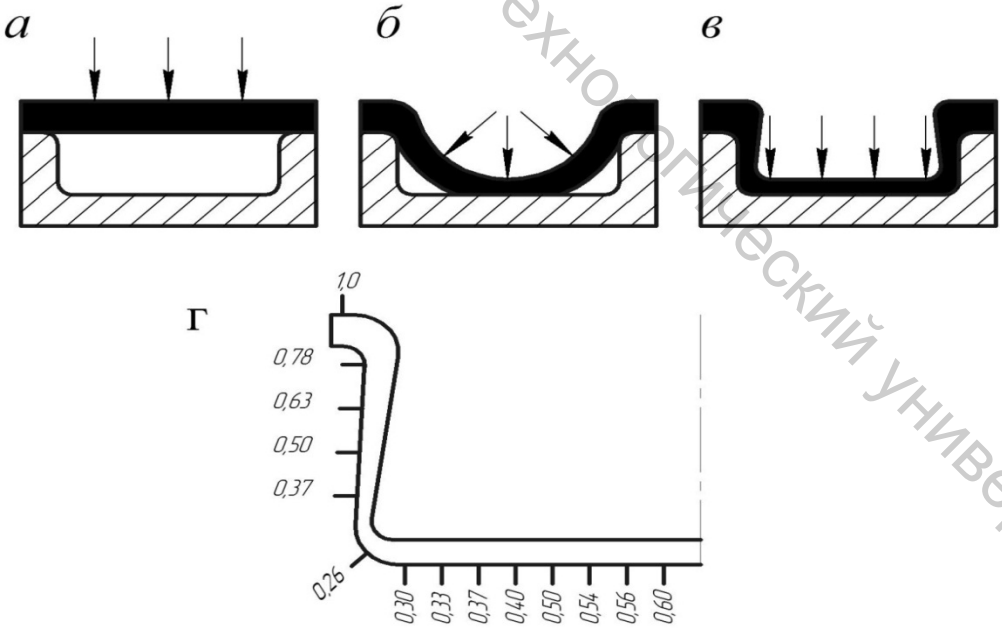


Рисунок 2.38 - Схемы негативной формовки:
а – стадия подачи давления на листовой материал; б – стадия выдувки купола; в – стадия завершения процесса; г – схема изменения толщины материала по сечению изделия при соотношении высоты к диаметру, равным 0,3

Витебский государственный технологический университет

Расположение абсолютного минимума толщины (в полюсе или окрестности скругления при переходе от стенки к донной части) зависит от размеров детали, её глубины и радиуса скругления в зоне угла.

2.7.1.2 Реверсивная формовка

Реверсивную формовку используют для уменьшения разнотолщинности материала, присущей негативной формовке, при сохранении технологической простоты этого процесса (рис. 2.39).

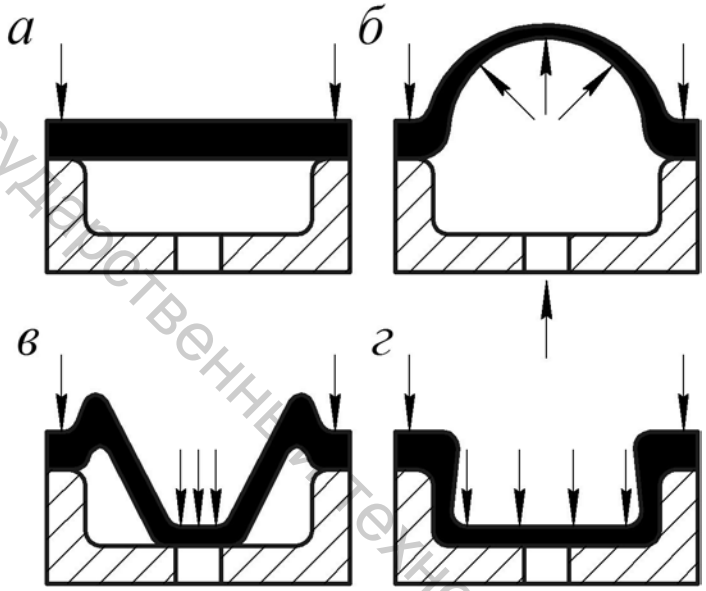


Рисунок 2.39 - Схемы стадий реверсивной формовки:
а – стадия подачи давления на листовой материал; б – стадия выдувки купола в сторону, противоположную от матрицы; в – изменение направления выдувки в сторону матрицы; г – заполнение полости матрицы

При реверсивной вытяжке сначала лист формуют в противоположном от поверхности матрицы направлении (рис. 2.39 *б*). Деформирование листа осуществляют до высоты, которая превышает глубину матрицы. Затем изменяют направление действия газа на противоположное таким образом, чтобы произошло заполнение полости матрицы, а изделие приобрело необходимую форму. Цель этого способа – увеличение толщины в углах полости матрицы за счёт большего утонения в полюсе (перераспределение материала донной части изделия). Во всех этих процессах, включающих последовательное утонение, важно на промежуточных стадиях не создавать избыточной площади поверхности заготовки, чтобы на окончательной стадии не образовывались складки.

Витебский государственный технологический университет

2.7.1.3 Позитивная формовка

Для получения относительно глубоких и сложных форм изделий применяют технологические способы, основанные на перемещении пуансона относительно плоскости листа. Такие технологические приёмы значительно расширяют сферу применения сверхпластической формовки.

Формовка с применением толкателя применяется для предварительного растяжения части поверхности, прилегающей к фланцу (рис. 2.40).

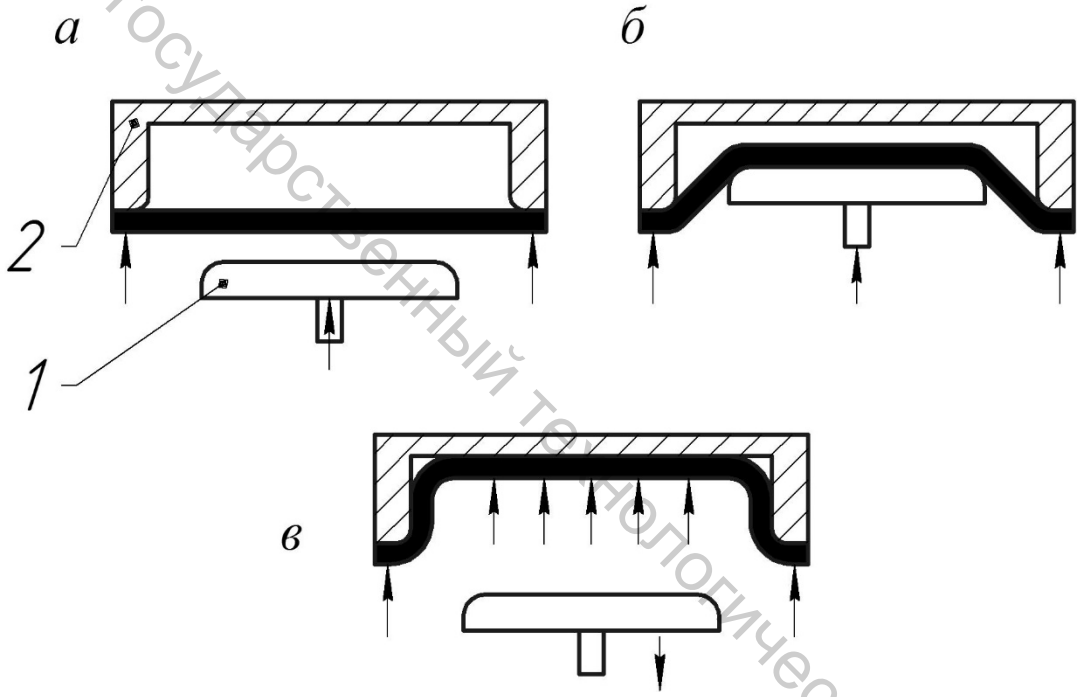


Рисунок 2.40 - Формовка с применением толкателя:
а – исходное положение листовой заготовки;
б – предварительная деформация толкателем;
в – окончательное формообразование газом;
1 – толкатель; 2 – матрица

Деформация затормаживается в местах контакта листа с толкателем и осуществляется преимущественно на участках, находящихся между толкателем и закреплённым фланцем.

Формовка с предварительной выдувкой основана на использовании подвижного пуансона, имеющего форму готового изделия (рис. 2.41). Первая стадия предусматривает свободную выдувку купола из листа в направлении противоположном инструменту.

Витебский государственный технологический университет

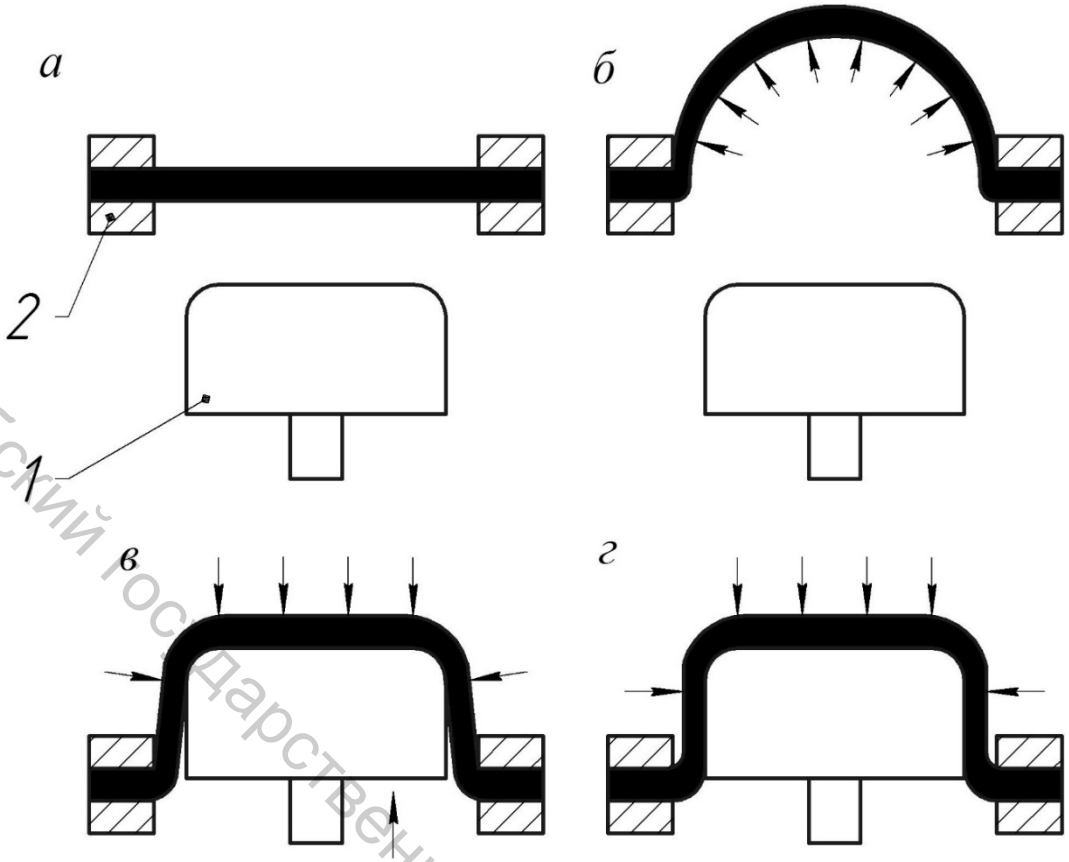


Рисунок 2.41- Стадии позитивной формовки с предварительной свободной выдувкой:
а – исходное положение листа; б – свободная выдувка оболочки;
в – перемещение пуансона внутрь оболочки; г – обжим оболочкой поверхности пуансона;
1 – пуансон; 2 – зажим фланцевой части листовой заготовки

Важно регламентировать размеры купола в зависимости от площади поверхности изделия. Если поверхность купола велика, то на изделии образуются складки. В случае заниженных размеров купола степень разнотолщинности повышается.

На последней стадии формоизменения (рис. 2.41 *г*) пуансон перемещается в полость купола. В этом случае материал растягивается механическими силами, преимущественно вблизи линии пересечения донной части и стенок, и обжимается по поверхности пуансона давлением газа.

2.7.2 Совмещенная сверхпластическая формовка и диффузионная сварка

Совмещение процессов сверхпластической формовки и диффузионной сварки позволяет использовать достоинства каждого процесса в отдельности и в результате достигать значительного

Витебский государственный технологический университет

снижения стоимости и веса конструкций изделий по сравнению с традиционными способами обработки. Сверхпластичность в сочетании с диффузионной сваркой позволяет получать титановые и алюминиевые изделия, которые не могут быть изготовлены другими способами. Вместо сборных узлов и механически обработанных деталей новые типовые конструкции состоят из элементов, сформированных из листа и сваренные в виде пустотелых профилей. Изделие получают в виде сложных слоистых конструкций. Снижение стоимости веса конструкций в среднем составляет от 30 до 50 %.

В качестве примера для демонстрации достоинств сверхпластической деформации с последующей диффузионной сваркой может служить **противопожарная стенка вертолета**. Эту конструкцию размером 746×1935 мм изготовляли ранее путём сборки плоского титанового листа с 53 деталями, используя 1074 механических соединений. Переработка конструкции противопожарной стенки для переработки её способом сверхпластической формовки и диффузионной сварки из титанового сплава привела к утолщенной монолитной конструкции с двумя титановыми деталями, 11 элементами жесткости с 300 механическими соединениями. Количество соединяемых деталей и механических соединений, а также трудоёмкость сборки радикально сократились.

Другой областью применения совмещенного процесса сверхпластической формовки и диффузионной сварки (СПФ/ДС) является изготовление **топливных емкостей** из титана. По существующей технологии изготовление баков из титана в качестве заготовки использовалась поковка, которая подвергалась механической обработке до тех пор, пока стенки оболочки не достигнут необходимой толщины. Затем обработанную заготовку подвергали штамповке.

По новой технологии использовали двухслойную дисковую заготовку, сваренную по торцевым поверхностям. По оси к заготовке сваркой присоединялась труба подачи газа 1 (рис. 2.42). Полученное соединение устанавливалось в инструментальную оснастку 4, в которую также помещалась бобышка 5 и штуцер 2. Через трубу 1 подавался формообразующий газ, под действием которого плоская заготовка 3 принимает сферическую форму, а затем происходит диффузионное соединение сферической заготовки с бобышкой 5 и штуцером 2.

Применение сверхпластичности и диффузионной сварки показало возможность существенного снижения трудоёмкости и механической обработки исходного материала.

Витебский государственный технологический университет

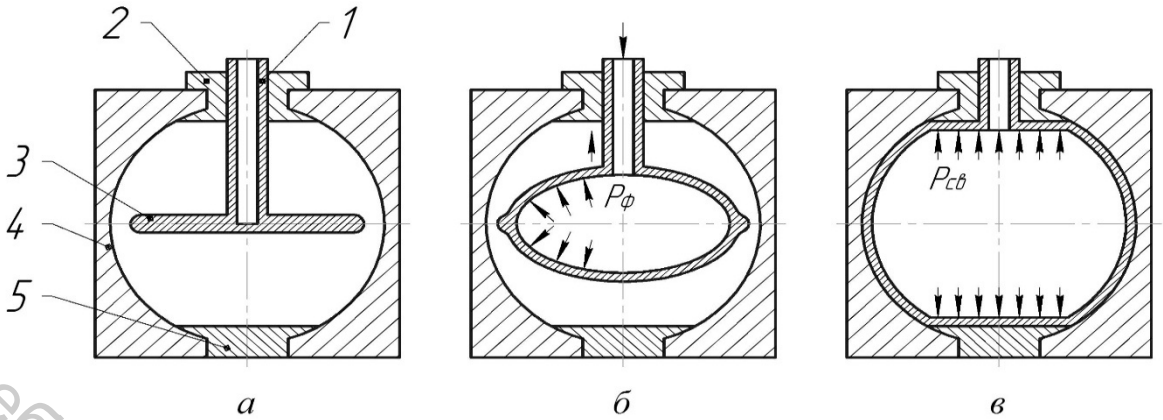


Рисунок 2.42 - Схема изготовления шаровых баллонов методом СПФ/ДС:
а - сборка заготовок в оснастке; б-формовка шаровой заготовки;
в - диффузионная приварка штуцеров;
1 – труба подачи газа; 2 – штуцер; 3 – дисковая заготовка; 4 – оснастка;
5 – бобышка; $P_ф$ – давление формовки; $P_{св}$ – давление сварки

Типовыми изделиями для реализации совмещенного процесса сверхпластической деформации и диффузионной сварки являются слоистые конструкции. Изготовлено множество слоистых панелей, отличающихся разнообразием конфигураций соединительных связок в форме синусоидальных волн, гексагональных и пирамидальных конструкций. Изготовленные варианты слоистых изделий показывают возможности получения панелей простой или сложной кривизны, а также кольцевых слоистых конструкций.

Определены три характерных типа слоистых конструкций (рис. 2.43). В каждом случае титановый лист подвергается сверхпластической формовке и диффузионной сварке с отдельными деталями в течение одного нагревательного цикла.

Все типы конструкции удачно реализованы в авиастроении. Технология изготовления конструкции типа «*а*» заключается в СПФ титанового листа в штампе, в который предварительно помещались вставки из титана. Формуемый лист входит в плотный контакт со вставками и диффузионно сваривается с ними. Этим достигается выборочное утолщение листового материала для повышения прочности или с целью крепежа. Такой процесс может быть применён для того, чтобы избежать использования в качестве исходных заготовок поковок, прутков, плит с последующей механической обработкой их до толщины листов на большей части поверхности. В результате потери металла уменьшаются на 90 % и, кроме того, резко снижается стоимость механической обработки.

Витебский государственный технологический университет

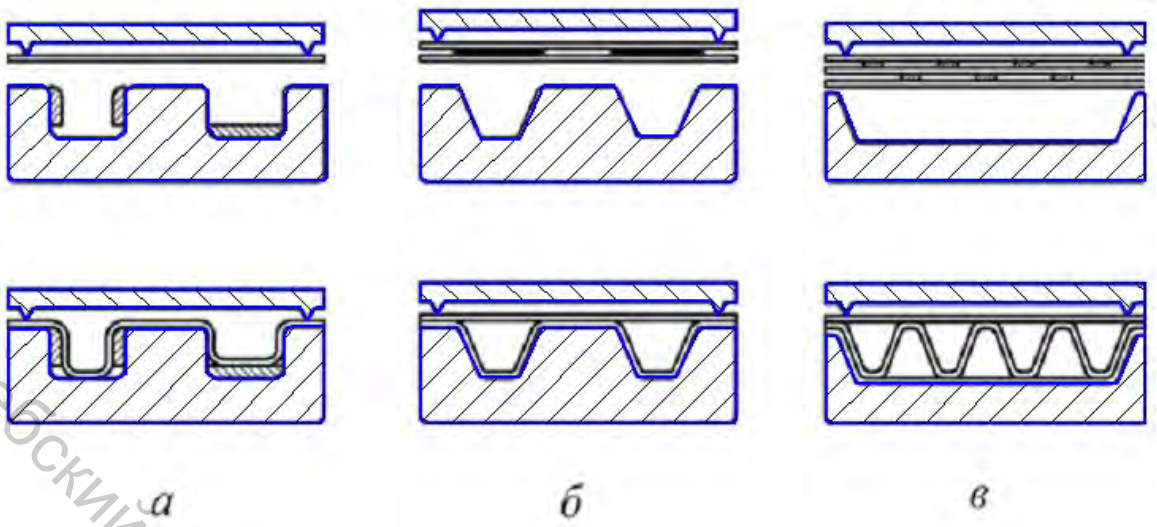


Рисунок 2.43 - Три основных типа титановых конструкций, полученных методом СПФ/ДС:
а – усиленная листовая конструкция (один лист); б – интегрально жесткая конструкция (два листа); в – слоистая конструкция (три листа)

Использование сверхпластичности и диффузионной сварки позволяет создавать конструкции, которые обеспечивают сокращение номенклатуры деталей. Конструкции, созданные на основе сверхпластичности и диффузионной сварки на, 30–50 % дешевле, а по весу 20–30 % ниже.

2.7.3 Объёмная штамповка в режиме сверхпластичности

Накоплен обширный опыт применения сверхпластичности в процессах горячей объемной штамповки, который позволяет осуществлять штамповку точных поковок сложной формы и больших размеров из малопластичных материалов при весьма малых усилиях деформации.

В отличие от кованых поковок, а также от штампованных поковок обычной точности, требующих, как правило, значительной обработки резанием по всей поверхности, точные штампованные поковки не надо обрабатывать, за исключением мест переходов и участков, в которых предусмотрено сверление или вырубка отверстий. При штамповке точных поковок обеспечиваются жесткие допуски, минимальные радиусы закруглений, штамповочные уклоны не превышают 1°. В результате при штамповке точных поковок имеет место наибольший коэффициент использования металла (КИМ), составляющий 0,8 и более (у поковок обычной точности КИМ в среднем равен 0,2–0,5 %), что очень важно при изготовлении деталей из дорогостоящих и дефицитных металлов и сплавов (рис. 2.44).

Витебский государственный технологический университет

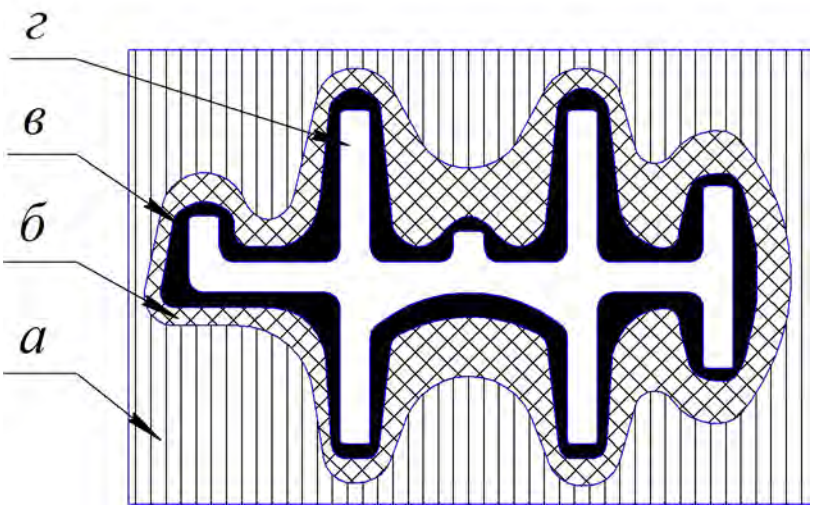


Рисунок 2.44 - Контуры поковок, полученных различными способами:
а – ковкой; б – черновой (предварительной) штамповкой;
в – штамповкой обычной точности; г – точной штамповкой

Результат процесса горячего деформирования металлов зависит от правильного выбора и соблюдения термомеханического режима формоизменения, т. е. определенного сочетания температуры, скорости и деформации. В обычных условиях деформирования возможности поддерживания оптимального режима обработки ограничены из-за неизбежного остывания нагретой заготовки при переносе её от печи к деформирующему оборудованию, укладке в инструмент и последующей деформации. Интенсивность охлаждения заготовки тем больше, чем больше отношение её поверхности к объему. Большие трудности возникают при штамповке деталей с тонким и широким полотном, узкими и высокими рёбрами.

Для компенсации остывания заготовка нагревается до температур, превышающих требуемые для деформации. При этом увеличивается интенсивность взаимодействия металла с окружающей средой, т. е. происходит окалинообразование, обеднение поверхностного слоя легирующими элементами.

Поддержание температуры заготовки частично решается путём подогрева штампов, применением стеклянных и металлических покрытий заготовок, использованием специальных кассет для переноса нагретой заготовки от печи к прессу, встраиванием нагревателей в деформирующий агрегат. Наиболее простым и эффективным средством уменьшения отвода теплоты от нагретой заготовки является нагрев инструмента. При штамповке титановых и жаропрочных сплавов нагрев инструмента обязателен.

Изотермическое деформирование осуществляется на гидравлических прессах. При этом скорость деформации может быть сколь угодно малой, и нижний её предел ограничен только требованиями производительности процесса. С уменьшением скорости деформации можно штамповать при значительно меньшем, по

Витебский государственный технологический университет

сравнению с обычными условиями горячей штамповки, сопротивлении металла деформированию.

Уменьшение напряжений течения особенно заметно при переходе в зону скоростей сверхпластичной деформации. В зависимости от материала заготовки, её формы, размеров и условий деформации усилия при изотермических условиях по сравнению с обычными могут снижаться в 10 раз.

Уменьшение усилия деформирования позволяет использовать для изотермической штамповки менее мощное оборудование, экономить производственные площади и энергию. Это особенно важно при получении крупногабаритных и сложных поковок. Штамповка таких заготовок в обычных условиях сопровождается большим количеством нагревов и переходов или требует использования уникального и дорогостоящего оборудования большой мощности. При изотермическом деформировании заготовки сложной конфигурации можно штамповать за меньшее число переходов.

С целью создания изотермических условий в рабочей зоне используются установки, имеющие системы нагрева инструмента, теплоизоляции штампового пространства, автоматического терморегулирования для поддержания температуры инструмента на заданном уровне.

На практике для осуществления изотермической штамповки необходимо нагревать инструмент до высокой температуры (700…1100 °С) и поддерживать её постоянной в процессе штамповки, а также обеспечивать работоспособность штампового инструмента в условиях продолжительного пребывания при температуре деформации.

Основными элементами установок для изотермического деформирования являются штамповые блоки, которые нагреваются с помощью индукторов, элементами сопротивления или газовыми горелками (рис. 2.45).

Принципиальная схема штампового блока с индукционным нагревом представлена на рисунке 2.45 *а*. Нижняя и верхняя части штампа крепятся с помощью шпилек 6, 7 к штамподержателям соответственно 4 и 10, связанным через теплоизолирующие прокладки с опорными плитами. Теплоизоляция штампового блока состоит из прокладок и нижнего неподвижного 3 и верхнего подвижного 9 кожухов. При перемещении ползуна пресса вверх кожух 9 не выходит из кожуха 3, что предотвращает нарушение теплоизоляции рабочей зоны. Штампы нагреваются индукторами. Заготовки загружаются, а штампованные поковки удаляются через специальное окно в кожухе 3. Размеры поковок ограничиваются размерами окна.

Витебский государственный технологический университет

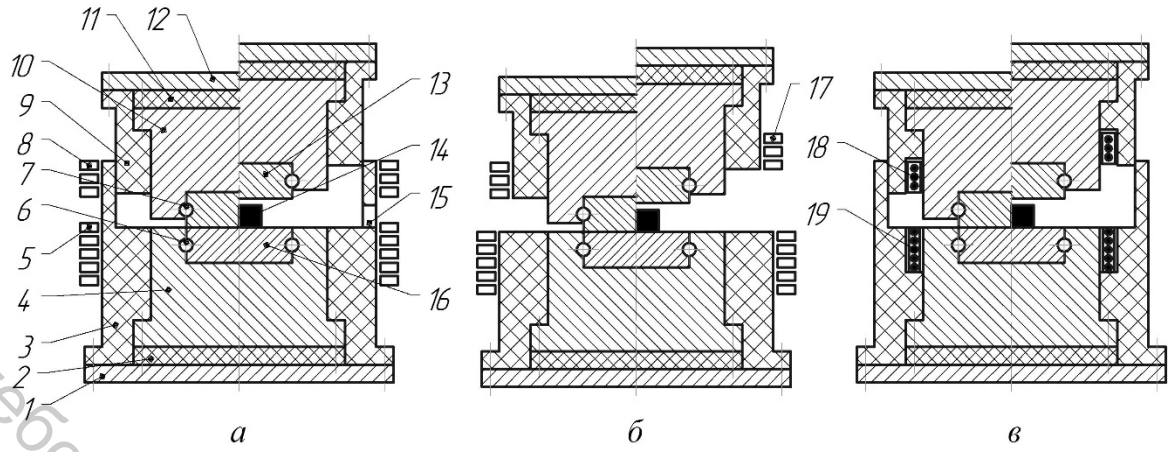


Рисунок 2.45 - Конструктивные схемы штамповых блоков для изотермического деформирования:
а – с индукционным нагревом и рабочим окном;
б – с индукционным нагревом и открытым разъемом;
в – с нагревом элементами сопротивления; 1, 12 – опорные плиты;
2, 11 – теплоизолирующие прокладки; 3, 9 – кожухи;
4, 10 – штамподержатели; 5, 8 – индукторы; 6, 7 – шпильки;
13, 16 – соответственно верхняя и нижняя части штампа;
14 – заготовка; 15 – окно; 17 – подвижный индуктор;
18, 19 – нагреватели сопротивления

Теплоизоляция рабочего пространства выполнена из кремнеземного волокна, заключенного во внутренний 3 и наружный 9 листовые сварные кожухи, изготовленные соответственно из жаропрочного сплава и коррозионностойкой стали.

Водоохлаждаемые индукторы 5, 8 изготовлены из медной трубки, имеют межвитковую изоляцию. В системе водяного охлаждения индукторов устанавливается сигнализатор падения давления. Для штамповки крупногабаритных поковок применяются блоки с открытым разъемом и подвижным индуктором 17, поднимающимся вместе с верхней частью штампа (рис. 2.45 *б*).

Конструктивная схема штампового блока с нагревом рабочей зоны элементами сопротивления представлена на рисунке 2.45 *в*. В отличие от вышеприведенных схем нагреватели расположены внутри теплоизолирующей системы. В качестве элементов сопротивления применяются проволочные нагреватели, карбидокремниевые стержни, пластины из жаропрочного никелевого сплава. Проволочные нагреватели выполняются из сплава, обладающего высоким омическим сопротивлением, что в сочетании с высокой температурой нагрева может приводить к пластической деформации инструмента. В то же время отсутствуют резкие тепловые колебания поверхностных слоёв, что предотвращает появление разгарных трещин и позволяет многократно восстанавливать ручей штампа.

Витебский государственный технологический университет

Габаритные размеры штампов должны соответствовать посадочным местам нагревательного блока установки для изотермического деформирования.

2.8 Обработка материалов с памятью формы

2.8.1 Механизмы образования эффекта памяти формы

Преобладающее большинство металлов и сплавов при напряжениях, превышающих предел упругости, после снятия нагрузки не воспроизводят первоначальных размеров и формы. В настоящее время достаточно широкое применение в различных отраслях современной техники и промышленности находят сплавы, проявляющие эффект памяти формы (ЭПФ). Образцы, изготовленные из этих сплавов после пластической деформации, восстанавливают свою первоначальную геометрическую форму в результате нагрева или непосредственно после снятия нагрузки. К ним относятся сплавы на основе AuCd, CuAlNi, CuZnAl, CuSn, TiNi, MnCu, CuZn, FeMn, TiNiCu, FePb и др. Одним из широко используемых материалов с памятью формы является никелид титана (TiNi).

Одной из важнейших особенностей материалов с памятью формы является изменение фазового состава и, как следствие, механических свойств при термическом или силовом воздействии. При понижении температуры или приложении нагрузки аустенитная фаза (А) превращается частично или полностью в мартенситную фазу (М). Таким образом реализуется прямое мартенситное А→М превращение. При возврате температуры к исходному значению или прекращению действия нагрузки происходит обратное мартенситное превращение (М→А).

Свободная энергия рождающихся кристаллов мартенсита меньше, чем исходной фазы. Именно это стимулирует развитие мартенситного перехода. Однако появляются силы, препятствующие переходу. Прежде всего, это повышение свободной энергии из-за возникновения границы раздела старой и новой фаз. Кроме того, растущие кристаллы мартенситной фазы вынуждены деформировать окружающую матрицу. В результате возникает упругая энергия, которая препятствует дальнейшему росту кристаллов. Когда эта энергия превысит предел упругости происходит интенсивная деформация материала в окрестностях границы раздела фаз. Рост кристалла прекращается. Этот процесс может происходить исключительно быстро, подобно взрыву, тогда отдельные кристаллы мартенсита вырастают практически мгновенно до своих конечных размеров.

Обратный переход мартенсита в аустенит уже не может произойти по обратному «взрывному» механизму. Нужен значительный

Витебский государственный технологический университет

перегрев сплава, чтобы в недрах мартенсита начали зарождаться и расти кристаллы аустенита. Это явление получило название **термоупругого равновесия фаз**.

На Всемирной выставке в Брюсселе внимание посетителей привлекло устройство, основной частью которого был тонкий стержень диаметром 3 мм, длиной 100 мм из золото-кадмиевого сплава (66 % золото). Один конец стержня был жёстко закреплен в стойке, а сам стержень находился в горизонтальном положении. На свободный конец стержня подвешивали груз (50 г), под тяжестью которого стержень изгибался. Затем к стержню подводили тепло. Стержень выпрямлялся и поднимал груз, но стоило вентилятору охладить стержень, как он снова изгибался. Процесс изгиба и выпрямления стержня мог продолжаться сколь угодно долго. Это была действующая модель теплового двигателя, у которого твёрдое рабочее тело из золото-кадмиевого сплава в результате нагрева и охлаждения обратимо меняло форму, что было следствием термоупругого мартенситного превращения.

Сплавы имеют поликристаллическое строение, т. е. состоят из множества отдельных кристаллитов (зёрен), которые отличаются ориентацией кристаллических решеток. Поскольку сдвиг атомов при мартенситном превращении происходит в решетке по определенным плоскостям и в определённом направлении, то в силу различной ориентации зёрен сдвиги в каждом зерне будут осуществляться в самых разных направлениях. Поэтому после мартенситного превращения, несмотря на значительную деформацию отдельных кристаллов, образец в целом не претерпевает заметного изменения формы.

Под действием нагрузок увеличивается количество кристаллов с мартенситной деформацией, совпадающей по направлению с приложенным усилием. Процесс развивается до тех пор, пока все кристаллы не выстроятся, а образец в целом не продеформируется в направлении действия силы. При нагреве они возвращаются на свои исходные позиции, восстанавливая первоначальную форму изделия.

Таковы механизмы, благодаря которым реализуется эффект памяти формы, основанный на термоупругом равновесии фаз и управляющем действии нагрузок.

Эффект памяти формы может возникнуть в случае **термомеханической обработки** сплава, создающей внутри материала микронапряжения, действия которых аналогичны действию силовой нагрузки. В результате сплав при охлаждении самопроизвольно принимает одну форму, а при нагреве возвращается к исходной форме. Например, пластина сворачивается в кольцо при охлаждении, а при нагреве выпрямляется или наоборот.

Часто у материалов с памятью формы наблюдается **сверхупругость**. Этот эффект проявляется в том случае, если мартенситное превращение вызывается не охлаждением, а приложением внешней нагрузки. В этом случае наблюдается

Витебский государственный технологический университет

значительная деформация изгиба, которая исчезает при снятии нагрузки. При этом величина упругой деформации на порядок выше, чем у лучших пружинных материалов.

Материалы с памятью обладают высокой **циклической прочностью**, т. е. способностью выдерживать большие знакопеременные нагрузки без разрушения. В этом случае долговечность изделий из сплавов с памятью может быть в тысячи раз больше, чем у изделий из традиционных материалов.

Материалам с памятью присуща высокая **способность рассеивать механическую энергию**. Это связано с тем, что при мартенситных превращениях перестройка кристаллической решетки сопровождается выделением или поглощением энергии. Поэтому если внешняя нагрузка вызывает мартенситное превращение, то происходит интенсивный переход механической энергии в тепловую.

2.8.2 Технология производства сплавов с эффектом памяти формы

Никелид титана в жидком состоянии легко поглощает газы и взаимодействует со многими веществами, поэтому его выплавка производится в вакууме или атмосфере чистого инертного газа. Хорошее качество металла достигается применением комбинированного способа плавки, при котором в начале плавка производится в вакуумной печи, после чего полученный электрод вторично переплавляют в электродуговой вакуумной печи в слитки массой до 1 т.

Никелид титана подвергают обработке давлением в интервале температур 700-900 ºС. Нагрев до более высоких температур опасен из-за сильного окисления и образования хрупкого газонасыщенного поверхностного слоя.

Особенно важную роль играет технологическая операция термофиксации. Сложность этой операции обусловлена проявлением эффекта памяти после придания заготовке из никелида титана требуемой формы. Заготовку деформируют при комнатной температуре. Для сохранения формы и размеров производят жесткое фиксирование по всем степеням свободы с последующим нагревом в вакууме до температуры 650-700 ºС, т. е. до аустенитного состояния. В результате такой операции достигается стабильное состояние структуры и формы, которые объект «запоминает».

Никелид титана в зависимости от состава и условий деформирования может иметь как однократно, так и многократно обратимый эффект памяти. Многократно обратимый эффект памяти проявляется при термоциклировании через интервалы прямого и

Витебский государственный технологический университет

обратного мартенситный переходов. Этот эффект проявляется как в нагруженном, так и не нагруженном состоянии материала и сохраняется практически независимо от числа теплосмен.

Для повышения триботехнических характеристик проводится химико-термическая обработка, состоящая из оксидирования и азотирования трущихся поверхностей.

Сварка никелида титана производится такими же способами, что и других титановых сплавов: аргоно-дуговым, электронно-лучевым и др.

Механическая обработка никелида титана вызывает затруднения. В процессе резания происходят структурные превращения в поверхностном слое, приводящие к появлению эффекта памяти и резкому изменению механических свойств. Для механической обработки следует применять твёрдосплавные резцы с оптимальной геометрией и специальные охлаждающие среды.

2.8.3 Применение материалов с памятью формы

Среди всех известных материалов с памятью формы наиболее перспективным для технического применения является никелид титана (нитинол). Сплавы на основе никелида титана обладают высокой демпфирующей способностью. В узком температурном интервале от 5 до 40 °С они способны восстанавливать предварительно заданные однократные и обратимые деформации, превосходящие деформации, генерируемые обычными упругими элементами. Сплавы на основе никелида титана высокотехнологичны при изготовлении различных полуфабрикатов (пластины, проволока, прутки и т. д.), обладают высокой износо- и коррозионной стойкостью, проявляют высокую биосовместимость с тканями организма человека.

Материалы, обладающие свойством памяти формы и сверхупругости, при воспрепятствовании восстановлению исходной формы при нагреве генерируют механические усилия, называемые реактивными. Реактивные силы могут достигать значительных величин. Эффект генерации реактивных сил может быть использован для создания силовых и энергетических установок. Трубчатый силовой элемент пресса с наружным диаметром 14 мм и толщиной стенки 1 мм развивает усилие до 20000 Н. С целью экономии полезного пространства можно использовать комбинированные конструкции, у которых все рабочие элементы являются активными. Примером такой конструкции является телескопический малогабаритный домкрат (рис. 2.46), у которого сквозные цилиндры развивают деформацию сжатия, а глухие – деформацию растяжения.

Витебский государственный технологический университет

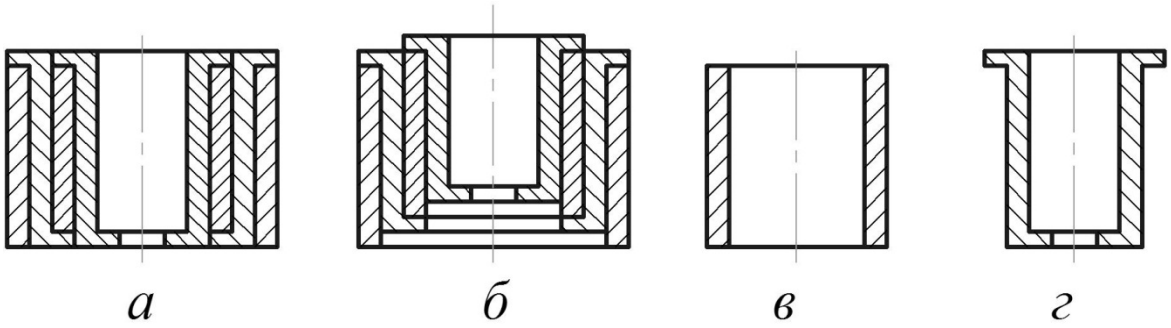


Рисунок 2.46 - Телескопический малогабаритный домкрат, состоящий из сквозных (*в*) и глухих (*г*) цилиндров:
а – исходное состояние; *б* – после восстановления формы

Муфты с термомеханическим соединением труб применяют во многих конструкциях гидросистем реактивных самолётов (рис. 2.47), причем каких-либо аварий, связанных с утечкой масла, не отмечено. Преимуществом муфт, изготовленных из сплавов с памятью формы, помимо их высокой надёжности, является отсутствие высокотемпературного нагрева (в отличие от сварки). Поэтому свойства материала в окрестности соединения не ухудшаются. Муфты такого типа применяются для трубопроводов атомных подводных лодок, надводных кораблей, при ремонте трубопроводов для перекачки нефти со дна моря. В некоторых случаях для изготовления муфт применяются сплавы Cu-Zn-Al.

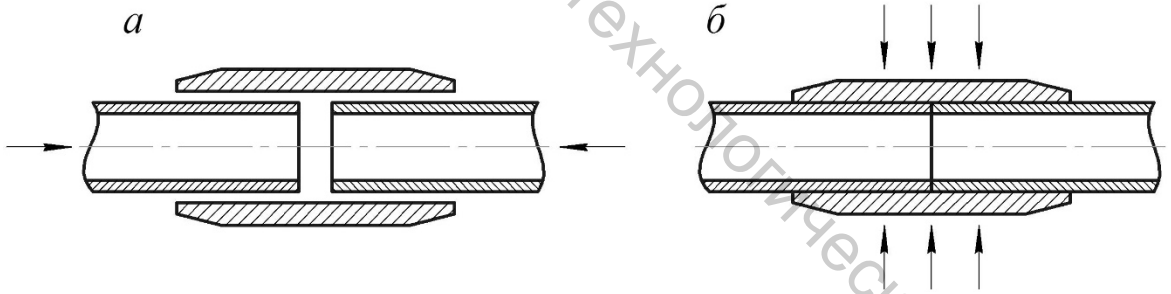


Рисунок 2.47 - Использование муфт с памятью формы:
а – в состоянии сборки; б – конечное состояние;
1 – муфта; 2 – труба

В особых случаях при соединении листовых (плоских) деталей, когда недопустимо использование заклёпок или болтов, могут быть применены штифты с памятью формы (рис. 2.48). Штифты в исходном состоянии имеют раскрытый торец (рис. 2.48 *а*). Перед операцией крепление штифта погружается в сухой лёд или жидкий азот. В результате охлаждения торец штифта выпрямляется, и его вводят в отверстие (рис. 2.48 *б, в*). При повышении температуры до комнатной происходит восстановление формы, торцы штифта разводятся (рис. 2.48 *г*), операция крепления завершается. Применение таких конструкций штифтов с памятью гарантирует герметичность и исключает возможность расстыковки соединений.

Витебский государственный технологический университет

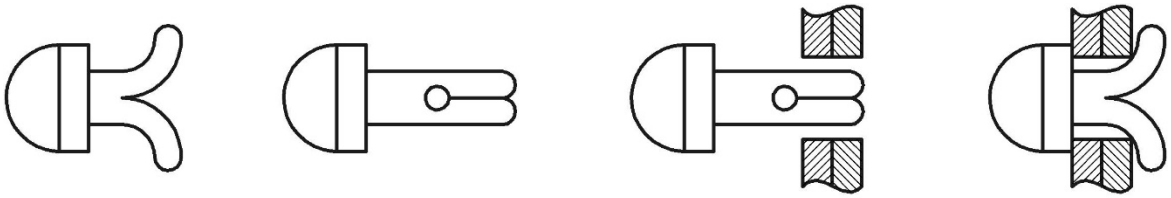


Рисунок 2.48 - Схема конструкции и соединения штифтами с памятью

Разновидностью муфты с памятью формы является электрический соединитель проводов (рис. 2.49). Втулка 1, которая является гнездом соединения, изготавливается из упругой бериллиевой бронзы. В ней прорезается продольный паз, затем разгибаются торцевые части. Сборку соединения производят при низкой температуре, понижение которой осуществляют обдувкой газом или холодным воздухом. Сборку производят в следующей последовательности. Сначала внутрь втулки вводят электрический штекер 2, а снаружи насаживают обжимающее кольцо. При повышении температуры до комнатной кольцо восстанавливает форму, плотно сжимая втулку и штекер.

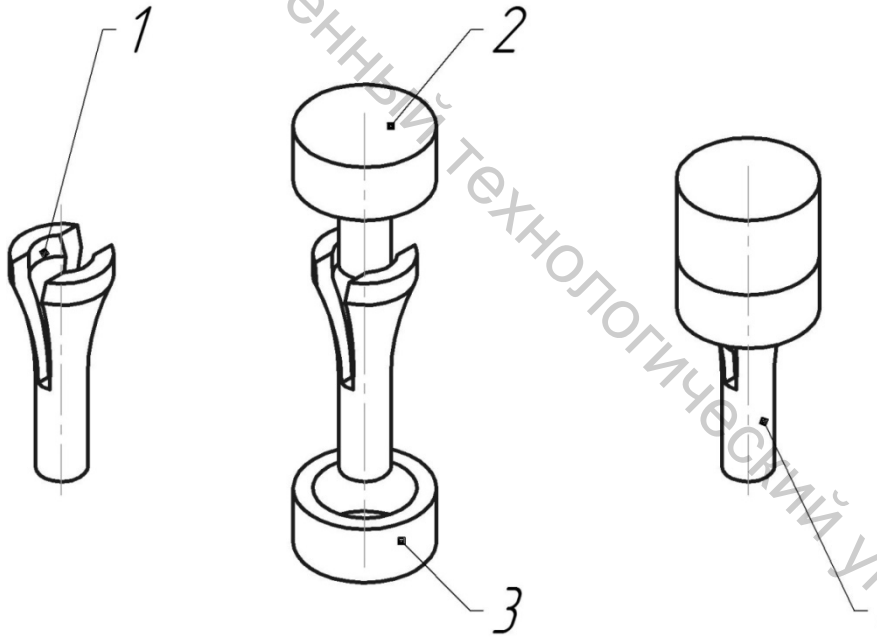


Рисунок 2.49 - Схема сборки электрического соединителя с памятью формы:
1 – втулка; 2 – штекер; 3 – обжимное кольцо с памятью формы;
4 – соединение в сборе

С помощью нитинола герметизируют корпуса радиотехнических приборов без применения сварки или пайки. Плоскую крышку предварительно деформируют в полусферу и свободно устанавливают в корпусе прибора. При нагреве крышка возвращается к исходной плоской форме, при этом врезается в пазы корпуса, надежно изолируя прибор от внешней среды.

Витебский государственный технологический университет

ГЛАВА 3
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

3.1 Вакуумная формовка

Широко распространено производство отливок в разовых песчаных формах. Этот способ применяется для изготовления из различных сплавов отливок широкого диапазона размеров и конфигураций. Технологический процесс литья в песчаные формы состоит из ряда последовательных операций: подготовка материалов, приготовление формовочных и стержневых смесей, изготовление форм и стержней, установка стержней и сборка форм, плавка металла, и заливка его в формы, охлаждение металла и выбивка готовой отливки, очистка отливки, термообработки и отделки.

Материалы, применяемые для изготовления разовых литейных форм и стержней делятся на исходные формовочные материалы и на формовочные смеси; их масса равна в среднем 5-6 тонн на 1 тонну годных отливок. При изготовлении формовочной смеси используют отработанную формовочную смесь, выбитую из опок, свежие песчано-глинистые материалы, добавки, улучшающие свойства смеси, воду. Приготовление смеси производят в определенной последовательности на смесеприготовительном оборудовании: ситах, сушилах, дробилках, мельницах, магнитных сепараторах, смесителях и т. п.

Формы и стержни изготавливают на специальном формовочном оборудовании. Насыпанная в опоки смесь уплотняется встряхиванием, прессованием или совместно тем и другим способом. Крупные формы заполняют с помощью пескометов. Формы в опоках подвергаются тепловой сушке в литейных сушилах.

После заливки форм жидким металлом и его отвердения отливки обычно выбивают из форм на вибрационных решетках. Полученные отливки поступают в очистное отделение, в котором отделяют пригоревшую смесь, элементы литниковой системы, зачищают остатки литников. Крупные отливки очищают гидравлическим способом в специальных камерах.

Самым многооперационным процессом производства отливок является формовка, реализация которой требует применение большого количества по массе и номенклатуры исходных материалов, а также задействования парка специализированного оборудования.

Особенностью вакуумной формовки является использование только кварцевого песка, пленки и вакуумного насоса. Сущность способа вакуумной формовки и последовательность операций иллюстрируется схемой, представленной на рисунке 3.1. Модельная

Витебский государственный технологический университет

плита 1 с закрепленной на ней моделью 2 монтируется на вакуумируемой камере 3, полость которой соединена сквозными каналами с поверхностью плиты и модели (рис. 3.1 *а*)

Полимерную пленку 4 толщиной 0,05-0,10 мм в течение нескольких секунд нагревают электрическим нагревателем 5 до перевода пленки в пластическое состояние (рис. 3.1 *б*).

Пленку накладывают сверху на модель (рис. 3.1 *в*), а полость камеры 3 подключают к вакуумному насосу. При этом пленка плотно облегает поверхность модельной плиты и модели, точно воспроизводя её контур.

На модельную плиту устанавливают опоку 6, которая через вытяжную камеру соединена с трубопроводом 7 и коллектором 8 (рис. 3.1 *г*). В опоку засыпают сухой мелкозернистый песок без связующего и предварительно уплотняют песок легкой вибрацией (рис. 3.1 *д*).

Далее отформовывают литниковую чашу, удаляют избыток песка из полуформы, накладывают на её поверхность полимерную пленку (без предварительного её нагрева) и уплотняют формовочный материал отсосом воздуха (вакуумированием формовочного материала) (рис. 3.1 *е*).

После вакуумирования полуформа приобретает необходимую прочность. Полуформу отключают от вакуумной системы и отделяют от модельной плиты (рис. 3.1 *ж*).

Вторую полуформу изготовляют аналогично, затем собирают из них форму. После сборки формы можно выполнять заливку. В процессе сборки формы, заливки металла и затвердевания отливки опоки подключены к вакуумному насосу (рис. 3.1 *з*). Как только температура отливки достигает значения, необходимого для сохранения её прочности, насос отключают, а песок, удаляемый из опок, через охладительное и пылеулавливающее устройство поступает в бункер (рис. 3.1 *и*).

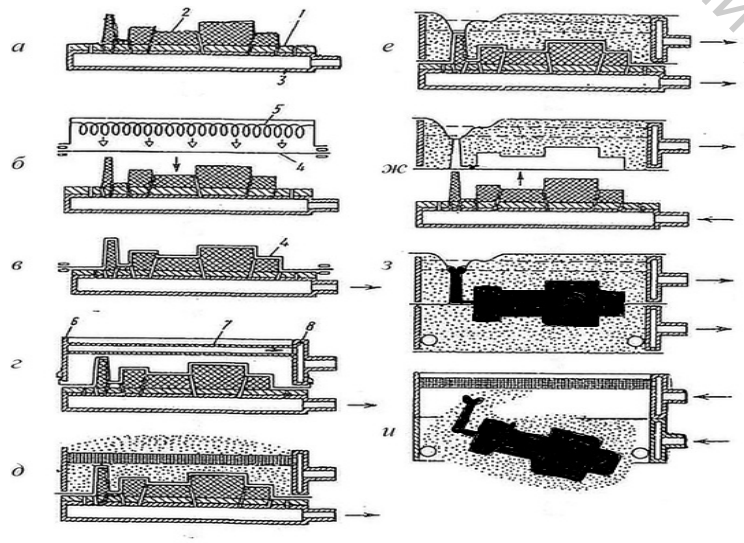


Рисунок 3.1 - Последовательность операций при вакуумной формовке

Витебский ГТУ Государственный технологический университет

При заливке пленка испаряется либо сгорает под влиянием заливаемого металла. Под воздействием вакуума продукты деструкции пленки проникают в форму и вместе с частицами песка образуют тонкую оболочку, которая упрочняет граничный слой формы. Это наряду с противопригарным покрытием обеспечивает получение отливок с низкой шероховатостью поверхности, что не требует дополнительных затрат на финишные операции очистки отливок.

Достоинства и недостатки вакуумной формовки

По сравнению с литьем в химически твердеющие или сырые песчаные формы при вакуумной формовке требуется практически в 2 раза меньше рабочих, а оборудование в 2 раза дешевле, чем оборудование для изготовления химически твердеющих форм.

Практически отпадает смесеприготовление, так как подготовка формовочного материала сводится лишь к просеиванию, охлаждению и регенерации использованного песка. Это резко сокращает затраты, связанные с использованием приготовительного оборудования. Значительный экономический эффект достигается за счет отсутствия в формовочном материале связующего вещества.

Производительность труда при формовке повышается в 2-5 раз. Так, цикл изготовления вакуумной формовкой двух полуформ размерами 1200×1400×250 мм составляет 10 мин. Цикл изготовления этих же форм по традиционной технологии составляет 40-60 мин.

По сравнению с встряхиванием и подпрессовкой вакуумная формовка обеспечивает равномерно высокую твердость, в результате разброс размеров уменьшается в среднем в два раза.

Полимерная пленка между моделью и песчаной формой обеспечивает снижение сопротивления трению, что позволяет извлекать модели с нулевым уклоном.

Высокая размерная точность отливок достигается путем использования отсортированного формовочного песка, отсутствием износа модельной оснастки, высокой равномерной степенью уплотнения песка, отсутствием литейных уклонов, отсутствием изменения размеров формы из-за улетучивающихся добавок формовочного материала.

В результате этого обеспечивается постоянство массы отливок больших размеров и сложной геометрической формы. Кроме того, обеспечивается высокая степень воспроизводимости при серийном производстве, от партии к партии не наблюдается каких-либо различий.

Способ вакуумной формовки можно использовать для получения отливок практически из любых сплавов, при любом уровне серийности, без каких-либо ограничений в отношении толщины стенок отливки. Однако имеются ограничения по сложности, высоте и конфигурации отливок.

Вакуумная формовка перспективна для получения отливок из сплавов, склонных к трещинообразованию при высокой температуре,

Витебский государственный технологический университет

поскольку этот способ позволяет регулировать прочность формы после образования на отливке твердой корки.

Область применения вакуумной формовки в отношении размеров отливаемых заготовок ограничивается практически только размерами опоки и мощностью вакуумного насоса.

Полученная вакуумной формовкой отливка массой 1000 кг размером 2020×405 мм заняла первое место на съезде литейщиков США в 2005 г. Отливка предназначена для гусеничного транспортера НАСА. Это стало заслуженным признанием способа вакуумной формовки и доверия к нему производителей литых деталей.

Витебский государственный технологический университет

3.2 Производство высокоточных сложных отливок по разовым моделям

Особенность литья по разовым моделям заключается в однократном использовании модели, которая остается в форме и удаляется из нее путем выплавления, газофицирования, растворения, испарения или размораживания. Наиболее эффективными для применения в литейном производстве оказались выплавляемые и газофицируемые модели.

3.2.1 Литье по выплавляемым моделям

Сущность процесса заключается в следующем. Модели или звено моделей 2 изготовляют в разъемной пресс-форме 1, рабочая полость которой имеет конфигурацию отливки с припусками на усадку и обработку резанием (рис. 3.2 *а*).

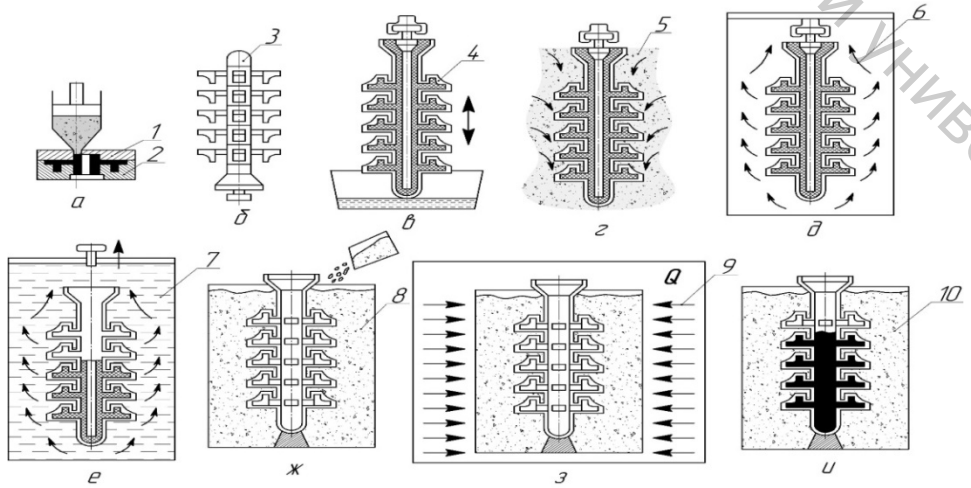


Рисунок 3.2 - Последовательность изготовления многослойной оболочковой формы по выплавляемым моделям:

а – изготовление модели; б – сборка блока; в - погружение блока в жидкую смесь; г – обсыпка; д – сушка; е – удаление модели; ж – засыпка; з – прокаливание; и – заливка; 1 – пресс-форма; 2 – модель; 3 – блок моделей; 4 – оболочка; 5 – огнеупорный материал; 6 – воздушный поток; 7 – вода; 8 – наполнитель; 9 – печь; 10 – прокаленная форма

Модель изготовляют из материалов, имеющих невысокую температуру плавления (воск, стеарин, парафин), способных растворяться (карбамид) или сгорать без образования твердых остатков (полистирол). Готовые модели или звенья моделей собирают в блоки 3 (рис. 3.2 *б*), включающие модели элементов литниковой системы из того же материала, что и модель. Блок моделей состоит из звеньев, центральная часть которых образует модели питателей и стояка. Модели чаши и нижней части стояка изготовляют отдельно и устанавливают в блок при его сборке. Блок моделей погружают в емкость с жидкой формовочной смесью — суспензией для оболочковых форм, состоящей из пылевидного огнеупорного материала, например кварца или электрокорунда, и связующего (рис. 3.2 *в*). В результате на поверхности модели образуется тонкий (менее 1 мм) слой суспензии 4. Для упрочнения этого слоя, увеличения его толщины на него наносят слои огнеупорного зернистого материала 5 (мелкий кварцевый песок, электрокорунд, зернистый шамот) (рис. 3.2 *г*). Операции нанесения суспензии и обсыпки повторяют до получения на модели оболочки требуемой толщины (3-10 слоев).

Каждый слой покрытия высушивают на воздухе или в парах аммиака 6, что зависит от связующего (рис. 3.2 *д*). После сушки оболочковой формы модель удаляют из нее выплавлением, растворением, выжиганием или испарением. На рисунке 3.2 *е* показан процесс удаления выплавляемой модели в кипящей воде 7. Так получают многослойную оболочковую форму по выплавляемой модели. Для упрочнения перед заливкой оболочковую форму помещают в металлический контейнер и засыпают огнеупорным материалом 8 (кварцевым песком, мелким боем использованных оболочковых форм) (рис. 3.2 *ж*).

Для удаления остатков моделей из формы и упрочнения связующего контейнер с оболочковой формой помещают в печь 9 для прокаливания (рис. 3.2 *з*). Форму прокаливают при температуре 1223-1273^0 К. Прокаленную форму 10 извлекают из печи и заливают расплавом (рис. 3.2 *и*). После затвердевания и охлаждения отливки до заданной температуры форму выбивают, отливки очищают от остатков керамики и отрезают от них литники.

Во многих случаях оболочки прокаливают в печи до засыпки огнеупорным материалом, а затем для упрочнения их засыпают предварительно нагретым огнеупорным материалом. Это позволяет

Витебский государственный технологический университет

сократить продолжительность прокаливания формы перед заливкой. Малая шероховатость поверхности формы при достаточно высокой огнеупорности и химической инертности материала позволяет получать отливки с поверхностью высокого качества.

После очистки отливок от остатков оболочковой формы шероховатость их поверхности характеризуется величиной Rz = 40-10 мкм, а в отдельных случаях достигает Ra = 2,5 мкм.

Отсутствие операций разъема моделей и формы; использование для изготовления моделей материалов, позволяющих не разбирать форму при удалении модели; высокая огнеупорность материалов формы; нагрев ее до высоких температур перед заливкой – все это обеспечивает возможность получения отливок сложнейшей конфигурации, максимально приближающийся к конфигурации готовой детали практически из любых сплавов. Коэффициент точности отливок по массе может достигать 0,85-0,95, что резко сокращает объемы обработки резанием и отходы металла в стружку. Точность отливок соответствует 8-11-му квалитетам, а припуски на обработку резанием для отливок размером до 50 мм составляют около 1,4 мм, а размером до 500 мм - около 3,5 мм. Поэтому литье по выплавляемым моделям относится к прогрессивным материало- и трудосберегающим технологическим процессам обработки металлов.

Наряду с преимуществами способ обладает следующими недостатками:

1) процесс изготовления формы многооперационный, трудоемкий и длительный;

2) большое число технологических факторов, влияющих на качество формы и отливки, и соответственно сложность управления качеством;

3) большая номенклатура материалов, используемых для получения формы (материалы для моделей, суспензии, обсыпки блоков, опорные материалы);

4) сложность манипуляторных операций изготовления моделей и форм, автоматизации этих операций;

5) повышенный расход металла на литники и поэтому невысокий технологический выход годного.

Указанные преимущества и недостатки определяют эффективную область использования литья в оболочковые формы по выплавляемым моделям:

1) изготовление отливок, максимально приближающихся по конфигурации к готовой детали с целью снижения трудоемкости обработки металлов и сплавов резанием; замена трудоемких операций сварки или пайки для повышения жесткости, герметичности, надежности конструкций детали, узла;

2) изготовление тонкостенных крупногабаритных отливок повышенной точности с целью снижения массы конструкции при по-

Витебский государственный технологический университет

вышении ее прочности, герметичности и других эксплуатационных свойств;

3) изготовление отливок повышенной точности из сплавов с особыми свойствами и структурой.

Производство отливок по выплавляемым моделям находит широкое применение в различных отраслях машиностроения и в приборостроении.

Использование литья по выплавляемым моделям для получения заготовок деталей машин взамен изготовления их из кованых заготовок или проката позволяет в среднем уменьшить отход металла в стружку на 34-90 %; снизить трудоемкость обработки резанием на 25-85 %; себестоимость изготовления деталей на 20-80 %.

Однако следует учитывать, что экономическая эффективность существенно зависит от выбора номенклатуры отливок, изготовляемых этим способом. Только при правильном выборе номенклатуры деталей можно достичь высокой экономической эффективности производства.

Литье по выплавляемым моделям широко применяют для изготовления отливок сложной конфигурации массой от нескольких граммов до 10-15 кг. Для литья по выплавляемым моделям применяют различные металлы: среднеуглеродистые стали; конструкционные легированные стали; углеродистые инструментальные стали; литейные коррозионностойкие и кислотоупорные стали; жаропрочные стали и сплавы; латуни; бронзы; силумины и другие цветные сплавы.

Литьем по выплавляемым моделям получают точные отливки лопаток турбин, клапаны, форсунки, режущие инструменты.

Конструирование деталей, получаемых литьем по выплавляемым моделям, имеет некоторые особенности, связанные с наличием прогреваемой керамической оболочки.

Отношение толщин стенок отливки не должно превышать 4:1. Для получения кромки минимальной толщины следует предусматривать плавное уменьшение толщины сечения, чтобы избежать появления трещин при охлаждении. Практически минимальную толщину кромки можно принимать 0,3–0,4 мм; для деталей, работающих при повышенных температурах, допустимая толщина кромки должна быть не менее 0,6–0,7 мм.

При литье по выплавляемым моделям ребра жесткости располагают на наружных поверхностях отливки. Толщину ребер жесткости принимают 0,7–0,8 мм толщины стенки.

Радиусы закруглений могут изменяться в широких пределах. Минимальный радиус при одинаковых толщинах стенок обычно принимают 1–2 мм. При значительной разности толщин стенок радиусы закруглений увеличивают до 5–10 мм и более.

Отверстия можно получать сквозные и глухие. Сквозные литые отверстия диаметром d = 5 мм и длиной l = (4…6)d получают без затруднений; отверстия диаметром менее 3 мм, а также сквозные

Витебский государственный технологический университет

отверстия при d/l ≤ 0,5 получать затруднительно. Минимальный диаметр отверстия d = 0,5 мм в стенках толщиной 1 мм из цветных металлов и в стенках толщиной 1,5 мм из других сплавов.

3.2.2 Литье по газифицируемым моделям

Литье по газифицируемым моделям в сочетании с такими технологическими процессами, как вакуумная формовка, литье под низким давлением и др., является одним из новейших способов производства отливок. Эта технология решает важнейшую задачу литейного производства – повышение точности отливок до уровня литья по выплавляемым моделям при минимальных издержках производства по сравнению с литьем по многоразовым моделям в песчано-глинистые формы (рис. 3.3 *а*).

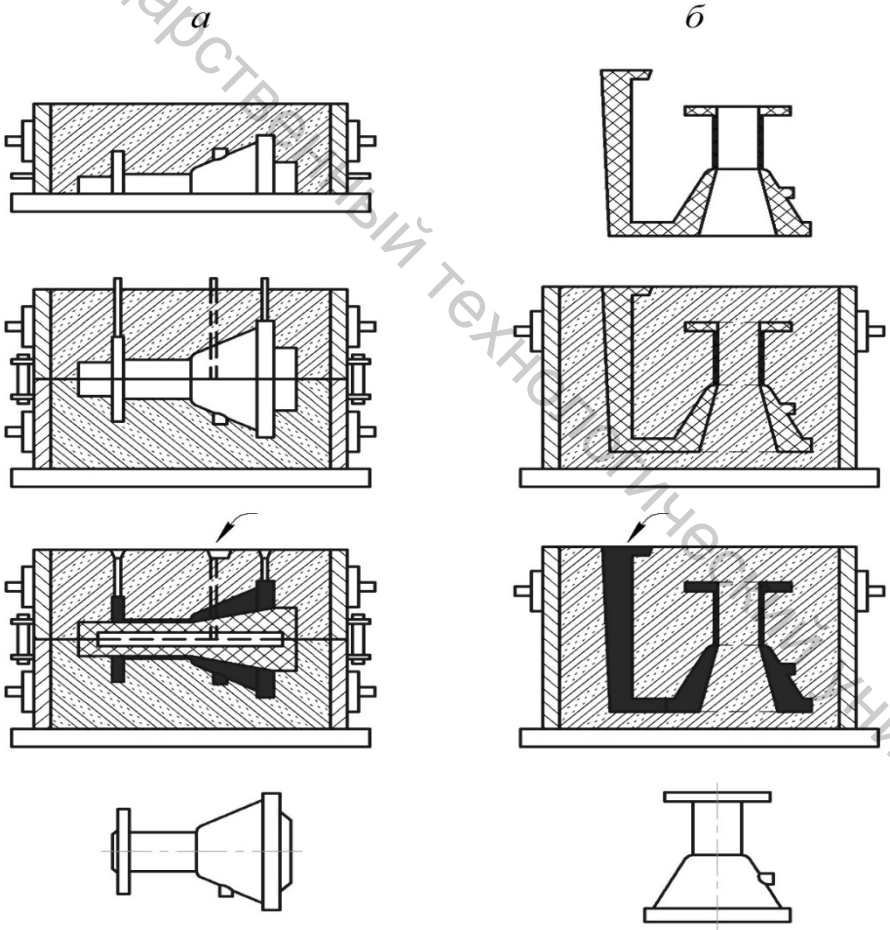


Рисунок 3.3 - Схемы процессов получения отливок:
а – литьем по разъемной многоразовой модели;
б – литьем по разовой газифицируемой модели

Отличительной особенностью литья по газифицируемым моделям является то, что модель удаляют не до заливки металла, а в процессе заливки формы металлом, который вытесняя (замещая)

Витебский государственный технологический университет

«испаряющуюся модель» из формы, занимает освободившееся пространство формы.

Суть способов литья по газифицируемым моделям заключается в следующем (рис. 3.3 *б*).

Разовые пенополистироловые модели изготавливают либо засыпкой в специальные металлические формы (массовое и крупносерийное производство) суспензионного гранулированного полистирола, либо механической обработкой нормализованных пенополистироловых плит (мелкосерийное, единичное производство). Сложные модели делают по частям. Отдельные части модели и литниковую систему соединяют в единый блок склеиванием или сваркой.

Собранную модель окрашивают слоем огнеупорной краски и сушат на воздухе. В итоге получается огнеупорная газопроницаемая оболочка, прочно связанная с пенополистироловой моделью.

Готовую модель устанавливают в специальную опоку-контейнер, засыпают зернистым огнеупорным наполнителем без связующего, уплотняют его вибрацией, закрывают металлической крышкой с отверстиями.

При изготовлении сложных отливок, контейнер после подачи опорного материала, закрывают сверху полиэтиленовой пленкой и создают разрежение 0,04–0,05 МПа (вакуумная формовка).

Приготовленную форму заливают жидким металлом. Модель газифицируется, а полость заполняется жидким металлом.

После затвердевания и охлаждения отливки опоку-контейнер переворачивают, наполнитель высыпается, отделяясь от отливки, а отливка поступает на дальнейшую обработку.

Модельные материалы. В качестве материала для изготовления газифицируемых моделей служит вспенивающийся полистирол. Порообразователем чаще всего служит изопентан. При нагреве до 27,9 °С изопентан закипает и превращается в газ, а при 80-90 °С оболочка размягчается и под действием давления газа деформируется. Этот процесс называется «вспениванием гранул полистирола». При вспенивании гранул в замкнутом объёме они спекаются в монолитную пеномассу – пенополистирол - точно воспроизводя конфигурацию формы, ограничивающей его рост.

Изготовление газифицируемых моделей

Процесс получения моделей в массовом и крупносерийном производстве состоит из двух стадий: предварительное вспенивание в свободном состоянии исходных гранул полистирола и окончательное вспенивание гранул в замкнутой полости пресс-формы.

Предварительная тепловая обработка необходима для получения газифицируемой модели с заданной объёмной массой, которая определяет прочность модели и качество поверхности.

Витебский государственный технологический университет

Подготовленные гранулы засыпают или задувают сжатым воздухом в смазанную специальной смазкой рабочую полость пресс-формы (рис. 3.4 *а*). Нагрев гранул осуществляют методом «теплового удара». Перегретый пар с температурой 125-135 °С под давлением 0,2-0,35 МПа подают непосредственно в пресс-форму, заполненную гранулами полистирола (внутренний тепловой удар). Просачиваясь между гранулами, турбулентный поток пара интенсивно вытесняет воздух, находящийся в порах, и равномерно по всему объёму нагревает полимерный материал, который окончательно вспенивается. Образующийся конденсат под действием расширяющихся гранул отжимается к стенкам пресс-формы и удаляется через специальные дренажные отверстия.

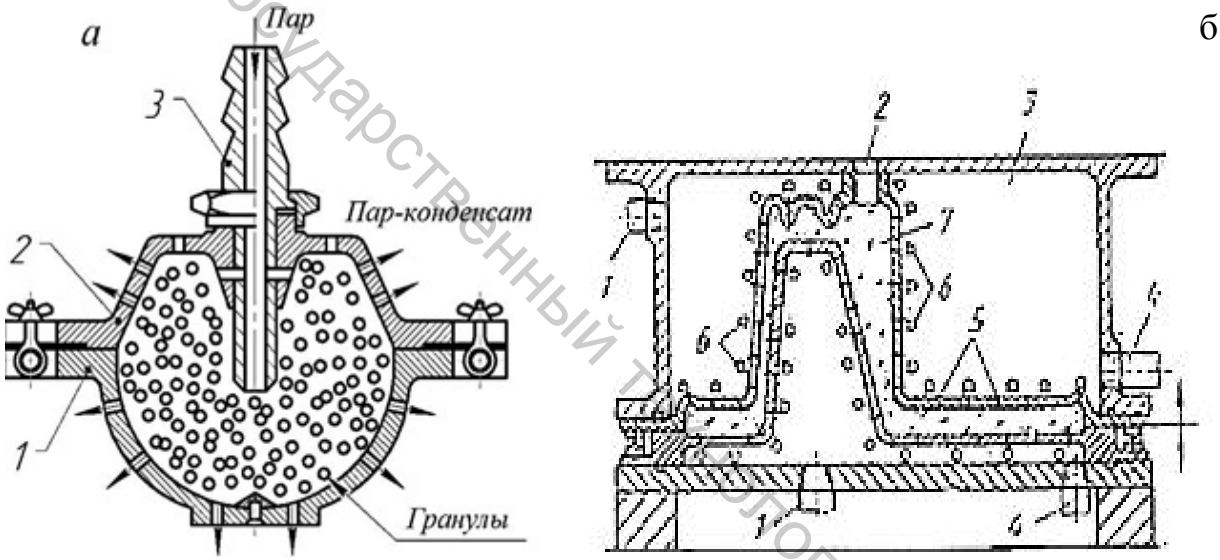


Рисунок 3.4 - Пресс-формы для изготовления газифицируемых моделей внутренним (а) и внешним (б) тепловыми ударами:
а – 1, 2 – нижняя и верхняя части пресс-формы; 3 – инжектор;
б – 1 – штуцер для подачи пара; 2 – отверстия для заполнения пресс-формы гранулами пенополистирола; 3 – камера; 4 – отвод пара;
5 – венты; 6 – форсунки; 7 – модель из пенополистирола

При внешнем тепловом ударе (рис. 3.4 *б*) пресс-форма окружена рубашкой, образующей камеру 3, в которую подается пар. Через венты 5 пар поступает в пресс-форму, предварительно заполненную гранулами пенополистирола. Пар нагревает гранулы, в результате чего происходит их расширение и формирование модели.

Технологический процесс изготовления моделей внешним тепловым ударом обеспечивает их высокое качество. На основе этого способа создано высокопроизводительное оборудование. Это позволило использовать процесс литья по газифицируемым моделям в

Витебский государственный технологический университет

крупносерийном и массовом производстве взамен традиционных методов литья.

Изготовление литейных форм без связующего. В крупносерийном и массовом производстве отливок по газифицируемым моделям используются сыпучие формовочные материалы: кварцевые, циркониевые пески, шамот, магнезит, электрокорунд. Их использование позволяет получать отливки при минимальных затратах на изготовление и выбивку форм, регенерацию формовочного материала.

Процесс формовки осуществляют следующим образом (рис. 3.5). На дно опоки-контейнера насыпают слой сухого песка толщиной 100…150 мм и уплотняют вибрацией. Затем в опоку устанавливают модель или блок моделей и заполняют опоку песком при одновременной вибрации.

Опока-контейнер имеет в стенках отверстия для выхода газа. Для обеспечения высокой газопроницаемости желательно, чтобы частицы песка имели угловатую форму.

Формы для получения массивных и сложных отливок изготовляют из формовочных смесей, которые должны иметь повышенную газопроницаемость и пластичность. Из-за низкой прочности пенополистировых моделей встряхивание опоки с целью уплотнения смеси недопустимо.

Наиболее предпочтительны самотвердеющие жидкоподвижные смеси, которые имеют необходимую прочность, газопроницаемость и позволяют уменьшить опасность деформации модели при формовке.

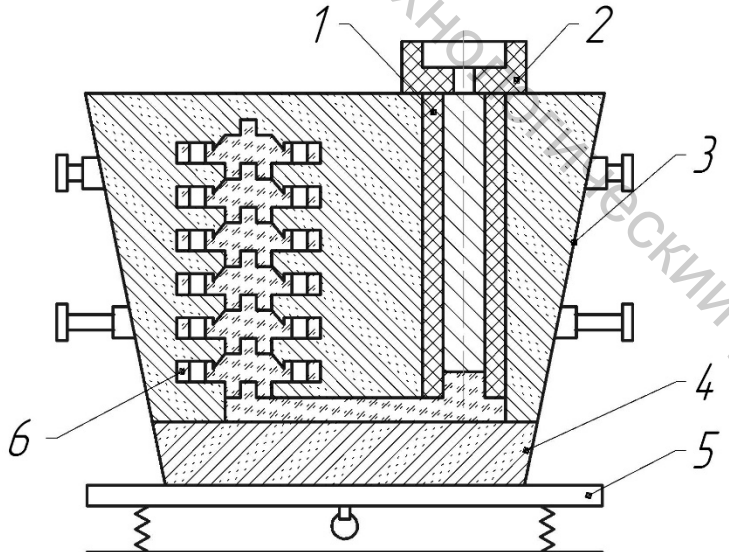


Рисунок 3.5 - Изготовление формы с пенополистироловой моделью без связующего:
1 – керамический стояк; 2 – чаша; 3 – опока-контейнер;
4 – предварительная засыпка; 5 – вибратор; 6 – блок моделей

Эффективность литья по газифицируемым моделям

По сравнению с литьем в песчаные формы имеет место снижение затрат за счет ликвидации стержней, повышения точности отливок по

Витебский государственный технологический университет

размерам и массе и значительного снижения затрат при последующей механической обработке. Общая экономия составляет около 35 %.

Высокая экономическая эффективность достигается в единичном производстве отливок из черных сплавов, что подтверждается широким использованием данного способа для получения литых заготовок крупных штампов в автомобилестроении; отливок для ремонта машин и оборудования; экспериментальных и уникальных отливок в станкостроении.

Областями применения литья по газифицируемым моделям являются следующие:

- изготовление средних и крупных отливок в условиях опытного и мелкосерийного производства;
- изготовление сложных отливок массой до 50 кг с повышенной точностью размеров в условиях серийного и крупносерийного производства из черных и цветных сплавов.

Поистине неограниченные технологические возможности литья по газифицируемым моделям открывают технологии изготовления моделей из фотополимеров методом лазерной стереолитографии. На ОАО «Тушинский машиностроительный завод» (г. Москва) впервые в мировой практике решена задача получения качественных отливок типа «Рабочее колесо» гидротурбины массой до 5000 кг, диаметром 3500 мм, предназначенных для работы на гидроэлектростанции, мощностью от 500 кВт и выше. Такие технологии особенно привлекательны для изготовления опытных, единичных, эксклюзивных, уникальных образцов, поскольку не требуется изготовление специальной оснастки.

3.3 Суспензионное литье

Процесс кристаллизации жидкого металла в форме протекает в следующей последовательности. При начальном соприкосновении жидкого металла со стенками формы в прилегающем слое металла возникает резкий градиент температур и происходит переохлаждение, ведущее к возникновению большого количества центров кристаллизации. Образуется корка затвердевшего металла, характеризующаяся мелкозернистой структурой.

После образования корки условия теплоотвода изменяются, градиент температур в прилегающих слоях уменьшается. В результате из небольшого количества центров кристаллизации начинают расти столбчатые кристаллы, ориентированные по нормали к поверхности корки.

В середине отливки нет определенной направленности теплоотвода. Температура металла выравнивается по объему. В результате образуется равновесная структура.

Витебский государственный технологический университет

Таким образом, в процессе кристаллизации в отливке образуются три зоны: наружная мелкозернистая корка, средняя зона столбчатых кристаллов и центральная зона с равновесной структурой. Такое строение затвердевшего металла отливки приводит к анизотропии свойств по объему отливки.

Сущность суспензионного литья состоит в том, что при заполнении литейной формы перегрев жидкого металла снимается благодаря внутренним теплоотводам, а по объему металла распределяются дополнительные активные центры кристаллизации, воздействие которых проявляется в увеличении скорости и развитии преимущественно объемного затвердевания и диспергировании структуры литого металла.

Различают два вида суспензионной разливки: эндогенную и экзогенную.

Эндогенную суспензионную разливку осуществляют путем наложения на кристаллизующуюся жидкую фазу внешних воздействий: механических, ультразвуковых или электромагнитных.

Экзогенную суспензионную разливку осуществляют введением в жидкий металл порошкообразных добавок. В качестве дисперсных добавок применяют стальную или чугунную дробь, гранулы различных металлов, ферросплавов или лигатур, железный порошок.

При изготовлении фасонных отливок различной массы от 200 кг до 40 т находит применение ввод дисперсных частиц с помощью тангенциального смесителя (вихревой воронки). Этот способ заключается в том, что в результате тангенциального подвода литника из приемной чаши в смесительную емкость в последней создается вращательное движение жидкого металла с образованием вихревой воронки. Дисперсные частицы из бункера подаются в центр воронки, захватываются вращающимся жидким металлом, распределяются им и уносятся в полость формы. Введенные данным способом дисперсные частицы равномерно распределяются по объему отливки.

При литье крупных отливок и слитков, когда разовая порция дисперсных частиц превышает 1-2 т, бункер-дозатор рекомендуется устанавливать стационарно для каждой заливаемой опоки над смешивающей воронкой. При литье мелких и средних отливок, когда масса порции дисперсных частиц не превышает 1 т, бункер подвешивают к разливочному ковшу или загрузочный бункер устанавливают коаксиально к заливочной чаше.

Весьма перспективным является метод суспензионного модифицирования расплава непосредственно в полости литейной формы. Технологический процесс суспензионного модифицирования осуществляется путем введения дисперсного порошка в полость формы с помощью пенополистироловых моделей. Дисперсный порошок вводят в пенополистироловую модель в виде плакированных металлическими

Витебский государственный технологический университет

частицами подвспененных полистироловых гранул, которые окончательно вспениваются в пресс-форме.

Технико-экономическая эффективность суспензионной заливки состоит в следующем:

- снижение брака по линейным дефектам на 30-50 % благодаря повышению качества отливок;
- сокращение объема прибылей на стальных отливках на 20-30 %, что обеспечивает увеличение выхода годных изделий на 5-10 %;
- снижение трудоемкости работ по устранению горячих трещин на 25-50 %;
- снижение брака в результате пригара на 25-30 % ,что обеспечивает уменьшение трудоемкости работ по обработке и очистке отливок на 10-15 %;
- сокращение времени выдержки отливок в форме на 15-20 %, что соответственно увеличивает производительность;
- повышение физико-механических и специальных свойств, приводящее к увеличению срока службы литых деталей на 10-20 %.

3.4 Литье с направленной кристаллизацией

Для получения плотных отливок из сплавов, характеризующихся большой объемной усадкой при кристаллизации, необходимо создать направленное затвердевание по направлению к прибыли. Кристаллизация является направленной, если процесс распространяется от тонких частей отливки к толстым или от наиболее удаленных мест отливки (периферии) по направлению к прибыли. В этом случае температурный градиент в системе «отливка – прибыль» остается по отношению к прибыли в течение всего процесса затвердевания положительным и прибыль затвердевает в последнюю очередь.

Литье с направленной кристаллизацией используют для изготовления отливок, у которых один габаритный размер превосходит два других в несколько раз, более 10, а так же при наличии технического требования направленности структуры в отливке.

Направленная кристаллизация предполагает направленный теплоотвод. Поэтому литейную форму, условия заливки и затвердевания отливки рассчитывают таким образом, чтобы теплоотвод был максимально интенсивным по требуемому направлению кристаллизации.

Литье с направленной кристаллизацией используют при изготовлении из алюминиевых и магниевых сплавов крупногабаритных фасонных отливок с толщиной стенок до 3…4 мм. Многие магниевые и высокопрочные алюминиевые сплавы имеют широкий интервал кристаллизации, и вследствие этого в отливках, полученных из таких

Витебский государственный технологический университет

сплавов, при затвердевании образуются усадочные дефекты (пористость, рыхлоты).

Существует три основных способа литья с направленной кристаллизацией. По первому способу (рис. 3.6) последовательное направленное затвердевание отливки происходит в процессе заливки сплава при непрерывном подводе к фронту затвердевания новых порций металла.

Литейную форму 6 крупногабаритной отливки устанавливают на столе 7, имеющем гидравлический привод. Литниковая система состоит из вертикальных щелевых питателей 4 и колодцев 5, расположенных по периметру отливки. Внутри колодцев находятся металлические трубки 3 для подвода расплава в форму, закрепленные в литниковой чаше 2. Отверстия трубок в чаше перекрываются коническими заглушками 1.

Литниковую чашу нагревают газовыми горелками до 200-250 °С, а литниковые трубки нагревают электроконтактным способом до 500-800 °С. После заполнения литниковой чаши жидким металлом заглушки вынимают, а форму начинают опускать с определенной скоростью.

Процесс заключается в том, что расплав под действием гравитационной силы заливают в матрицу, затем пуансоном осуществляют окончательное оформление контуров отливки и последующее ее уплотнение (выдержку под давлением) до окончания затвердевания. После извлечения из пресс-формы отливку подвергают различным видам последующей обработки.

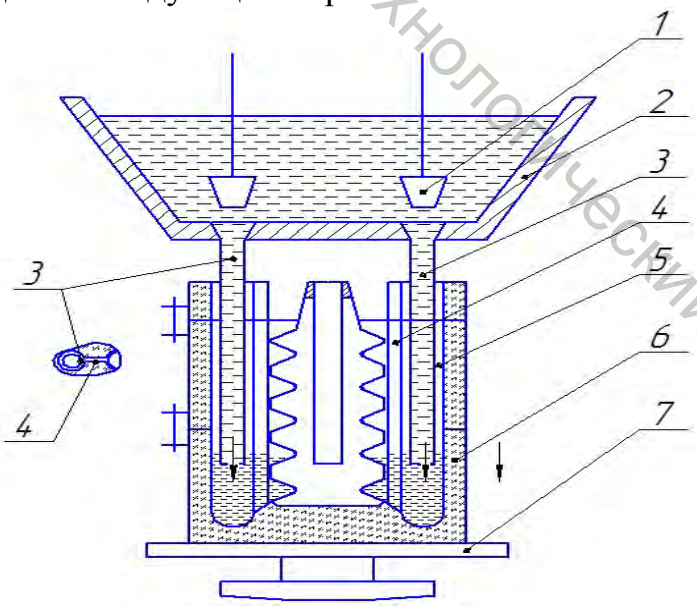


Рисунок 3.6 - Схема установки для направленной кристаллизации путем последовательного заполнения формы:
1 – заглушки; 2 – литниковая чаша; 3 – трубка для подвода расплава в форму; 4 – щелевой питатель; 5 – колодец; 6 – литейная форма; 7 – стол

Витебский государственный технологический университет

Скорость опускания формы определяют из условия неразрывности потока жидкого металла

$$V_{\text{оп}} = \frac{\mu S_{\text{пит}} n\sqrt{2gH_0}}{S_{\text{ф}}},$$

где $V_{\text{оп}}$ – скорость опускания формы, м/с; μ – коэффициент расхода (для стальных трубок диаметром 12-16 мм равен 0,6–0,8); $S_{\text{пит}}$ – площадь поперечного сечения литниковой трубки, м^2; n – количество литниковых трубок; g – ускорение свободного падения, м/с^2; H_0-высота отливки, м; $S_{\text{ф}}$ – площадь поперечного сечения отливки, м^2.

Размеры поперечного сечения литниковой трубки определяют из условия материального баланса в зоне затвердевания

$$S_{\text{пит}} = \frac{k}{\mu\sqrt{2gH_0 t_{\text{з}}}} S_{\text{ф}},$$

где $t_{\text{з}}$ – время заполнения формы металлом, с.

По второму способу литейную форму, нагретую выше температуры ликвидуса сплава, устанавливают на охлаждаемый кристаллизатор 5 и заливают перегретым сплавом (рис. 3.7) . Форма при заливке находится внутри нагревающего устройства (индуктора). После небольшой технологической выдержки (3-5 с) форму опускают и выводят из зоны нагрева с определенной скоростью (3-50 мм/с) вместе с кристаллизатором. При этом в процессе затвердевания формируется направленная структура отливки.

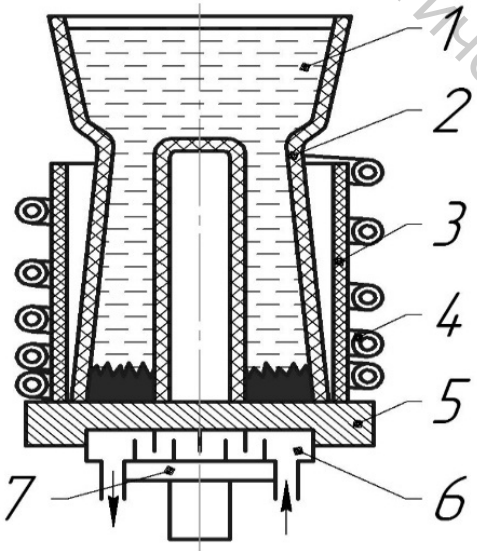


Рисунок 3.7 - Схема установки для направленной кристаллизации путем нагрева формы:
1 – литейная чаша; 2 – форма; 3 – графитовая вставка; 4 – индуктор; 5 – кристаллизатор; 6 – устройство охлаждения кристаллизатора; 7 – шток

Витебский государственный технологический университет

Получение направленной структуры требует задания определенного градиента температуры у фронта затвердевания, обеспечивающего динамическую устойчивость поверхности раздела твердой и жидкой фаз. Плоский фронт кристаллизации устойчив при отсутствии концентрационного переохлаждения, что определяется условием

$$\frac{T_{ж}}{V_{з}} \geq \frac{\omega_{л} C_{т}\left(1 - k_{р}\right)}{k_{р} D_{ж}},$$

где $T_{ж}$ – градиент температуры в жидкой фазе, °С/м; $V_{з}$ – скорость затвердевания, м/с; $\omega_{л}$ – тангенс угла наклона линии ликвидуса сплава; $C_{т}$ – относительная концентрация второго компонента в твердой фазе; $k_{р}$ – коэффициент распределения компонента, равный $k_{р} = \frac{C_{т}}{C_{ж}}$($C_{ж}$- относительная концентрация второго компонента в жидкой фазе); $D_{ж}$ – коэффициент диффузии второго компонента в жидкой фазе.

Максимальная скорость затвердевания из условия теплового баланса на фронте затвердевания в предположении $T_{ж} \rightarrow 0$ равна

$$V_{max} = \frac{\lambda_{т} T_{т}}{\rho_{т} L},$$

где $\lambda_{т}$ – коэффициент теплопроводности твердого металла, Вт/м °С; $T_{т}$ – градиент температуры в твердой фазе °С/м; $\rho_{т}$ – плотность твердой фазы кг/м^3; L – удельная теплота кристаллизации, кДж/кг.

Этим способом получают литые заготовки из никелевых жаропрочных сплавов типа ЭЦ 765,ЭЦ 893 магнитных сплавов и др.

По третьему способу (рис. 3.8) направленную кристаллизацию осуществляют посредством одновременного охлаждения днища формы и нагрева металла в её верхней части.

Процесс затвердевания отливки в форме осуществляют следующим образом. В форму 1 заливают расплавленный металл и накрывают крышкой 2. Затем включают устройство распылительного водяного охлаждения 5, предназначенного для охлаждения днища формы. Одновременно включают электронагревательный элемент 3, который управляется автоматическим регулятором температуры металла в верхней части формы 1. Автоматический регулятор задает перепад температур по высоте формы и обеспечивает получение заданного вектора кристаллизации металла в форме и завершение процесса кристаллизации одновременным затвердеванием металла по всему объему формы.

Витебский государственный технологический университет

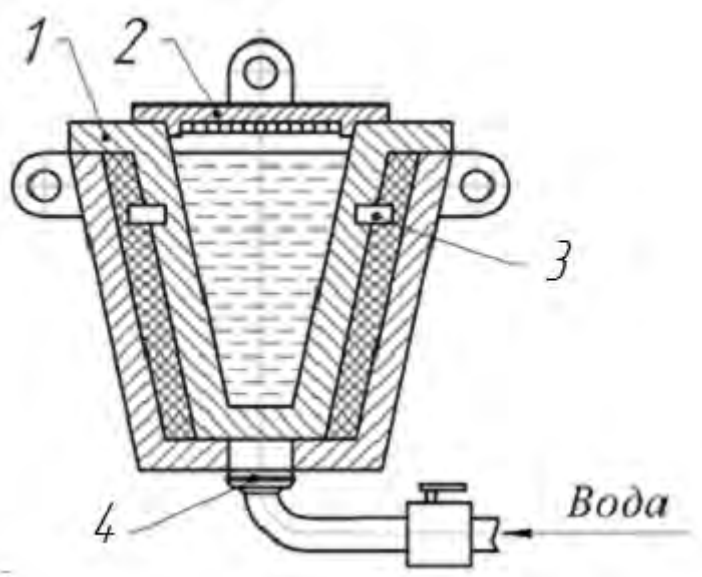


Рисунок 3.8 - Схема установки для направленной кристаллизации путем одновременного охлаждения и нагрева частей формы:
1- форма; 2 - крышка; 3 - нагревательный элемент;
4 - водяное охлаждение

Процесс кристаллизации металла в форме сопровождается направленным ростом столбцов кристаллов металла по всему объему отливки от днища до поверхности верхней части формы. Последовательное уменьшение объема металла в форме (усадка) обеспечивает выдавливание из металла металлических включений на поверхность металла, затвердевающую в последнюю очередь. Это способствует очистке металла от неметаллических включений, повышению его однородности, достижению более плотной структуры и улучшению его физико-механических характеристик.

3.5 Производство отливок с монокристаллической структурой

К ряду изделий машиностроительного производства предъявляются особо высокие требования. Типичными представителями таких изделий являются энергетические установки и, в частности, лопатки газотурбинных двигателей. Условия работы лопаток сверхтяжелые: высокая температура, напряжения растяжения, вибрация, коррозия и эрозия. Разумеется, для изготовления лопаток используются только жаропрочные, жаростойкие, обладающие продолжительной прочностью материалы. Температура газового потока реактивных турбовинтовых двигателей превышает температуру плавления материала лопаток. Поэтому в лопатках предусматривается система каналов для эффективного охлаждения. Наличие каналов обусловливает разностенность лопаток. Внутренние полости разнообразны по

Витебский государственный технологический университет

конфигурации. Толщина стенок сложных пустотелых отливок составляет 0,8 … 3,5 мм. При этом ресурс работы лопаток должен составлять не менее 10000 ч.

Разрушение материала лопаток происходит, главным образом, по межзеренным поверхностям. Значит, для обеспечения надежности лопаток необходимо устранить межзеренные поверхность, т. е. перейти к качественно новой структуре материала лопаток: от поликристаллической к монокристаллической. Такой переход требует применения новых высоких технологий.

Лопатки могут быть изготовлены сваркой, штамповкой или литьем. Преимущественно во всем мире применяется литье по выплавляемым моделям. Литые лопатки дешевле штампованных на 30 % при меньшем количестве отходов. Литье позволяет сократить расход металла на 18…20 %, снизить трудоемкость на 40 %, себестоимость на 20…35 % и улучшить механические свойства на 30…40 % .

Сущность новых технологий заключается в применении бестигельной плавки в сочетании с объемной направленной кристаллизацией и регулируемой температурой при заливке и затвердевании металла в керамической форме.

Схема установки для литья лопаток с монокристаллической структурой представлена на рисунке 3.9.

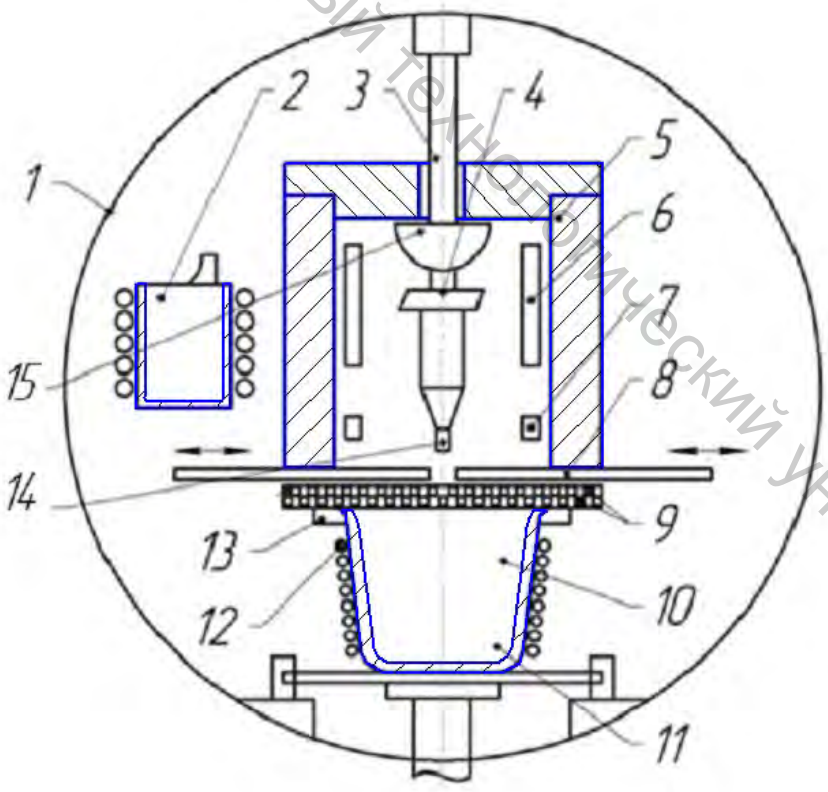


Рисунок 3.9 - Схема установки для литья монокристаллических лопаток: 1 – вакуумная камера; 2 – индукционная плавильная печь; 3 – механизм вертикального перемещения формы; 4 – керамическая форма; 5 – печь подогрева формы; 6 – нагреватель верхней зоны; 7 – нагреватель нижней зоны; 8 – раздвижной экран; 9 – тепловой экран; 10 – емкость

ВитебскийГосударственныйТехнологическийУниверситет

для кристаллизации; 11 – нижняя часть емкости с жидкометаллическим охладителем; 12 – нагревательные элементы; 13 – водоохлаждаемая рубашка емкости с жидкометаллическим охладителем; 14 – затровка; 15 – литниковая чаша

Процесс производства монокристаллических лопаток состоит в следующем. Первоначально изготавливают керамическую оболочковую форму лопатки с расположенными внутри стержнями для формообразования внутренних полостей. В нижнюю часть формы помещают монокристаллическую затравку 14 заданной кристаллографической направленности.

Керамическую форму 4 с помощью вертикального механизма 3 опускают и устанавливают в печи подогрева форм 5 в необходимое по технологии положение относительно нагревателей верхней зоны 6 и нижней 7. Под нагревателем 7 перемещают в нужное горизонтальное положение раздвижной экран 8. В индукционную плавильную печь 2 помещают шихтовую заготовку требуемого веса. Закрывают камеру печи 1 и вакуумируют. Включают печь подогрева форм 5. При достижении заданной температуры керамической формы включают нагрев индукционной плавильной печи 2, в которой расплавляют жаропрочный сплав и заливают его в керамическую форму 4. Включают механизм вертикального перемещения формы 3 и керамическая форма с заданной скоростью перемещается из зоны нагрева через раздвижной 8 и тепловой 9 экраны в емкость с жидкометаллическим охладителем 10.

Скорость погружения оболочковой формы в жидкометаллический охладитель определяется скоростью роста монокристалла внутри формы. Для каждого сплава этот параметр определяется экспериментально.

После того как форма с отливкой 4 погрузилась полностью в охладитель, нагреватели 6, 7 выключаются и при снижении температуры в печи подогрева форм 5 до 900–1000 °С керамическую форму с отливкой через экраны 8, 9 поднимают в исходное положение, где она охлаждается до температуры 100–200 °С, производят разгерметизацию установки и извлечение формы с отливкой. Далее процесс повторяется с другой формой.

3.6 Литье изделий с аморфной структурой

3.6.1 Аморфное состояние сплавов

Аморфное состояние – это одна из форм существования твёрдых тел. Веществом в аморфном состоянии называется твёрдое некристаллическое вещество, образующееся в результате охлаждения жидкости со скоростью, $10^4 - 10^6$ С°/с при условии содержания

Витебский государственный технологический университет

достаточного количества аморфизаторов, которыми являются металлы и неметаллы: бор, фосфор, кремний, углерод.

Считается, что в принципе расплав любого вещества можно перевести в аморфное состояние, если создать необходимые условия переохлаждения. Однако некоторые металлы Pb, Cu, Ag, Zn не удаётся получить в аморфном состоянии даже при скорости охлаждения 10^{10} С°/с. При оценке склонности к образованию аморфной фазы очень важной является оценка критической скорости охлаждения, необходимой для предотвращения образования кристаллической фазы.

Большинство жидкостей при температурах, близких температуре ликвидуса, в условиях изотермической выдержки, должны переходить в кристаллическое состояние. Поэтому возможность перевода вещества из жидкого состояния в аморфное определяется скоростью, с которой это вещество охлаждается в той области температур, где вероятность кристаллизации наиболее высока.

При охлаждении жидкости ниже температуры плавления она либо кристаллизуется, либо аморфизируется. При кристаллизации вязкость, объём и энтропия изменяются скачкообразно, а при аморфизации – быстро и непрерывно.

Структура и свойства аморфного материала зависят от характера изменения предшествующего термического состояния, например от скорости охлаждения.

Аморфное состояние характеризуется двумя основными особенностями: его свойства (механические, тепловые, электрические и др.) в естественных условиях не зависят от направления (изотропность свойств). При повышении температуры вещество, размягчаясь, переходит в жидкое состояние постепенно т. е. отсутствует определённая точка плавления.

Эти особенности обусловлены отсутствием в аморфных телах **дальнего порядка –** характерной для кристаллов строгой повторяемости во всех направлениях одного и того же элемента структуры (атома, группы атомов). В тоже время в аморфных телах существует **ближний порядок** – согласованность в расположении соседних частиц, т. е. порядок, соблюдаемый на расстоянии, сравнимом с размерами молекул.

3.6.2 Обозначение и свойства аморфных материалов

Для маркировки аморфных сплавов используется буквенно-числовая система обозначений. Элементы обозначаются буквами русского алфавита, так же, как это предусмотрено для сталей. Числа перед буквенным обозначением элемента указывают его среднее содержание в сплаве. Содержание кремния и бора в марочном

Витебскийгосударственныйтехнологическийуниверситет

обозначении не указывается, их общее содержание, как элементов-аморфизаторов, равно 20-25 %.

Химический состав аморфных сплавов обозначают символами химических элементов с цифровыми индексами, которые указывают содержание данного элемента, например $Fe_{40}\ Ni_{40}\ P_{14}\ B_6$.

Очевидное преимущество аморфной структуры – отсутствие границ зёрен и как следствие – высокая прочность. Как известно, теоретическая прочность, т. е. напряжение, необходимое для разрыва всех межатомных связей в плоскости разрушения, составляет $\sim 10^{-1}$E (E – модуль Юнга). Прочность поликристаллов на два-три порядка ниже – лишь прочность монокристаллов приближается к теоретической. Для аморфных сплавов **прочность приближается к теоретической**.

Предел текучести аморфных сплавов $Fe_{80}\ B_{20}$, $Fe_{40}\ Ni_{40}\ P_{14}\ B_6$, $Fe_{60}\ Cz_6\ Mo_6\ B_{28}$ составляет соответственно 2400, 3600, 4500 МПа, в то время как предел текучести высокопрочных сталей обычно составляет не более 2500 МПа.

Для аморфных сплавов характерна четкая линейная зависимость между твёрдостью и прочностью. Для сплавов на основе Fe, Ni, Co справедливо выражение $H_v = 3{,}2\sigma_т$, что позволяет с достаточной точностью использовать показания твердомера для определения прочностных характеристик.

Энергия разрушения и ударная вязкость аморфных сплавов так же значительно превышают эти характеристики для обычных поликристаллических материалов.

Основным механизмом пластической деформации поликристаллических материалов является сдвиговое перемещение одних частей кристаллита (зерна) относительно других, осуществляемое с помощью многочисленных видов движения дислокаций. Сдвиговые механизмы пластической деформации разнообразны. Основными из них являются скольжение и двойникование внутри зёрен, также проскальзывание по границам зёрен. Существенную роль играют диффузионные процессы, облегчающие как внутризёренную, так и межзёренную пластическую деформацию.

Пластическая деформация аморфных сплавов может быть гомогенной, когда деформируется каждый элемент объёма и образец испытывает однородную деформацию и негомогенной, когда пластическое течение локализуется в тонких полосах сдвига.

Гомогенная деформация происходит при высоких температурах (близких, к температуре кристаллизации) и низких напряжениях. При этом скорость деформации пропорциональна приложенному напряжению. Степень пластической деформации при гомогенном течении практически не ограничена, и при правильно подобранных условиях можно добиться эффекта **сверхпластичности** с деформацией в сотни процентов.

ВитебскийГосударственныйТехнологическийУниверситет

Негомогенное пластическое течение происходит при низких температурах ($T \leq 0{,}8T_{\text{кр}}$) и высоких напряжениях ($\tau > 0{,}02G$),деформация сосредоточена в полосах сдвига, количество которых определяет пластичность сплава. Пластичность сильно меняется в зависимости от схемы нагружения. При растяжении она невелика – разрушение происходит после деформации в 1…2 %. При прокатке можно достигнуть деформации 50…60 %, а при изгибе радиус может быть сопоставим с толщиной ленты (30…40 мкм).

В отличие от полос сдвига в кристаллических металлах, в аморфных металлах полосы сдвига легко меняют свое направление и ветвятся. Толщина полос сдвига обычно составляет 10…50 нм.

Разрушение аморфных сплавов может быть хрупким и вязким. Хрупкое разрушение происходит сколом без внешних следов макроскопического течения и по плоскостям, перпендикулярным оси растяжения. Вязкое разрушение происходит после или одновременно с пластической деформацией. Оно развивается по плоскостям, где действуют максимальные касательные напряжения. Характерной особенностью вязкого разрушения аморфных сплавов является наличие на поверхности разрушения двух зон: почти гладких участков скола и следов выхода областей сильно локализованного пластического течения толщиной 0,1 мкм.

Важной особенностью многих аморфных сплавов является их охрупчивание после отжига выше некоторой температуры. В зависимости от различных факторов температура охрупчивания может меняться в пределах 180…350 °С.

Причинами возникновения охрупчивания может быть сосредоточение примесей в определенных областях аморфной структуры.

3.6.3 Способы получения аморфных металлических сплавов

3.6.3.1 Получение аморфной структуры методами закалки расплава

Аморфную структуру в металлических сплавах получают различными методами: закалкой из жидкого состояния; осаждением из газовой фазы или жидкого раствора; лазерной обработкой, распылением электрическим полем, обработкой электроискровым разрядом, ионной имплантацией.

Закалка из жидкого состояния является одним из наиболее распространенных способов получения аморфной структуры из жидкого состояния сплава. Осуществляется способ путем охлаждения расплава со скоростью порядка $10^5 - 10^8$ К°/с.

Витебский государственный технологический университет

Практика показывает, что добиться предотвращения кристаллизации и зафиксировать аморфное состояние можно путём соприкосновения жидкого расплава с металлической холодной подложкой. Наиболее часто используются два метода: в одном из них жидкий металл наносится на внешнюю или внутреннюю цилиндрические поверхности вращающихся дисков, во втором расплав извлекается вращающимся диском. На рисунке 3.10. представлены принципиальные схемы устройств для реализации этих методов.

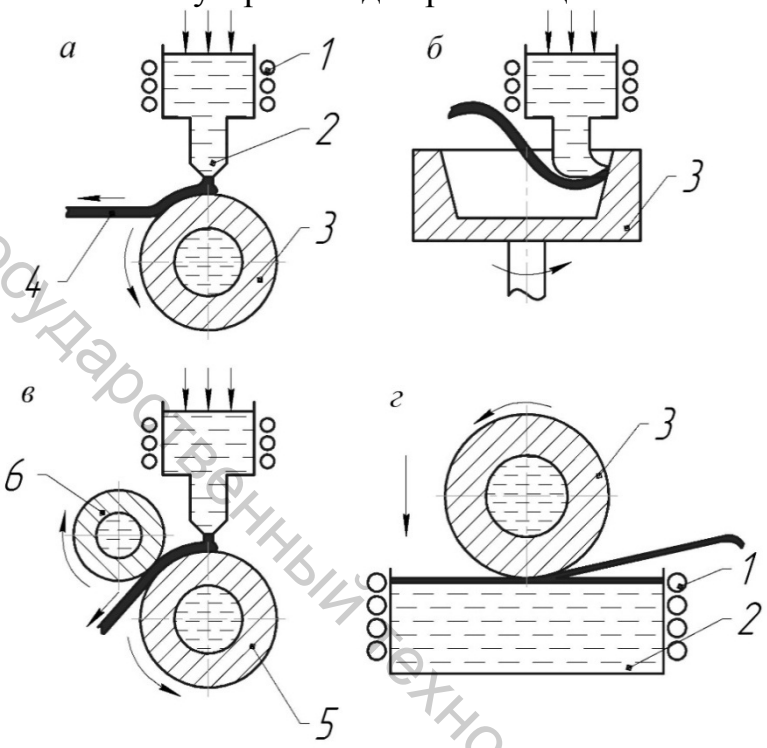


Рисунок 3.10 - Методы получения аморфной ленты закалкой расплава на внешней (а) и внутренней (б) поверхностях дисков; прокаткой в валках (в) и экстракцией расплава из тигля (г):
1 – нагревательное устройство; 2 – тигель; 3 – диск;
4 – аморфная лента; 5, 6 – валки

Обод металлических дисков должен изготавливаться из материалов, обладающих высокой теплопроводностью: медь, бериллиевая бронза, латунь и др. Нагрев расплава осуществляется индукционным нагревательным устройством или печью сопротивления. Расплав выдавливается под давлением через сопло на поверхность охлаждающего элемента (отсюда термин «спинингование»). Сопло изготавливается из плавленого кварца или окиси алюминия.

При центробежной закалке на внешней или внутренней поверхностях диска охлаждение расплава происходит только с одной стороны, а при охлаждении между двумя валками – с обеих сторон. В первом случае возникают трудности с обеспечением качества внешней поверхности ленты, а во втором – требуется более сложное оборудование.

Витебский государственный технологический университет

Наиболее распространен метод закалки на внешней поверхности вращающегося диска. Как правило, скорость вращения диска подбирают таким образом, чтобы отвод тепла происходил быстрее, чем движется расплав, т. е. происходило вытягивание уже затвердевшей ленты. Обычно скорость вытягивания ленты составляет $10 \ldots 50$ м/с, при этом скорость охлаждения достигает $10^5 \ldots 10^6$ К °/с, а толщина получаемой ленты $10 \ldots 50$ мкм.

Во всех установках закалки металл растекается тонким слоем по поверхности диска, быстро затвердевает. При постоянстве состава сплава скорость охлаждения зависит от толщины расплава и характеристик диска.

Скорость охлаждения зависит так же от свойств самого расплава, а также длительности контакта расплава с диском. Увеличение длительности контакта может быть достигнуто с помощью газовых струй, прижимающих ленту к диску или ремнем, движущимся с одинаковой скоростью с диском (рис. 3.11).

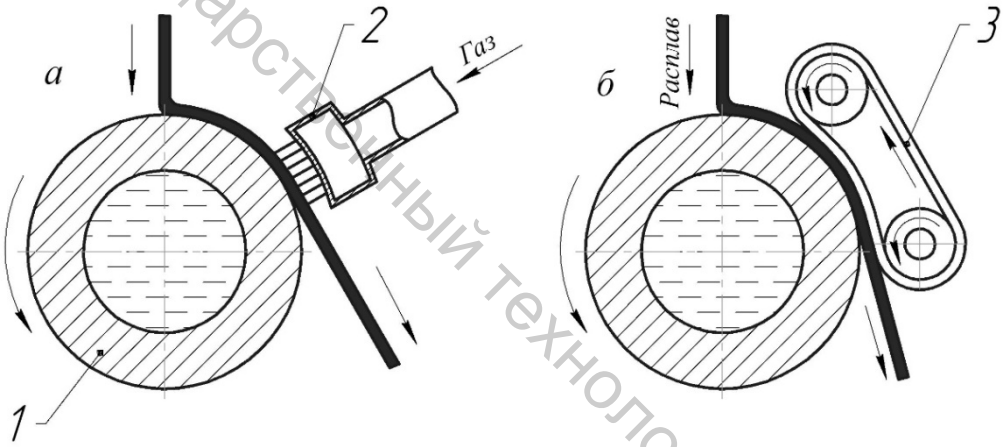


Рисунок 3.11 - Схемы устройств для увеличения продолжительности контакта ленты с диском путём использования газовых струй (а) и прижимного ремня (б):
1 – диск; 2 – струйная форсунка; 3 – подвижный ремень

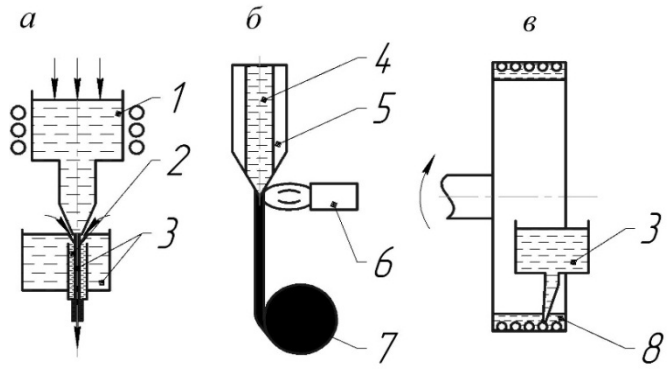


Рисунок 3.12 - Методы получения тонкой проволоки закалкой расплава:
а – протягивание расплава через охлаждающую жидкость;
б – протягиванием капилляра; в – центробежной закалкой;
1 – тигель; 2 – трубка; 3 – охлаждающая жидкость; 4 – расплав;

Витебский государственный технологический университет

5 – стеклянная трубка; 6 – форсунка; 7 – бобина; 8 – барабан

Вытягивание проволоки из расплава может осуществляться двумя способами. Первый способ (рис. 3.12 *а*) предполагает вытягивание проволоки через трубку, заполненную соляным раствором и помещенную в охлаждающую жидкость.

По второму способу (рис. 3.12 *б*) расплав поступает в стеклянную трубку, которая разогревается пламенем форсунки и вместе с полученным стеклянным капилляром, заполненным аморфитизированным волокном, сворачивается в бобину. Главная трудность в данном случае состоит в отделении волокна от покрывающего стекла, что ограничивает номенклатуру составов, аморфизируемых данным способом.

Центробежный способ (рис. 3.12 *в*) предполагает подачу струи расплава в охлаждающую жидкость, удерживаемую центробежной силой на внутренней поверхности вращающегося барабана. Затвердевшая нить сматывается затем в бобину.

Схема промышленной установки для производства аморфной ленты представлена на рисунке 3.13. Установка работает следующим образом. Выплавленный в индукционной печи 1 сплав поступает в тигель-накопитель 2 и при открытии запорного клапана 3 сливается в литейную насадку 8. Температура сплава, находящегося в насадке 8, термостабилизируется с помощью специального нагревателя. Перед разливкой положение литейной насадки по отношению к закалочному диску 6 выставляется с помощью регулятора положения 4. Производится выпуск сплава на закалочный диск 6. Сплав затвердевает и по ременной системе 10 перемещается к холодильной камере 9 и к намоточному устройству 12. На основе данных о геометрических размерах и свойствах ленты, непрерывно получаемых с помощью измерительного стенда 11, через систему обратной связи производится корректировка технологических параметров: скорости вращения диска, положения литейной насадки, температуры сплава и др.

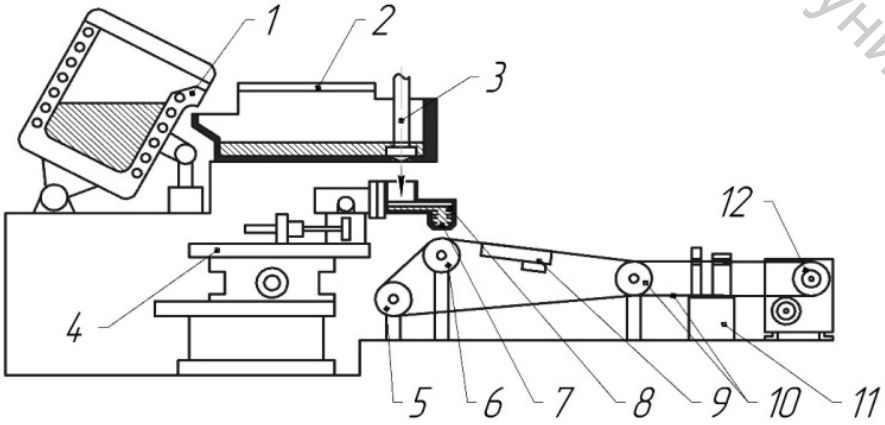


Рисунок 3.13 - Схема промышленной установки для производства аморфной ленты:

1 – индукционная печь; 2 – тигель-накопитель; 3 – запорный клапан;

Витебский государственный технологический университет

4 – регулятор положения; 5 – приводной ролик; 6 – закалочный диск; 7 – сопловая система; 8 – литейная насадка; 9 – холодильная камера; 10 – ременная система; 11 – измерительный стенд; 12 – намоточное устройство

3.6.3.2 Физические методы получения аморфной структуры

Осаждение на охлаждаемые подложки при ионно-плазменном и термическом напылении дает возможность создания аморфных структур сложного состава толщиной до 1 см на охлаждаемых подложках. Данная методика позволяет создать материалы широкого диапазона составов. Следует отметить, что используя ионно-плазменное напыление, можно получить в массивном аморфном состоянии также и те вещества, которые невозможно получить методом закалки из жидкого состояния.

Формирование аморфизированных металлических слоев лазерной обработкой. Процесс получения аморфной структуры осуществляется путем взаимодействия вещества за короткий период времени с лазерным высокоэнергетическим излучением. Основная часть энергии лазерного излучения ($\sim 10^3 - 10^{10}$ Вт/см^2) в зависимости от материала расходуется на быстрое расплавление поверхностного слоя вещества. Вследствие кратковременности процесса основная масса материала остается холодной. Сохранение холодной поверхности на границе контакта с тонким слоем расплава приводит к охлаждению со скоростями $10^5 - 10^8$ К°/с. При скоростном расплавлении и охлаждении образуется аморфная структура. Процесс образования на поверхности металлических материалов подобной структуры получил название «лазерного стеклования».

Распыление электрическим полем. Если между поверхностью жидкого расплава и какой-либо поверхностью создать достаточно сильное электрическое поле, то на поверхности расплава возникает острый выступ, который может испускать как поток ионов атомов расплава, так и капли размером от 0,1 до 20 мкм, которые быстро охлаждаются с образованием аморфного сплава.

Ионная имплантация. Аморфная структура создается путем внедрения ионов с высокой энергией в поверхностный слой металлического сплава. Способ хорош для создания коррозионностойких и упрочненных поверхностей. Основной недостаток – малая толщина аморфизированного слоя, который обычно не превышает 1–2 мкм.

Аморфизация электроискровым разрядом. Суть этого метода заключается в том, что поток энергии, сконцентрированный в канале искрового разряда, за короткий промежуток времени ($\sim 10^{-3}$с)

Витебский государственный технологический университет

выделяется и расплавляет поверхностные участки материала на глубину до 3–5 мкм.

3.6.4 Применение аморфных изделий

Около 80 % промышленных аморфных сплавов производится с целью использования магнитных свойств. Сплавы применяются в качестве магнитомягких материалов, сочетающих: изотропность свойств, высокую магнитную проницаемость, высокую индукцию насыщения, малую коэрцитивную силу. Их применяют для изготовления магнитных экранов, магнитных фильтров и сепараторов, датчиков, записывающих головок и т. п. Сердечники трансформаторов, изготовленные из аморфных сплавов, характеризуются незначительными потерями на перемагничивание, а также высоким электросопротивлением при малой толщине, что уменьшает потери, связанные с вихревыми токами.

Хотя аморфные материалы химически более активны, чем кристаллические, но при содержании в них хрома и других элементов, способствующих формированию пассивирующей плёнки, они могут обладать исключительно высокой коррозионной стойкостью и применяться в агрессивных средах. Аморфные сплавы используются как высокопрочные, например, в качестве компонентов композиционных материалов и даже корда автомобильных шин. Некоторые аморфные сплавы имеют близкий к нулю коэффициент термического расширения или слабо зависящий от температуры и могут применяться в прецизионных приборах. Аморфные сплавы используют для изготовления сейсмодатчиков, мембран манометров, датчиков скорости, ускорения и крутящего момента.

Аморфные материалы используются для армирования трубок высокого давления, изготовления металлокорда шин и др. В перспективе возможно применение аморфных сплавов для изготовления маховиков. Такие маховики могут использоваться для аккумулирования и покрытия пиковых нагрузок на электростанциях, для улучшения рабочих характеристик автомобилей и т. д.

Высокая прочность в сочетании с коррозионной стойкостью позволяют использовать аморфные сплавы для изготовления кабелей, работающих в контакте с морской водой, а так же изделий, условия эксплуатации которых связаны с воздействием агрессивных сред. Из аморфной ленты изготавливают предметы бытового назначения – бритвенные лезвия, рулетки и т. д.

Аморфные материалы часто называют материалами будущего, что обусловлено уникальностью их свойств, не встречающихся у обычных кристаллических металлов (табл.3.1).

Витебский государственный технологический университет

Таблица 3.1 - Состав, свойства и применение некоторых аморфных металлические материалов

Состав сплава	Свойства	Применение
$Fe_{75}\ Si_{10}\ B_{15}$	высокая прочность, высокая вязкость	проволока, армирующие материалы, пружины, режущий инструмент
$Fe_{45}\ Cr_{25}\ Mo_{10}\ P_{13}\ C_7$	высокая коррозионная стойкость	электродные материалы, фильтры для работы в растворах кислот, морской воде и сточных водах
$Fe_{81}\ B_{13}\ Si_4\ C_2$	высокая магнитная индукция насыщения, низкие потери	сердечники трансформаторов, преобразователи, дроссели
$Fe_5\ Co_{70}\ Si_{10}\ B_{15}$	высокая магнитная проницаемость	магнитные головки и экраны, магнетометры, сигнальные устройства
$Fe_{83}\ B_{17}$	постоянство модулей упругости и температурного коэффициента линейного расширения	инварные и элинварные материалы

Применение аморфных сплавов сдерживают как технологические ограничения (малая толщина получаемых полуфабрикатов, полная несвариваемость), так и малая стабильность свойств – их структура и свойства существенно изменяются не только при нагревах, но и в процессе работы при комнатной температуре.

Можно выделить три основных фактора, определяющих эффективность применения в широких масштабах аморфных сплавов:

– повышение качества изделий вследствие применения аморфных сплавов, обладающих более высокими служебными характеристиками, чем традиционные кристаллические материалы, и возможность создания приборов и устройств нового поколения, параметры которых основываются на уникальном комплексе их физико-механических свойств;

– замена кристаллических материалов на основе дефицитных металлов аморфными сплавами, состоящими или из более доступных

Витебский государственный технологический университет

элементов, или содержащими дефицитные элементы в меньших количествах;

– переход от традиционной, (многоступенчатой, трудоемкой и энергонасыщенной) технологии получения конечного продукта к новой материало- и энергосберегающей технологии получения изделий методом закалки из расплава.

Экономическая целесообразность новых технологий будет проявляться по мере увеличения объема и номенклатуры продукции, а также совершенствования оборудования. Создание высокопроизводительных агрегатов, в которых используются сплавы с близкой к нулю магнитострикцией. Проявляется четкая тенденция увеличения производства готовых стандартных сердечников. Количество выпускаемых микротрансформаторов, в том числе импульсных, широко применяемых в радиоэлектронной промышленности, исчисляется десятками миллионов в год. Широко применяются высококобальтовые аморфные сплавы для изготовления головок магнитной аудио- и видеозаписи. Аморфные магнитные материалы находят также применение в бытовой технике и в сфере обслуживания (в частности, более 4 млрд наклеек в год из аморфных сплавов применяют для фиксации потребительских товаров). Использование аморфных сплавов в современной технологической цивилизации обусловлено не только высоким уровнем их магнитных свойств, но и уникальным сочетанием этих свойств с другими физико-механическими характеристиками, в первую очередь, с такими, как прочность, твердость, сопротивление истиранию, высокое удельное электрическое сопротивление, стойкость к радиации. Не последнее значение в росте производства аморфных сплавов занимает то обстоятельство, что фактически создана новая технология металлургического производства, обеспечивающая получение конечного продукта непосредственно из расплава, минуя многоступенчатые и энергоемкие технологические циклы, такие как ковка, прокатка, промежуточные отжиги.

3.7 Литье под регулируемым давлением

В процессе заливки формы жидким металлом заполнение, охлаждение и кристаллизация металла по объему формы происходит неравномерно. В первую очередь металл заполняет, охлаждается и затвердевает в полостях, предназначенных для формообразования тонких ребер, стенок, перегородок и т. д. В силу интенсивного теплообмена между металлом и стенками формы температура металла понижается, жидкотекучесть уменьшается, металл затвердевает раньше, чем произойдет полное заполнение всей полости формы.

Витебский государственный технологический университет

Массивные части формы заполняются более замедленно. Охлаждение и кристаллизация металла в этих частях происходит с некоторой задержкой. В результате между отдельными частями отливки возникают внутренние усадочные напряжения, которые могут вызвать коробление отливки и в местах резкого перехода от тонких стенок к массивным частям образование трещин.

С целью устранения отмеченных недостатков перед заливкой в жидкий металл вводят специальные добавки, способствующие повышению жидкотекучести.

Для термостабилизации металла производят дополнительный нагрев металла (перегрев), а также нагрев самой формы. Применяемые меры имеют отрицательные последствия.

Ввод в жидкий металл технологических добавок, повышающих жидкотекучесть, приводит к изменению химического состава отливок, что неизбежно скажется на физико-технических характеристиках отливок.

Перегрев металла сопровождается окислением, выгоранием легирующих элементов интенсивным газонасыщением, что неизбежно скажется на снижении механических характеристик. При этом повышается опасность образования пригара, усадочной пористости и горячих трещин.

Подогрев формы также приводит к снижению качества отливок в результате выделяющегося из формы большого объема газов и коробления самой формы.

Кардинальным средством решения проблемы является увеличение скорости заполнения формы, которая зависит от напора заливаемого металла и гидравлического сопротивления формы.

Напор металла определяется силами гравитации и при дополнительном внешнем воздействии на металл-давление.

Гидравлическое сопротивление определяется сопротивлением элементов литниковой системы и непосредственно самой формы.

Рационал геометрии литниковой системы позволяет уменьшить сопротивление, а значит и увеличить скорость заполнения формы. Сопротивление формы будет определяться конфигурацией и размерами полости, т. е. геометрическими параметрами отливки, которые оптимизируются на стадии проектирования отливки.

Следует отметить, что высокоскоростная струя жидкого металла способствует инжекции (захвату) воздуха подачи его в форму. Кроме того, струя жидкого металла может вызвать разрушение формы. В зависимости от прочности материала формы применяют литье под низким и высоким давлением.

Витебский государственный технологический университет

3.7.1 Литье под низким давлением

Сущность способов литья под низким давлением состоит в том, что заливка формы расплавом и затвердевание отливки происходит под действием избыточного давления воздуха или газа. При этом заполнение формы происходит путем поступления сплава под давлением из тигля по металлопроводу снизу вверх.

Частными способами литья под низким давлением является литье с противодавлением и литье вакуумным всасыванием.

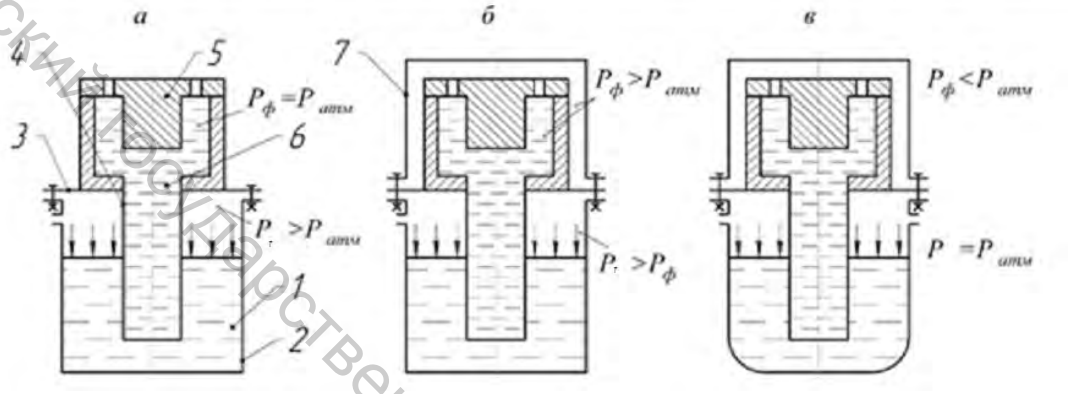


Рисунок 3.14 - Схемы способов литья:
а – под низким давлением, б – с противодавлением, в – вакуумным всасыванием;
1 – расплав, 2 – камера, герметизирующая тигель с расплавом,
3 – крышка камеры, 4 – металлопровод, 5 – литейная форма, 6 – литник,
7 – камера, герметизирующая форму

Литье под низким давлением осуществляется следующим образом (рис. 3.14 *а*). В герметичную камеру 2 устанавливают тигель с расплавленным металлом. На верхнюю часть камеры помещают литейную форму 5. Металлопровод 4 соединяет полость формы с тиглем.

При наличии в полости формы давления газа, соответствующего атмосферному ($P_ф = P_{атм}$), заливка осуществляется благодаря избыточному давлению газа над поверхностью расплава в камере:

$$\Delta P = P_T - P_ф,$$

где P_T – давление над поверхностью расплава в тигле.

Под действием сжатого газа металл из тигля поднимается по металлопроводу и заполняет полость формы. Давление сжатого газа на металл регулируется и не превышает 0,1 МПа.

После заполнения и затвердевания отливки давление сбрасывают, форму раскрывают и извлекают отливку.

Витебский государственный технологический университет

Характерными параметрами для литья под низким давлением являются: допустимая скорость движения металла в полость формы $V_м$, скорость изменения давления газа V_p и его максимальное значение ΔP в камере. На практике $V_м = 0{,}01 - 0{,}5$ м/с. Максимальное значение давления ΔP обычно равно 0,06–0,08 МПа. Во избежание размыва футеровки у входа в металлопровод скорость сброса давления в камере в конце литейного цикла не должна превышать Vp = 0,001–0,01 Мпа/с.

Основными достоинствами процесса литья под низким давлением являются: автоматизация трудоемкой операции заливки формы; возможность регулирования скорости потока расплава в полости формы изменением давления в камере установки, что важно для улучшения заполнения форм тонкостенных отливок; улучшение питания отливки, что повышает её плотность, благодаря избыточному давлению на расплав при его кристаллизации; снижение расхода металла на литниковую систему, так как незатвердевший расплав из металлопровода сливается в тигель, что повышает коэффициент выхода годного (во многих случаях до 90 %) металла.

Наряду с отмеченными достоинствами способ литья под низким давлением имеет недостатки: невысокая стойкость части металлопровода, погруженной в расплав, что затрудняет использование способа литья для сплавов с высокой температурой плавления; сложность системы регулирования скорости потока расплава в форме, вызванная динамическими процессами, происходящими в установке при заполнении её камеры воздухом; нестабильность процесса в результате утечек воздуха через уплотнения; понижение уровня расплава в установке по мере изготовления отливок; возможность ухудшения качества сплава при длительной выдержке в тигле установки; сложность эксплуатации и наладки установок.

Достоинства и недостатки способа определяют рациональную область его применения и перспективы использования. Литье под низким давлением наиболее широко применяют для изготовления сложных фасонных и особенно тонкостенных отливок из алюминиевых и магниевых сплавов, простых отливок из медных сплавов и стали в серийном и массовом производстве.

Литье с противодавлением заключается в регулируемом заполнении формы и воздействии повышенного давления на расплав при формировании отливки (рис. 3.14 *б*). При давлении газа в полости формы, превышающем атмосферное $P_ф > P_{атм}$ для надежного заполнения литейной формы расплавом перепад давлений в тигле должен составлять

$$\Delta P = P_T - P_ф = P_{изб} - \Delta P_ф.$$

Витебский государственный технологический университет

Заполнение формы расплавом вопреки препятствию находящегося в её полости сжатого газа ($\Delta P_{\text{ф}}$) предопределило название этого процесса – литье с противодавлением.

В начальный момент сжатый воздух или инертный газ при требуемом по технологии давлением, например, 0,5–0,6 МПа одновременно поступает в обе герметизирующие камеры 2, 7. По достижению заданного давления камера, герметизирующая форму, открывается, и давление в ней понижается. Под действием разности давлений расплав по металлопроводу поступает и заполняет форму. После заполнения формы расплав затвердевает под избыточным всесторонним давлением, что значительно улучшает питание отливки, уменьшает усадочную и газовую пористость, повышает ее механические свойства и герметичность. По существу, в этом процессе литья совмещены два способа: способ литья под низким давлением, используемый для заполнения полости формы, и способ кристаллизации отливок под всесторонним давлением газа или воздуха.

Этот способ литья дает наибольший эффект при изготовлении отливок с массивными стенками равномерной толщины из алюминиевых и магниевых сплавов, кристаллизующихся в широком интервале температур. Использование второй стадии процесса кристаллизации под всесторонним избыточным давлением для тонкостенных отливок не всегда приводит к заметному улучшению их свойств. Это объясняется тем, что продолжительность кристаллизации тонкостенных отливок мала, и отливка затвердевает прежде, чем давление в верхней камере установки достигнет необходимой величины.

Литье вакуумным всасыванием (рис. 3.14 *в*) состоит в том, что расплав заполняет форму под действием разрежения, создаваемого в герметизирующей камере. В этом случае давление в форме меньше атмосферного $P_{\text{ф}} < P_{\text{атм}}$, и составляет 40–80 КПа, а давление в тигле на поверхность сплава равно атмосферному $P_T = P_{\text{атм}}$. Изменением разности между атмосферным давлением и давлением в полости формы можно регулировать скорость заполнения формы и тем самым обеспечивать управление процессом. В отличие от литья под низким давлением и с противодавлением, литье вакуумным всасыванием обладает дополнительным важным достоинством – на всех этапах получения отливки (заполнение формы, затвердевание и питание отливки) давление активно и положительно действует на формирование отливок.

Вакуумирование полости форм при заливке позволяет заполнять формы тонкостенных отливок с толщиной стенки 1-1,5 мм; исключить попадание воздуха в расплав; повысить точность, герметичность и механические свойства отливок. Например, предел прочности

Витебский государственный технологический университет

алюминиевого сплава АП-9 возрастает на 5-10 %, а относительное удлинение на 30 % по сравнению с гравитационной заливкой.

3.7.2 Литье под высоким давлением

Сущность процессов литья под высоким давлением состоит в том, что заполнение формы жидким металлом и его затвердевание происходит под действием избыточного давления, значительно превосходящего давление воздуха или инертного газа.

Различают литье под давлением с холодной камерой прессования (рис. 3.15) и с горячей камерой прессования (рис. 3.16).

Литье под давлением с холодной камерой прессования заключается в том, что расплавленный металл заливается в камеру прессования 1 специальной машины, а затем под действием поршня 2, перемещающегося в этой камере, через литниковые каналы заполняет полость металлической пресс-формы, затвердевает под избыточным давлением и образует отливку. После затвердевания и охлаждения до определенной температуры из отливки сначала извлекаются стержни 3 (рис. 3.15 *б*), а затем пресс-форма раскрывается (рис. 3.15 *в*) и толкатели 4 удаляют отливку из пресс-формы (рис. 3.15 *г*). От отливки отделяют литники и зачищают заусенцы.

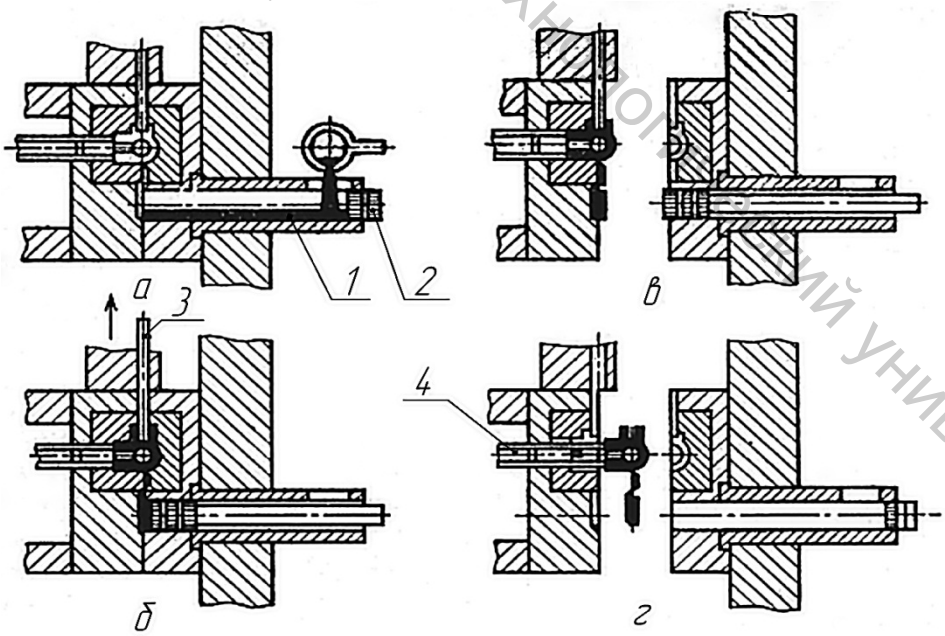


Рисунок 3.15 - Схема технологического процесса литья под давлением на машине с холодной камерой прессования:
а – заполнение камеры прессования; б – заполнение полости пресс-формы; в – разъем пресс-формы; г – удаление отливки;
1 – камера прессования; 2 – поршень; 3 – стержень; 4 – толкатель

Витебский государственный технологический университет

Литьем под давлением с холодной камерой прессования изготовляют отливки для различных отраслей машиностроения и приборостроения из цинковых, алюминиевых, магниевых, медных сплавов, реже из чугуна и стали. Масса отливок изменяется от нескольких граммов до нескольких десятков килограмм. Отливки отличаются сложной конфигурацией, развитой поверхностью и в преобладающем большинстве являются тонкостенными.

Размеры и масса отливок зависят от мощности машин, на которых осуществляется процесс: чем большее усилие запирания пресс-формы, скорость перемещения подвижных частей и давление литья, тем больших размеров возможно получение отливок.

В горячекамерных машинах камера прессования 1 располагается в тигле 2 и сообщается с ним отверстием 3, через которое в нее поступает расплав (рис. 3.16 *а*).

При движении поршня вниз отверстие 3 перекрывается и расплав по обогреваемому каналу 5 поступает в пресс-форму (рис. 3.16 *б*). После затвердевания отливки поршень 4 возвращается в исходное положение и остатки расплава из канала 5 сливаются в камеру прессования (рис. 3.16 *в*). Пресс-форма раскрывается, отливка 7 выталкивается из нее толкателями 8, после чего пресс-форма закрывается и цикл повторяется.

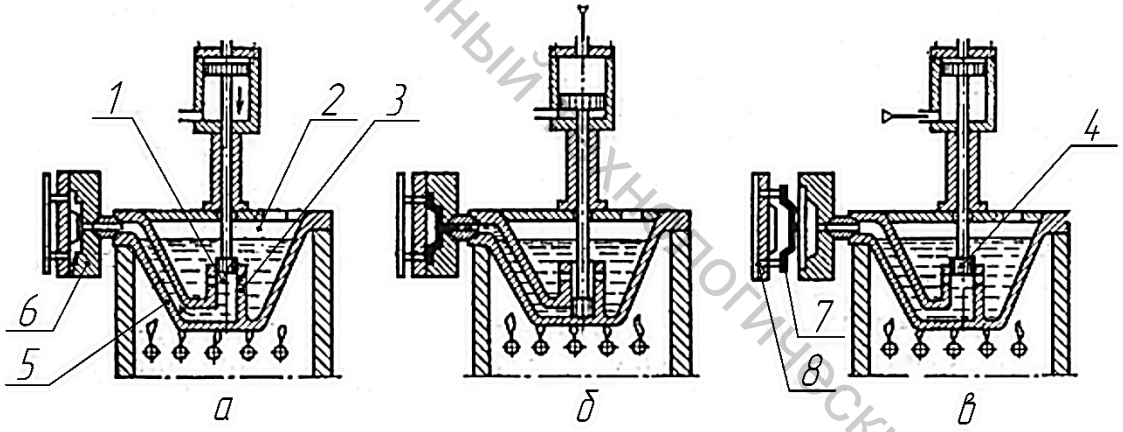


Рисунок 3.16 - Схема технологического процесса литья под давлением на машине с горячей камерой прессования:
а – исходное положение; б – заполнение пресс-формы и кристаллизация; в – раскрытие пресс-формы и извлечение отливки;
1 – камера прессования; 2 – тигель; 3 – отверстие; 4 – поршень;
5 – канал; 6 – пресс-форм; 7 – отливка; 8 – толкатель

Машины с горячей камерой по сравнению с машинами с холодной камерой более производительны, однако камера прессования и прессовый поршень на этих машинах работают в тяжелых условиях: они постоянно погружены в расплав; быстро изнашиваются и требуют замены. Такие машины обычно используют для получения отливок из цинковых, свинцово-сурьмянистых, магниевых сплавов, не взаимодействующих с материалами поршня и камеры прессования.

Витебский государственный технологический университет

Камера прессования на машинах литья под давлением может быть расположена горизонтально (см. рис. 3.15) или вертикально (см. рис. 3.16). Машины с горизонтальной холодной камерой прессования позволяют развивать значительные усилия запирания и прессования, могут иметь большие камеры прессования. Поэтому такие машины используют для изготовления отливок из алюминиевых, медных, магниевых сплавов, чугуна и стали. Однако на таких машинах трудно получать особо мелкие точные отливки, так как расплав быстро охлаждается в камере прессования и заполняемость форм ухудшается.

Машины с вертикальной горячей камерой прессования лишены этого недостатка, и их используют преимущественно для изготовления мелких, небольших отливок с тонкими стенками. Получать на этих машинах крупные отливки сложно, так как в камерах прессования, работающих в расплаве, трудно создать высокие давления прессования, необходимые для получения крупногабаритных отливок.

Достоинства процессов литья под высоким давлением

1. Поток расплава в литниковой системе и полости пресс-формы движется с высокими скоростями. Скорость впуска расплава в пресс-форму колеблется от 0,5 до 120 м/с, а конечное давление на расплав может достигать 490 МПа. Форма заполняется за десятые, а часто и за сотые доли секунды. Это позволяет, несмотря на высокую скорость охлаждения расплава в форме, изготовлять весьма тонкостенные отливки с толщиной стенки менее 1 мм. Высокая кинетическая энергия движущегося расплава и статическое давление в момент окончания заполнения формы способствует получению качественной поверхности отливки.

2. Использование металлической пресс-формы с точными размерами рабочей полости и давление на расплав и затвердевающую отливку способствуют повышению точности отливок по массе и размерам. Высокая точность размеров отливок до 8-13-го квалитетов позволяет уменьшить припуски на обработку до 0,3-0,8 мм, а в некоторых случаях полностью исключить обработку резанием. Остается только зачистка мест удаления питателей и облоя. Коэффициент точности отливок по массе при литье под давлением достигает 0,95-0,98. Шероховатость поверхности отливок под давлением зависит в основном от шероховатости поверхности пресс-формы и технологических режимов литья. Обычно отливки под давлением имеют шероховатость Rz = 20-10 мкм и даже Ra = 1,25-0,63 мкм.

3. Полное исключение трудоемких операций изготовления, сборки и выбивки форм; металлическая пресс-форма используется многократно; сборка формы и извлечение из нее готовой отливки выполняются машиной; процесс получения отливки малооперационный. Указанные обстоятельства и высокая скорость затвердевания отливки в пресс-форме делают процесс литья под давлением одним из

Витебский государственный технологический университет

самых высокопроизводительных литейных процессов и создают предпосылки для полной автоматизации производства.

Наряду с указанными достоинствами литье под давлением имеет ряд недостатков.

1. Габаритные размеры и масса отливок ограничены мощностью машины (усилием, развиваемым механизмом запирания).

2. Высокая стоимость пресс-формы, сложность и трудоемкость изготовления, ограниченная стойкость, особенно при литье сплавов черных металлов и медных сплавов, что снижает эффективность процесса и ограничивает область его использования.

Повышение стойкости пресс-форм является одной из важных проблем, особенно при литье сплавов, имеющих высокую температуру плавления. Удлинение срока службы пресс-форм повышает эффективность производства, а также позволяет расширить номенклатуру сплавов, из которых могут быть получены отливки под давлением.

3. Трудности выполнения отливок со сложными полостями, поднутрениями, карманами.

4. Наличие в отливках газовоздушной и часто усадочной пористости снижает пластические характеристики металла отливок, их герметичность, затрудняет термическую обработку, вследствие чего ограничиваются возможности изготовления отливок из сплавов, упрочняемых термической обработкой. Получение отливок без газовоздушной и усадочной пористости является одной из важных проблем, решение которой позволяет расширить область применения этого перспективного технологического процесса, эффективность его использования.

5. Жесткая неподатливая пресс-форма способствует появлению напряжений в отливках при усадке, что также ограничивает номенклатуру сплавов, из которых могут быть изготовлены отливки.

Преимущества и недостатки способа определяют рациональную область его использования. Экономически целесообразно вследствие высокой стоимости пресс-форм, сложности оборудования, высокой производительности применять литье под давлением в массовом и крупносерийном производстве точных отливок с минимальными припусками на обработку из легких, цинковых и медных сплавов, а в некоторых случаях и специальных сплавов и сталей.

Литьем под давлением изготавливают тонкостенные детали сложной формы из цинковых, алюминиевых, магниевых и медных сплавов. Наиболее часто применяют сплавы: алюминиевые АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ11, АЛ28 и АЛ 32, цинковые ЦА4 и ЦА4М1, магниевые МЛ5 и МЛ6, латуни ЛЦ4ОС и ЛЦ16К4.

При конструировании заготовок, получаемых литьем под давлением, кроме выполнения общих требований конструирования литых заготовок необходимо учитывать, что слишком тонкие стенки из-

Витебский государственный технологический университет

за быстрого остывания металла в форме приводят к плохому заполнению и недоливу, а толстые стенки из-за большого объема воздуха в полости формы и усадочных явлений могут привести к появлению раковин.

Необходимо избегать образования выступов и выемок, вызывающих необходимость использования составных и подвижных стержней. Внутренние полости, отверстия необходимо конструировать так, чтобы стержни пресс-формы свободно извлекались.

Отверстия под резьбу необходимо располагать в полости разъема формы или перпендикулярно ей. В отливках из цинковых сплавов резьбовые отверстия можно выполнять без припуска на механическую обработку.

Также необходимо учитывать, что отсутствие радиуса закругления стенок отливки приводит к образованию трещин, а переходы с большими радиусами – к появлению воздушных и усадочных раковин.

Этот процесс с полным основанием может быть отнесен к малооперационным и практически безотходным технологиям, так как литники и облой подвергают переплавке, а отходы в стружку малы.

3.7.3 Литье с кристаллизацией под давлением

Процесс заключается в том, что расплав под действием гравитационной силы заливают в матрицу, затем пуансоном осуществляют окончательное оформление контуров отливки и последующее ее уплотнение (выдержку под давлением) до окончания затвердевания. После извлечения из пресс-формы отливку подвергают различным видам последующей обработки.

Литье с кристаллизацией под давлением отличается отсутствием камер прессования, а процесс осуществляется на вертикальных гидравлических прессах.

Отливки изготовляют в формах (пресс-формах, штампах), состоящих из пуансона (прессующего узла), матрицы, толкателей и съемников. Верхнюю плиту с закрепленными на ней деталями прессующего узла монтируют на ползуне пресса, а нижнюю плиту с размещенными на ней матрицей и механизмом выталкивания отливки – на столе пресса.

Этим способом изготовляют простые и сложные по конфигурации заготовки из сплавов на основе алюминия, железа, магния, меди и цинка, используя для этой цели как специализированные, так и неспециализированные гидравлические прессы и машины.

Витебский государственный технологический университет

Процесс осуществляется по следующим схемам (рис. 3.17): поршневое прессование; пуансонное прессование; пуансонно-поршневое прессование; прессование через литники-питатели.

При поршневом прессовании давление на кристаллизующийся расплав передается через пуансон, перекрывающий открытую полость матрицы и действующий на верхний торец формирующейся отливки в течение времени, необходимого для ее затвердевания. К моменту приложения давления в местах соприкосновения расплава с матрицей образуется корка, а уровень сплава в матрице понижается вследствие объемной усадки. Поэтому пуансон (поршень) воздействует вначале на вертикальную корку, а после соприкосновения с незатвердевшим сплавом уплотняет всю отливку.

Формообразование отливки при поршневом прессовании практически полностью осуществляется во время гравитационной заливки расплава в матрицу. Основная масса расплава при контакте с пуансоном не перемещается (за исключением верхней части) при понижении уровня во время уплотнения затвердевающей отливки.

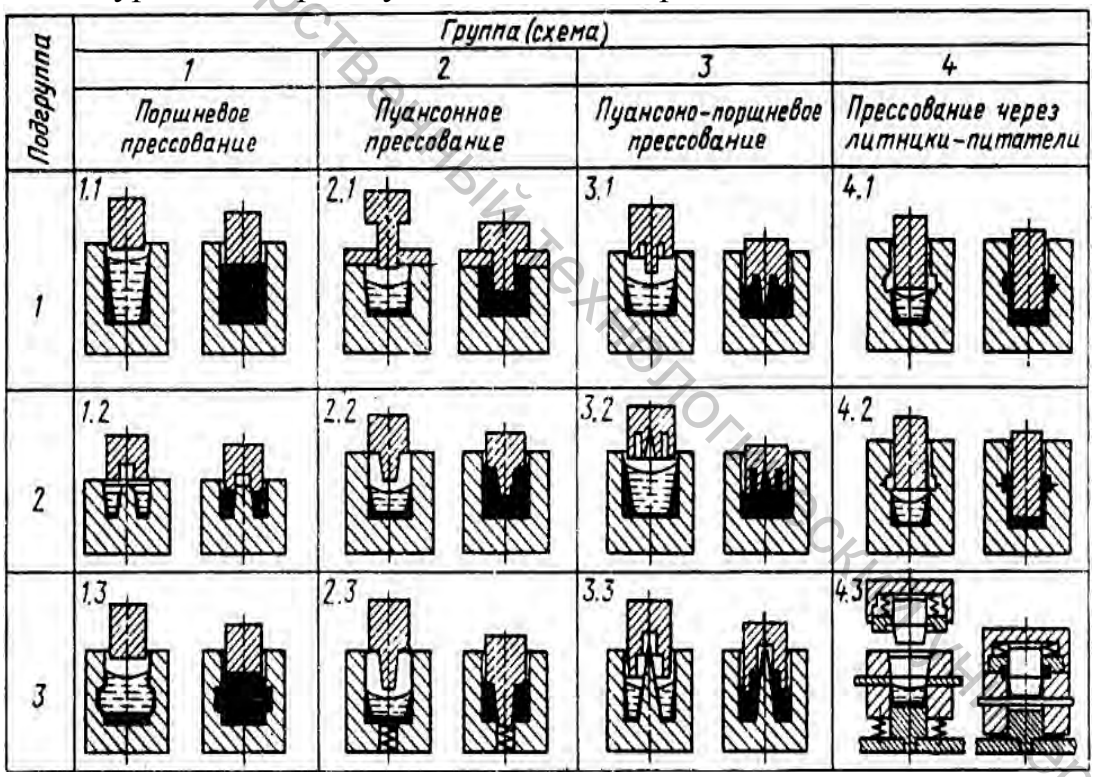


Рисунок 3.17 - Классификация схем кристаллизации под давлением

При пуансонном прессовании под действием выступающей рабочей части пуансона незатвердевший сплав выдавливается вверх до полного заполнения рабочей полости пресс-формы. Особенностью этой схемы является то, что пуансон вначале соприкасается с расплавом, удаленным от боковых стенок матрицы, и вытесняет его выше уровня заливки. Пуансон не соприкасается с вертикальной коркой, образовавшейся до его внедрения в расплав. Таким образом, формообразование отливки частично происходит при заливке расплава

Витебский государственный технологический университет

в матрицу и выдержке его в матрице до подхода пуансона, а заканчивается после внедрения пуансона в кристаллизующийся расплав.

При пуансонно-поршневом (комбинированном) прессовании формообразование отливки частично осуществляется во время заливки расплава в матрицу и выдержке его в ней до соприкосновения с пуансоном, а заканчивается после вытеснения части незатвердевшего сплава в полости, ограниченные пуансоном и расположенные выше уровня заливки расплава в матрицу. Перемещение незатвердевшего сплава происходит как при сжатии вертикальной корки (подгруппы 3.2 и 3.3), так и при выдавливании его вверх выступающими элементами пуансона.

Особенность рассматриваемой схемы прессования заключается в том, что вытесненный незатвердевший сплав не соприкасается со стенками матрицы, а заполняет рабочие полости в пуансоне. С момента приложения давления пуансон также воздействует на вертикальную корку, соприкасающуюся с боковыми стенками матрицы и образовавшуюся до момента соприкосновения сплава с пуансоном.

При прессовании через питатели (выдавливании расплава в закрытые полости) расплав заливают в металлоприемник. Из этого металлоприемника металл пуансоном вытесняется в закрытые полости пресс-формы, в которых могут быть изготовлены одновременно одна или несколько отливок. Движение расплава из металлоприемника в рабочие полости пресс-формы осуществляется по питателям в матрице (подгруппа 4.1) или пуансоне (4.2), через отверстия в специальной раздвижной диафрагме (4.3) или непосредственно из металлоприемника (без использования питателей и диафрагм).

Литье с кристаллизацией под давлением рекомендуется использовать для изготовления отливок с повышенными требованиями по плотности и герметичности: поршней двигателей внутреннего сгорания, гидро- и пневмоцилиндров и др.

В процессе литья с кристаллизацией под давлением по сравнению с другими способами литья имеет место повышение прочностных свойств сплавов на 15-30 %, пластичности в 2-4 раза.

При переходе с литья в кокиль на литье с кристаллизацией под давлением примерно в 2 раза снижается себестоимость отливки и на 10-15 % уменьшается обработка резанием.

К основным технологическим параметрам литья с кристаллизацией под давлением относятся номинальное давление прессования, скорость прессования, длительность выдержки под давлением, температура металла и формы.

Значение давления прессования для алюминиевых сплавов в зависимости от сложности отливок изменяется в пределах 50-120 МПа, для медных 80-200 МПа.

Скорость прессования выбирают из условия сохранения ламинарного перемещения жидкого металла в форме: для мелких

Витебский государственный технологический университет

тонкостенных отливок скорость не превышает 0,2 м/с; для массивных толстостенных – 0,1 м/с.

Продолжительность технологических операций должна быть минимальной.

Выдержка под давлением металла в пресс-форме для отливок диаметром 50-125 мм составляет 60-150 с.

Температура заливки жидких сплавов в форму превышает температуру ликвидуса сплава на 50-150 °С. Температура формы для алюминиевых сплавов не должна превышать 300 °С, для медных сплавов – 400 °С.

Витебский государственный технологический университет

3.8 Электрошлаковое литье

Производство отливок включает ряд последовательных процессов: плавка металла, транспортировка к форме, ее заполнение и кристаллизация. В течение всего производственного цикла в жидком металле интенсивно протекают окислительные процессы газонасыщения, а также взаимодействия с материалами формы. Это неизбежно приводит к ухудшению качества отливок.

Сущность электрошлакового литья заключается в том, что плавка, транспортировка металла и заполнение формы происходят одновременно, непосредственно в самой форме при полной изоляции от атмосферного воздействия. Это позволяет, с одной стороны, сократить время производственного цикла, а с другой – обеспечить химическую чистоту расплава.

Различают следующие способы электрошлакового литья: с прямым выплавлением металла в форму; с переливом металла и с приплавлением закладных элементов отливки.

Способ литья с прямым выплавлением металла заключается в следующем (рис. 3.18). Жидкий металл, предназначенный для заполнения формы, получают путем переплава электрода из металла, требуемого химического состава. Источником нагрева электрода является шлаковая ванна. В начале процесса в водоохлаждаемый медный кристаллизатор 6 заливают предварительно расплавленный шлак специального состава. Электрический ток подводится к переплавляемым электродам 7 с затравки 1 в нижней части кристаллизатора 6. Шлаковая ванна обладает высоким электросопротивлением. При прохождении через нее электрического тока ванна нагревается до температуры 2000 °К и более. При погружении в ванну концы электродов оплавляются. Капли расплавленного металла проходят через ванну шлака 4, собираются в зоне кристаллизации, образуя под слоем шлака металлическую ванну 3. Металлическая ванна непрерывно пополняется в верхней части

расплавом от плавящихся электродов и последовательно затвердевает в нижней части вследствие отвода теплоты через стенки кристаллизатора. Для получения отливки 2 электроды 7 по мере их оплавления и затвердевания отливки постепенно поднимаются вверх. Для образования полости в отливке водоохлаждаемый металлический стержень 5 также перемещается вверх.

Таким образом, формообразование отливки осуществляется в результате направленной кристаллизации металла – снизу вверх, а литейная форма выполняет две функции: служит устройством для приготовления расплава и непосредственно для формирования отливки.

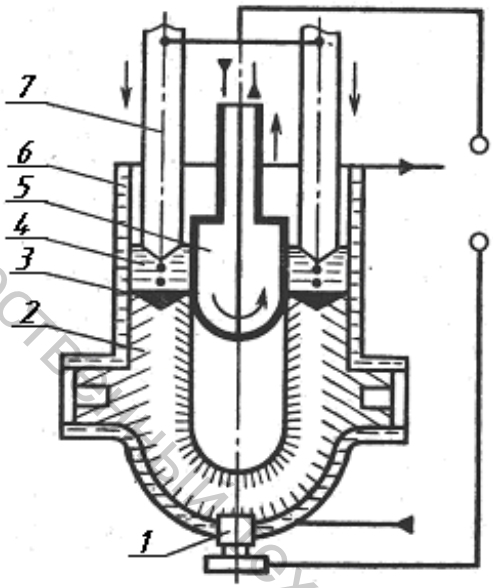


Рисунок 3.18 - Схема электрошлакового литья с прямым выплавлением металла в форму:
1 – затравка; 2 – отливка; 3 – металлическая ванна; 4 – шлак;
5 – металлический стержень; 6 – кристаллизатор; 7 – электроды

Способ электрошлакового литья с переливом металла (рис. 3.19 *а*) предполагает разделение процессов плавки электродов и кристаллизации жидкого металла, которые осуществляются порознь в плавильной печи и литейной форме. Жидкий металл из плавильной печи поступает в форму путем перелива. Плавильная печь перемещается вверх относительно неподвижной формы по мере ее заполнения. Металл в плавильной печи и форме постоянно находится под слоем жидкого флюса.

Способ электрошлакового литья с приплавлением (рис. 3.19 *б*) применяется для изготовления отливок сложной конфигурации. В этом случае заранее изготовленные закладные элементы устанавливают в знаковые части литейной формы. При плавке металла в форме по определенному режиму происходит соединение закладных элементов с кристаллизующимся в форме жидким металлом. Способ позволяет получать не только сложные по конфигурации отливки, но и комбинированные по составу.

Витебский государственный технологический университет

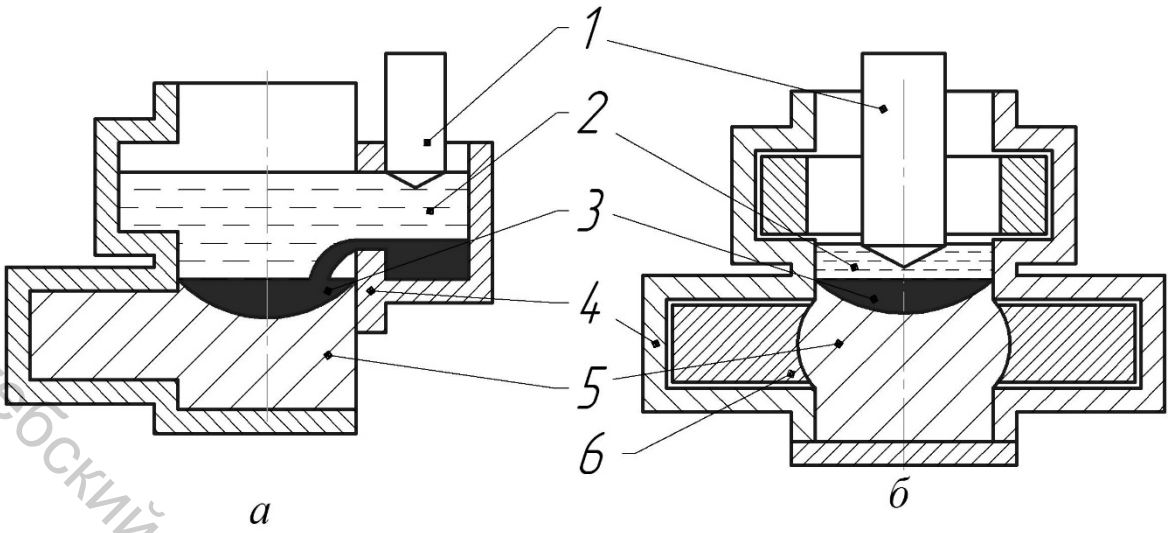


Рисунок 3.19 - Схемы электрошлакового литья с переливом металла (а) и приплавлением (б):
1 – расходуемый электрод; 2 – жидкий шлак; 3 – жидкий металл; 4 – форма; 5 – отливка; 6 – закладной элемент

Качество отливок при электрошлаковом литье обусловлено особенностями формирования. Перенос капель расплава с конца электрода через шлаковую ванну, интенсивное взаимодействие расплава со шлаком, последовательная и направленная кристаллизация расплава при высокой интенсивности охлаждения способствуют удалению из расплава неметаллических включений и растворенных газов, получению плотного однородного кристаллического строения отливки.

На кристаллическое строение отливки существенное влияние оказывает направление тепловых потоков: основное количество теплоты отводится в осевом направлении. Переносу теплоты в радиальном направлении препятствует тонкая корочка малотеплопроводного шлака между отливкой и кристаллизатором. Основное количество теплоты подводится в верхнюю часть отливки расплавленным и перегретым электродным металлом, а высокий перегрев шлаковой ванны создает градиент температур в осевом направлении. В результате расплав кристаллизуется в осевом или радиально-осевом направлениях. Это способствует формированию в отливке столбчатых кристаллов, а благодаря осевой или радиально-осевой их направленности, непрерывному питанию растущих кристаллов в отливке исключаются усадочные дефекты, трещины, ликвационная неоднородность.

Химический состав металла в отливке по основным элементам практически не изменяется, но содержание кислорода и азота снижается в 1,5-2 раза, понижается концентрация серы и уменьшается в 2-3 раза загрязненность металла неметаллическими включениями. При этом неметаллические включения становятся мельче и равномерно

Витебский государственный технологический университет

распределяются в отливке. Особенности формирования отливки оказывают положительное влияние на механические свойства металла: улучшается микроструктура отливки, резко возрастают пластические свойства. Поэтому механические свойства отливок выше, чем поковок и проката из металла одинакового химического состава.

Поскольку отливка выплавляется в металлической форме, покрытой изнутри тонким слоем шлака, качество поверхности отливки получается высоким, отливка не требует очистки, а во многих случаях и обработки резанием.

Таким образом, при электрошлаковом литье отпадает необходимость в плавильных печах, приготовлении формовочных и стержневых смесей, формовке литниковых систем и прибыли. Полученные отливки имеют поверхность высокого качества.

Вместе с тем для изготовления отливки требуется достаточно сложная и дорогостоящая литейная форма, специальные заготовки-электроды из проката или предварительно отлитые.

Накопленный производственный опыт показывает, что наиболее выгодно использовать этот процесс для получения отливок из специальных сталей и сплавов и отливок ответственного назначения, к которым предъявляются повышенные требования по качеству металла, механическим свойствам.

Способом электрошлакового литья получают полые заготовки цилиндров, трубы круглого и овального сечений, корпуса задвижек запорной и регулирующей арматуры тепловых и атомных электростанций, сосуды сверхвысокого давления, коленчатые валы, шатуны и другие детали крупных судовых двигателей, прокатные валки, бандажи цементных печей, заготовки штамповочного и режущего инструмента и другие детали.

Производство заготовок электрошлаковым литьем взамен поковок и стальных отливок имеет следующие преимущества: экономится значительное количество металла; возможен переход к новым, более экономичным конструктивным решениям; значительно сокращается объем обработки резанием.

При замене поковок электрошлаковыми отливками расход металла благодаря уменьшению припусков на обработку резанием снижается почти в 2 раза.

3.9 Непрерывное литье монолитных заготовок

Сущность непрерывного литья заключается в получении длинномерных отливок послойного поперечного сечения непрерывной заливкой литейных форм-кристаллизаторов на вертикальных или горизонтальных установках непрерывного действия.

Витебский государственный технологический университет

Процесс непрерывного литья осуществляется следующим образом (рис. 3.20). Расплав из ковша 1 равномерно и непрерывно поступает в водоохлаждаемую металлическую форму-кристаллизатор 2. Частично затвердевшая часть 3 отливки (слитка, прутка, заготовки прямоугольного, квадратного сечения, трубы) непрерывно извлекается валками 4 или иными устройствами; если требуется, отливка разрезается на заготовки пилой 5.

Особенности процесса формирования непрерывной отливки обусловлены тем, что в кристаллизаторе в разных его зонах по высоте или длине в каждый данный момент одновременно происходят все последовательные стадии охлаждения и затвердевания расплава (рис. 3.20): I - кристаллизатор заполняется расплавом; II - отвод теплоты перегрева; III - кристаллизация; IV - охлаждение отливки. Высокая интенсивность охлаждения расплава способствует направленной его кристаллизации, уменьшению ликвационной неоднородности, неметаллических и газовых включений, а непрерывная подача расплава в верхнюю часть кристаллизующейся отливки -постоянному питанию фронта растущих кристаллов, устранению усадочных дефектов (раковин, рыхлот, пористости). Таким образом, сущность процесса непрерывного литья заключается в возможности создания условий направленной кристаллизации и питания отливки.

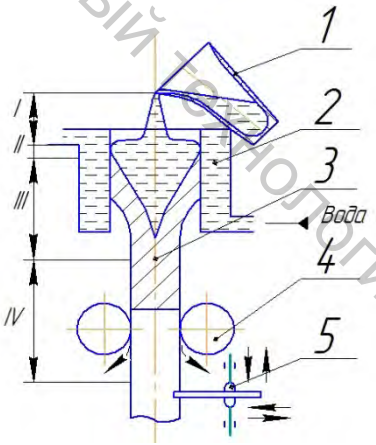


Рисунок 3.20 - Схема получения отливок при непрерывном литье на вертикальных установках:
1 – ковш; 2 – форма-кристаллизатор; 3 – отливка;
4 – валки; 5 – отрезная пила

Скорость вытягивания слитка (профиля) зависит от температуры, физических свойств и распределения жидкого металла в форме и достигает 2,5 м/мин. Длина кристаллизатора, температурные режимы литья зависят от свойств отливаемого сплава. Алюминиевые и медные сплавы льют в короткие (до 300 мм) кристаллизаторы, а стали и чугуны – в длинные (от 1000 до 1500 мм) кристаллизаторы. Как правило, заготовки, полученные способом непрерывного литья, имеют плотное, без усадочных дефектов строение, малую ликвационную

Витебский государственный технологический университет

неоднородность и газосодержание, чистую поверхность, достаточно высокую точность размеров. Однако высокая скорость охлаждения расплава во многих случаях приводит к образованию значительных внутренних напряжений в отливках, а иногда к трещинам.

Достоинства непрерывного литья: возможность получения отливок постоянного поперечного сечения неограниченной длины; увеличение выхода годного металла путем уменьшения расхода на прибыли и донные части слитков; уменьшение расходов на изготовление изложниц и литейных форм; повышение качества металла, точности и улучшение поверхности отливок; автоматизация процесса разливки расплава, возможность создания непрерывно действующих агрегатов для получения слитков и последующей их прокатки в профили или литых заготовок деталей машин и последующей их обработки вплоть до готового изделия; полное исключение трудоемких операций изготовления литейных форм, выбивки, обрубки, очистки отливок; устранение из литейного цеха формовочных и стержневых смесей и связанное с этим существенное улучшение условий труда и уменьшение вредного воздействия литейного процесса на окружающую среду.

Таким образом, непрерывное литье - это прогрессивный материало- и трудосберегающий технологический процесс, позволяющий повысить качество отливок, производительность и улучшить условия труда.

Непрерывное литье позволяет получать отливки сложной конфигурации, которая определяется возможностью непрерывного извлечения из кристаллизатора. Расширение области применения этого прогрессивного процесса литья для машиностроительных деталей связано с необходимостью пересмотра устоявшихся конструктивных решений тех или иных деталей и узлов машин, разработки таких конструкций деталей, которые могли бы быть изготовлены этим способом.

Важнейшим технологическим параметром процесса непрерывного литья является интенсивность охлаждения расплава, определяющая скорость кристаллизации отливки и соответственно ее качество, а также производительность процесса. Увеличение скорости кристаллизации способствует созданию условий направленной кристаллизации и повышению качества литого металла, производительности установок.

Интенсивность отвода теплоты от расплава в кристаллизаторе ограничена тем, что вследствие усадки отливки между кристаллизующейся корочкой металла и стенками кристаллизатора образуется зазор, снижающий скорость отвода теплоты. Для устранения этого явления на определенном участке (по высоте) кристаллизатор делают с обратной конусностью. Однако при недостаточно точном соблюдении температурных режимов литья и скорости вытягивания отливки

Витебский государственный технологический университет

обратная конусность повышает вероятность обрыва корочки металла, появления в ней надрывов и трещин.

Для литья фасонных профилей с отверстиями используют установки горизонтального типа с графитовым водоохлаждаемым кристаллизатором (рис. 3.21).

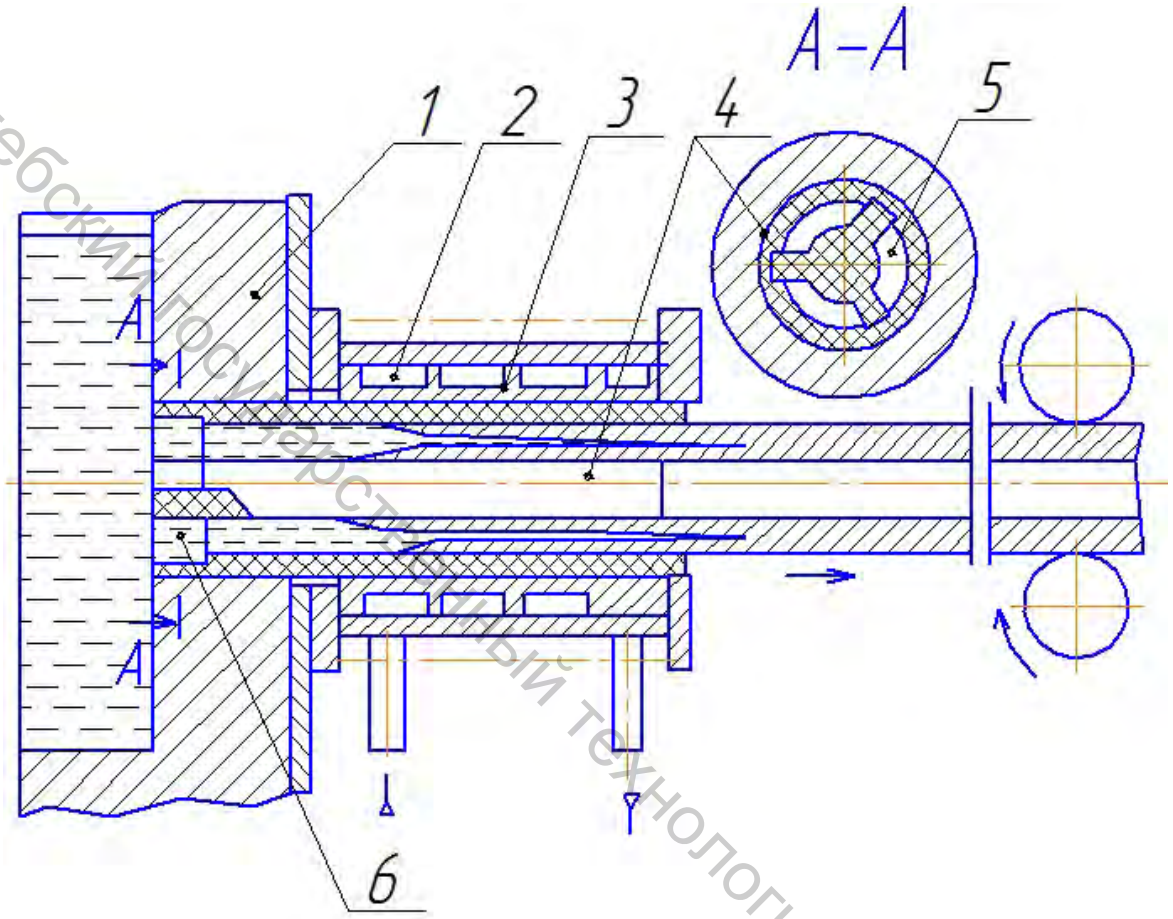


Рисунок 3.21 - Схема кристаллизатора для горизонтального непрерывного литья трубчатых заготовок:
1 – раздаточная печь; 2 – водоохлаждаемая рубашка;
3 – графитовый вкладыш; 4 – стержень; 5 – отверстия

Область применения непрерывного литья – получение сплошных круглых и прямоугольных заготовок под последующую обработку давлением из алюминия, магния, меди и их сплавов, конструкционных, углеродистых и низколегированных сталей; полых цилиндрических заготовок из сплавов на основе меди под обработку резанием; чугунных заготовок, используемых в станках, судо-, автомобиле- и тракторостроении, химической, авиационной и стекольной промышленности (рис. 3.22).

Витебский государственный технологический университет

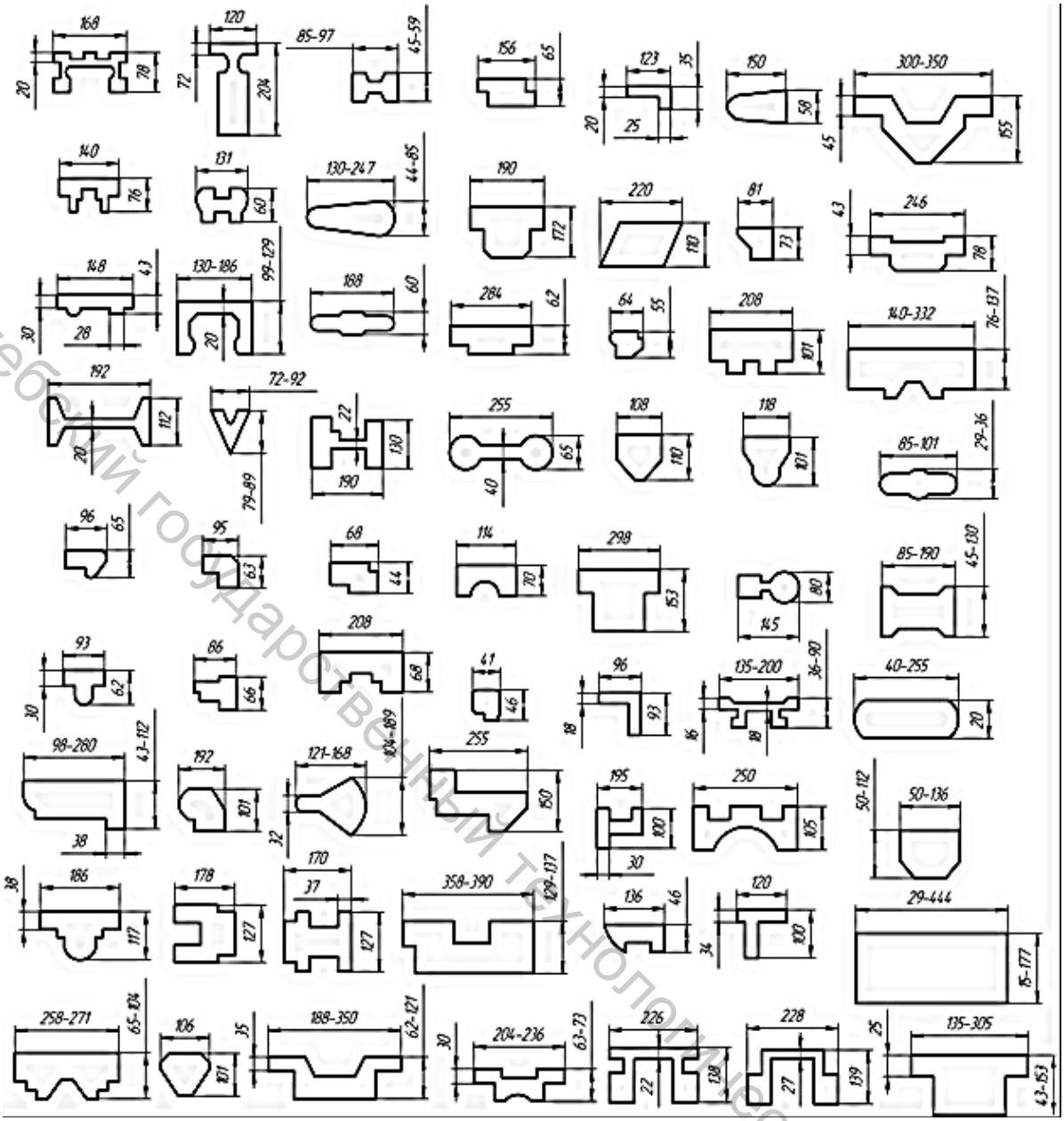


Рисунок 3.22 - Типоразмеры заготовок, получаемых методами непрерывного литья

Детали из этих заготовок устанавливают на металлорежущие станки, автоматы, полуавтоматы, деревообрабатывающие, литейные, кузнечно-прессовое и текстильное оборудование.

Основные достоинства непрерывного литья:

- возможность получения заготовок с минимальными припусками и максимально приближенных по конфигурации и размерам к готовым деталям, уменьшение за счет этого расхода металла на 15–25 %;
- увеличение выхода годных изделий до 85–92 %;
- исключение наиболее трудоемких операций формовки, смесеприготовления, обрубки и очистки литья;
- значительное сокращение расхода вспомогательных операций;

Витебский государственный технологический университет

- увеличение производительности по сравнению с литьем в разовые песчано-глинистые формы возрастает в 4 раза;

- себестоимость снижается в 1,5 раза.

3.9.1 Непрерывное литье многослойных заготовок

Непрерывное литье многослойных заготовок является одним из наиболее перспективных направлений в развитии производства многослойного проката. Этот способ позволяет значительно повысить производительность труда, снизить себестоимость готовых изделий, создать благоприятные условия для механизации и автоматизации производственных процессов.

Предложено множество способов и устройств для реализации процессов многослойного литья. На рисунке 3.23 представлены наиболее распространенные схемы процессов формообразования многослойных отливок. Суть этих процессов состоит в следующем. В режиме непрерывной заливки металла первоначально формируется слой основного металла, т. е. в систему кристаллизаторов подается, охлаждается и затвердевает металл основного слоя. Полученная заготовка основного слоя в дальнейшем является частью системы кристаллизаторов. На поверхность затвердевшего, но еще горячего слоя основного металла поступает металл плакирующего слоя. В результате взаимодействия металлов твердого, но горячего основного слоя, и жидкого плакирующего происходит их соединение (сварка). Полученное слоистое изделие валками вытягивается из системы кристаллизаторов. Этим способом можно получать двухслойные, трехслойные изделия простой и сложной конфигурации.

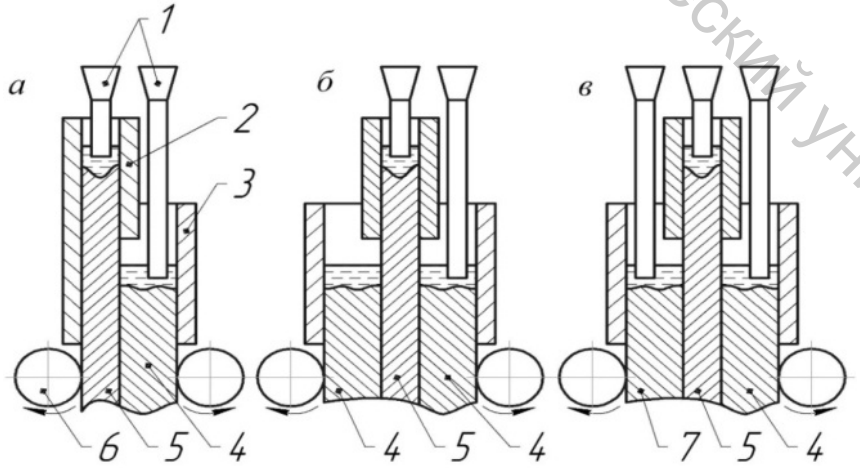


Рисунок 3.23 - Схемы непрерывного литья многослойных заготовок:
а – двухслойных; б – трехслойных биметаллический; в – трехслойных;
1 – питатели; 2, 3 – соответственно внутренний и наружный кристаллизаторы; 4, 7 – плакирующие слои;
5 – основной слой; 6 – валки

Витебский государственный технологический университет

На рисунке 3.24 представлена схема промышленной установки для непрерывного литья плоских слоистых заготовок, предназначенных для последующей прокатки.

Установка включает два кристаллизатора – верхний 3 и нижний 1. Верхний кристаллизатор предназначен для формирования заготовки основного слоя 2, а нижний – плакирующего слоя 6. Основной металл поступает из сталеразливного ковша 4, подвешенного на кране, а плакирующий – из ковша 5, установленного на стенде. В процессе разливки затвердевшая заготовка 2 из основного металла поступает в нижний кристаллизатор, в который заливают плакирующий металл. При взаимодействии последнего со слабоокисленной горячей поверхностью заготовки из основного металла образуется биметаллическая заготовка. На установке можно отливать трехслойные и двухслойные заготовки. Для формообразования двухслойных отливок верхний кристаллизатор необходимо сместить относительно одной из граней нижнего кристаллизатора.

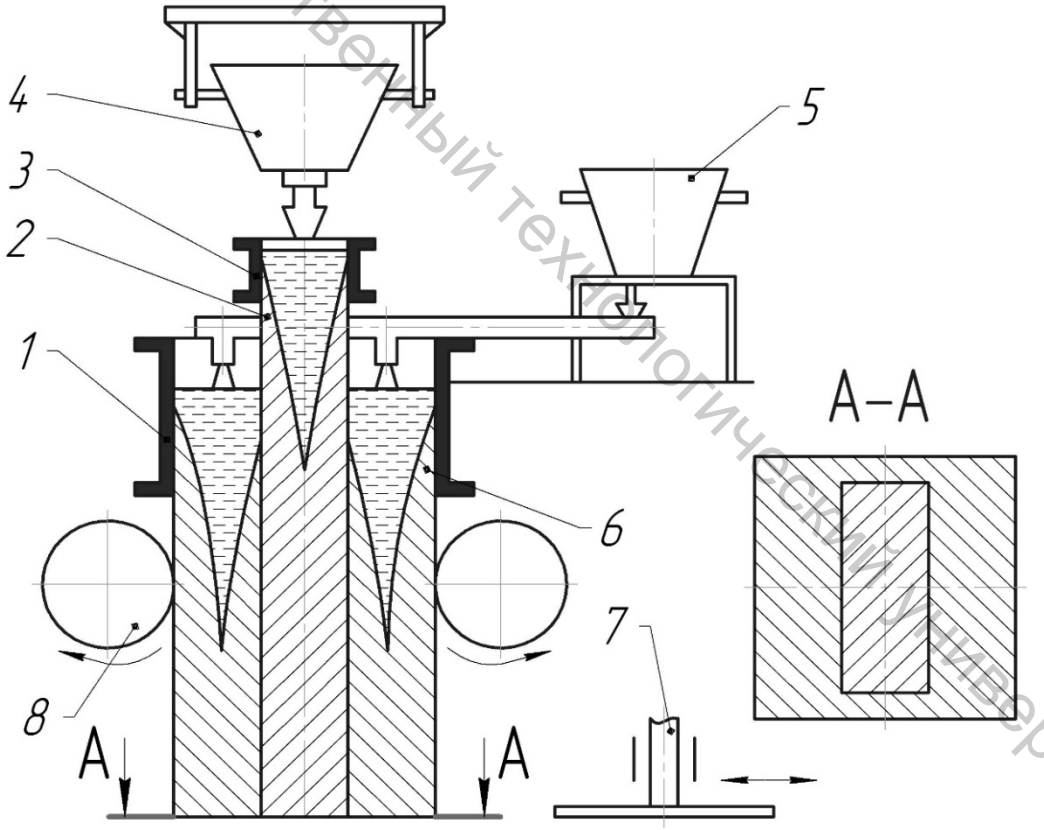


Рисунок 3.24 - Схема промышленной установки непрерывного литья плоских слоистых заготовок:
1 – нижний кристаллизатор; 2 – основной слой;
3 – верхний кристаллизатор; 4, 5 – разливочные ковши соответственно основного и плакирующего слоев;
6 – плакирующий слой; 7 – отрезная пила;
8 – тянущие валки

Витебский государственный технологический университет

На установке получают заготовки с внутренним слоем из мягкой стали 15 и наружными слоями из стали 60, предназначенные для прокатки трехслойной стали.

Были апробированы отливки трехслойных заготовок сталь У9 + сталь 10 + сталь У9, а также трехслойные и двухслойные заготовки с плакирующими слоями из сталей 12Х18ХН10Т и 10х13 с основным слоем из стали Ст3.

Номенклатура и сортамент изделий, которые могут быть получены из непрерывно литых биметаллических заготовок, достаточно широки: отвалы плугов, лемехи, плоскорезы, диски лущильников и борон, пальцы звеньев гусениц тракторов и другое оборудование для сельскохозяйственного машиностроения; биметаллические трубы, двух- и трехслойный лист, плакированный нержавеющей сталью для химического машиностроения и автомобильной промышленности; круглые биметаллические заготовки для изготовления крупногабаритных высоконагруженных шестерен, в частности ведущей шестерни редуктора электровоза; тяжелонагруженных железнодорожных рельсов и колес; заготовки композиции «сталь + цветной металл», в частности медь, для электрохимической промышленности.

3.10 Комбинирование процессов литейного производства и обработки давлением

Можно выделить четыре основных группы комбинирования процессов литья и обработки давлением: литьё-прокатка; литьё-прессование; литьё-прессование-прокатка, литье-прокатка-армирование.

Литьё-прокатка является одним из первых реализованных совмещенных процессов. Процесс осуществляется в режиме непрерывно отливаемой заготовки и в нагретом состоянии подачи её в прокатный стан, где заготовка подвергается пластическому формоизменению. Для реализации процесса были созданы мощные технологические линии, совмещающие плавку, литье и прокатку, а оборудование названо литейно-прокатными агрегатами. К середине восьмидесятых годов использование этих агрегатов обеспечивало выпуск высококачественной катанки и ленты, объём которых значительно превысил потребности многих стран.

Все промышленные линии независимо от типа применяемого в них кристаллизатора имеют общую структуру, а их конструкционные различия определяются видом получаемого изделия, типом применяемых литейных машин, производительностью агрегатов в целом. Наиболее просты по конструкции горизонтальные кристаллизаторы скольжения и агрегаты на их основе. Недостатком

Витебский государственный технологический университет

непрерывного литья через такой кристаллизатор является сравнительно низкая скорость движения отливаемой заготовки по сравнению со скоростью её прокатки.

Решение проблемы выравнивания скоростей литья и прокатки заключается в использовании роторных (карусельных) кристаллизаторов. Новейшие изобретения, относящиеся к агрегатам с роторными литейными машинами, направлены на повышение стойкости литейных лент, совершенствование системы охлаждения, конструкции деталей и узлов, и в целом повышение рентабельности производства.

Литьё-прессование осуществляется на базе способа Конформ и карусельной литейной машины Кастекс (рис. 3.25). Машина такой конструкции оснащена системой подачи жидкого металла из тигля 1 через металлопровод 4 непосредственно в ручей, образованный поверхностями колеса 5 и башмака 9. Скорость подачи жидкого металла изменяется регулятором 2. Охлаждение колеса 5 осуществляется водой, циркулирующей по каналам внутреннего оребрения 6.

Быстрое охлаждение металла позволяет получить литую заготовку с незначительной ликвацией и мелким зерном, что обеспечивает высокую пластичность металла. В процессе вращения колеса происходит перемещение металла вдоль ручья и выдавливание через матрицу 8.

Стабильность процесса во многом зависит от системы непрерывной подачи расплавленного металла в ручей. Скорость перемещения расплавленного металла должна быть постоянной и соответствовать скорости его затвердевания, определяемой интенсивностью теплоотвода от рабочего колеса.

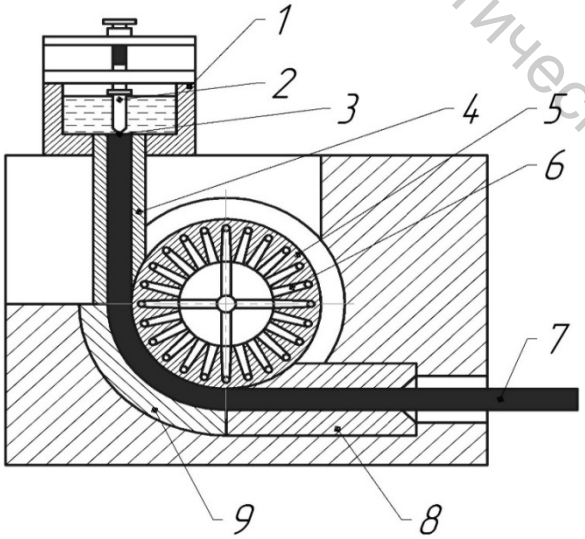


Рисунок 3.25 - Схема реализации процесса непрерывного литья-прессования по способу Конформ-Кастекса:
1 – тигель; 2 – регулятор; 3 – жидкий металл; 4 – металлопровод; 5 – колесо; 6 – внутреннее оребрение; 7 – изделие; 8 – матрица; 9 – башмак

Витебский государственный технологический университет

Литьё-прокатка-прессование осуществляется по схеме, приведённой на рисунке 3.26.

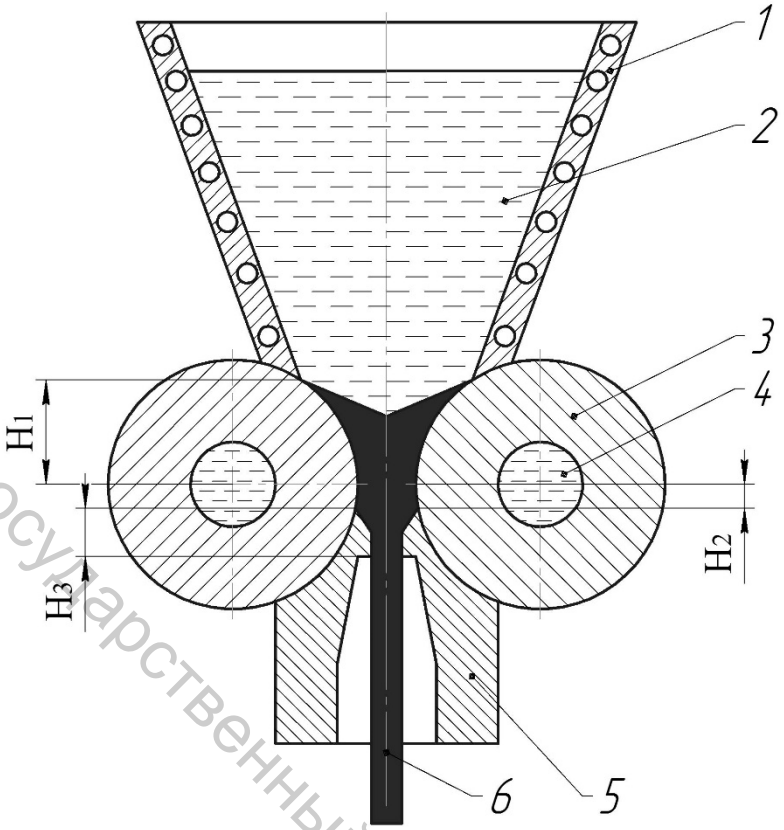


Рисунок 3.26 - Схема реализации совмещения процессов литья-прокатки-прессования:
1 – тигель; 2 – расплав; 3 – валки; 4 – отверстие; 5 – матрица;
6 – изделие;
H_1 – высота участка кристаллизации и поперечного сжатия заготовки (литье-прокатка); H_2 – высота участка продольного перемещения заготовки; H_3 – высота участка прессования заготовки

Расплав 2 непрерывно поступает в валки 3 и кристаллизируется в виде заготовки прямоугольной формы. С целью интенсификации процессов кристаллизации и охлаждения валков в них выполнены отверстия 4, по которым циркулирует вода. На участке высотой H_1 под действием нормальных сил со стороны валков заготовка обжимается в поперечном сечении.

На участке H_2 контактными силами трения со стороны валков заготовка перемещается к отверстию матрицы 5 и на участке H_3 происходит выдавливание заготовки через отверстия.

Контактные силы трения на участке H_2 между заготовкой и валками направлены по ходу движения заготовки. На участке H_3 контактные силы трения между заготовкой и поверхностью отверстия матрицы, наоборот, направлены против движения заготовки.

Контактные силы трения на участках H_1 и H_3 направлены навстречу друг другу и обеспечивают сжатие заготовки по всей длине.

Витебский государственный технологический университет

Принимая во внимание, что в поперечном направлении на участках H_1 и H_3 заготовка подвергается сжатию, можно констатировать, что по всему объёму очага деформации имеет место объёмное сжатие, обеспечивающее мелкозернистую плотную структуру и сводящее к минимуму внутренние напряжения.

Литье-прокатка-армирование осуществляется по схеме, представленной на рисунке 3.27. В валковый кристаллизатор непрерывно подается сплав 4 и армирующая сетка 3. В зазоре между валками происходит кристаллизация сплава, его соединения с армирующей сеткой, сжатие и уплотнение в поперечном направлении с образованием биметаллической ленты 1.

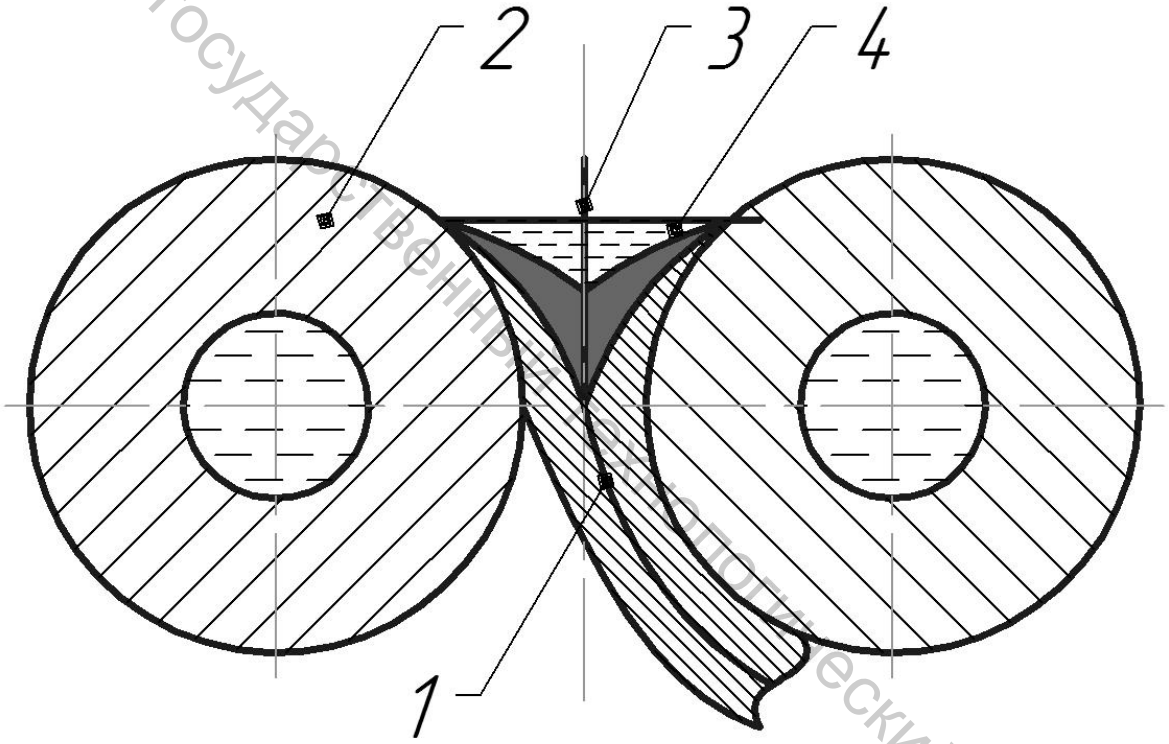


Рисунок 3.27 - Схема непрерывного литья-прокатки-армирования биметаллических лент:
1 – армированная лента; 2 – валки-кристаллизаторы;
3 – армирующая сетка; 4 – расплав

Витебский государственный технологический университет

ГЛАВА 4
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ РЕЗКИ И СВАРКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

4.1 Фрикционная обработка материалов

При относительном перемещении твердых тел, прижатых друг к другу силой Р, возникают силы трения и часть механической энергии, затрачиваемой на преодоление силы трения, превращается в тепловую. Количество выделяемой теплоты пропорционально скорости относительного перемещения Vот и величине нормального давления ρ

$$Q = k\text{т}\rho f V\text{от},$$

где kт - коэффициент, учитывающий долю механической энергии, превращающейся в теплоту; f - коэффициент трения.

При определенных условиях локальные участки поверхностных слоев трущихся тел могут нагреваться до высоких температур. Фрикционный нагрев используют при осуществлении таких технологических операций, как фрикционная отбортовка отверстий, фрикционная резка, фрикционная сварка.

4.1.1 Фрикционная резка

Фрикционная отбортовка отверстий. Фрикционная отбортовка позволяет получать безотходные отверстия в листовом материале. Отличительной особенностью этого вида отбортовки является образование двухстороннего буртика. На рисунке 4.1 представлены основные стадии формообразования отверстия.

На первой стадии (1) инструмент из тугоплавкого и жаропрочного материала подводится к листовой заготовке и прижимается к ней, после чего инструменту сообщается вращательное движение. При дальнейшем поступательном движении инструмент своей конической частью внедряется в заготовку (2). В результате фрикционного тепловыделения пластичность материала заготовки повышается и начинается его деформация. Коническая часть инструмента проходит через материал заготовки (3) и формирует коническое отверстие в пластичном материале. В процессе дальнейшего перемещения инструмента его цилиндрическая (калибровочная) часть начинает формировать внутренний диаметр отверстия (4). В нижнем положении инструмента формообразование втулки завершается (5). После чего инструмент выводят из отверстия в

Витебский государственный технологический университет

исходное положение (6). При необходимости возможно нарезание резьбы метчиком (7).

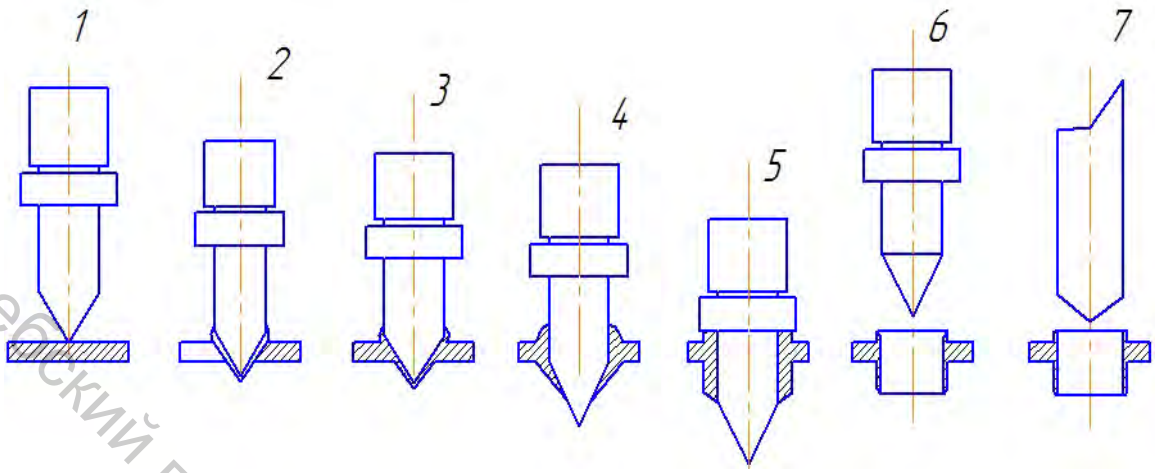


Рисунок 4.1 - Основные стадии фрикционной обортовки

Технология фрикционной отбортовки отверстий находит все более широкое применение. Соответствующее оборудование и инструменты изготавливаются в Голландии, Германии, США.

Фрикционная отрезка. Операции фрикционной отрезки и прорезки пазов осуществляется с помощью вращающегося дискового инструмента. Диск поджимается к заготовке с некоторым усилием подпружиненного регулирующего устройства. Диск вращается вокруг собственной оси. В отдельных случаях к инструменту и заготовке подводят напряжение от сильного точного источника питания и резку осуществляют комбинированным электрофрикционным способом. Для интенсификации отвода тепла от диска-инструмента его добавочно обдувают струей сжатого воздуха.

4.1.2. Сварка трением с перемешиванием слоев.

Технологический процесс этой разновидности фрикционной сварки включает три основных стадии (рис. 4.2). На первой стадии – вращающийся с высокой скоростью инструмент 1 цилиндрической ступенчатой формы вводят в отверстие, расположенное на стыке свариваемых заготовок 2, 3. Когда торец инструмента 6 войдет в контакт с поверхностями заготовок, погружение прекращают и приступают ко второму этапу процесса – перемещению вращающегося инструмента по плоскости контакта заготовок. На третьем этапе (по окончании процесса соединения) вращающийся инструмент выводят из стыка.

Витебский государственный технологический университет

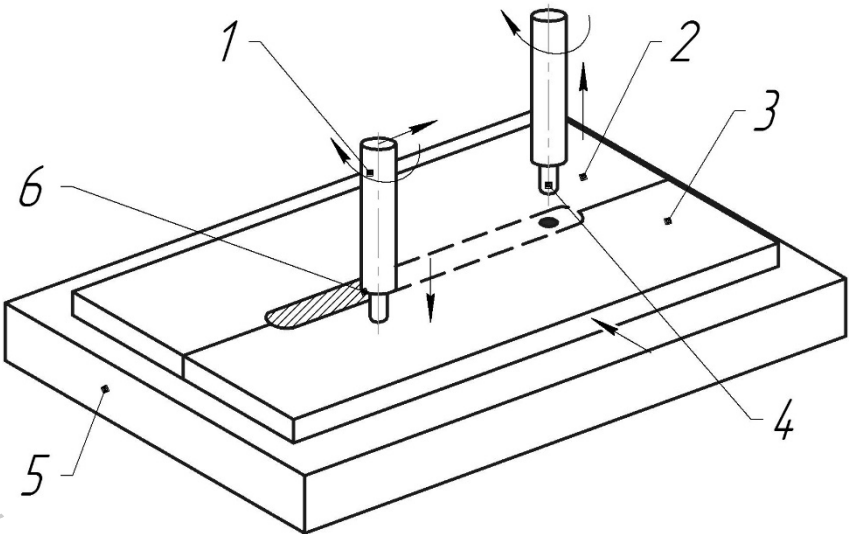


Рисунок 4.2 - Технологическая схема сварки трением с перемешиванием слоев:
1 – корпус инструмента; 2, 3 – заготовки; 4 – наконечник инструмента; 5 – опорная плита; 6 – торец инструмента

Тепловая энергия, генерируемая трением стержня инструмента о поверхности заготовок, локализовано выделяется в непосредственной близости от будущего соединения и доводит металл до высокопластического состояния. Впереди инструмента возникает очаг деформации между двумя заготовками и инструментом, совершающим одновременно поступательное и вращательное движения. В очаге деформации возникает сложное объёмное перемещение слоев металла. С одной стороны металл деформируется нормальными контактными силами инструмента в направлении продольного перемещения инструмента, и с другой стороны тангенциальными (круговыми) силами трения.

Позади инструмента освобождается пространство, ограниченное поверхностями опорной плиты 5, заготовок 2, 3 и торцом инструмента 6. В это пространство из передней части перемещаются деформируемые слои. В результате позади инструмента происходит интенсивное, заполнение пространства, смешивание и соединение слоев заготовок с образованием единого цельного сварного шва.

К подготовке кромок, как и всей поверхности, а так же сборке элементов под сварку трением с перемешиванием не предъявляются какие-либо специальные требования. Нет необходимости в предварительном удалении оксидов. Оксидная пленка в процессе сварки разрушается, дисперсно упрочняется и равномерно распределяется по всему объему вращающимся инструментом.

Собранные под сварку стыки должны быть без зазоров. Отклонения инструмента в процессе его перемещения по линии должны быть строго регламентированы.

Витебский государственный технологический университет

Свариваемые заготовки прижимают к опорной плите с помощью силовых приспособлений, которые предотвращают нарушения плоскостности и поперечного перемещения свариваемых элементов под воздействием контактных сил вращающегося инструмента. Плотное прижатие заготовок к опорной плите позволяет обеспечивать точную установку инструмента и контролировать глубину погружения инструмента в процессе сварки, что очень важно для качественного формирования зоны шва.

Основными параметрами являются: скорость сварки (скорость перемещения инструмента вдоль оси шва), частота вращения инструмента, усилие прижатия и перемещения инструмента, угол наклона инструмента и его размеры. Так же учитываются условия трения в зависимости от применяемого материала инструмента и напряжения течения материала заготовок при температуре деформации.

Во избежание недогрева или перегрева металла необходимо назначать оптимальное соотношение скоростей поступательного и вращательного движения. Это соотношение зависит от множества факторов и на практике устанавливается экспериментально.

Существенное влияние на формирование швов оказывают частота вращения инструмента и скорость сварки. Тепловыделение в зоне сварки повышается с увеличением количества оборотов инструмента или уменьшением скорости его перемещения вдоль стыка. При определенном для каждого конкретного сплава соотношении частоты вращения инструмента и скорости сварки выделяемой за счет трения теплоты может оказаться недостаточным для пластификации требуемого объема металла, чтобы заполнить всю полость, образуемую наконечником инструмента. В результате нарушается непрерывность потока, перемещающегося по сложной траектории металла, а в шве образуются внутренние незаполненные полости. При сохранении той же скорости вращения инструмента и уменьшении скорости его поступательного перемещения пластифицированного металла становится больше, благодаря чему качество сварного шва улучшается. При чрезмерном уменьшении скорости сварки происходит избыточное выделение тепла, приводящее к перегреву металла, оплавлению легкоплавких эвтектик на межзеренных границах и образованию внутренних дефектов в виде полостей и несплошностей.

Результаты экспериментальных исследований показали, что качество формирования швов, например, алюминиевых сплавов, главным образом зависит от таких параметров, как размер и конфигурация рабочих поверхностей бурта и наконечника инструмента, усилия прижатия инструмента к поверхностям листов. Чрезмерно большой диаметр бурта способствует формированию широкой лицевой поверхности шва, значительному короблению сварных соединений и образованию дефектов вследствие перегрева металла в зоне сварки. Установлено, что для сварки алюминиевых сплавов толщиной 1,8–2,5

Витебский государственный технологический университет

мм оптимальный наружный диаметр бурта инструмента должен находиться в пределах 10–12 мм. Кроме того, для обеспечения стабильности формирования швов на торцевой поверхности бурта необходимо делать небольшое кольцевое углубление, обеспечивающее плавное и непрерывное перемещение пластифицированного металла и формирование качественной лицевой поверхности швов. Размер его должен быть таким, чтобы при небольшом заглублении бурта инструмента перемещающийся металл постоянно находился под избыточным давлением.

Перемешивание металла по всей толщине свариваемых кромок в процессе сварки происходит за счет перемещения его вращающимся наконечником инструмента. Проведенные эксперименты показали, что получить качественное сварное соединение можно при использовании наконечника инструмента в виде простого усеченного конуса. Во избежание несплавления в корневой части шва длина наконечника должна составлять 0,9–0,95 толщины свариваемых материалов.

Хорошие результаты получены при использовании сборного инструмента с раздельным исполнением корпуса и наконечника (рис. 4.3). Этот вариант конструкции обеспечивает различные скорости и направления вращения друг относительно друга наконечника и корпуса.

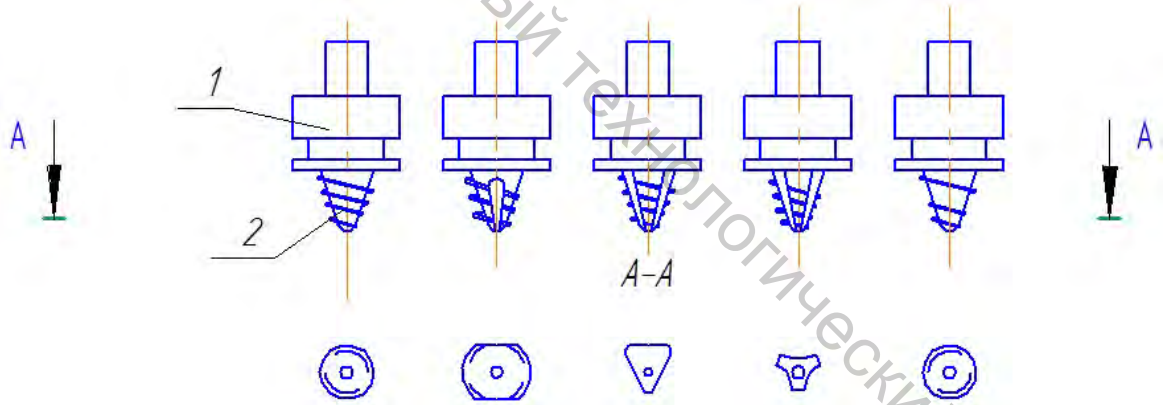


Рисунок 4.3 - Разновидности инструмента
с раздельным исполнением корпуса и наконечника:
1 – корпус; 2 – наконечник

Используемые установки для реализации этого метода позволяют предварительно задавать различные скорости вращения, либо автоматически их изменять в процессе, чтобы достичь желаемых условий сварки. При обычном методе сварки относительная скорость вращения точек изменяется от нуля в центре до максимума на краю фланца, что может вызвать значительный нагрев и оплавление поверхности, прилегающей к фланцу (бурту). Раздельное вращение составного инструмента применяется для снижения скорости вращения корпуса инструмента до соответствующего уровня и, следовательно,

Витебский государственный технологический университет

способствует уменьшению тенденции к перегреву и оплавлению, сохраняя при этом высокую скорость вращения наконечника.

Преимущество сварки с раздельным вращением состоит в том, что она снижает максимальную температуру, достигаемую в течение термического цикла сварки, что помогает избегать проблем ликвационных трещин. Так же более низкие температуры, достигаемые в сварном шве при сварке с раздельным вращением, уменьшают величину изменений механических свойств, которые происходят в процессе перемешивания материала. После двух месяцев естественного старения швы, выполненные с раздельным вращением корпуса инструмента и наконечника, показали более высокие значения твердости в зоне перемешивания и зоне термического влияния, чем при обычном методе сварки.

Предложено много вариантов конструкций инструментов, отличающихся, главных образом, конструктивными особенностями рабочего стержня. Рекомендуется стержень выполнять в виде усеченного конуса. Предложены различные варианты его поперечного сечения. Отмечается высокая эффективность винтовой нарезки на рабочем стержне с равномерным или переменным шагом и создание функционального рельефа на торце буртика.

В процессе сварки некоторое количество материала выдавливается на лицевую поверхность шва. Разработан инструмент, позволяющий в процессе сварки срезать лишний материал, зачищая поверхность.

Целесообразно использование одновременно двух инструментов с поперечным, продольным или шахматным расположением (рис. 4.4). Вариант с поперечным расположением инструментов, вращающихся в противоположных направлениях, может существенно снизить реактивный момент.

Вариант с последовательным расположением инструментов предполагает следование одного инструмента за другим. Второй инструмент перемещается по уже размягченному шву, что позволяет использование менее износостойких материалов.

Шахматное расположение инструментов предполагает создание достаточно широкой площади сварного шва. Инструменты расположены один за другим со сдвигом в сторону так, что полоса второго сварного шва частично перекрывает первую полосу. Это позволяет избежать утонения заготовок после наложения первого шва. Преимущество шахматного расположения инструментов также проявляется при соединении внахлестку, так как образовавшаяся область сварного шва обеспечивает большую прочность, чем наложение одного шва.

Витебский государственный технологический университет

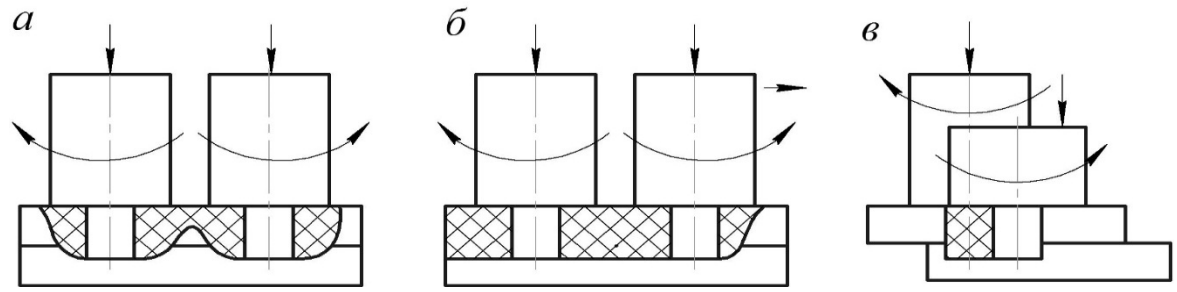


Рисунок 4.4 - Варианты сварки трением двумя инструментами с поперечным (а), продольным (б) и шахматным (в) расположением инструментов

К основным достоинствам процесса сварки трением с перемешиванием относят следующие: не требуется специальная разделка кромок и удаление пленки перед сваркой; снижается вероятность образования пор, особенно при сварке сплавов алюминия; можно получать качественные соединения в любых пространственных положениях; достигается высокая эффективность использования электрической энергии; процесс идеально подходит для автоматизации; не требуется высокая квалификация оператора; отсутствие специфических вредных факторов, таких как шум, ультрафиолетовое излучение; сварка может выполняться в сильных электромагнитных полях.

Типы соединений, выполняемых сваркой трением с перемешиванием, характеризуются большим разнообразием: стыковые, угловые, тавровые, нахлесточные, а так же различные замковые и прорезные.

Швы могут быть получены на сплавах, склонных к горячим и холодным трещинам; появляется возможность сварки деталей больших толщин без применения последующей термической обработки; может достигаться более высокий уровень прочности для термически упрочняемых сплавов; формирование шва в твердой фазе позволяет сохранить свойства метастабильных сплавов, как композиты или сплавы, полученные быстрой кристаллизацией; легковесные прессованные панели, состоящие из многочисленных небольших профилей, которые практически невозможно или экономически нецелесообразно прессовать; сборка стыков не требует точных подгонок кромок.

К недостаткам способа сварки трением с перемешиванием можно отнести следующее: необходимость прочных подкладок, на которых должны надежно закрепляться свариваемые заготовки; образование в конце сварного шва отверстия, равного размеру диаметра штыря, и, как следствие, применение дополнительных способов сварки для заполнения отверстия, либо применение вводных и выводных планок; ограниченное применение по толщинам заготовок (невозможно

Витебский государственный технологический университет

сваривать листы толщиной менее 1 мм); высокая стоимость оборудования для применения в мелкосерийном производстве; возникновение большого реактивного момента от вращения инструмента при сварке прочных материалов и деталей больших толщин.

4.2 Взрывные технологии

4.2.1 Общие сведения о явлении взрыва

Взрыв - это процесс очень быстрого совершения механической энергии при расширении сильно сжатых газов или паров. В зависимости от причин сжатия газов или паров и выделения энергии, за счет которой совершается работа, различают ядерные, физические и химические взрывы.

Взрывы, возникающие в результате выделения внутриядерной энергии при делении ядер тяжелых элементов или синтезе ядер легких элементов, называют ядерными.

Взрывы, вызываемые быстрым изменением физического состояния системы без протекания химических и ядерных реакций, называют физическими. Например, к таким взрывам относится электрический взрыв проводников, возникающий в результате образования сильно нагретых и сжатых паров металлов. Физические взрывы происходят при высокоскоростном ударе (скорость соударения около 10 км/с и более). В процессе соударения кинетическая энергия очень быстро преобразуется в тепловую. При этом образуются сильно сжатые газы и пары, совершающие при последующем расширении механическую работу. К физическим взрывам относят также взрывное разрушение сосудов высокого давления, возникающее под действием чрезмерного повышения давления или в результате механических повреждений.

Взрывы, происходящие в результате быстрой экзотермической реакции превращения веществ, называются химическими.

Взрывные технологии в зависимости от расположения заряда относительно объекта воздействия подразделяются на две основные группы: контактные и неконтактные. К первой группе относятся резание, сварка взрывом, ко второй – штамповка взрывом, детонационно-газовое напыление покрытий, компактирование взрывом порошков сверхтвердых материалов и др.

Витебский государственный технологический университет

4.2.2. Взрывные технологии разделения конструкций

Взрыв заряда, имеющего выпуклую внешнюю поверхность, создает вокруг себя облако расширяющихся продуктов детонации. Характерной особенностью взрыва такого заряда является быстрое уменьшение значений основных параметров: скорости, давления и плотности. В непосредственной близости от поверхности заряда действие взрыва максимально. Независимо от исходной скорости заряда (шар, цилиндр, куб) облако продуктов детонации принимает форму сферы.

Если на поверхности заряда имеется углубление, то при взрыве создается сходящийся поток продуктов детонации. По мере увеличения в этом потоке схождения продуктов детонации плотность и давление возрастают и формируется высокоскоростная струя продуктов детонации, характеризующаяся высокой разрушающей и проникающей способностью. Такой эффект усиления действия взрыва заряда в направлении углубления получит название «кумулятивный эффект взрыва», а само углубление - название «кумулятивное углубление».

Открытие кумулятивного эффекта привело к широкому применению кумулятивных зарядов. Используемые в промышленности кумулятивные заряды можно условно подразделить на две группы: пробивающие и режущие.

Пробивающие заряды представляют собой компактные осесимметричные кумулятивные заряды с углублением в форме конуса или полусферы, покрытым металлической облицовкой. При взрыве таких зарядов формируется высокоскоростная кумулятивная струя, пробивающая глубокие отверстия в преграде. Такие заряды используются для пробивания глубоких отверстий в массивах горных пород, отверстий в плитах и т. д.

Режущие кумулятивные заряды представляют собой удлиненные заряды, имеющие удлиненное клиновидное или полуцилиндрическое углубление, покрытое металлической или металлополимерной облицовкой (рис. 4.5). При взрыве таких зарядов в результате схлопывания облицовки формируется плоская кумулятивная струя, которая разрезает преграду. Продольная ось удлиненных кумулятивных зарядов может быть искривлена и иметь, например, форму окружности или ее дуги.

В результате воздействия плоской кумулятивной струи на преграду образуется прорезь, глубина L которой зависит от конструктивных характеристик заряда; основных размеров – радиуса заряда $r_{\text{укз}}$, диаметра заряда $d_{\text{укз}}$, длины образующей клиновидной облицовки $l_{\text{обл}}$, угла раствора облицовки 2α, диаметра облицовки $d_{\text{обл}}$, толщина облицовки $\delta_{\text{обл}}$, плотности облицовки $\rho_{\text{обл}}$,плотности заряда

Витебский государственный технологический университет

$\rho_з$, толщина слоя заряда $h_з$; расположения заряда относительно преграды, определяемого расстоянием F (рис. 4.5)

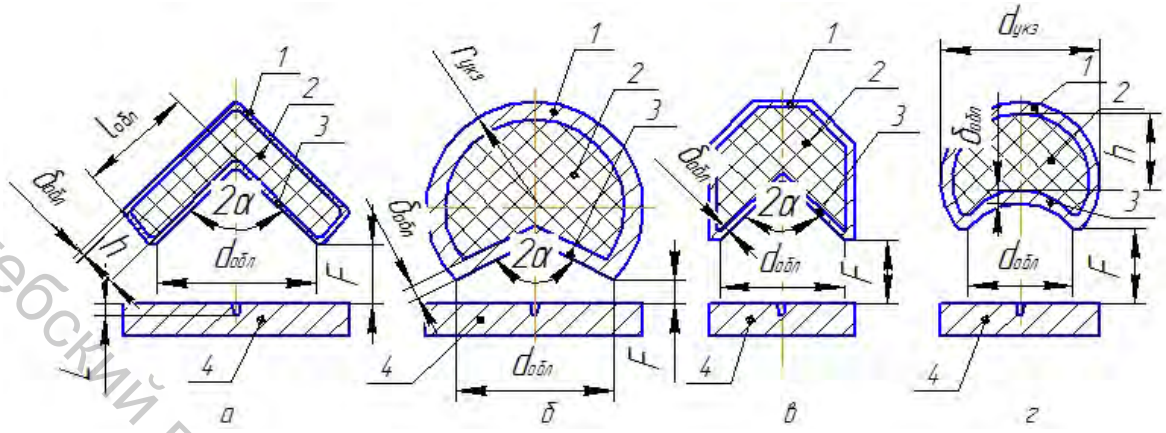


Рисунок 4.5 - Формы поперечных сечений удлиненных кумулятивных зарядов (УКЗ):
а-в - клиновидная облицовка; *г* - полуцилиндрическая облицовка;
1 - оболочка; 2 - заряд; 3 - металлическая облицовка; 4 - преграда

Область применения удлиненных кумулятивных зарядов-резание взрывом трубопроводов, а также сложнопрофилированных и крупногабаритных металлоконструкций: резервуаров, железнодорожных конструкций, газо- и нефтехранилищ, химических реакторов, корпусов морских, речных и воздушных судов. Имеется опыт резания взрывом крупногабаритных шин карьерных самосвалов с толщиной резинокордного слоя 90 мм.

В зависимости от конкретных технологических задач удлиненному кумулятивному заряду как основному инструменту взрыва предъявляются различные требования.

В одних случаях важно обеспечить высокое качество поверхности реза и неизменность структуры металла (для последующей сварки), в других случаях – наибольшую дешевизну и эффективность; в третьих - защиту окружающей среды и оборудования от действия продуктов детонации. Этим объясняется многообразие имеющихся типов удлиненных кумулятивных зарядов.

4.2.3 Сварка взрывом

Сварка взрывом – процесс получения соединения двух или нескольких тел, происходящих при их соударении. Ускорение соударяющихся тел до необходимой скорости осуществляется энергией взрыва, выделяющейся при детонации заряда. Основная (базовая) схема сварки плоских изделий представлена на рисунке 4.6.

Витебский государственный технологический университет

На основании 1 (земляной грунт, дерево, металл и т. п.) расположено одно из свариваемых изделий (в простейшем случае пластина 2), над которой параллельно с определенным зазором h на технологических опорах 4 расположено второе изделие 3. На внешней поверхности изделия 3 находится заряд взрывчатого вещества 5 заданной высоты $H_{ВВ}$ и площадью, как правило, равной площади изделия 3. В одном из концов заряда находится детонатор 6.

При инициировании заряда по нему распространяется фронт детонационной волны (рис. 4.7).

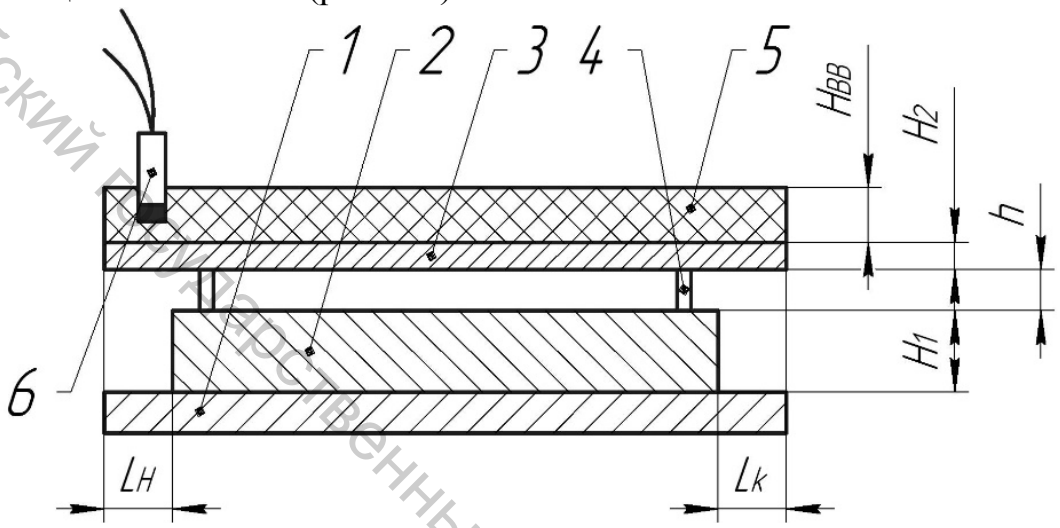


Рисунок 4.6 - Принципиальная схема сварки взрывом плоских изделий:
1 – основание; 2 – неподвижная пластина; 3 – подвижная пластина;
4 – технологические опоры; 5 – заряд взрывчатого вещества;
6 – детонатор;
H_1, H_2, h – соответственно высоты неподвижной, подвижной пластин и толщины заряда; h – зазор между пластинами; L_H, L_k – соответственно – величины начального и конечного нависания верхней пластины над нижней; $H_{В.В.}$ – высота заряда взрывчатого вещества

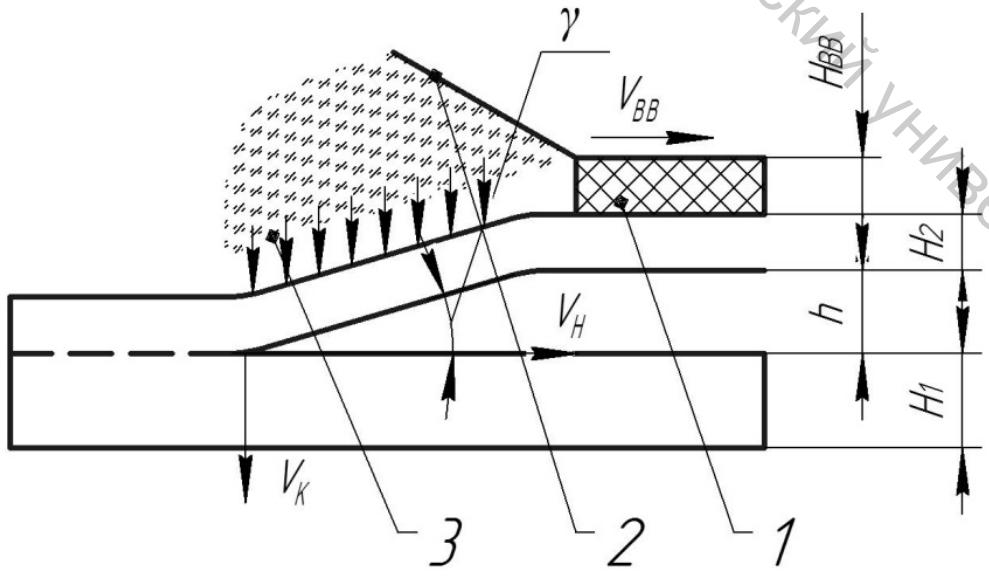


Рисунок 4.7 - Схема установившегося процесса сварки взрывом:

ВитебскийГосударственныйТехнологическийУниверситет

1 – фронт детонационной волны; 2 – фронт разлета продуктов взрыва ВВ; 3 – фронт волны разрежения; $V_{вв}$ – скорость детонации ВВ; $V_К$ – нормальная составляющая скорости соударения контактирующих поверхностей; $V_Н$ – скорость движения вершины динамического угла встречи контактирующих поверхностей в направлении сварки ($V_Н = V_{вв}$)

Технологические параметры сварки взрывом разделяются на три группы: установочные, кинематические и параметры заряда ВВ.

К установочным параметрам относятся параметры, определяющие исходное взаимное расположение свариваемых пластин: расстояние между пластинами, зазоры, размеры краевых нависаний (рис. 4.7).

Кинематические параметры определяют конфигурацию соударения свариваемых пластин: скорость соударения контактирующих поверхностей V_H; скорость движения вершины динамического угла V_k; угол соударения γ (рис. 4.7).

Параметры заряда ВВ определяют характер, кинетику разгона метаемого элемента и количество энергии, вводимой в систему соударяющихся пластин. Важнейшим параметром является скорость детонации заряда ВВ.

Скорость детонационной волны $V_{вв}$ для существующих взрывчатых материалов составляет 2000-8000 м/сек. В результате действия высокого давления расширяющихся продуктов взрыва метаемая пластина приобретает импульс, под действием которого объемы метаемой пластины последовательно вовлекаются в ускоренное движение к поверхности неподвижной пластины. При установившемся процессе метаемая пластина на некоторой длине дважды перегибается, ее наклонный участок со скоростью $V_к = V_{вв}$ движется за фронтом детонационной волны, а участок перед ее фронтом с непродетонированной частью заряда занимает исходное положение.

В окрестностях точки соударения развиваются высокие давления, на порядок превосходящие пределы прочности материалов. Деформация метаемой пластины в зоне соударения определяется углом соударения γ и скоростью точки контакта V_K, которые связаны с исходными параметрами соударения и позволяют изменять режим сварки. В определенном диапазоне изменения этих параметров внутри точки контакта возникает стационарный поток массы соединяемых материалов в виде кумулятивной струи или облака дисперсных частиц. При этом производится самоочищение свариваемых поверхностей, а за точкой контакта создаются условия для их сближения под действием высоких давлений соударения и совместного пластического течения. Длительность процесса составляет 10^{-6}–10^{-5} сек.

Перед сваркой соединяемые поверхности должны быть зачищены до металлического блеска или протравлены и обезжирены.

Витебский государственный технологический университет

Исходные материалы не должны иметь внутренних дефектов (включений, пор, трещин), в противном случае возможно разрушение. Прогиб исходных заготовок не должен превышать 5-10 мм на погонный метр. Несоблюдение этого требования приводит к недопустимому колебанию сварочного зазора и, как следствие, к нестабильности свойств биметаллических заготовок по площади, вплоть до отсутствия прочности или появления непроваров.

Многослойные композиционные изделия получают одним или двумя симметрично расположенными зарядами (рис. 4.8 *г, д*).

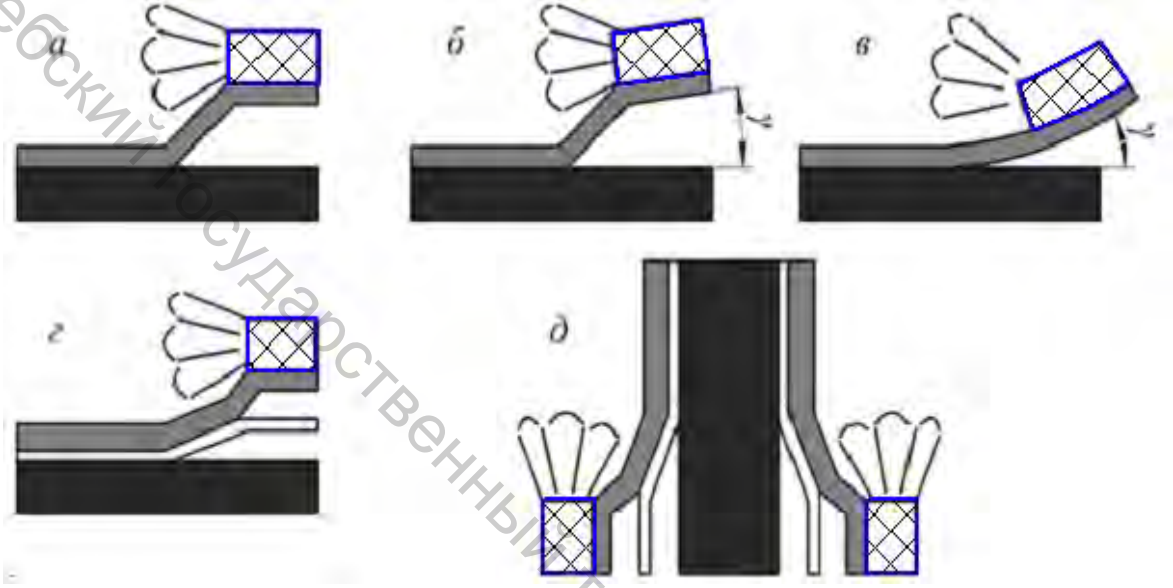


Рисунок 4.8 - Технологические схемы изготовления сваркой взрывом плоских биметаллических и многослойных изделий:
а – плоскопараллельная; *б, в* – угловые с постоянным и переменным углом; *г, д* – плоскопараллельные многослойные с одним и двумя зарядами

Сварка взрывом коаксиальных биметаллических и многослойных заготовок предусматривает использование наружного, либо внутреннего зарядов (рис. 4.9). Сварка взрывом с использованием наружного заряда более предпочтительна из-за своей простоты и меньшей остаточной деформации получаемой заготовки. В этом случае внутренний объем трубных заготовок заполняется водой (рис. 4.9 *б, г*). Характерной особенностью рассматриваемых схем является применение направляющего металлического конуса 4. Заряд, обычно порошкообразного вида, формируется в картонном контейнере в вертикальном положении, в верхней части которого строго симметрично устанавливается детонатор 5.

Значительно более сложны в практическом использовании схемы изготовления полых коаксиальных заготовок с внутренним расположением заряда. Плакирование внутренних поверхностей обычно осуществляют в случаях, когда внутренняя труба значительно толще наружной. Основные проблемы в этих случаях сводятся к

Витебский государственный технологический университет

необходимости создания вокруг наружной поверхности внешней трубы массивной разборной опоры многоразового использования 7 и нестабильности работы заряда ВВ в опоре, а следовательно, нестабильности свойств соединений вдоль оси заготовки.

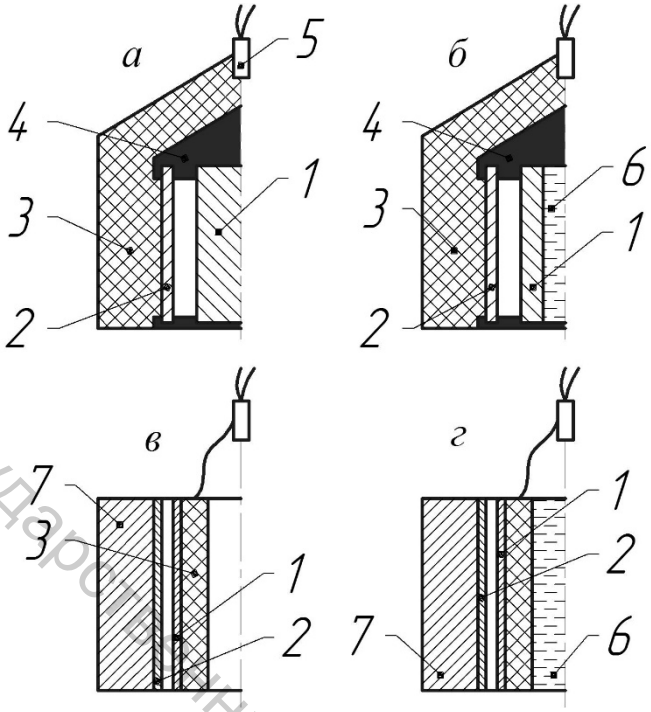


Рисунок 4.9 - Технологические схемы изготовления коаксиальных заготовок:
а – сплошного сечения; *б–г* – полых;
1, 2 – свариваемые элементы; 3 – заряд ВВ; 4 – направляющий конус;
5 – детонатор; 6 – вода; 7 – разъемная опора

Основным отличительным признаком схем конструкционной сварки взрывом является применение локализованных и ограниченных по площади относительно всей конструкции зарядов ВВ. Сварка выполняется на готовой конструкции, а получаемое изделие не требует дальнейших переделов.

Соединение листовых заготовок встык выполняют плоским накладным зарядом, укладываемым на отбортованную кромку одного из листов (рис. 4.10 *а*). На противоположной кромке обеспечивают требуемый угол соударения. Сварку осуществляют на металлической подложке.

Освоена технология покрытия (рис. 4.10 *б*) отдельных участков криволинейных поверхностей ответственных конструкций. Таким образом, были покрыты участки лопастей гидротурбин кавитационно-стойкими сталями. С целью предупреждения возможных деформаций и появления трещин заготовку лопасти гидротурбин при сварке располагали на подушке из металлической дроби.

Взрывные технологии широко используют для закрепления труб в трубных дисках различного теплообменного оборудования тепловых и

Витебский государственный технологический университет

атомных электростанций, химического и нефтеперерабатывающего оборудования (рис. 4.10 *в*).

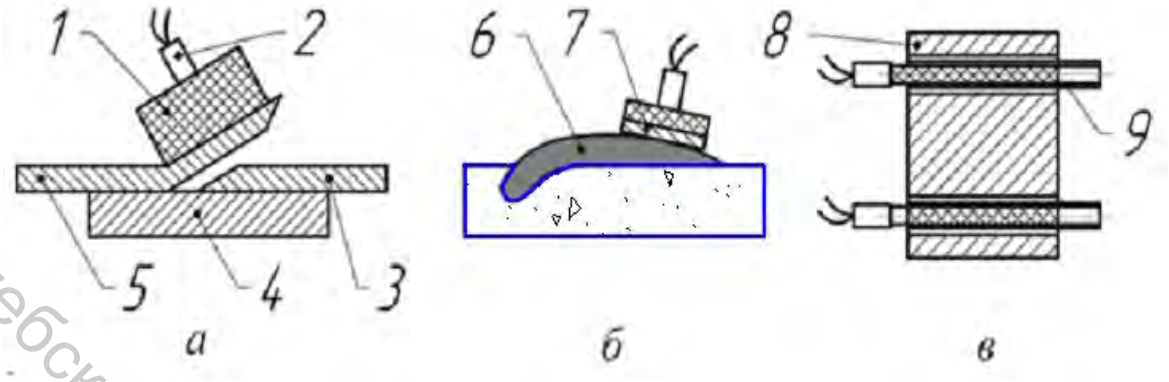


Рисунок 4.10 - Схемы конструкционной сварки:
а – соединение в стык; *б* – плакирование криволинейных поверхностей;
в – соединения труб и трубных дисков; 1 – заряд ВВ; 2 – детонатор;
3, 5 – листовые заготовки; 4 – подложка; 6 – лопасть гидротурбины;
7 – плакирующая заготовка; 8 – трубная плита; 9 – трубные заготовки

Основные области применения сварки взрывом

Сварка взрывом в силу присущих ей достоинств (высокая скорость процесса, а, следовательно, и производительность, сверхвысокие давления, отсутствие расплава) является одним из перспективных и ведущих процессов производства. Высокопроизводительный и экономичный процесс сварки взрывом позволяет получать соединения практически любых разнородных металлов и сплавов с прочностью на уровне свойств основных металлов. Для ряда металлических соединений сварка взрывом по уровню реализуемых служебных свойств, номенклатуре типоразмеров, производительности и себестоимости не имеет альтернативы.

Области применения сварки взрывом приведены на рисунке 4.11.

Рисунок 4.11- Области применения сварки взрывом

Витебский государственный технологический университет

В современных процессах металлообработки взрывом применяют заряды массой от нескольких граммов до нескольких тонн. Это обстоятельство обусловливает использование рассматриваемого процесса в следующих вариантах:

- сварка на открытых полигонах мощностью до 5 т ВВ и площадью от 5 до 200 Га применяется для изготовления крупногабаритных заготовок и узлов;
- сварка в переносных и стационарных взрывных камерах мощностью от 20 г до 120 кг ВВ;
- сварка взрывом в подземных каменоломнях и отработанных шахтах;
- точечная сварка взрывом с помощью ручных инструментов (используются малые заряды ВВ);
- в отдельных случаях возможно проведение сварочных работ непосредственно на готовом изделии в цеху, при его эксплуатации или монтаже;
- основным преимуществом работы на открытых полигонах при их достаточном удалении от жилых и промышленных объектов является возможность получения сваркой взрывом заготовок и изделий практически неограниченных габаритных размеров и массы. Наличие нескольких площадок для ведения процесса может обеспечить высокую производительность при незначительных капитальных затратах.

Наиболее перспективна сварка взрывом для плакирования плоских изделий, особенно при большой толщине основного слоя. В частности, освоено плакирование листов толщиной 70-100 мм, площадью 10-20 $м^2$ для сосудов давления ответственного назначения.

Освоено производство плакирования изделий со сложной криволинейной поверхностью. Плакировано взрывом и эксплуатируется свыше 150 рабочих колес радиально-осевых турбин на крупнейших гидроэлектростанциях. Номенклатура и объемы производства биметалла постоянно растут, что объясняется эффективностью его применения.

С помощью различных модификаций сварки взрывом освоены следующие соединения: трубопроводов, проводов контактной сети железных дорог, алюминиевых оболочек кабелей связи, шинопроводов, труб с трубными решетками теплообменников, рельсовых соединителей, сталеалюминевых анодных штырей электролизеров алюминия, ремонт крупногабаритных оболочечных конструкций, отвод к действующим газопроводам под давлением без стравливания и прекращения транспортировки газа и др.

Витебский государственный технологический университет

4.3 Сварка прокаткой

Сварка прокаткой является разновидностью сварки давлением и осуществляется в условиях деформирования при малой длительности взаимодействия. Сварка может выполняться при нагреве соединяемых металлов (горячая сварка прокаткой) и в холодном состоянии при формировании слоистых материалов из пластичных металлов (холодная сварка прокаткой).

Сваркой прокаткой получают металлические конструкции, состоящие из двух или более слоёв (компонентов), которые выполняют различные функции. Слой, выполняющий функцию силового элемента, называется основным. Слой, имеющий специальные свойства, которые определяются требованиями конструкции, называется плакирующим. Основной слой, как правило, имеет большую по сравнению с плакирующим слоем толщину и изготавливается из более дешевого материала.

Исходной заготовкой служит пакет, состоящий из двух слоёв металла в виде пластин или слябов. Перед сборкой в пакеты заготовки правят, а их свариваемые поверхности механически обрабатывают, зачищают стальными щетками или подвергают травлению и обезжириванию. Применяют одинарные пакеты – для изготовления одного листа, двойные несимметричные пакеты – для изготовления двух листов разной толщины, тройные пакеты – для изготовления трех листов, два из которых – двухслойные, а один – трехслойный (рис. 4.12).

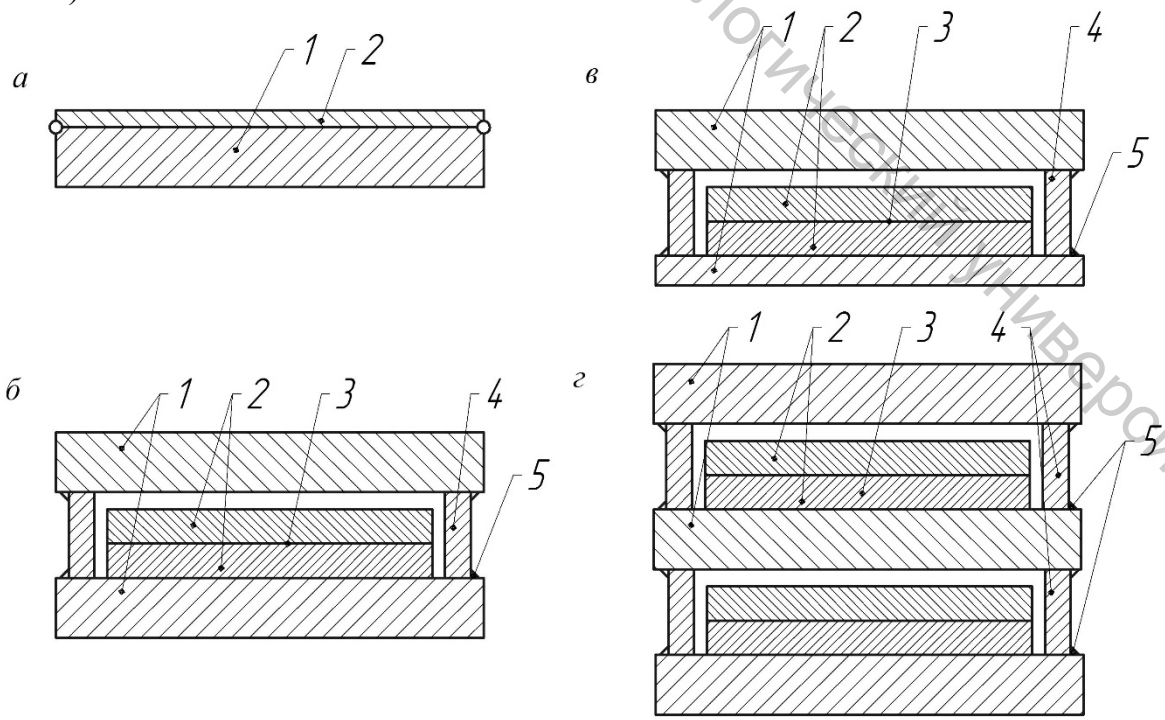


Рисунок 4.12 - Конструкция одинарного (а), двойного симметричного (б), двойного несимметричного (в) и тройного (г) пакетов:

Витебский государственный технологический университет

1 – основной слой, 2 – плакирующий слой, 3 – промежуточный разделительный слой, 4 – планки из углеродистой стали, 5 – сварной шов

Для предотвращения окисления поверхностей заготовок при нагреве перед сваркой пакеты герметизируют по периметру сварным швом.

Для облегчения формирования сварного соединения, а также для уменьшения диффузии углерода из основного слоя в плакирующий, особенно при получении коррозионностойких материалов, в зону соединения вводят промежуточные прослойки.

Основными технологическими параметрами сварки прокаткой являются: температура заготовок перед сваркой; диаметр валков; частота вращения валков, величина обжатия.

Сварку прокаткой осуществляют на обычных прокатных станах, используемых для получения однослойных заготовок аналогичных размеров. Для нагрева пакетов перед сваркой используют нагревательные колодцы, методические, камерные газовые печи обычной конструкции.

Сваркой прокаткой получают коррозионностойкие, износостойкие, электропроводные, инструментальные, жаростойкие термоупругие, контактные, переходниковые, декоративные слоистые конструкции, поперечные сечения которых представлены на рисунке 4.13.

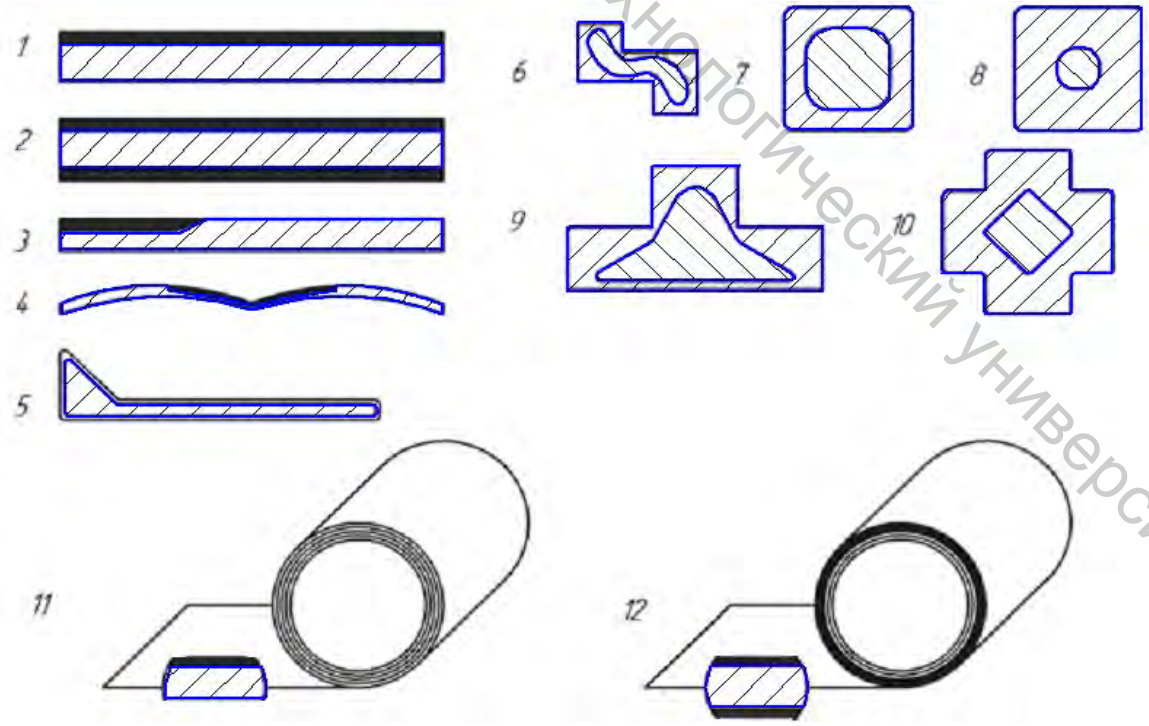


Рисунок 4.13 - Поперечные профили сварных конструкций, полученных прокаткой:

1 – толстолистовая коррозионностойкая; 2 – толстолистовая трехслойная износостойкая; 3 – листовая для режущего инструмента с

Витебский государственный технологический университет

местной плакировкой; 4 – сдвоенная для самозатачивающихся плужных лемехов; 5 – 10 – фасонная коррозионностойкая для судостроения; 11 – двухслойная лента Fe-Ni; 12 – трехслойная лента Al-Fe-Ni

Сварка прокаткой применяется в химической промышленности и судостроении для изготовления изделий, работающих в различных агрессивных средах; в сельскохозяйственном машиностроении при изготовлении деталей, подвергающихся в процессе эксплуатации сильному изнашиванию, например, плужных лемехов, лап культиваторов; дисков лущильников и других деталей, в которые должны сочетать поверхностную твердость и вязкость сердцевины. В электротехнической промышленности – для создания сверхпроводящих материалов; в приборостроении – для термоупругих материалов, предназначенных для измерения и регулирования температуры; защиты электрических цепей от перегрузки и других отраслях.

Витебский государственный технологический университет

4.4. Диффузионная сварка

Диффузионная сварка – это разновидность сварки давлением, осуществляемая путем взаимной диффузии атомов контактирующих изделий при длительном нагреве и незначительной деформации. Процесс может осуществляться с использованием индукционного нагрева, нагрева в расплаве солей или нагрева тлеющим разрядом. Наиболее часто применяется индукционный нагрев. Как правило, диффузионную сварку проводят в вакууме. Однако принципиально возможно осуществление сварки в атмосфере защитных или восстановительных газов.

На рисунке 4.14 представлена принципиальная схема установки для диффузионной сварки.

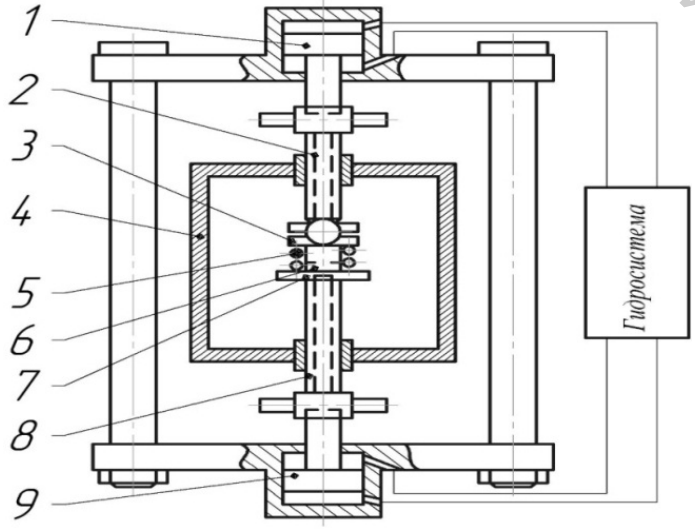


Рисунок 4.14 - Схема установки для диффузионной сварки

Установка включает верхний 1 и нижний 9 силовые цилиндры, промежуточные штоки 2, 8, шаровую опору 3, вакуумную камеру 4, индуктор 5, водоохлаждаемый стол 7. Свариваемые изделия 6 устанавливаются на стол 7, расположенный в вакуумной камере 4 и сжимаются гидроцилиндрами. При необходимости свариваемые изделия могут перемещаться вверх или вниз относительно индуктора. Источником нагрева служит высокочастотный генератор. Сжимающее усилие обеспечивается гидросистемой. После сварки изделия охлаждаются в вакуумной камере до комнатной температуры. Технологическими параметрами являются температура, давление и время выдержки.

Температура сварки должна обеспечить большую скорость пластического деформирования и развитие диффузионных процессов, она составляет 0,5-0,7 от температуры плавления. Для жаропрочных сплавов и тугоплавких металлов температура сварки может быть несколько выше. Такая температура необходима для ускорения взаимной диффузии атомов материалов через поверхность стыка и для обеспечения некоторого размягчения металла, которое способствует смятию неровностей поверхности.

Давление призвано обеспечить полноту контакта поверхностей, исключить пустоты в области стыка, разрушить и удалить поверхностные окисленные слои. Оно должно быть достаточным, чтобы осуществить деформацию микронеровностей и обеспечить максимальную фактическую площадь контакта. Оптимальное значение давления примерно равно пределу текучести свариваемых материалов при температуре сварки.

Время выдержки при заданных температуре и давлении должно быть минимальным, что обосновано как физико-механическими, так и экономическими критериями. Для получения прочного соединения время выдержки определяется установлением плотного контакта между соединяемыми поверхностями и минимальной диффузией атомов через поверхность соединения. Значительная диффузия может привести к образованию пустот в зоне соединения, а при сварке разнородных металлов и сплавов к образованию интерметаллических связей.

В зависимости от свойств свариваемых материалов степень разрежения в вакуумной камере выбирают в диапазоне $1{,}3 \cdot 10^{-2} - 1{,}3 \cdot 10^{-4}$Па. При сварке малоуглеродистых сталей, меди, никеля требования к остаточному давлению менее жесткие. Присутствие в сплавах хрома, алюминия, титана, вольфрама и других активных элементов приводит к необходимости снижения остаточного давления.

В качестве контролируемых атмосфер применяют осушенные аргон, гелий, очищенные водород, азот или смесь азота с 6–8 % водорода.

На воздухе сваривают малоуглеродистые и некоторые инструментальные стали. При этом контактные поверхности заготовок

Витебский государственный технологический университет

после механической обработки защищают от окисления консервирующим покрытием: эпоксидной смолой или глицерином. При нагреве зоны стыка в процессе сварки покрытие выгорает без остатка, а образующиеся газы защищают зону сварки от окисления.

Состав соляных ванн для диффузионной сварки определяется необходимой температурой, например, 850–870 ^{0}C при использовании расплава NaCl, 1000–1150 ^{0}C – при $BaCl_2$.

Предварительная обработка поверхности должна обеспечить максимальную фактическую площадь контакта свариваемых поверхностей, шероховатость которых должна быть не более Ra 1,25 мкм. Предпочтительно применение механической обработки.

При сварке материалов, образующих в контакте интерметаллидные фазы, необходимо применение барьерных прослоек. Для этого могут быть использованы гальванические покрытия или фольговые прокладки, изготавливаемые по форме площади контактирования. Основное требование при выборе покрытий или прокладок – совместимость с каждым из свариваемых сплавов.

Особое место в технологии диффузионной сварки занимают расплавляющиеся прослойки. Жидкая фаза в зоне соединения образуется за счет применения прослоек, имеющих температуру плавления ниже температуры плавления свариваемых материалов. Наличие жидкой фазы в зоне контакта позволяет ограничить деформирующую нагрузку, снизить температуру сварки, активизировать процесс формирования контакта, что важно при соединении трудно деформируемых жаропрочных сплавов, керамик, сложнолегированных сплавов и других материалов.

Диффузионной сваркой получают все типы соединений, известные в практике сварки (рис. 4.15). Технологические возможности диффузионной сварки позволяют широко использовать этот процесс в приборостроении, при создании металлокерамических узлов, катодных узлов, полупроводниковых систем.

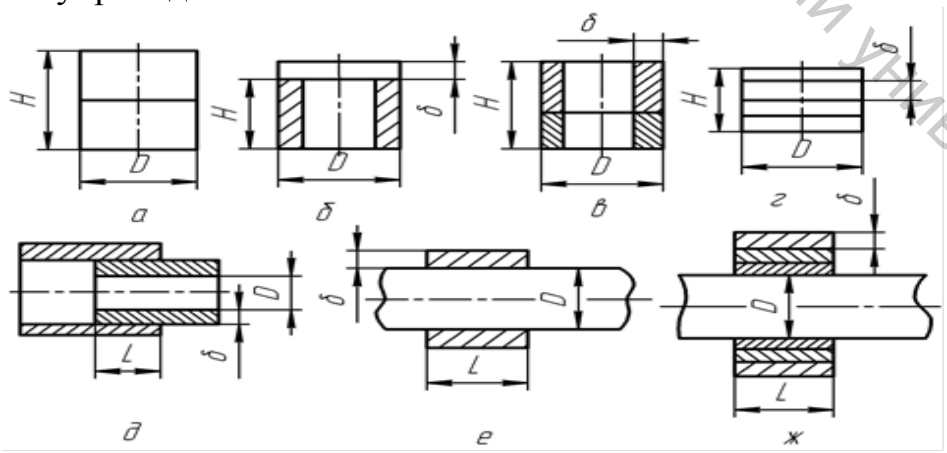


Рисунок 4.15 - Варианты соединений при диффузионной сварке: а – массивные детали (H/D≤6) (соединение по торцевой поверхности); *б* – листовые элементы и массивная деталь (H/δ<10);

Витебский государственный технологический университет

в – трубки, соединяемые по торцу (δ/D>0,2, H/D<6);
г – многослойный пакет (δ/D>0,2, H/D<6); *д* – цилиндрические поверхности (L/D<5); е – то же (0,5<L/D<5, δ≥0,05);
ж – то же для многослойной заготовки (0,5<L/D<5, δ≥0,05)

Диффузионная сварка находит применение для изготовления крупногабаритных заготовок сложной формы, получение которых механической обработкой, методами обработки давлением или литьем невозможно или неэкологично.

Путем соединения простых по форме элементов, изготовленных из стандартных полуфабрикатов, можно существенно повысить коэффициент использования металла, а в ряде случаев, получить сложные заготовки из разнородных металлов, которые практически невозможно изготовить другими методами сварки. Особенно эффективно применение диффузионной сварки в опытном и мелкосерийном производстве. При этом используются открытые прессы в сочетании с герметизированными камерами. Диффузионная сварка позволяет создавать прочные соединения не только однородных, но и разнородных металлов и сплавов. Это надежный способ соединения твердых сплавов между собой и со сталями, пористых неметаллических, малопластичных, тугоплавких, нерастворимых друг в друге материалов.

Диффузионной сваркой производится соединение сложных и точных конструкций для химической промышленности (высота 3 м, диаметр 1,8 м), металлокерамических герметичных вводов, высокостойких штампов, упругих элементов датчиков, вольфрамовых сопел, лопаток и дисков турбин, пористых труб и т. п.

4.5 Электронно-лучевая сварка

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) относится к методам сварки высококонцентрированными источниками энергии и обладает широкими технологическими возможностями, позволяя соединять за один проход металлы и сплавы толщиной от 0,1 мм до 400 мм.

Сущность процесса сварки электронным лучом состоит в использовании кинетической энергии, электронов, движущихся в глубоком вакууме. При бомбардировке электронами поверхности металла подавляющая часть кинетической энергии электронов превращается в тепловую и используется для расплавления металла.

Получение свободных электронов достигается применением раскаленного металлического катода, испускающего электроны. Ускорение электронов обеспечивается электрическим полем с высоким потенциалом между катодом и анодом. Фокусировка – концентрация

Витебский государственный технологический университет

электронов – осуществляется магнитным полем. Резкое торможение электронного потока происходит при соударении электронов с металлом.

Принципиальная схема установки (пушки) для сварки электронным лучом представлена на рисунке 4.16. Устройство предназначено для получения узких электронных пучков высокой концентрации энергии.

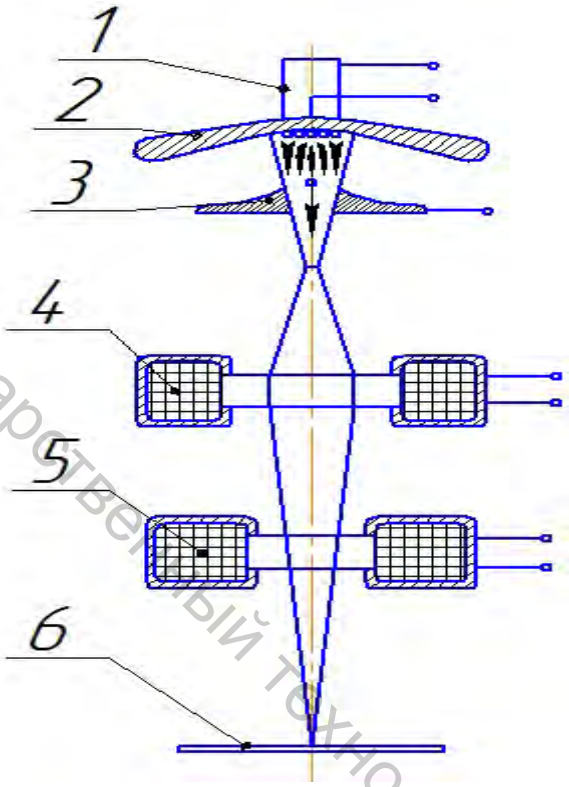


Рисунок 4.16 - Схема установки для сварки электронным лучом:
1-высокотемпературный катод; 2-прикатодный электрод;
3-анод; 4-магнитная линза; 5-магнитная отклоняющая система;
6-изделие

Катод 1 нагревается до высоких температур. Он размещается внутри прикатодного электрода 2. На некотором расстоянии от катода размещается ускоряющий электрод (анод) 3 с отверстием. Прикатодный и ускоряющий электроды имеют форму, обеспечивающую такое строение электрического поля, которое фокусирует электроны в пучок с диаметром, равным диаметру отверстия в аноде. Положительный потенциал ускоряющего электрода может достигать нескольких тысяч вольт. Поэтому электроны, испускаемые катодом на пути к аноду, приобретают значительную скорость и энергию.

Электроны имеют одинаковый заряд и поэтому отталкиваются друг от друга. Диаметр пучка увеличивается, а плотность энергии в пучке уменьшается.

С целью увеличения плотности энергии в пучке электроны фокусируются магнитным полем в магнитной линзе 4 и высококонцентрированный пучок электронов с большой скоростью

Витебский государственный технологический университет

ударяется о малую ограниченную площадку изделия 6. Кинетическая энергия электронов, вследствие торможения в веществе, превращается в тепло, нагревая металл до высоких температур.

Управление пучком электронов по поверхности свариваемых изделий производится отклоняющей системой 5.

Для обеспечения свободного движения электронов от катода к изделиям, тепловой и химической изоляции катода, и также предотвращения возможности возникновения дугового разряда между электродами в установке создается глубокий вакуум порядка 10^{-2}Па.

Пучок электронов ускоряется в вакууме напряжением до 100кВ и более. При изменении напряжении от 30 до 200 кВ скорость электронов изменяется от 0,33 до 0,67 скорости света.

Кинетическая энергия электронов при торможении внутри металла и вблизи его поверхности превращается в тепловую, расходуемую на плавление свариваемых кромок и образование в жидком углублении (канала) на всю толщину свариваемого металла. Этот процесс характеризуется высоким КПД, достигающим 90 %.

Источник нагрева в виде пучка электронов сосредоточен на малом пятне, диаметром в десятые и даже сотые доли миллиметра. При мощности пучка в десятки КВт плотность энергии превышает плотность энергии электрической сварочной дуги на два-пять порядков (от 10^5 до 10^9 Вт/см^2).

Такая концентрация энергии позволяет осуществить сварку с недостижимым для электродуговых методов отношения глубины к ширине проплавления (до 50:1).

Узкий шов, параллельность его границ и малая протяженность обусловливает незначительные линейные и угловые деформации свариваемых изделий. Практически отсутствует коробление. Это самое важное достоинство электронно-лучевой сварки.

Глубокое проплавление металла при низких значениях погонной энергии приводит к повышенной скорости кристаллизации малой по объему сварочной ванны, благодаря чему измельчается структура сварного шва.

Электронный луч является практически безынерционным источником тепловой энергии. Возможность тонкой регулировки мощности, фокусировки и положения луча на поверхности изделия позволяет широко использовать системы автоматизированного управления и программирования режимов сварки.

Сварку можно вести отдельными импульсами с различной скважностью, а перемещая луч непрерывно вдоль или поперек стыка, что позволяет сваривать с наименьшими производственными затратами крупные партии однотипных изделий. Номенклатура изделий свариваемых электронным лучом распространяется от деталей из тонкой фольги до деталей толщиной более 100 мм, соединяемых за один проход; от деталей микромеханики до сегментов корпусов самолетов и

Витебский государственный технологический университет

подводных лодок; от отдельных частей космических аппаратов до крупных серий в электро- и автомобилестроении.

При конструировании и выборе способа сварки следует учитывать следующие достоинства электронно-лучевой сварки.

- широкий диапазон толщин свариваемых изделий - от долей миллиметра до 100 мм и более;
- возможность получения узких швов с глубоким проплавлением;
- возможность регулирования отношения глубины проплавления к ширине шва;
- уменьшение роста зерна в шве;
- большие скорости нагрева и охлаждения металла в вакууме, что позволяет получать максимальную степень чистоты и высокие физико-механические свойства соединения;
- возможность сварки соединений различных типов, в том числе принципиально новых не выполняемых известными способами сварки плавлением.

Широкое внедрение электронно-лучевой сварки в высокотехнологичное производство затрудняется ее экономическими и техническими особенностями:

- высокое капиталовложение;
- необходимость точной подгонки свариваемых элементов;
- ограниченный размер конструкций, поскольку сварку приходится выполнять в камерах;
- генерирование рентгеновского излучения.

4.6 Электрошлаковая сварка

Электрошлаковая сварка – принципиально новый способ получения неразъемного соединения металлов. В отличие от других способов сварки плавлением при электрошлаковой сварке источником нагрева служит тепло, выделяющееся в ванне расплавленного флюса при прохождении через нее тока от электрода к изделию.

Электрошлаковый процесс реализуется следующим образом (рис. 4.17). Шлаковая ванна 4 образуется в результате расплавления сварочного флюса, который находится в этом состоянии в течение всего процесса сварки. Сварочный ток, проходя через шлаковую ванну 4 между погруженными в нее электродами 3 и металлической ванной 5, поддерживает высокую температуру и теплопроводность шлака. Объем и глубину шлаковой ванны сохраняют, как правило, постоянными. Для этого зазор между свариваемыми кромками закрывают с боков водоохлаждаемыми ползунами 6. Металлическая ванна 5, кристаллизуясь, образует сварной шов.

Витебский государственный технологический университет

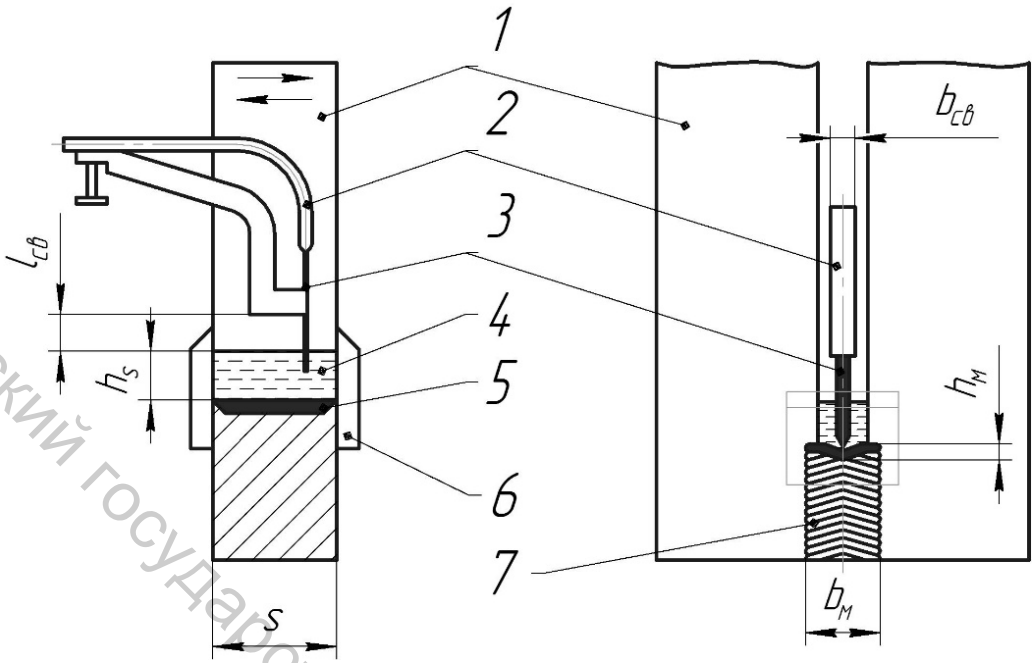


Рисунок 4.17 - Схема электрошлаковой сварки:
1 – свариваемые детали шириной s; 2 – мундштук для подачи электрода; 3 – электрод; 4 – шлаковая ванна глубиной h_s; 5 – металлическая ванна глубиной $h_М$; 6 – формующий ползун; $b_{св}$ – зазор между деталями; $l_{св}$ – сухой вылет электродов

При электрошлаковой сварке почти вся электрическая мощность передается шлаковой ванне, а от нее электроду и свариваемым кромкам. Устойчивый процесс возможен только при постоянной температуре шлаковой ванны. Рабочая температура шлаковой ванны может достигать под электродом 1900-2000 ^{0}С.

Общее количество генерируемого в шлаковой ванне тепла расходуется следующим образом: 20-25 % на плавление электродной проволоки; 55-60 % на плавление и нагрев основного металла; 4-6 % на плавление флюса и поддержание шлаковой ванны в жидком состоянии; 12-16 % – потери тепла через ползуны и теплоотвод в массу металла.

Электрошлаковая сварка проволочными электродами получила наибольшее применение в машиностроительных отраслях. Этот способ реализуется в соответствии со схемами (рис. 4.18).

Витебский государственный технологический университет

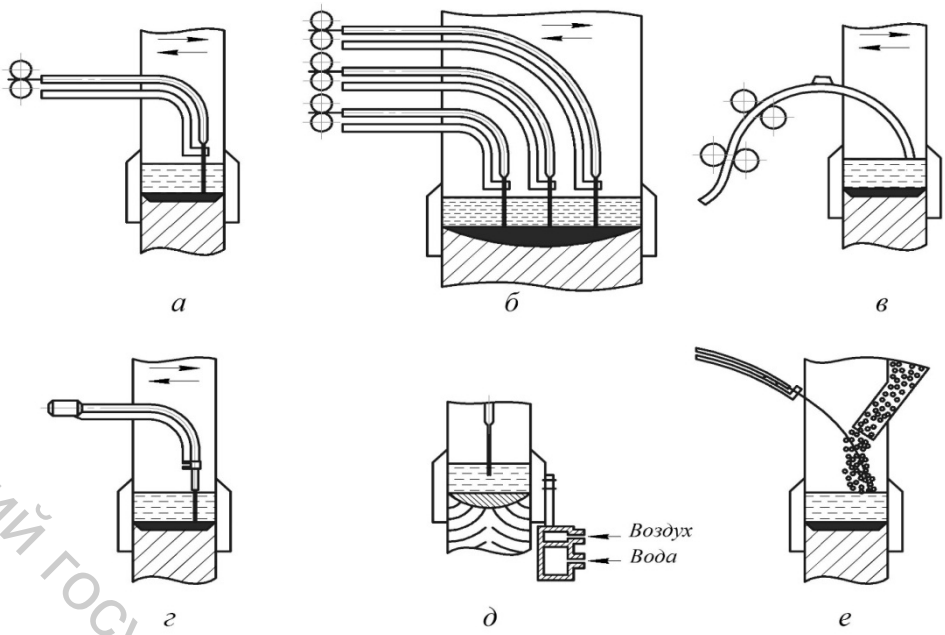


Рисунок 4.18 - Электрошлаковая сварка проволочными электродами: а – одной проволокой без колебаний; б – одной, двумя или тремя проволоками с колебаниями; в – одной проволокой без введения мундштука в зазор; *г* – проволокой с увеличенным «сухим» вылетом; *д* – с использованием сопутствующего принудительного охлаждения; е – с присадкой порошкообразного материала

Наибольшее применение получили способы *а, б* (рис. 4.18). Этими способами можно сваривать металл толщиной от 20 до 450 мм, используя преимущественно 3-мм проволоку. Способом *в* можно сваривать металл толщиной до 120 мм. Способ *г* обеспечивает повышение скорости сварки в 1,5-2,0 раза по сравнению со способами *а, б*. Способ *д* можно рекомендовать для электрошлаковой сварки низколегированных сталей толщиной до 100 мм без последующей высокотемпературной термической обработки сварного соединения.

Способ *е* используется при монтаже крупногабаритных изделий, сварные соединения которых не подвергаются последующей высокотемпературной термической обработке. Толщина свариваемого металла до 60 мм. Способ характеризуется повышенной скоростью сварки и значительно лучшими механическими свойствами соединения. Все перечисленные способы осуществляются на стандартной сварочной аппаратуре.

Электрошлаковой сваркой можно получить стыковые, угловые и тавровые типы соединений и практически все виды швов. *Прямолинейные швы* встречаются в сварных соединениях всех типов и выполняются в вертикальном положении (рис. 4.19 *а, б*). Возможный наклон не должен превышать 15…20° (рис. 4.19 *б*). *Кольцевые швы* можно выполнять не только на цилиндрической поверхности (рис. 4.19 *г*), но и на конической (рис. 4.19 *д*), а так же сферической (рис. 4.19 *е*).

Витебский государственный технологический университет

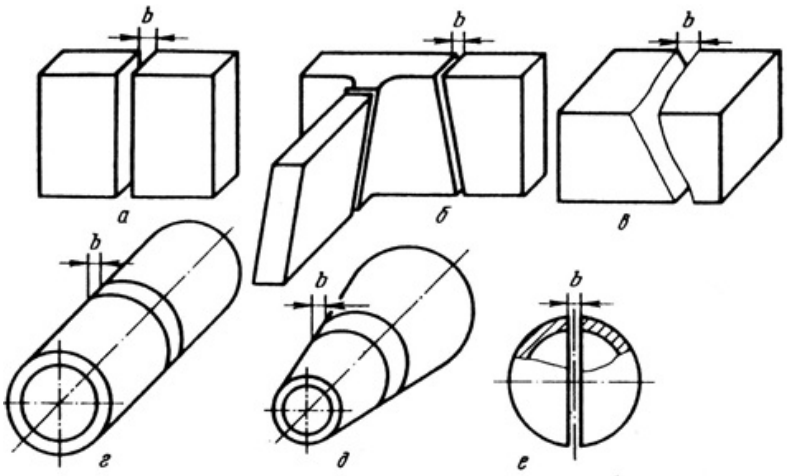


Рисунок 4.19 - Виды сложных швов, выполняемые электрошлаковой сваркой:
а и б – прямолинейные на вертикальной и наклонной плоскостях;
в – пространственной формы; *г, д* и *е* – кольцевые на цилиндрической, конической и шаровой поверхностях

Основными технологическими параметрами электрошлаковой сварки являются: падение напряжения на участке электрода; сила сварочного тока; скорость перемещения поверхности металлической ванны; глубина шлаковой ванны; скорость поперечного перемещения (колебания) электрода; количество электродов; зазор между кромками; расстояние между электродами, толщина свариваемого металла.

Достоинства электрошлаковой сварки. Электрошлаковая сварка – высокопроизводительный способ соединения металла практически неограниченной толщины. По скорости плавления присадочного материала он не имеет равных. Так, коэффициент наплавки при электрошлаковой сварке составляет 20…30 г/(А·ч), при дуговой автоматической – 14…18 г/(А·ч), а при дуговой ручной – всего 8…12 г/(А·ч).

Выполнение в подавляющем большинстве случаев сварного соединения за один проход полностью исключает наиболее распространенный дефект многошовной сварки – шлаковые включения, а вертикальное положение оси шва значительно облегчает всплывание газовых пузырей, шлака, примесей и удаление их из металла.

Расход флюса при электрошлаковой сварке в 10…20 раз меньше, чем при дуговой сварке, и составляет около 5 % расхода электродной проволоки. Расход электроэнергии на плавление равных количеств электродного металла в 1,5…2 раза меньше, чем при автоматической сварке под флюсом и в 4 раза меньше, чем при ручной сварке.

Экономичность и эффективность электрошлаковой сварки возрастает с увеличением толщины свариваемого металла: при толщине 40…60 мм можно рекомендовать использование электрошлаковой сварки, а при 100…200 мм и более электрошлаковая сварка остается

Витебский государственный технологический университет

наиболее рациональным способом сварки в условиях как серийного, так и мелкосерийного производства.

Недостатком электрошлаковой сварки является необходимость последующей высокотемпературной термической обработки сварного соединения для восстановления высоких служебных характеристик сварной конструкции. Известно, что в процессе электрошлаковой сварки металл шва и околошовной зоны подвергается значительному перегреву. Это способствует снижению пластических свойств сварного соединения, особенно при отрицательных температурах. Весь опыт электрошлаковой сварки показывает, что вопросы необходимости применения высокотемпературной термической обработки, повышения качества сварных соединений и производительности процесса следует решать комплексно путем рационального выбора свариваемых и сварочных материалов, приемов и режимов сварки.

Электрошлаковая сварка получила широкое распространение в тяжелом, энергетическом, химическом машиностроении, судо- и авиастроении.

Электрошлаковым способом сваривают стали практически всех классов и марок, чугун, жаропрочные и никелевые сплавы, титан, алюминий, медь и сплавы на их основе.

Использование электрошлаковой сварки в тяжелом машиностроении, где этот способ стал одним из ведущих технологических процессов, позволило заменить крупные литые и кованые конструкции, габаритные размеры и масса которых ограничены техническими возможностями оборудования, на сварно-литые, сварно-кованые и прокатно-сварные, значительно снизив при этом металлоемкость конструкций и трудоемкость изготовления.

Замена цельнолитых деталей сварно-литыми считается целесообразной и эффективной при снижении одного из следующих показателей:

- массы сварно-литой металлоконструкции – не менее, чем на 10 %;

- трудоемкости машинной формовки литых заготовок – на 30…40 % по сравнению с трудоемкостью ручной формовки цельнолитой детали;

- брака производства цельнолитых конструкций – на 10…15 %.

Сварно-литые детали считают наиболее экономичными. В сварном варианте изготавляют станины прокатных станов, рамы щековых дробилок, крупногабаритные бандажи цементных и обжиговых печей, рабочие колеса мощных гидротурбин, форштевни крупных кораблей и многие другие детали.

Большой технико-экономический эффект достигается также при изготовлении сварно-кованых конструкций вместо цельнокованых: разнообразных цилиндров, колонн, валов гидротурбин, подштамповых плит, «баб» бесшаботных молотов, роторов турбогенераторов и др.

Витебский государственный технологический университет

ГЛАВА 5
ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

5.1 Высокоскоростная обработка резанием

В зависимости от режимов резания различают три разновидности обработки: обычная, высокоэффективная и высокоскоростная. Частоты вращения шпинделя составляют: при обычном резании - 30…2000 мин$^{-1}$, высокоэффективном - 1000…12000 мин$^{-1}$, высокоскоростном - 3000…40000 мин$^{-1}$. Скорости съема материала соответственно составляют: 1–20 см^3/мин для обычной обработки , 1–150 см^3/мин для высокоэффективной и 1–60 см^3/мин для высокоскоростной обработки. Отличительной особенностью высокоскоростной обработки является малое сечение среза, снимаемое с высокой скоростью, и большая минутная подача.

Отработка режимов резания при высокоскоростной обработке привела к появлению разновидности этого вида обработки, которая называется высокоэффективной/высокопроизводительной. Высокоэффективная обработка отличается от высокоскоростной, уменьшенной в 2 раза частотой вращения шпинделя (скорости резания) и увеличенными в 3,5 раза, объемами снимаемого при резании материала.

В зависимости от скорости резания изменяется характер распределения температуры. При обычной обработке с возрастанием скорости резания повышается температура обрабатываемой заготовки, снимаемой стружки и инструмента. При резком увеличении скорости например в 5-10 раз, температура заготовки и инструмента изменяются незначительно, а стружки значительно возрастает . Например, при скорости 100 м/мин температура удаляемой стружки не превышает 450 °С, то при достижении скорости 1200 м/мин температура может приблизится к 1500 °С. Причина заключается в том, что скорость резания превышает скорость теплопроводности обрабатываемого материала. Основная доля тепла отводится стружкой, а в материал заготовки и инструмента тепло не успевает поступать.

Высокоскоростная обработка отличается следующими достоинствами:

- высокое качество обработанной поверхности (низкая шероховатость, уменьшенные остаточные напряжения);
- снижения сил резания, способствующие повышению точности обработки;
- снижение возможности возникновения вибраций;

Витебский государственный технологический университет

- возможность обработки тонкостенных деталей;
- хорошее стружкоотделение;
- повышение стойкости инструмента.

5.1.1 Инструментальные материалы для высокоскоростной обработки

В процессе резания рабочие поверхности инструментов подвергаются интенсивному воздействию высоких контактных давлений и температур, а взаимодействие с обрабатываемым материалом приводит к интенсификации процессов адгезии, диффузии, окисления, вызывающих быстрый износ режущего инструмента. Силовые нагрузки приводят к поломкам и выкрашиванию режущей части инструмента.

Для снижения изнашивания и предотвращения разрушения материал инструмента должен отличатся высокой твердостью, теплостойкостью, износостойкостью, прочностью.

Основой инструментальной базы высокоскоростного резания являются твердые и сверхтвердые материалы.

Твердые сплавы выпускаются в виде стандартизованных пластин, которые припаиваются, приклеиваются или крепятся механически к державкам из конструкционной стали. Выпускаются также инструменты, рабочая часть которых целиком выполнена из твердого сплава (монолитные).

Применяемые твердые сплавы делятся:

- на вольфрамовые сплавы группы ВК (ВК3,ВК4,ВК6,ВК8 и др). В условном обозначении цифра показывает условное содержание кобальта;
- титановольфрамовые сплавы группы ТК (Т5К10, Т15К6, Т14К8, Т30К4, Т60К6 и др.). В условном обозначении цифра, стоящая после буквы Т, показывает процентное содержание титана, после буквы К - кобальта, остальное карбиды вольфрама;
- титанотанталовольфрамовые сплавы группы ТТК (ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ20К9 и др.). В условном обозначении цифры, стоящие после буквы Т, показывают процентное содержание карбидов титана и тантала, после буквы К - кобальта, остальное – карбиды вольфрама.

В области разработки новых и совершенствования существующих марок твердых сплавов активно ведутся работы, связанные с созданием ультра- и особомелкозернистых сплавов, имеющих размер зерен в пределах 1,5 …3,5 мкм.

Разработка новых ультра- и особомелкозернистых твердых сплавов направлена на решение ряда современных технологических задач – экологически чистого высокоскоростного резания без

Витебский государственный технологический университет

применения смазывающе-охлаждающих технологических сред, обработки труднообрабатываемых материалов, изготовления цельных твердосплавных особо сложных инструментов.

Прямым результатом уменьшения размеров зерен является улучшение физико-механических свойств твердого сплава, в первую очередь, твердости и износостойкости при обеспечении достаточно высокой вязкости. Сплавы с такой структурой обладают повышенной сопротивляемостью хрупкому разрушению, что исключительно важно при использовании операций прерывистого резания.

Снижение размеров зерен обеспечивает возможность получения более острой режущей кромки инструмента, с уменьшенным радиусом закругления. В результате снижаются силы резания и температура в зоне резания.

Для повышения работоспособности твердосплавных инструментов используют износостойкие покрытия, которые позволяют повысить скорости резания на 20…40 % при той же стойкости или увеличить в 1,8…5 стойкость инструментов при той же скорости, что и у инструментов без покрытия.

Наносимые на инструменты покрытия представляют собой нитриды, карбиды, карбонитриды, оксиды металлов- $AL_2\ O_3$, TiN, TiC, TiCN, TiAlN и др.

Помимо однослойных покрытий TiN, TiC или TiCN широко используются многослойные покрытия. Типичным представителем таких покрытий является покрытие TiN- TiCN-$AL_2\ O_3$. Наружный слой из $AL_2\ O_3$ служит термоизолирующим барьером и снижает окисление инструментального материала при повышенных температурах резания. Нитрид титана TiN обладает кристаллохимической совместимостью с твердосплавной подложкой, а карбонитрид титана TiCN повышает прочность адгезионной связи между инструментальным материалом и наружным слоем.

Применяются следующие разновидности многослойных покрытий, созданные путем комбинации различных одиночных слоев:

- многослойные со слоями различного функционального назначения с толщиной отдельных слоев 0,5…10 мкм;

- многослойные наноструктурированные с толщиной отдельных слоев от нескольких до 100 нм.

Сверхтвердые инструментальные материалы представляют собой синтетические или природные алмазы и композиты преимущественно на основе нитрида бора. Алмазные инструменты широко используются при обработке деталей из различных материалов. Для алмазов характерны исключительно высокие твердость и износостойкость. По абсолютной твердости алмаз в 4-5 раз тверже твердых сплавов. Вследствие высокой теплопроводности алмазы лучше отводят тепло из зоны резания. Это гарантирует получение деталей без прижогов поверхности. Однако алмазы весьма хрупки, что сильно

Витебский государственный технологический университет

сужает область их применения. Кроме того, при повышенной температуре алмаз вступает в химическую реакцию с железом и теряет работоспособность.

Материалы на основе нитрида бора превосходят по теплостойкости все материалы, применяемые для лезвийной обработки: алмаз в 1,9 раза, быстрорежущую сталь - в 2,3 раза, твердый сплав – в 1,7.

Эти материалы изотропны, обладают близкой к алмазам микротвердостью, высокой теплопроводимостью, химической инертностью по отношению к железу.

Преимущество материалов на основе нитрида бора перед твердыми сплавами особенно заметно при сопоставлении при торцевом фрезеровании: скорость резания закаленной стали выше в 5 раз, чугунов – в 10-20 раз (в зависимости от твердости). Инструменты на основе нитрида бора позволяют в 3…6 раз повысить скорость резания по сравнению с твердосплавными.

5.1.2 Особенности станков для высокоскоростной обработки

Специфические изменения станков для высокоскоростной обработки касаются шпиндельных узлов, приводов подач, системы удаления стружки.

Высокоскоростной шпиндельный узел – это основной компонент станка для высокоскоростной обработки. От его конструктивного решения зависит не только долговременная стабильность в работе станка, но и качественные характеристики выполняемых работ. Высокоскоростной шпиндель – это компромисс между частотой вращения и мощностью привода.

Так, при частоте вращения 15000 мин$^{-1}$ мощность привода составляет 45 квт, а при частоте 40000 мин$^{-1}$понижается до 12 квт. Это означает, что на высокоскоростном оборудовании с повышением максимальных частот вращения необходимо переходить от силовых режимов обработки к более щадящим скоростным режимам резания, т. е скоростные станки более целесообразно использовать для чистовой обработки.

В настоящее время находят применение комбинированные шпиндельные узлы, в корпусе которых размещены два привода. Такая конструкция позволяет работать шпиндельному узлу в черновом режиме резания с частотой до 10000 мин$^{-1}$ с обеспечением большого крутящего момента или в чистовом режиме с частотой до 30000 мин$^{-1}$ за счет второго высокоскоростного привода.

Приводы подач станков для высокоскоростной обработки обычно сопровождаются большими значениями подач. При изготовлении

Витебский государственный технологический университет

пресс-форм, штампов и других габаритных деталей станки должны обеспечивать частоту вращения шпинделя не менее 15000 $мин^{-1}$, с величиной подачи как минимум 3000 мм/мин, отрабатывая при этом малые перемещения от 2 до 20 мкм. Наряду с такими высокими значениями подач необходимо, чтобы имелась возможность быстрого ускорения и замедления.

Система удаления стружки в станке для высокоскоростной обработки имеет особое значение. Образование стружки при высокоскоростной обработке осуществляется значительно интенсивнее, чем при обычной обработке. Поскольку тепло концентрируется преимущественно в стружке, то ее необходимо быстро удалять из зоны резания. В процессе удаления в зону резания подается смазывающе-охлаждающая жидкость, которая оказывает на инструмент циклическое термическое воздействие. Поэтому в ряде случаев вместо смазывающе-охлаждающей жидкости целесообразно использовать струю воздуха.

5.2 Комбинированные методы механической обработки

Традиционные способы механической обработки на предприятиях с высокой организацией труда достигли совершенства и практически не имеют резервов повышения производительности. Комбинированные способы механической обработки позволяют снизить энергические затраты, в 1,5-2 раза повысить загрузку и использование мощности станков, сократить производственные площади и оборудование. Они создают условия для организации непрерывных технологических процессов.

Комбинированные методы механической обработки основаны на комплексном воздействии на заготовку резанием, давлением, электрическим током или магнитным полем. Доминирующим процессом является резание. Соответственно процессы называются: деформационно-механическая обработка; вибромеханическое резание; электромеханическая обработка, магнитно-абразивная обработка.

5.2.1 Деформационно-механическая обработка

Деформационно-механическая обработка – это метод, совмещающий пластическую деформацию и резание. Сначала производится пластическая деформация, а затем резание. Метод получил название резание с опережающим деформированием.

Витебский государственный технологический университет

Схемы обработки резанием с опережающим пластическим деформированием применительно к типовым операциям резания представлены на рисунке 5.1

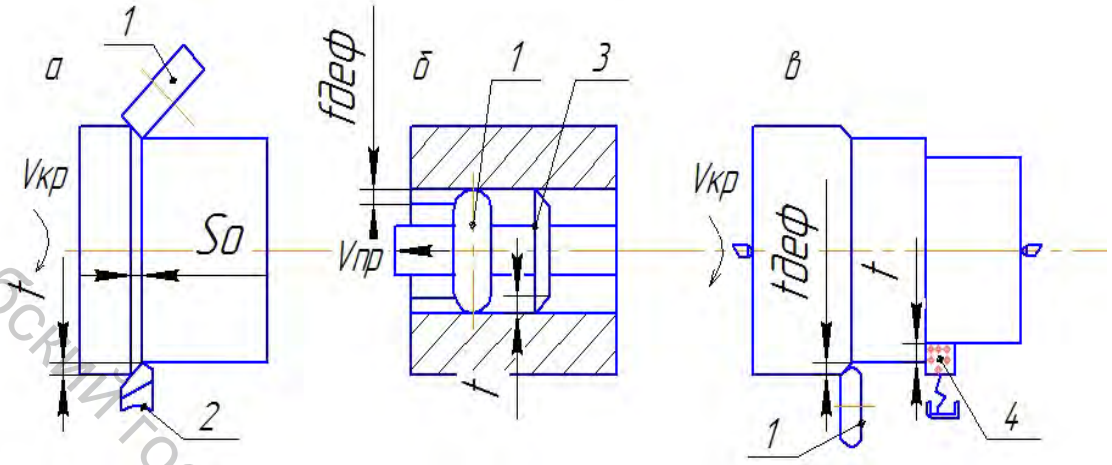


Рисунок 5.1 - Схемы комбинированной обработки с опережающим пластическим деформированием:
а - точение; *б* - протягивание; *в* - шлифование;
1- деформирующий ролик; 2 - резец; 3 - протяжка;
4 - абразивный инструмент;
t - глубина резания; tдеф – глубина деформируемого слоя;
Vкр,Vпр - соответственно круговая и продольная скорости

Воздействие деформирующего инструмента может быть оказано на поверхность резания (рис. 5.1 *а*), или на обрабатываемую поверхность (рис. 5.1 *б, в*). На черновых операциях применение опережающей деформации приводит к повышению стойкости режущего инструмента и производительности.

На чистовых операциях, выполняемых абразивным инструментом, опережающую деформацию используют для повышения качества поверхности.

Процесс опережающей деформации может обеспечить эффективное стружкодробление с помощью рифленого ролика, применение которого повышает стойкость инструментов в 2,8-4,5 раза.

5.2.2 Вибромеханическое резание

Механическая обработка с наложением вибрации находит все более широкое применение. Можно выделить два направления наложения вибрации. Первое направление связано с гашением неблагоприятных вибраций при механической обработке, вызывающих снижение качества поверхности, точности обработки и стойкости

Витебский государственный технологический университет

инструмента. Особое значение это направление приобретает при резании труднообрабатываемых материалов.

Второе направление связано с достижением положительного эффекта в процессе наложения вибраций. Применение вибрационного резания обеспечивает эффективное дробление стружки, а также значительное улучшение обрабатываемости резанием разнообразных материалов.

Общими физическими особенностями резания с вибрацией являются:

- кратковременное периодическое увеличение скорости резания;
- переменная циклическая нагрузка на деформируемый материал;
- снижение сил трения на поверхностях контакта инструмента со стружкой и обрабатываемой заготовкой;
– повышенная эффективность применения смазочно-охлаждающей жидкости.

По направлению действия вибрации могут быть осевые, радиальные или тангенциальные.

Резание с осевыми колебаниями применяют для дробления стружки. Основными особенностями вибрационного резания с осевыми колебаниями являются большое изменение подач (толщины среза) за один цикл колебаний инструмента, а также существенное изменение рабочих углов резания. Во всех случаях при точении глубина износа передней поверхности резцов уменьшается.

Наиболее эффективно применение осевого вибрационного резания при сверлении, в процессе которого значительно улучшаются условия дробления и удаления стружки. При обычном сверлении в процессе передвижения по винтовой канавке стружки происходит ее заклинивание и периодическое образование пробок, что вызывает необходимость остановки и вывода сверла из отверстия. Это обстоятельство затрудняет автоматизацию сверления.

Вместе с возможностью автоматизации вибрационное сверление позволяет увеличить производительность обработки в 2,5 раза и повысить стойкость инструмента в три раза.

Резание с радиальной вибрацией отрицательно сказывается на результатах обработки - увеличиваются параметры шероховатости, поскольку перемещение режущей кромки при вибрации непосредственно фиксируется на обработанной поверхности. Неудовлетворительны и условия работы режущей кромки, поскольку большая нагрузка при колебательном движении воспринимается режущей кромкой, как следствие, происходит повышенный износ и выкрашивание кромок.

Резание с тангенциальными колебаниями, т. е. с колебаниями в направлении окружной скорости резания, применяют для существенного повышения производительности и стойкости

Витебский государственный технологический университет

инструмента. Метод показал положительные результаты при точении, фрезеровании, развертывании, нарезании резьб, шлифовании, абразивной заточке инструмента.

5.2.3 Электромеханическая обработка

Сущность электромеханической обработки заключается в том, что через поверхность контакта инструмента и заготовки пропускается ток большой силы и низкого напряжения. Выступы микронеровностей поверхностного слоя подвергаются сильному нагреву и под силовым воздействием инструмента деформируются и сглаживаются, а поверхностный слой упрочняется за счет быстрого отвода тепла в основную массу металла и скоростного охлаждения. При этом нагрев до температур фазовых превращений является необходимым условием упрочняющих режимов обработки.

Эффект упрочнения достигается благодаря тому, что реализуются сверхбыстрые скорости нагрева и охлаждения и достигается высокая степень измельченности зерен.

Электромеханическая обработка характеризуется следующими особенностями:

1) тепловое и силовое воздействие на поверхностный слой осуществляется одновременно;

2) тепловыделение в зоне контакта инструмента и заготовки является следствием действия двух источников теплоты - внешнего и внутреннего;

3) термический цикл (нагрев, выдержка и охлаждение) весьма кратковременны и измеряется долями секунды.

Существуют различные способы подвода электрического тока к месту контакта инструмента и заготовки (рис. 5.2).

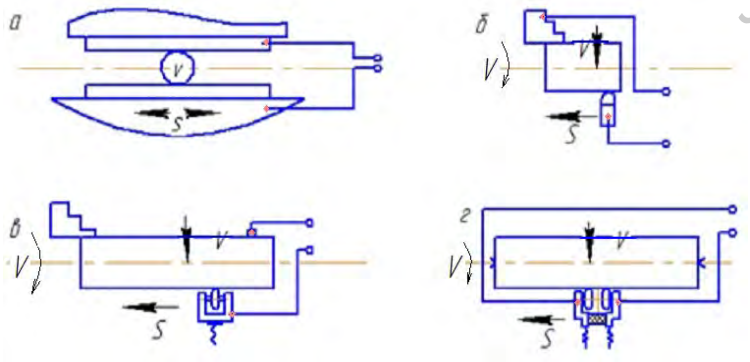


Рисунок 5.2 - Способы подвода электрического тока:
а - через неподвижный контакт; б - через вращающиеся элементы оборудования; в - через ролик; г - через сдвоенные ролики

Витебский государственный технологический университет

Каждый из способов подвода тока обладает своими преимуществами и недостатками. В зависимости от назначения и типа оборудования для электромеханической обработки могут быть использованы токарные, фрезерные, сверлильные и другие металлорежущие станки. Различают следующие режимы электромеханического упрочнения.

Жесткий упрочняющий режим, предполагающий высокую поверхностную плотность тока (700...1500 А/мм²), низкую скорость обработки (0,5...5 м/мин) и невысокие требования к параметрам шероховатости. В поверхностном слое образуется мелкодисперсный мартенсит, при этом отсутствуют значительные пластические деформации.

Средний упрочняющий режим осуществляется при поверхностной плотности тока 800 А/мм² и характеризуется наличием ферритно - мартенситной структуры и значительных деформаций поверхностного слоя. Скорости обработки примерно равны или несколько больше скоростей при жестком режиме.

Отделочный режим характеризуется отсутствием фазовых превращений, невысокой поверхностной плотностью тока и высокими скоростями обработки (10..120 м/мин). Применяется при поверхностном упрочнении. При этом достигается высокая производительность.

Оптимальные режимы электромеханического упрочнения позволяют добиться не только требуемых параметров шероховатости, но и получить завершенную структуру поверхностного слоя с повышенной износостойкостью.

Сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое от сил деформирования оказывают упрочняющее влияние на различные виды разрушающих нагрузок. Упрочнение поверхностных слоев повышает их коррозионную стойкость. Это объясняется не только высокой степенью упрочняемости, особой структурой и дисперсностью поверхностного слоя, но и совокупностью благоприятных физико-механических свойств этого слоя.

В связи с повышением эксплуатационных свойств электромеханическое упрочнение целесообразно применять для широкой номенклатуры деталей, работающих в различных условиях трения изнашивания.

5.2.4 Магнитно-абразивная обработка

Сущность магнитно-абразивной обработки заключается в абразивном удалении припуска путем создания непосредственно в зоне

Витебский государственный технологический университет

резания магнитного поля от внешнего источника. В качестве абразивного инструмента применяют: магнитно-абразивные порошки, абразивные суспензии, магнитно-реологические жидкости.

Перемещение металлической заготовки в магнитном поле сопровождается появлением в ней индукционных токов переменного направления при многократном перемагничивании.

Абразивное резание с наложением этих явлений имеет ряд особенностей. В результате действия магнитного и электропластического эффектов изменяются прочностные характеристики обрабатываемого материала, преимущественно в приповерхностном слое. Снижаются силы, необходимые для резания и пластического выглаживания обрабатываемой поверхности; облегчаются условия для формирования поверхности с малыми параметрами шероховатости и с увеличенной опорной площадью.

Электрическая заряженность обрабатываемой поверхности интенсифицирует электрохимические явления. Этим объясняется высокая эффективность применения химически и поверхностно активных смазочно-охлаждающих жидкостей в процессах магнитно-абразивной обработки по сравнению традиционными видами абразивной обработки.

Механическими особенностями магнитно-абразивной обработки является:

- непрерывный контакт порошка с обрабатываемой поверхностью, позволяющий повышать точность геометрических размеров и формы, а так же снизить циклические нагрузки на систему «станок – приспособление - инструмент - деталь»;

- отсутствие жесткого крепления абразивного зерна в связке, способствует самопроизвольному нивелированию режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности;

- возможность управления жесткостью инструмента позволяет регулировать съем металла с формообразующей поверхности;

- отсутствие трения связки о поверхность изделия существенно снижает температуру в зоне абразивной обработки и шероховатость Ra с 1,25...0,32 до 0,08...0,01.

В процессах магнитно-абразивной обработки используют магнитно-абразивный порошок. Магнитное поле создают с помощью специальных магнитных индукторов. На активной поверхности магнитных индукторов и в рабочем зазоре порошок удерживается силами магнитного поля и силами трения порошка о поверхность индуктора. Необходимые для абразивного резания силы создаются благодаря сжатию порошковой среды в рабочей зоне магнитными силами и распорными давлениями. Силы трения в контакте порошка с заготовкой создают дополнительные давления в порошковой среде и на ее границах.

Витебский государственный технологический университет

Схемы магнитно-абразивной обработки представлены на рисунке 5.3.

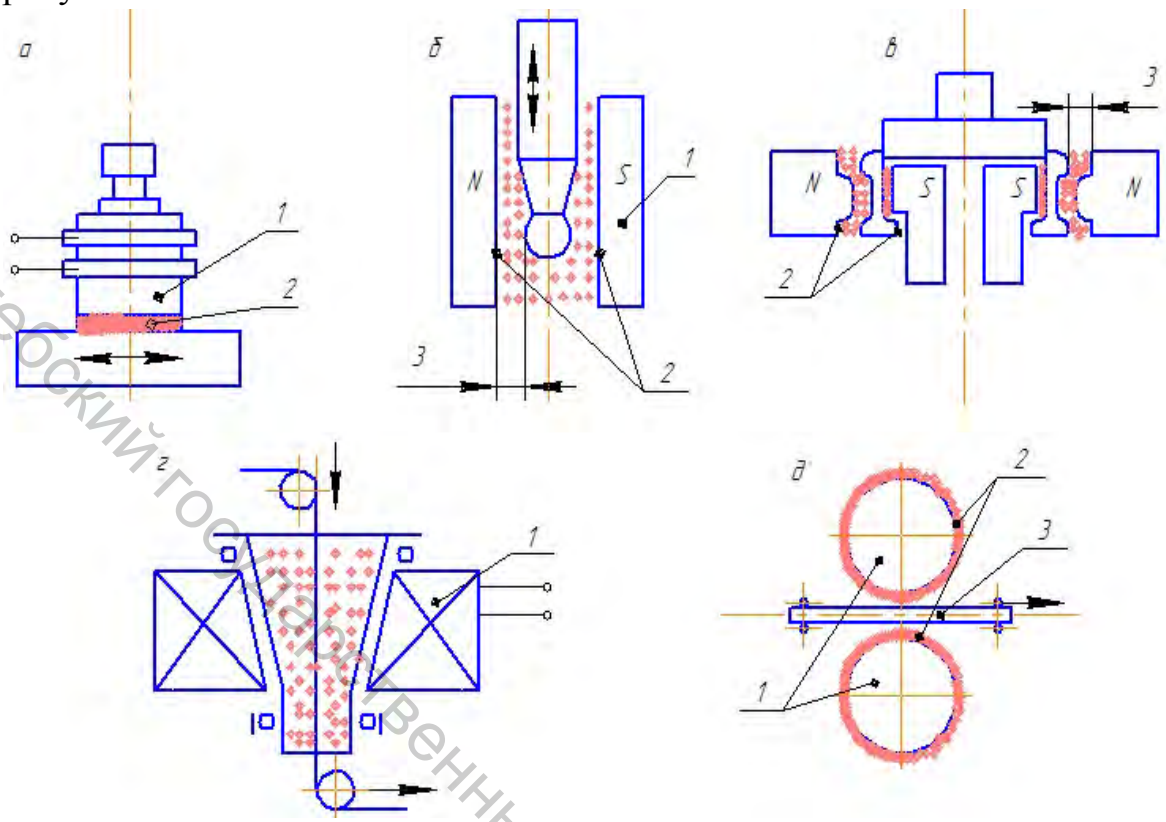


Рисунок 5.3 - Схемы магнитно-абразивной обработки порошком:
а - плоских поверхностей; б - наружных цилиндрических поверхностей вращения с порошком в рабочей зоне; в - фасонных наружных и внутренних поверхностей с порошком в рабочих зазорах;
г - проволоки путем протягивания через вращающуюся воронку;
д - листового материала; 1- магнитный индуктор;
2 - активная поверхность; 3 - рабочий зазор

Магнитно-абразивную обработку осуществляют на специализированных станках, снабженных специальной технологической оснасткой для МАО. Конструкции станков предполагают наличие приводов рабочих и вспомогательных движений, магнитный индуктор, бункер для порошка с дозатором, устройство для очистки рабочей зоны от отработанного порошка.

Магнитно-абразивную обработку порошком применяют на отделочных технологических операциях для полирования поверхностей, их очистки от оксидных и химических пленок, удаления мелких заусенцев, скругления кромок, отделки и упрочнения режущих и штамповых инструментов.

Витебский государственный технологический университет

5.3 Гидроабразивная обработка

5.3.1 Физические особенности гидроабразивной обработки

Гидроабразивная обработка представляет собой процесс ударного воздействия на обрабатываемую поверхность высокоскоростной гидроабразивной струи. Удар частицы о поверхность приводит к возникновению кратера. Вытесненный из кратера материал течет в направлении движения частицы с образованием вала. Движение вала сопровождается возникновением внутренних напряжений, которые приводят к растрескиванию вытесняемого материала. При соударении частицы с поверхностью под прямым углом вал располагается вокруг кратера равномерно. При меньших углах атаки вал образуется по бокам кратера и по направлению движения частицы. Характер деформаций и форма вала зависят от формы частиц, угла ее соударения, а также от свойств материала частицы и обрабатываемой заготовки.

При ударе о поверхность остроугольной частицы наблюдается процесс микрорезания материала. Микрорезание производится только вершинами абразивных зерен. При ударе остроугольные частицы отделяют материал от поверхности заготовки. Процесс микрорезания становится возможным при напряжениях по линии скалывания, превышающих сопротивление материала срезу.

Износ материала заготовки одиночной частицей абразива определяется процессами стирания и резания. Стирание наблюдается при больших отрицательных передних углах резания. При положительных передних углах преобладает процесс резания.

Удаление материала при воздействии на обрабатываемую поверхность струи абразивных частиц происходит в результате взаимодействия нескольких одновременно протекающих процессов: соударение частиц между собой внутри набегающего потока; дробление отдельных частиц; экранирование обрабатываемой поверхности, отскакивающими от нее частицами; повреждение поверхностного слоя материала вследствие многократных ударов абразивными частицами.

Движение струи сопровождается бомбардировкой обрабатываемой поверхности абразивными частицами. Количество ударов абразивных частиц колеблется в зависимости от условий обработки от $2*10^6$ до $25*10^6$ в секунду.

5.3.2 Струйно-абразивная обработка поверхностей

Сущность данного способа заключается в воздействии высокоскоростной (30...70 м/с) суспензии на поверхность обрабатываемой заготовки.

Витебский государственный технологический университет

Основными компонентами суспензии для гидроабразивной обработки являются рабочая жидкость (в основном вода) и абразивный материал. Особенность струйной гидроабразивной обработки состоит в сочетании процессов съема материала, смазки и охлаждении обрабатываемой поверхности.

Рабочая жидкость выполняет следующие функции: обеспечивает транспортировку абразивных частиц от расходной емкости до обрабатываемой поверхности; непрерывно очищает обрабатываемую поверхность, удаляя отработанные абразивные частицы и частички снятого материала; предотвращает образования пыли; является носителем поверхностно-активных веществ, создающих адсорбирующие слои полярных молекул и уменьшающих межатомные связи в поверхностном слое обрабатываемого материала и снижает, таким образом, твердость и сопротивляемость материала разрушению; регулирует тепловой режим в зоне обработки. Рабочая жидкость должна не только обеспечивать интенсивность обработки поверхности, но и предотвращать прилипание частиц снятого материала к обрабатываемой поверхности, а так же проявлять антикоррозионные свойства.

Состав рабочей жидкости подбирают в зависимости от исходного состояния обрабатываемой поверхности и требуемого качества обработки. Как правило, основным компонентом абразивной суспензии является вода. Недостатком воды является коррозия деталей после обработки. Для уменьшения коррозии в суспензию добавляют поверхностно активные вещества на основе сульфосоединений, которые оказывают пассивирующее действие на поверхность, повышают коррозионную стойкость заготовок.

Объемное содержание абразивных частиц в суспензии подбирается опытным путем. Рекомендуется объемная концентрация абразивных частиц в суспензии 20...30 %.

Абразивные частицы в процессе ударного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью изнашиваются, их рабочие грани округляются, что приводит к снижению абразивной способности. При непрерывной обработке в зависимости от вида абразивного материала срок действия суспензии составляет 40...70 часов.

На рисунке 5.4 приведена схема струйно-абразивной установки. Насос 6 подает суспензию из бака 5 по трубопроводу 4 к струйному аппарату 3, который направляет струю суспензии на заготовку 2. Обработка происходит в герметичной камере 1, откуда суспензия стекает в бак 5. Для размешивания смеси в баке предусмотрено устройство 7 с отдельным приводом.

Установки для струйно-абразивной обработки работают как при низком (0,5...0,8 МПа), так и при высоком (4...10 МПа) давлениях. Высокое давление используются для интенсификации обработки грубых поверхностей заготовок. Увеличение давления сжатого воздуха

Витебский государственный технологический университет

приводит к повышению производительности. Так, увеличение давления от 3 до 6 МПа повышает скорость съема металла более, чем в 3 раза.

Скорость движения подачи на предварительных операциях составляет 0,5...2 м/мин, на окончательных операциях 0,15...0,20 м/мин.

Скорость съема металла изменяется в пределах 10-30 мкм. Шероховатость обработанной поверхности составляет Ra=1,7...0,7 мкм.

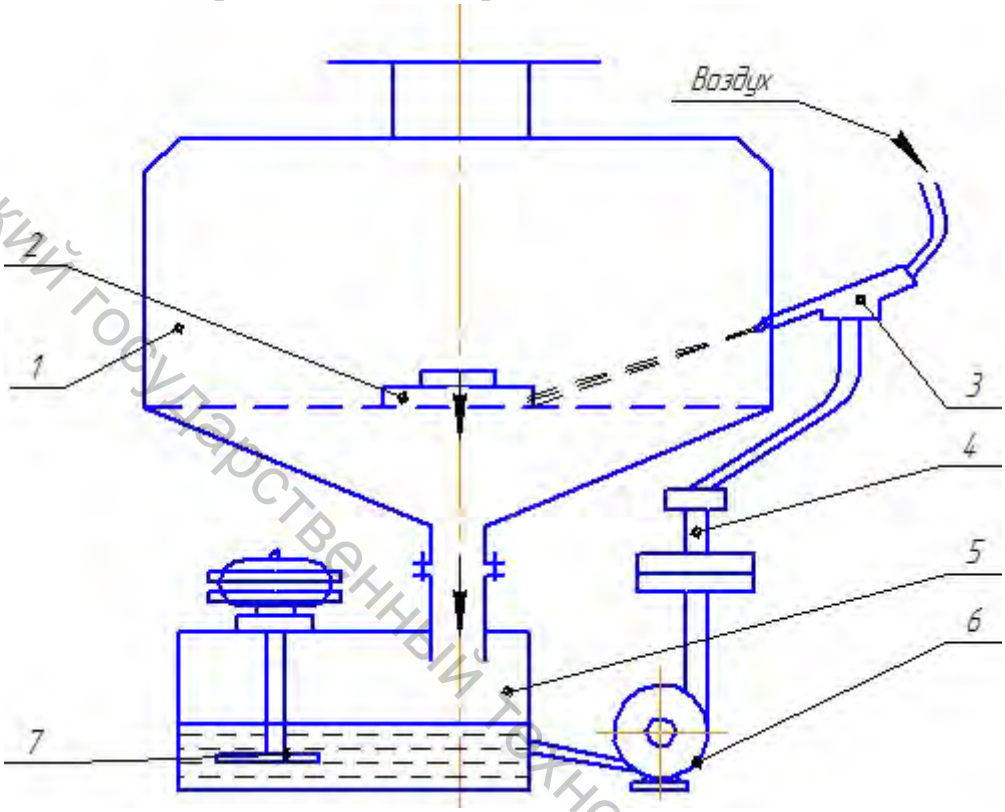


Рисунок 5.4 - Схема струйно-абразивной обработки

Производительность и качество струйной обработки поверхностей зависит от энергетических возможностей гидроабразивной струи, формируемой струйным аппаратом. Основными требованиями, предъявляемыми к струйным аппаратам, являются: обеспечение максимальной скорости струи при минимальном расходе энергоносителя и максимальном расходе гидроабразивной суспензии; обеспечение равномерного распределения абразивных частиц по сечению струи. Первое требование определяет производительность, а второе - качество обработки.

В настоящее время наибольшее применение находят аппараты с принудительной насосной подачей суспензии в камеру смешения и последующим ее разгоном сжатым воздухом. Такие аппараты стабильно работают в широком диапазоне изменения давления воздуха и расхода суспензии, обеспечивают достаточно высокую производительность и качество обработки. Эффективность работы струйного аппарата определяется его геометрическими параметрами, основными из которых являются: размеры и соотношение площадей активного и смесительного

Витебский государственный технологический университет

сопел; расстояние между активным и смесительным соплами; длина сопел; угол сходимости смесительного сопла; размеры камеры смешения и др.

Разгон гидроабразивной суспензии осуществляется в смесительном сопле струйного аппарата. Длина сопла выбирается таким образом, чтобы обеспечить минимальные потери энергии при разгоне суспензии; равномерное поле скоростей на выходе из сопла и заданный угол распыла струи. Практически во всех конструкциях струйных аппаратов предусмотрено регулирование расстояния между выходным торцом активного сопла и входным торцом смесительного сопла.

Внутренняя поверхность смесительного сопла при работе струйного аппарата подвергается интенсивному абразивному воздействию. Поэтому материалы, из которых изготавливаются сопла, должны иметь повышенную износостойкость. Для изготовления сопел струйных аппаратов широко используются твердые сплавы и металлокерамика.

На рисунке 5.5 представлена конструкция струйного аппарата, позволяющая регулировать его геометрические параметры.

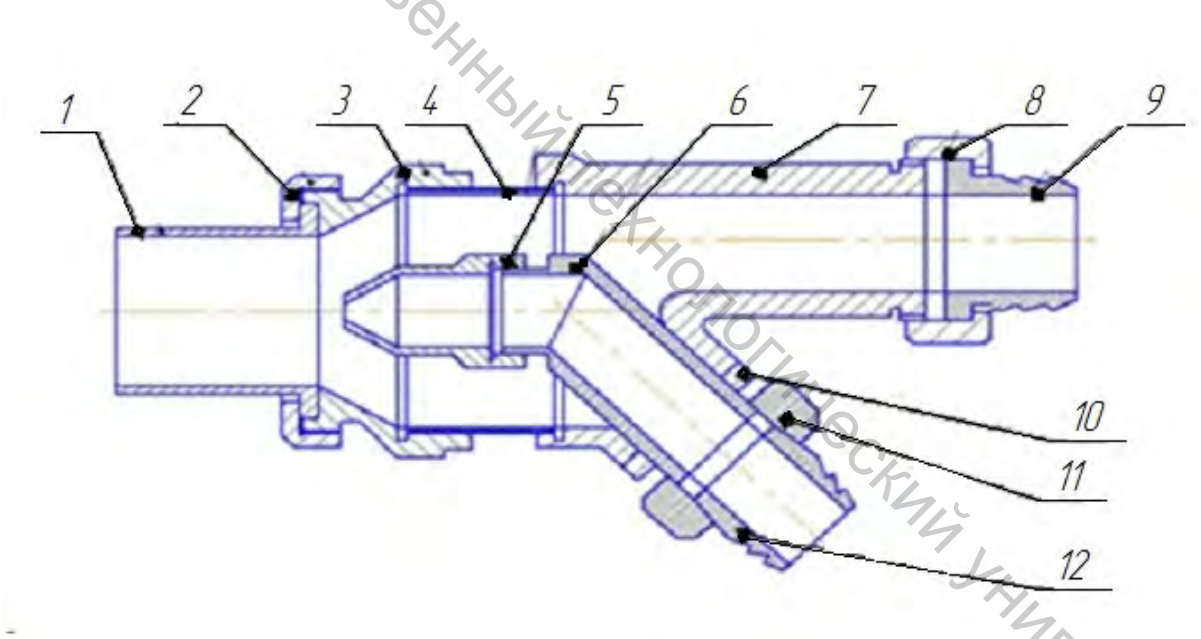


Рисунок 5.5 - Регулируемый струйный аппарат:
1- смесительное сопло; 2, 8, 10, 11- гайки; 3,4- корпусы;
5-активное сопло; 6-трубка; 9,12-штуцеры

На корпус 4, представляющий собой втулку с наружной резьбой, навертывается передний 3 и задний 7 корпусы. На переднем корпусе 3 гайкой 2 крепится смесительное сопло 1. В задний корпус 7 ввернута трубка 6, на конец которой навертывается активное сопло 5. Трубка в корпусе крепится гайкой 10. На нижнем конце трубки с помощью накидной гайки 11 крепится штуцер 12, по которому к струйному

Витебский государственный технологический университет

аппарату подводится сжатый воздух. К корпусу 7 накидной гайкой 8 присоединяется штуцер 9 для подвода суспензии.

Плоская гидроабразивная струя в отличие от осесимметричной обладает более широкими технологическими возможностями, особенно при обработке сложнопрофильных поверхностей. Применение струйных аппаратов, формирующих плоские гидроабразивные струи, позволяет значительно упростить схему обработки, обеспечить равномерный съем материала при стабильном получении заданных показателей поверхностного слоя обрабатываемой детали.

На рисунке 5.6 представлен многосопловый струйный аппарат, который формирует струю с равномерным по ширине профилем скорости за счет перекрытий, расположенных в ряд с определенным шагом струй круглого сечения.

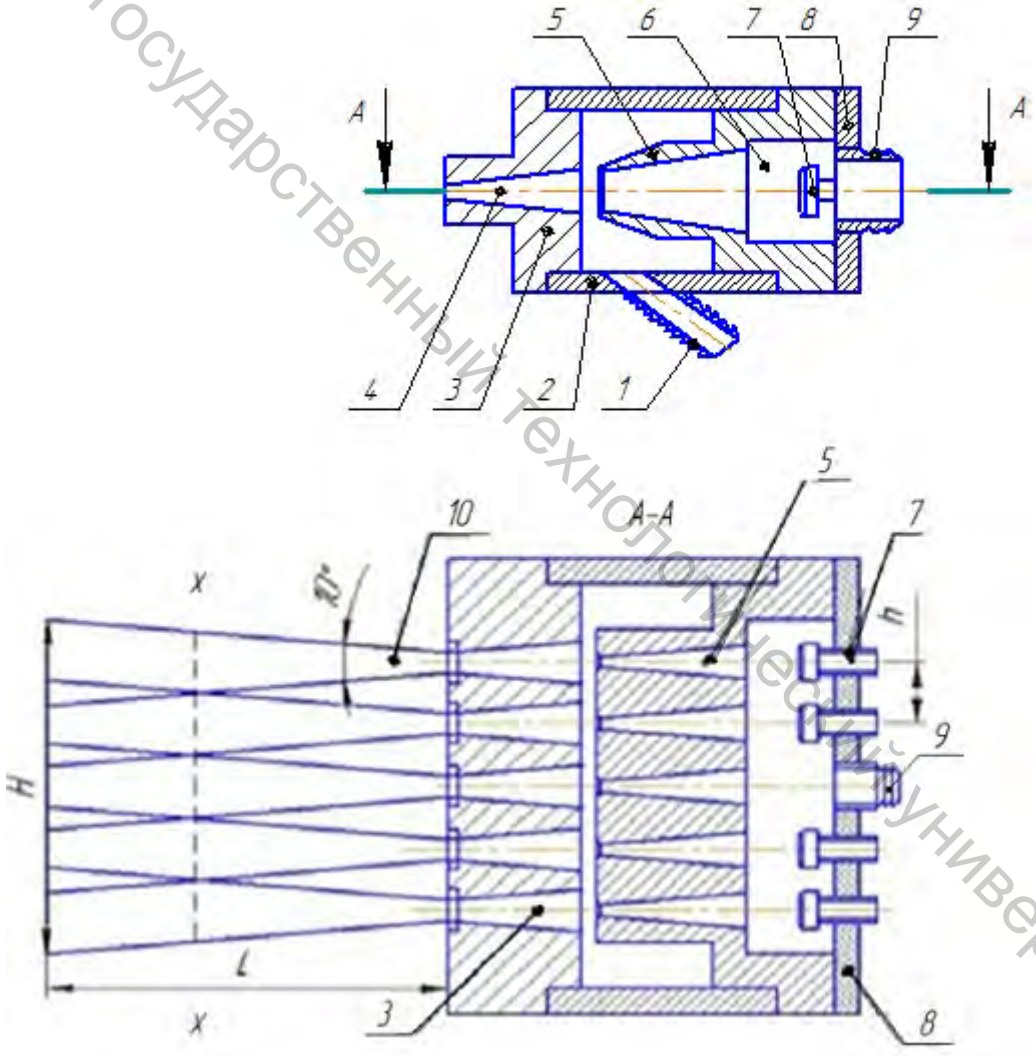


Рисунок 5.6 - Многосопловый струйный аппарат:
1, 9 - штуцера; 2 - корпус; 3, 5 - соответственно смесительное и активное сопла; 4 - керамические вставки; 6 - распределительная камера; 7 - запорные устройства; 8 - крышка; 10 - гидроабразивные струи

ВитебскийГосударственныйТехнологическийУниверситет

Струйный аппарат состоит из корпуса 2 со штуцером 1, через который подается суспензия. В корпусе установлены секции активных 3 и смесительных 5 сопел. Секция активных сопел 5 имеет распределительную камеру 6, закрытую крышкой 8. На крышке установлены запорные устройства 7 активных сопел 5.

Струйный аппарат работает следующим образом. Воздух через штуцер 9 подается в распределительную камеру 6 и поступает в активные сопла 5, где разгоняется до звуковой скорости. Одновременно суспензия через штуцер 1 поступает к смесительным соплам 3, где происходит смешивание с потоком воздуха. Гидроабразивные струи 10, выходящие из смесительных сопел, имеют угол распыла β и пересекаются в плоскости Х-Х, за которой образуется сплошной гидроабразивный поток. В результате наложения и взаимодействия отдельных гидроабразивных струй происходит выравнивание полей скоростей внутри сплошного потока. На некотором расстоянии L от смесительных сопел, которое зависит от угла распыла струи, выходного диаметра смесительных сопел и расстояния между их осями, скорости внутри потока выравниваются настолько, что обеспечивается равномерный съем материала с обрабатываемой поверхности.

Для обработки поверхностей различных размеров без изменения положения струйного аппарата активные сопла имеют запорные устройства 7. Перекрывая доступ воздуха к части активных сопел, можно регулировать размеры зоны обработки, что расширяет технологические возможности струйного аппарата.

5.3.2.1 Применение струйно-абразивной обработки поверхностей

Практика показала, что многие ручные слесарно-зачистные, слесарно-полировальные операции могут быть успешно заменены высокоэффективной механизированной или автоматизированной струйной гидроабразивной обработкой. Этот метод обработки обладает высокими технологическими возможностями. Он может использоваться для различных видов обработки, например, для скругления острых кромок; полировки и шлифовки сложных поверхностей; удаление заусенцев и зачистки сварных швов; снятия со всей поверхности или локально дефектного слоя; подготовки поверхности под покрытие; снятия небольшого припуска; повышения качества поверхности; удаления оксидных пленок, нагара, различных повреждений с поверхностей изделий.

Особенностью струйно-абразивной обработки является активное использование воды, которая выполняет функции транспортирования

Витебский государственный технологический университет

абразивных частиц, демпфирования ударов частиц о поверхность изделия смазки и промывки. Применение воды позволяет избежать образования пыли при использовании очень мелких абразивных порошков. Для операции обезжиривания не требуется использование растворителей и других опасных веществ.

Технология струйно-абразивной обработки обеспечивает высокоэффективную очистку отливок из цветных сплавов, полученных литьем под давлением; удаление загрязнений с поверхностей.

Струйно-абразивный процесс достигает весомых преимуществ при обработке прессованных профилей, турбинных лопаток, сварных швов, матриц экструдерных прессов и многих других сложных деталей, для которых традиционная технология пескоструйной обработки не эффективна или не экологична.

Струйно-абразивная обработка обеспечивает матовую поверхность, идеальную для последующей полировки; облегчает последующее проведение дефектоскопии поверхности; устраняет повреждения краев изделия и эрозию основного слоя, минимизирует износ форм и увеличивает их долговечность.

Струйно-абразивная обработка также обеспечивает и другие значительные преимущества. Регулируя соотношение абразивных компонентов в суспензии можно выбирать различные режимы обработки от тонкого безразмерного хонингования до грубого шлифования и обдирки.

5.3.3 Гидроабразивная резка

5.3.3.1 Технологические основы гидроабразивной резки

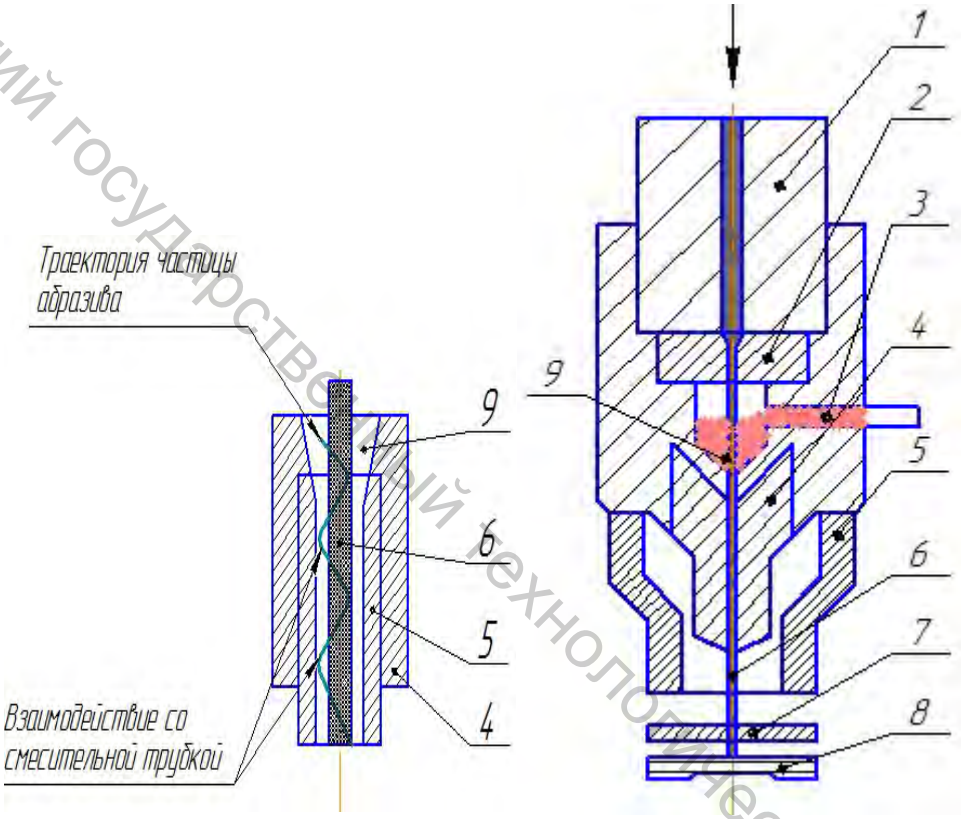
По данным Международной ассоциации инженеров-технологов в мировой практике на мелкосерийное производство, единичное и среднесерийное производство приходиться 70-80 % общего объема выпуска изделий в машиностроении.

Сложность продукции машиностроительного производства за последние три десятилетия в среднем выросли в шесть раз. Из общего числа типоразмеров деталей производства наибольшая доля (более 2/3 общей номенклатуры изделий) приходится на плоские детали сложной конфигурации. Плоские детали сложного контура имеют значительное распространение (более 50 % номенклатуры), а их обработка составляет 20-30 % от общей стоимости механообработки. При месячной программе, измеряемой десятками и сотнями штук сложноконтурных плоских деталей, использование традиционных методов обработки становится экологически нецелесообразно. Выход из создавшегося положения заключается в использовании деталей из

Витебский государственный технологический университет

толстолистового проката, а для его обработки – резку гидроабразивной струей.

Процесс гидроабразивной резки иллюстрирует рисунок 5.7. От насоса сверхвысокого давления вода поступает в подводящий водовод 1 и фокусируется в отверстии сопла 2. Одновременно через подвод 3 в смесительную трубку 4 поступает абразивный порошок. Происходит смешивание струи воды, порошка и воздуха. Гидроабразивная струя направляется на поверхность обрабатываемого материала. В зоне резания образуется щель или сквозной паз. На выходе из паза разрушающая сила струи гасится водой, содержащейся в ванне 8.



а) б)

Рисунок 5.7 - Схемы режущей головки (б) и траектории движения частиц в смесительной трубке (а):

1 - подводящий водовод; 2 - сопло; 3 - подвод абразива; 4 -смесительная трубка; 5 - кожух; 6 - режущая струя; 7 - разрезаемый материал; 8 - гасящий слой воды; 9 - смесительная камера

В сопло 2 вода поступает под давлением 300...600 МПа и фокусируется отверстием сопла до размера Ø 0,01...0,025 мм. Скорость истечения струи воды на выходе из сопла превышает в 3...4 раза скорость звука. Такая струя воды становится режущим инструментом. С добавлением частиц она способна разрезать практически все материалы.

Сфокусированная водяная струя с абразивом постепенно и с постоянной скоростью вводится в заготовку и прорезает в ней узкую щель. Скорость струи по толщине реза вследствие трения о поверхность

Витебский государственный технологический университет

реза замедляется – на входе в заготовку скорость максимальная, на выходе минимальна. Съем материала по толщине также разный. В результате образуется изогнутая фронтальная поверхность реза. Угол между неискаженной водяной струей и поверхностью резания постепенно увеличивается (рис. 5.8 *а*)

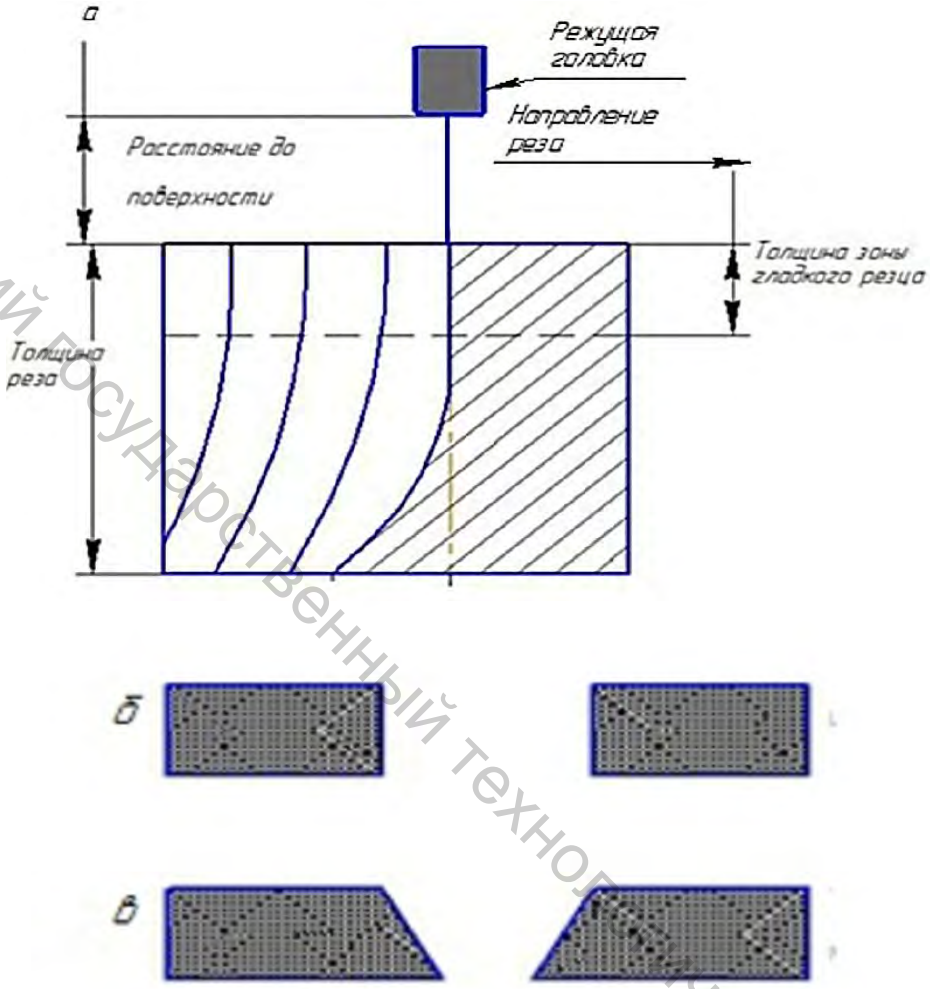


Рисунок 5.8 - Форма струи в направлении движения головки (а) и формы паза на входе (б) и на выходе (в) реза

Форма стенок реза по толщине также неодинакова: на входе стенки реза расположены вертикально; на выходе наклонно (рис. 5.8 *б, в*).

Частицы абразива в процессе перемещений взаимодействуют (соударяются) с поверхностью смесительной трубки и вызывают увеличение диаметра вследствие интенсивного износа. В результате на выходе трубки уменьшается давление струи и ее скорость.

Обычно сопла изготавливают из сапфира, рубина или твердого сплава. Срок службы сапфировых и рубиновых сопел составляет 60...100 ч, твердосплавных сопел 80...150 ч. Смесительные трубки изготавливают из сверхпрочных материалов, и их срок службы составляет 100...200 часов.

Витебский государственный технологический университет

Основными технологическими параметрами процесса гидроабразивной резки являются скорость перемещения режущей головки, скорость и давление гидроабразивной струи, толщина обрабатываемого материала; концентрация и размеры абразивных частиц; свойства разрезаемого материала. При завышенной скорости перемещения режущей головки происходит отклонение от прямолинейности водно-абразивной струи; заметно проявляется ослабевание струи и, как следствие, возникновение конусности реза.

При выборе параметров режима резания задаются следующие исходные данные:

- материал обрабатываемого изделия;
- толщина реза;
- состав и количество (расход) абразивного материала;
- диаметры водяного и рабочего сопел;
- давление воды на входе в рабочую головку;
- требуемые показатели качества поверхностного слоя.

Назначаемой величиной является подача головки, которую часто называют скоростью резания. В таблице 5.1 приведены рекомендуемые скорости резания некоторых материалов.

Таблица 5.1 – Рекомендуемые значения параметров режима резания различных материалов

Условия обработки	Максимальная скорость резки, м/мин				
	Давление 414 Мпа			Давление 276 МПа	
Соотношение диаметров водяного и выходного сопел, мм	0,254/0,762	0,355/1,016	0,457/1,50	0,254/0,762	0,33/,016
Расход воды (л/мин)	2,27	4,36	7,27	1,91	3,23
Расход абразива, кг/мин	0,4	0,63	1,13	0,27	0,45
Мощность, кВт	25	50	80	11	25
Толщина, мм	*Алюминий*				
6,25	1,36	1,93	2,56	0,68	1,01
12,5	0,64	0,91	1,21	0,32	0,48
25	0,29	0,41	0,54	0,14	0,21
	Графит				
6,25	3,69	5,24	6,95	1,86	2,73
	Термореактивный пластик				
12,5	1,75	2,48	3,29	0,83	1,29
25	0,78	1,10	1,46	0,39	0,57
	Никелевый сплав				
6,25	0,46	0,65	0,86	0,23	0,34

Витебский государственный технологический университет

Окончание таблицы 5.1

12,5	0,22	0,31	0,41	0,11	0,16
25	0,01	0,14	0,18	0,05	0,07
	Стекло				
6,25	2,61	3,70	4,91	1,32	1,93
12,5	1,24	1,76	2,33	0,62	0,91
25	0,55	0,78	1,03	0,28	0,41
	Сталь среднеуглеродистая				
6,25	0,54	0,77	1,02	0,27	0,40
12,5	0,26	0,36	0,48	0,13	0,19
25	0,11	0,16	0,21	0,06	0,08
	Сталь нержавеющая				
6,25	0,50	0,71	0,95	0,25	0,37
12,5	0,24	0,34	0,45	0,12	0,18
25	0,10	0,14	0,20	0,05	0,08
	Титановый сплав (6Al4V)				
6,25	0,66	0,93	1,23	0,33	0,49
12,5	0,31	0,44	0,58	0,16	0,23
25	0,14	0,20	0,26	0,07	0,10

По мере увеличения давления в струе с одной стороны происходит увеличение глубины резания, с другой стороны ускоряется износ элементов режущей головки.

Для каждого вида и толщины обрабатываемого материала подбираются оптимальные значения давления и концентрации абразива и размера частиц.

Максимальное рабочее давление обычно составляет 300...320, 380, 415 или 600 МПа.

Оптимальная концентрация абразива зависит от вида материала, а также степени износа сопла.

При малой концентрации абразива эффективность гидроабразивной резки будет невысокой, а повышенная концентрация вызывает скопление абразива, которое вызывает затруднение его удаления из зоны резания. При этом понижается эффективность обработки.

Размер абразивных частиц составляет 10-30 % диаметра режущей струи для обеспечения ее эффективного воздействия и стабильного истечения. Обычно размер частиц составляет 150..250 мкм, и в ряде случаев 75..100 мкм, если допустимо получение поверхности реза с низкой шероховатостью.

Витебский государственный технологический университет

5.3.3.2 Технологическое оборудование для гидроабразивной резки

Технологическое оборудование выполнено по модульному принципу. Модули соединяются между собой гибкими связями. Это позволяет легко осуществлять монтаж и демонтаж отдельных модулей на подвижные платформы, в том числе и на автомобильные, осуществлять транспортировку к объектам обработки. Мобильность установок способствует увеличению их загрузки.

Модулями являются:

координатный стол 1; режущая головка 2; система подачи абразива 3; бак-отстойник 4; станция высокого давления 5; высоконапорная разводка 6; система водоподготовки 7; воздушный компрессор 8; система управления 9 (рис. 5.9). Дополнительно в состав установки могут входить устройства для предотвращения столкновений режущей головки с заготовкой, механическая система предварительного просверливания, ловушка струи воды, гасящая ее энергию и служащая для сбора отработанного абразива. Таким образом, установки обладают разной степенью универсальности и автоматизации. Они могут быть выполнены в виде роботизированных комплексов.

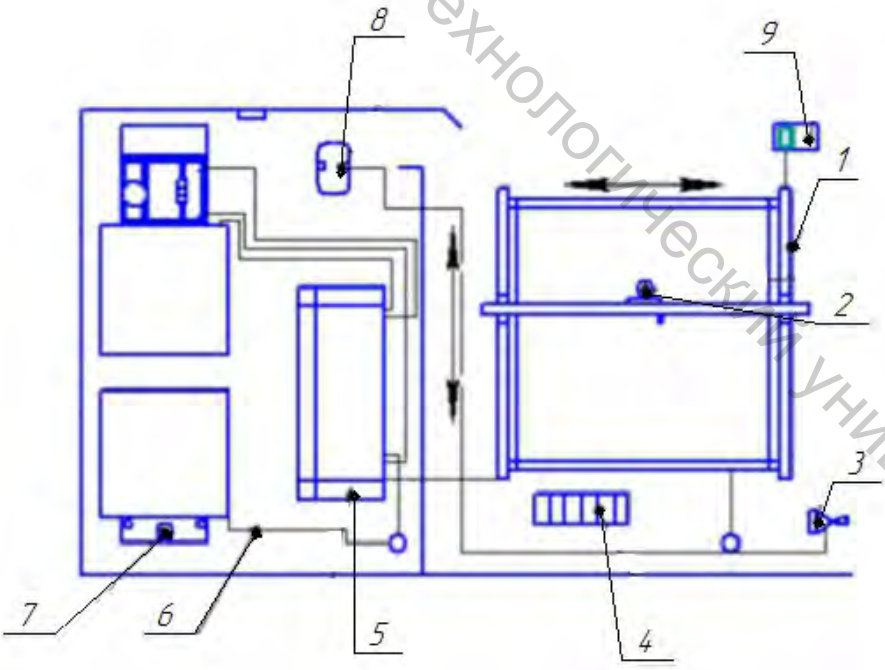


Рисунок 5.9 - Схема установки гидроабразивной резки:
1- координатный стол; 2 - режущая головка; 3 - система подачи абразива; 4 - бак-отстойник; 5 - станция высокого давления; 6 - высоконапорная установка; 7 - система водоподготовки; 8 - воздушный компрессор; 9 - система управления

Витебский государственный технологический университет

Координатный стол предназначен для размещения обрабатываемого изделия и позиционирования режущей головки. Стол включает портал 1 (рис. 5.10), перемещающийся по осям X, Y, Z. Вдоль портала по оси Y движется поперечная тележка 3, обеспечивающая подъем и опускание по оси Z вертикальной каретки 4. Режущая головка 5 имеет возможность вращения вокруг двух взаимно перпендикулярных осей.

Перемещение по каждой из осей осуществляется отдельным приводом. Положение головки определяется преобразователями координат или магнитной линейной системой.

Перемещение по осям ограничивается с помощью концевых датчиков. Опорные датчики гарантируют повторяемость перемещений на требуемую позицию даже при сбоях в системе электропитания.

Программное управление обеспечивает динамический наклон головки, что позволяет избежать конусности обрабатываемых поверхностей.

Под рабочей поверхностью стола находится уловитель остаточной энергии (ловушка струи). Как дополнительный вариант возможна установка оборудования для автоматической регулировки уровня воды, барботирования и откачки пульпы (шлама и использованных абразивных материалов) во внешний отстойный резервуар.

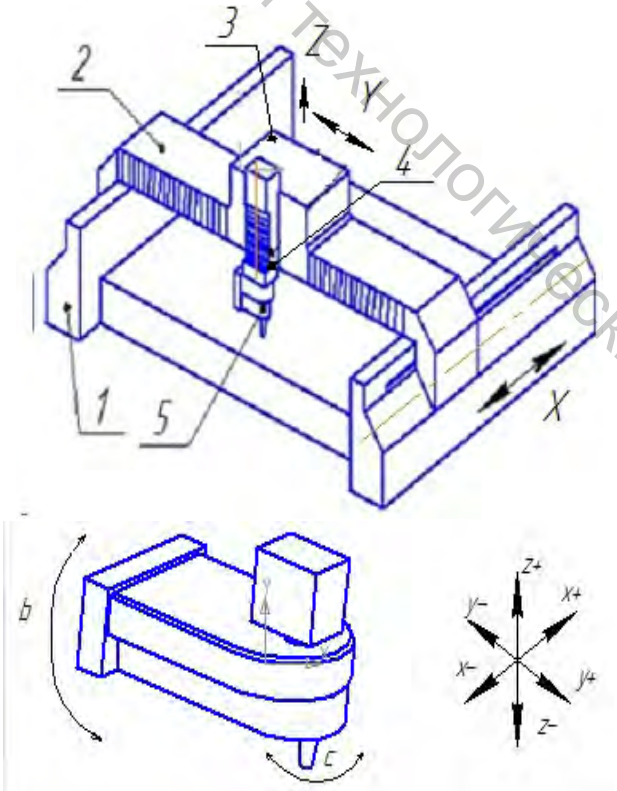


Рисунок 5.10 - Схема стола портального типа (а) и направления вращения режущей головки:

Витебский государственный технологический университет

1 - продольные направляющие; 2 - портал; 3, 4 - соответственно поперечная и высотная каретки; 5 - режущая головка

Режущая головка осуществляет окончательное формирование высоконапорной тонкой струи как режущего инструмента со своими геометрическими и энергетическими параметрами. Конструктивные особенности струйной головки: взаиморасположение деталей, характер их соединения, контакт формируемой струи определяют качество и надежность головки. Существует множество конструкций струйных головок. Наиболее совершенными из них считаются конструкции со свободным вводом абразива в рабочую зону с минимальным нарушением их гидродинамических характеристик (рис. 5.11).

Основными геометрическими параметрами проточной части гидроабразивной головки являются: d□ - выходной диаметр струеформирующего сопла; dв - диаметр отверстия водовода; d - диаметр отверстия коллиматора; D - диаметр камеры смешивания; L_1 - длина камеры смешения; L_2 - длина коллиматора.

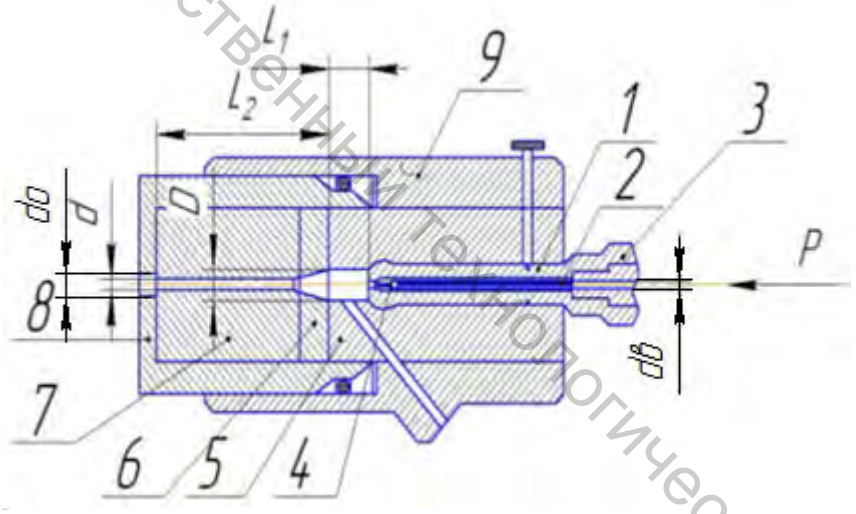


Рисунок 5.11 - Схема конструкции гидроабразивной головки:
1- струеформирующее устройство; 2 - успокоитель;
3 - подводящий водовод; 4 - сопло; 5 - камера смешивания;
6 - переходник; 7 - коллиматор; 8 - корпус коллиматора;
9 - корпус головки

Существующие теоретические модели формирования абразивной струи базируются на представлении, что формирование гидроабразивной струи происходит только в коллиматоре головки. При этом с помощью уравнений гидродинамики описывается разгон смеси воздуха и абразивных частиц, как течение двух параллельных осесимметричных потоков воздушной струи и смеси воздуха с абразивными частицами. В соответствии с математической моделью формирования гидроабразивной струи параметры режущей головки подразделяются на три группы.

Витебский государственный технологический университет

К первой группе относятся динамические и структурные характеристики струи высокого давления, влияющие на эффективность формирования гидроабразивной струи: диаметр сопла d_0 и давление воды перед насадкой.

Вторая группа включает геометрические параметры проточной части гидроабразивного инструмента: диаметр D и длина L камеры смешивания и геометрические параметры коллиматора: диаметр d и длина L_2.

К третьей группе относятся параметры системы дозирования подачи абразива в камеру смешивания в условиях гравитационной подачи абразива в камеру смешивания или путем самовсасывания за счет разряжения.

Повышением эффективности существующих режущих головок является их модернизация путем охлаждения режущей струи распылением жидкого азота в камере смешивания (криогенная резка). В результате происходит охлаждение высоконапорной струи жидкости с испаряющимся азотом, образование в ней частиц льда, выполняющих роль абразивных зерен, и возникновение на поверхности сопла ледяной корки, защищающей сопло от интенсивного износа. Гидроабразивная головка с охлаждением представлена на рисунке 5.12.

Головка функционирует следующим образом.

По трубопроводу 4 через форсунку расположенную в патрубке 3, внутрь камеры 5 подается вода и распыляется жидкий азот. Происходит интенсивное охлаждение корпуса режущей головки 1 и циркулирующей воды. Эффективность охлаждения повышается за счет оребрения 14.

Одновременно по трубопроводу 7 через форсунку, расположенную в патрубке 6, внутрь камеры смешивания 9 также поступает распыленный жидкий азот. В результате происходит непосредственное охлаждение высоконапорной струи жидкости испаряющимся азотом и образование в нем частиц льда, а также происходит кристаллизация водяной пыли, образующейся в камере 9. Выход газа из камер предварительного и окончательного охлаждения осуществляется через патрубки 11,13.

Криогенная резка позволяет разрезать сверхтолстые и прочные материалы, недоступные другим видам резки. Криогенная резка является конкурентам для других высокотехнологичных видов резки: лазерной, плазменной, гидроабразивной.

Достоинствами криогенной резки являются возможность резки всех видов материалов, высокая скорость реза, практически отсутствие ограничений на толщину разрезаемого материала, высокое качество реза толстого материала, относительная безопасность процесса.

Витебский государственный технологический университет

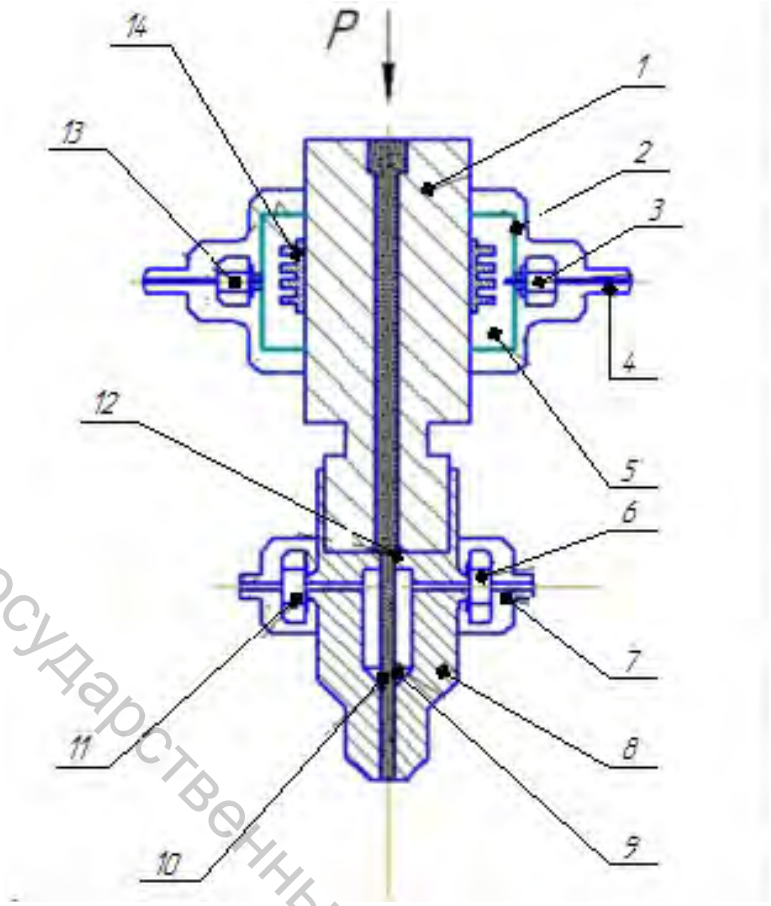


Рисунок 5.15 - Гидроабразивная головка с охлаждением:
1– корпус режущей головки; 2, 8 - корпуса устройств соответственно предварительного и окончательного охлаждения;
3, 6 - входные патрубки; 4, 7 - входные трубопроводы;
5 - камера предварительного охлаждения; 9 - смесительная камера;
10 - струя высокого давления; 11, 13 - выходные патрубки;
12 - сопло; 14 - оребрение

Станция высокого давления включает насосы прямого действия или мультипликаторного. Насосы прямого действия основаны на создании давления жидкости кривошипно-шатунными механизмами, приводимыми в действие электрическими двигателям. Насосы прямого действия могут надежно и стабильно работать на уровне давления до 400 МПа. Практика использования установок для гидроабразивной резки показала, что процесс резки устойчиво и стабильно осуществляется в диапазоне давления 270...340 МПа. Кроме того, насосы прямого действия обладают высоким КПД - до 95 %.

Насосы мультипликаторного действия способны создавать давление 400...600 МПа.

Давление в таких насосах поднимается ступенчато. На первой ступени первичное давление создается гидравлическим насосом. При этом используется гидравлическая жидкость, которая последовательно

Витебский государственный технологический университет

поступает в левый и правый цилиндры мультипликатора. Площади цилиндров мультипликатора могут быть в 20 раз больше площади плунжеров мультипликатора. В результате давления воды, выталкиваемой плунжерами из каждого цилиндра в 20 раз выше первичного давления в гидравлическом насосе. Вода высокого давления последовательно из каждого цилиндра поступает в аттенюатор (аккумулятор), который сглаживает пульсации давления и обеспечивает ее непрерывный поток в режущую головку.

Разводка высокого давления используется для подачи воды от насоса высокого давления к режущей головке системой неподвижных и подвижных труб. Для обеспечения плотности соединений при движении портала и рабочей головки используются специальные шарниры, высокого давления или спиральные специальные конструкции.

Достоинства и недостатки гидроабразивной резки

Область применения гидроабразивной резки весьма обширна: высококачественные стали, цветные металлы, стекло, натуральный камень, керамика, материалы для авиационной и космической промышленности, пластмассы, комбинированные материалы и т. д. Гидроабразивной резкой можно разделять практически все материалы. При этом не возникает механических деформаций, поскольку воздействия струи составляет 1...100 Н, а температура в зоне реза не превышает 60...90 °С. Поэтому в материале отсутствуют термические напряжения. Исключается оплавление или пригорание кромок. Возможно обработка термочувствительных материалов. Обеспечивается экологическая чистота процесса, полное отсутствие вредных газовых выделений.

Гидроабразивная струя способна разрезать материалы, толщиной до 300 мм по сложному контору с высокой точностью. Возможна резка со скосом кромок. При резке возможны минимальные зазоры между деталями, что позволяет минимизировать расход обрабатываемого материала. Режущая головка обеспечивает перемещение абразивной струи в любом направлении. Поэтому возможно получение двухмерных плоских и трехмерных объемных изделий.

Витебский государственный технологический университет

ГЛАВА 6
ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ

6.1 Высокотемпературные покрытия

6.1.1 Материалы высокотемпературных покрытий

Витебский государственный технологический университет

Эксплуатационная надежность машин ограничивается сроком службы деталей, работающих в экстремальных условиях, т. е. при повышенных температурах, давлениях и скоростях. Такими деталями являются сопловые лопатки газотурбинных двигателей, элементы поршневой группы двигателей внутреннего сгорания и т. д. Значительно увеличить срок службы таких деталей можно путем нанесения жаростойких покрытий, предохраняющих поверхность от высокотемпературного окисления, эрозии, разупрочнения основного материала.

Материалами высокотемпературных покрытий являются окислы, твердые соединения: карбиды, бориды, нитриды, силициды.

Тугоплавкие окислы. Альфа-окись алюминия (α-$Al_2\,O_3$) характеризуется высокой механической прочностью, имеет несколько модификаций, температура плавления 2050 °С.

В природе окись алюминия встречается в виде корунда, сапфира или рубина.

Окись бериллия (Be O) является стабильным, мало летучим соединением с температурой плавления 2570 °С. Ее температура плавления выше, чем у окиси алюминия, а механическая прочность несколько ниже, чем окиси алюминия. Благодаря высокому электросопротивлению, малыми электрическими потерями и низкой плотностью она является лучшим изолятором, нежели окись алюминия, особенно при высоких температурах (1700-2000 °С).

Окись церия существует в двух видах: $Ce_2\ O_2$ и CeO_2 . Последний более устойчив и плавится при температуре 2593-2737 °С. Хотя окись церия считается редкоземельным материалом, практически она встречается в земной коре чаще, чем цинк или олово.

Окись гафния HfO_2 обычно присутствует в цирконийсодержащих минералах (2-7 %); как правило, окись гафния не отделяют от окиси циркония. Поскольку температура плавления HfO_2 равна 2810 °С и она образует твердый раствор с окисью циркония (ZrO_2), ее присутствие не ухудшает свойств ZrO_2. Чистая окись гафния - редкий и дорогой материал.

Окись никеля (NiO) – легко восстанавливаемый окисел. Его температура плавления 1949 °С. Окись никеля является единственным

тугоплавким материалом, способным восстанавливаться до металлического состояния в атмосфере водорода. Объемные изменения, сопровождающие эту реакцию, столь велики, что вызывают разрушения изделий из NiO.

Окись тория (ThO_2) - наиболее тугоплавкий, характеризуемый температурой плавления 3200 °С. Ограниченность ее применения определяется большой плотностью, высокой стоимостью, слабым сопротивлением тепловому удару.

Окись титана (TiO_2) представляет собой химически стабильное кристаллическое вещество, плавящееся при 1840 °С. Она ценится как диэлектрик.

Твердые соединения - карбиды, нитриды, бориды и силициды- имеют сходные структуры, поскольку атомы азота и углерода находятся в позициях внедрения в решетке металла. Эти материалы обладают низким электросопротивлением; при этом большинство карбидов, боридов, нитридов отличаются высокой теплопроводностью и большой твердостью.

Карбиды являются самыми тугоплавкими веществами: 4 TaC* ZrC (tпл=3918 °С), 4 TaC*HfC (tпл=3928 °С). Карбид кремния (SiC) и карбид бора (BC) известны как абразивные материалы, а карбид титана (TiC) и вольфрама (WC) - как составляющие твердых сплавов.

Нитриды по своим свойствам похожи на карбиды, но их склонность к окислению больше, чем у карбидов. Наиболее стабильными нитридами являются HfN и ZrN. Эти материалы можно с успехом применять для работы в вакууме вплоть до температуры 1800 °С. Будучи в контакте с углеродом, нитриды взаимодействуют с ним, образуя карбиды; обычно эта реакция протекает даже в атмосфере азота.

Бориды устойчивы в интервале температур 2000-3200 °С. Как правило, всем боридам свойственна малая летучесть, низкое электросопротивление, высокая твердость и хорошая теплопроводность. Бориды - одни из немногих материалов, которые достаточно стабильны и мало летучи при 2500° С, и поэтому могут быть эффективными жаропрочными материалами.

Силициды бора B_6 Si и B_4 Si пригодны для использования при высоких температурах и стабильны в течение длительного времени, при 1400 °С. Они обладают высоким сопротивлением тепловому удару. При окислении на них образуется защитное тело из боросиликатного стекла.

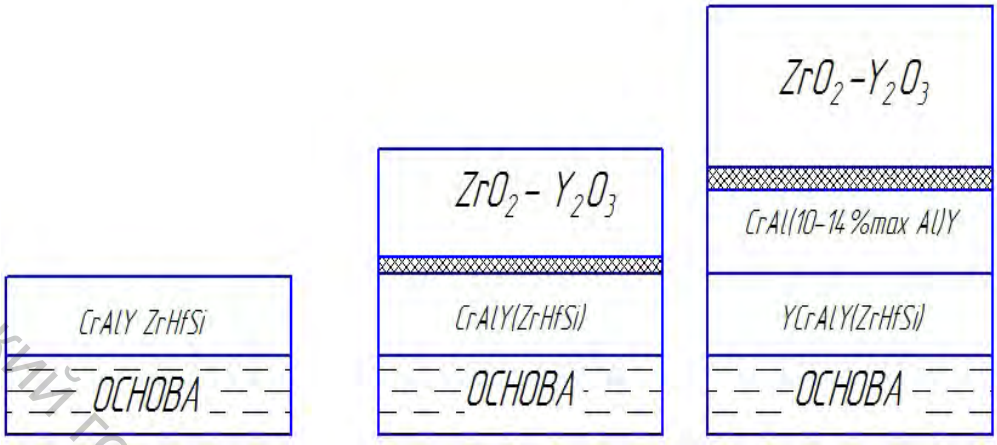
Разработанные жаростойкие и теплозащитные покрытия разделены на три группы (рис. 6.1):

- однослойные металлического типа CrAlYZr HfSi (рис. 6.1 *а*);

- двухслойные покрытия с внутренним металлическим CrAlYZrHfSi и внешним керамическим ZrO_2-Y_2O_3 (рис. 6.1 *б*);

Витебский государственный технологический университет

- трехслойные покрытия с внутренним металлическим CrAlYZrHfS, промежуточным металлическим CrAlY; внешним керамическим ZrO_2-Y_2O_3 (рис. 6.1 *в*).



а б в

Рисунок 6.1 - Схемы жаростойких и теплозащитных покрытий:
а - однослойных, б - двухслойных, в - трехслойных

Общая толщина однослойных покрытий не превышает 150 мкм, двухслойных - 200 мкм и трехслойных - 300 мкм. Толщина внутреннего слоя в трехслойных покрытиях колеблется от 30 до 50 мкм, промежуточного 50-80 мкм, внешнего 80-120 мкм. Концентрация хрома, алюминия, натрия, циркония, гафния, кремния в жаростойком слое составляют соответственно 18-24 % мас, 10-130 % мас, 0,4-1,8 мас, циркония, гафния, кремния от 0,05 до 0,2 % мас. Дополнительное легирование сплавов CrAlY цирконием, гафнием, кремнием позволило: с одной стороны, повысить жаростойкость однослойных многокомпонентных и композиционных жаростойких покрытий, а с другой стороны, замедлить диффузионные процессы на границах основы – демпфирующий внутренний слой – внешний керамический слой – и тем самым повысить ресурс покрытия в целом. Еще более существенное замедление диффузионных процессов в слоях, составляющих покрытия, наблюдаются при выполнении промежуточного жаростойкого слоя в микрослойном варианте от 0,5 до 1 мкм. При этом оптимальные характеристики достигаются при концентрации дисперсных тугоплавких частиц (Zr O_2 -Y_2O_3, Al_2O_3) в микрослое от 0,3 до 1 % масс.

6.1.2 Технологические основы процессов газотермического напыления

В зависимости от источника теплоты различают следующие методы газотермического нанесения покрытий: газопламенное

Витебский государственный технологический университет

напыление, плазменное, электродуговая металлизация, детонационно-газовое и вакуумно-конденсационное напыление.

Сущность процессов газотермического нанесения покрытий заключается в образовании направленного потока дисперсных частиц напыляемого материала и переносе их на поверхность обрабатываемого изделия при оптимальных для формирования слоя покрытия значения температуры и скорости.

Обобщенная схема процесса газотермического напыления представлена на рисунке 6.2.

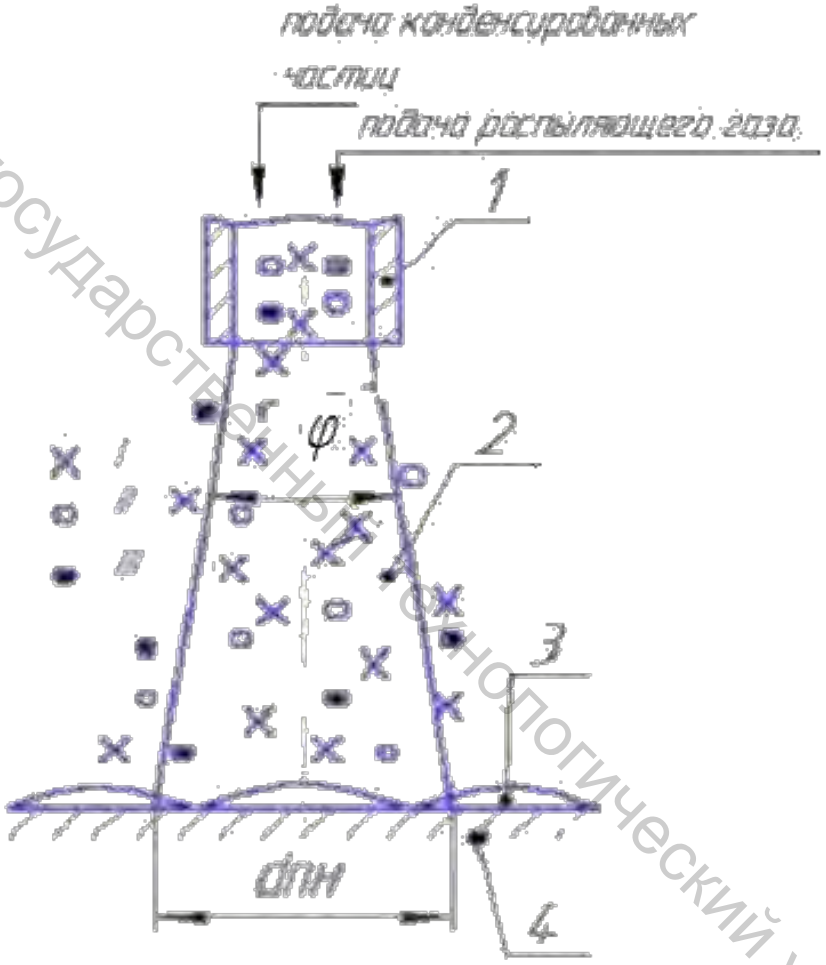


Рисунок 6.2 - Схема процесса газотермического напыления:
1- сопловая часть генератора частиц; 2 - трехфазная струя
(I - конденсированные частицы, II - атомы распыляющего газа,
III - паровая фаза); 3 - покрытие; 4 - поверхность напыления;
Ф - угол расхождения потока частиц; dпн - диаметр пятна напыления

Распыляемый материал в виде порошка, проволоки или стержня попадет в зону нагрева и диспергируется. Различают радиальную или осевую подачу материала. Нагретые частицы распыляют газом. Основное назначение газа-ускорение частиц в осевом направлении. Распыляющий газ при использовании проволоки или стержней может диспергировать расплавленный материал.

Витебский государственный технологический университет

Покрытие формируется из порошковых частиц, находящихся в расплавленном состоянии с частичным расплавлением, нерасплавленных и частично затвердевших. При распылении проволоки и стержней покрытие формируется из расплавленных частиц с широким спектром дисперсности.

К потоку напыляемых частиц предъявляется ряд требований, обеспечивающих благоприятные условия для формирования покрытия:

- температура нагрева частиц должна быть достаточной для образования прочных адгезионных связей с поверхностью напыления. При невысоких скоростях частиц (50-500 м/с) температура нагрева должна быть выше температуры плавления материала. Высокие скорости частиц (800-1000 м/с) позволяют формировать покрытия при температурах, составляющих до 0,9 температуры плавления материала частиц;

- скорость частиц в потоке назначают в зависимости от их температуры. Она должна составлять 50-100 м/с (минимальная для расплавленных перегретых частиц, максимальная для нерасплавленных, находящихся в вязкопластичном состоянии);

- угол расхождения потока **φ** должен составлять 5-20 º. Минимальный угол расхождения обеспечивает получение компактных потоков частиц и возможность формирования покрытий.

Наиболее важные параметры распыляемого материала: физико-химические свойства, размеры порошковых частиц, диаметр стержня, проволоки.

Используют проволоку диаметром 0,5-5 мм. Скорость подачи проволоки выбирают максимальной для заданного режима работы (2-10 мм/с).

Параметрами, характеризующими внешние условия напыления, являются: давление окружающей среды; дистанция напыления; угол напыления; температура изделия, его форма и размеры; скорость перемещения пятна напыления.

6.1.3 Газопламенное напыление

Газовое пламя получают посредством сгорания горючих газов в кислороде или на воздухе. В качестве горючих газов для напыления покрытий используют: ацетилен (C_3H_3), метан (CH_4), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}), водород (H_2) и др. Физико-химические свойства горючих газов представлены в таблице 6.1.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 6.1 - Физико-химические свойства горючих газов

Горючий газ	Относительная плотность по воздуху	Теплотворная способность при 25 ºС и 0,1 МПа, Мдж/м³	Теплота выделения при нейтральном сгорании, Мдж/м³	Скорость распространения пламени в смеси с кислородом, м/с	Температура газового пламени в смеси с кислородом, °К
Ацетилен	0,91	56,5	18,5	13,5	3100-3200
Метан	0,56	35	1,4	3,3	2000-2100
Пропан	1,57	93,5	12,6	3,7	2400-2700
Бутан	2,1	125,1	–	–	2400-2700
Водород	0,07	10,8	–	8,9	2000-2100

В качестве распыляемого материала при газопламенном напылении используют порошок, гибкие шнуры в полимерной оболочке, заполненные порошками, а так же порошковые проволоки в металлической оболочке. Распыляемый материал подают по оси газопламенной струи внутрь факела (рис. 6.3).

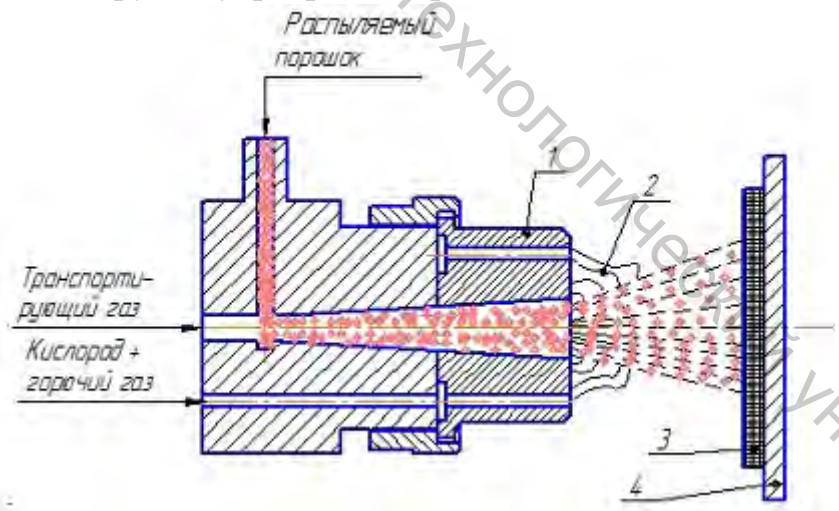


Рисунок 6.3 - Принципиальная схема газопламенного напыления: 1 - сопло, 2 - газовый факел; 3 - покрытие; 4 - подложка

К технологическим параметрам, оказывающим наибольшее влияние на эффективность процесса, относятся: диаметр газового сопла, диаметр отверстий на периферии сопла, угол наклона оси отверстий к оси распылителя.

Давление транспортирующего газа выбирают в пределах 0,1-0,2 МПа, расход газа 0,3-0,6 м³/ч, скорость подачи 180-500 м/ч, масса расходуемого материала 5-30 кг/ч.

Витебский государственный технологический университет

Дистанция напыления составляет 100-200 мм, скорость перемещения пятна напыления 0,2-0,3м/с. При порошковом напылении температура распыляемого материала не превышает 2200 ºС, при проволочной 2700 ºС.

Создаются распылители, обеспечивающие ускорение газопламенных потоков до сверхзвуковых и даже гиперзвуковых скоростей. В качестве материала используются мелкодисперсные порошки. Это может обеспечить получение покрытий с низкой пористостью (2-3 %), с порами малого размера (менее 10 мкм), и шероховатостью Rz 25…30 .

К недостаткам метода газопламенного напыления следует отнести: наличие в струе активных газов, взаимодействующих с напыляемыми материалами; низкие значения эффективного КПД нагрева порошковых частиц (1..15 %); невысокое качество покрытий из порошковых материалов.

6.1.4 Электродуговая металлизация

Процесс осуществляется путем плавления электрической дугой материала покрытия при одновременном его распылении газом. Наиболее широкое распространение получила двухэлектродная схема (рис. 6.4).

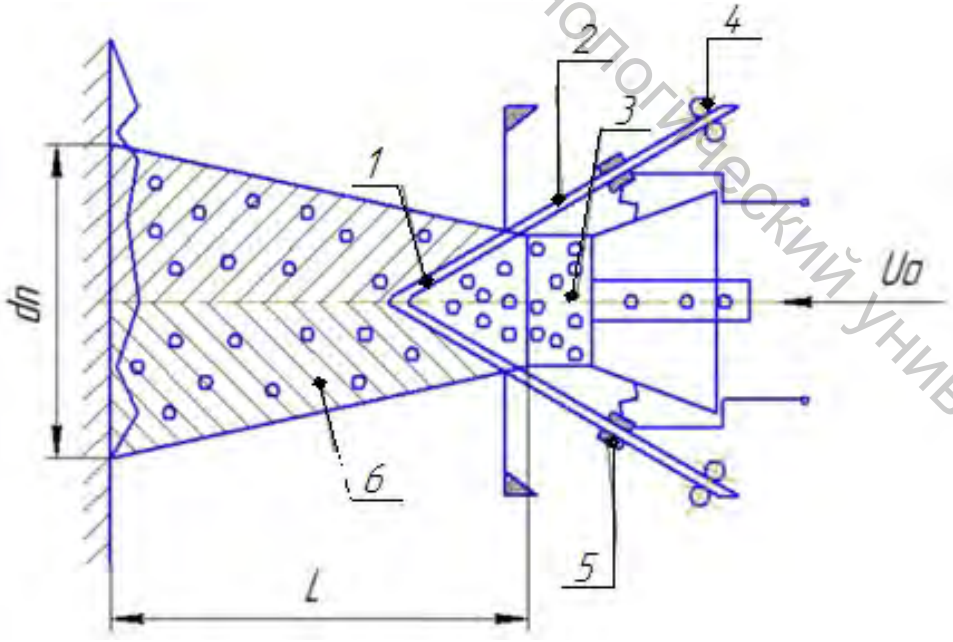


Рисунок 6.4 - Схема процесса двухэлектродной электродуговой металлизации:
1 - электрическая дуга; 2 - электроды; 3 - сопло; 4 - механизм подачи; 5 - контактные устройства; 6 - напыляемая смесь

Витебский государственный технологический университет

Распыляемый материал в виде электродной проволоки 2 диаметром 1,0-5,0 мм подается механизмом подачи 4 в зону горения дуги 1. Напряжение от источника питания подается к контактным устройствам 5. Между скрещивающимися электродами расположено сопло 3, предназначенное для создания скоростного распыляющего потока газа. Для этих целей используют сжатый газ: азот, аргон и др. Газовая струя срывает расплавленный металл с торцов проволок, диспергирует и образует поток наплавляемых частиц совместно с распыляющим газом.

На ряду с двухэлектродными применяют и трехэлектродные схемы металлизации. Электродные проволоки располагают по образующим усеченного конуса под углом 120º и используют переменный трехфазный ток.

Наибольшее влияние на процесс распыления оказывают форма и размеры сопла. В основном применяют цилиндрические сопла диаметром 3-6 мм.

Широкое применение электродуговая металлизация получила при формировании коррозионностойких покрытий различных строительных сооружений. Формируют покрытие из алюминия и цинка. В качестве износостойких покрытий применяют стали, бронзы и др.

Достоинствами метода являются: высокое значение энергетического КПД распыление, достигающее 70-90 %; высокая производительность до 50 кг/ч; возможность получения качественных покрытий с высокой адгезионной прочностью и низкой пористостью.

Недостатками метода являются: взаимодействие частиц с активной газовой фазой и насыщение напыляемого металла кислородом и азотом; ограниченное применение метода только электропроводящими материалами.

6.1.5 Вакуумное конденсационное напыление покрытий

Покрытие при вакуумном конденсационном напылении формируется потоком частиц, находящихся в атомарном, молекулярном или ионизированном состоянии. Поток частиц получают распылением материала различными способами: термическим испарением материала из твердого или расплавленного состояния; взрывным испарением-расплавлением; ионным распылением твердого материала.

Процесс вакуумного конденсационного напыления принято рассматривать, состоящим из трех стадий: переход конденсируемой фазы (твердой или жидкой) в газообразную (пар); формирование потока и перенос частиц на поверхность конденсации; конденсация паров на поверхности напыления и формирование покрытия.

Витебский государственный технологический университет

Процесс осуществляют в жестких герметичных камерах при давлении 13,3-13,3·10^{-3}Па (рис. 6.5). Наиболее высокое давления пара, достигающее 13,3 Па и более наблюдается вблизи поверхности испарения. Это и обусловливает перемещение частиц в направлении поверхности изделия, где давление паров минимально.

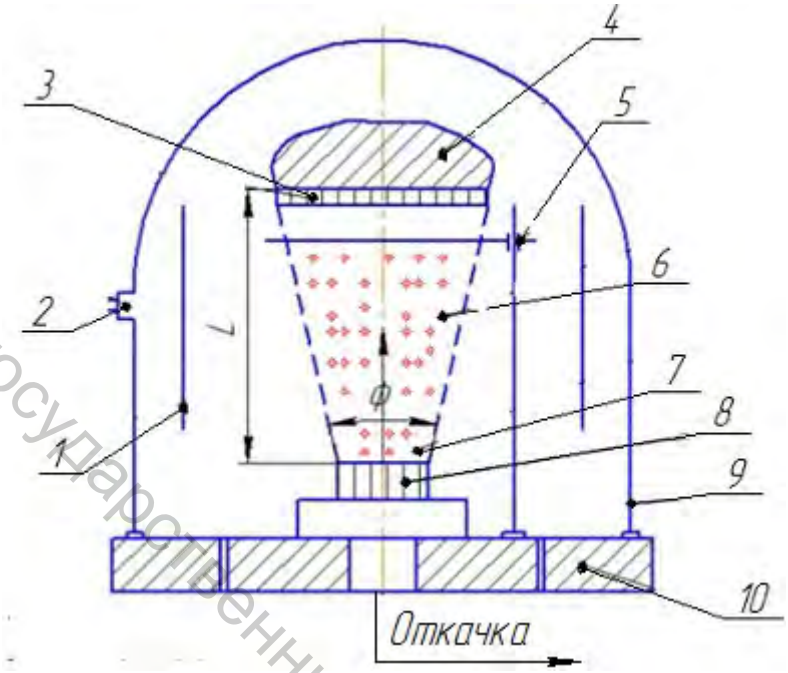


Рисунок 6.5 - Схема процесса вакуумного конденсационного напыления:
1 - экран; 2 - нагнетатель рабочего газа; 3 - покрытие; 4 - напыляемое изделие; 5 - заслонка; 6 - поток напыляемых частиц;
7 - подвод энергии распыления; 8 - распыляемый материал;
9 - вакуумная камера; 10 - базовая плита

Введение в камеру активных газов позволяет перейти к способу вакуумного реакционного нанесения покрытий. Частицы в потоке или на поверхности конденсации вступают в химическое взаимодействие с активными газами (кислородом, азотом и др.) и образуют соответствующие соединения: оксиды, нитриды и др.

Термическое испарение материала осуществляется при его нагреве выше температуры плавления. Для большинства материалов эти температуры превышают 1000-2000 ºС. Нагрев материала осуществляется в испарителе, назначение которого - удерживать расплавленный материал до достижения вакуума 1-100 Па и обеспечивать минимальные тепловые потери. Например, применение керамических тиглей снижает мощность источника теплоты по сравнению с медными водоохлаждаемыми в 4-6 раз. В то же время медные тигли позволяют испарять материалы без изменения их состава. Применение одновременно нескольких тиглей позволяет получать покрытия сложные по составу и с высокой равномерностью по толщине.

Витебский государственный технологический университет

6.1.6 Детонационно-газовые покрытия

Детонационно-газовое покрытие предполагает использование специфических источников нагрева, распыления и ускорения напыляемых частиц.

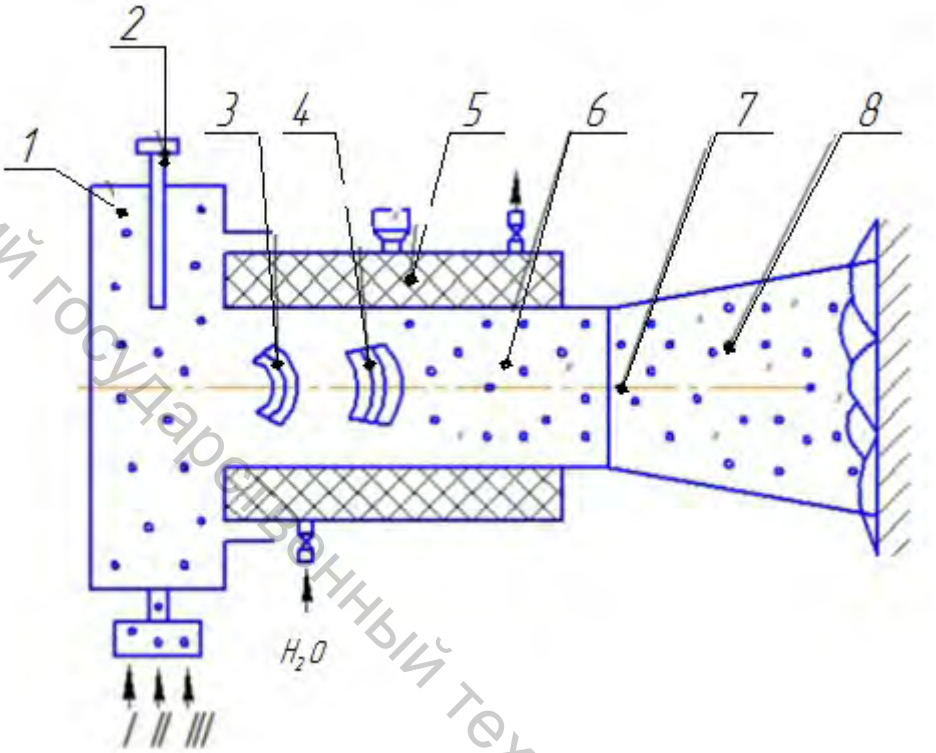


Рисунок 6.6 - Схема процесса напыления:
1 - камера зажигания, 2 - воспламенитель; 3 - ударные волны;
4 - детонационная волна; 5 - камера; 6 - горючая смесь;
7 - дульное пламя; 8 - поток напыляемых частиц

В камеру зажигания 1 подают заданное количество смеси газов, например, $C_2H_2+O_2+N_2$. При помощи мощного электрического разряда через воспламенитель 2 поджигают смесь. По объему газов распространяется пламя с увеличивающейся скоростью. Возникает ударная волна 3. Горение переходит в детонацию. С этого момента по стволу камеры 5 распространяется детонационная волна 4, представляющая комплекс ударной волны и химической реакции.

В ударной волне газ сжимается до давления нескольких десятков атмосфер, а температура повышается до нескольких тысяч градусов и становится значительно больше критической температуры, при которой смесь вступает в реакцию.

После достижения детонационной волной открытого конца ствола детонационная волна разрушается и образуется дульное пламя 7. Продукты детонации начинают истекать из ствола в виде сверхзвуковой

Витебский государственный технологический университет

струи. Температура и давление продуктов детонации в стволе уменьшается.

При истечении продукты детонации увлекают напыляемые частицы. Формируется двухфазный поток, состоящий из продуктов детонации и напыляемых частиц. Двухфазный поток неоднороден как по длине, так и по сечению ствола. Продукты детонации нагревают и ускоряют напыляемые частицы. После выхода двухфазного потока из ствола продукты детонационных покрытий резко расширяются. Их температура, скорость и плотность уменьшаются по мере удаления от ствола. Вблизи поверхности обрабатываемой детали поток газа тормозится и затем растекается вдоль преграды.

При напылении материалов однородного химического состава покрытие может формироваться из практически полностью расплавленных частиц и из смеси расплавленного и нерасплавленного материалов.

Время цикла состоит из трех составляющих: времени, необходимого для заполнения камеры ствола газовой смесью; времени взрыва и выброса продуктов детонации и порошков и времени продувки камеры и ствола. Обычно время одного цикла составляет 0,2-0,5 с. В течение одного цикла на поверхность переносится 30-40 мг распыляемого материала. При одном цикле образуется единичное пятно диаметром 20-30 мм и толщиной 10-30 мкм.

Различают установки одноствольные и многоствольные, последние обеспечивают повышение производительности. Большое влияние на эффективность процесса оказывают диаметр ствола (8-40 мм) и его длина 1200-2000 мм.

Достоинствами детонационно-газового напыления является:

- высокое качество покрытия;
- увеличение усталостной прочности, обусловленное наклепом;
- умеренный нагрев изделий при их напылении (t<300ºС);
- достаточно высокая производительность (1-10 кг/ч);
- широкая номенклатура распыляемых материалов;
- невысокая чувствительность к состоянию исходной поверхности напыления (подогрев, загрязнение, шероховатость);
- неограниченность размеров и формы изделий. Например, напылению подвергают как крупные изделия (длиной до 10 м, диаметром 2-3 м, массой до 4 т), так и мелкие (хирургический инструмент, сверла, метчики и т. п.).

В качестве недостатков следует отметить:

- затрудненность нанесения покрытий на изделия, имеющие большую поверхность и высокую твердость (HRC>60);
- затрудненность напыления покрытий из порошков с невысокой плотностью (карбиды титана и т. д.);

Витебский государственный технологический университет

- невозможность напыления внутренних поверхностей на глубину, превышающую диаметр входного отверстия;

- высокий уровень шума (140 дБ и выше);

- необходимость применения герметичных боксов и дистанционного управления процессом;

- достаточно высокая стоимость оборудования.

6.1.6.1 Применение детонационных покрытий

Сфера применения детонационных покрытий весьма велика. Номенклатура деталей с детонационными покрытиями непрерывно расширяется. Детонационный метод покрытий, вначале проверенный и успешно освоенный в авиационной и космической промышленности, нашел широкое применение в других отраслях.

Существенным доводом в пользу применения детонационных покрытий является возможность получения конструкций, обладающих малым весом в сочетании с высокой износостойкостью. Эффект усиливается тем, что технологический процесс детонационного нанесения покрытий практически не изменяет первоначальной конфигурации детали и не оказывает заметного воздействия на микроструктуру материала, вследствие локального термического воздействия. Сама деталь редко нагревается до температуры выше 200 ºС. При необходимости температуру детали снижают путем ее обдува углекислотой или воздухом. Благодаря этому можно наносить покрытие на детали, изготовленные с высокой точностью и ее сохранением.

На некоторые поверхности деталей из легкоплавких материалов (например, на внутреннюю поверхность втулки из алюминиевого сплава диаметром около 10 мм) качественно нанести покрытие можно только детонационным методом, поскольку другие газотермические методы требуют расположения деталей в зоне интенсивного нагрева.

Наибольшее распространение детонационные покрытия нашли в области повышения ресурса работы лопаток турбин авиационных двигателей, компрессоров и т. д.

Детонационные покрытия способствуют внедрению более легких сплавов в конструкции двигателей и узлов самолетов. Например, покрытие на основе карбида вольфрама позволило успешно применить титановые лопатки в турбореактивных двигателях. Применение рычагов из алюминиевых сплавов с изнашиваемыми поверхностями, покрытыми твердыми сплавами, позволили снизить общий вес самолета.

В машиностроении основной задачей применения детонационных покрытий является уменьшение износа трущихся

Витебский государственный технологический университет

сопряженных деталей различного назначения. Возрастающие скоростные, тепловые и силовые нагрузки требуют от материалов движущихся частей машин сочетания весьма противоречивых свойств: малой массы и высокой прочности, жаростойкости и жаропрочности, износостойкости, низкого коэффициента трения и т. п. Опыт использования детонационных покрытий на основе окиси алюминия показал, что они имеют высокую износостойкость в широком диапазоне нагрузок и скоростей трения в сочетании с различными материалами. Сравнительные испытания подшипников скольжения, рабочая поверхность которых была покрыта износостойким покрытием и работающих в коррозионной среде, показали увеличение срока службы в 30 раз.

Использование детонационных покрытий для инструмента позволяет решить задачу оптимального сочетания жесткости и износостойкости. Обладая высокой твердостью и прочностью сцепления с основой, нанесенные покрытия из твердого сплава и окиси алюминия позволят получать качественные кромки у режущих инструментов различного назначения.

Так, срок службы режущих лезвий, применяемых для резки пластмасс, резины, бумаги и покрытых слоем твердого сплава на основе карбида вольфрама толщиной 0,05 мм, повышается от 3 до 12 раз.

Детонационные покрытия из твердого сплава, нанесенные на поверхность вставок из углеродистых сталей, используемых в качестве зубьев пилы при резке картона, асбестовой ткани и подобных материалов увеличивают срок службы в 50 раз.

Детонационные покрытия на ножах для резки стекловолокна увеличивают срок их службы от 10 до 20 раз.

Трубчатые сверла с покрытием на основе карбида вольфрама, предназначенные для прошивки отверстий с помощью ультразвука, прослужили в 50 раз дольше обычных инструментов.

При волочении проволоки через фильеры, покрытые окисью хрома, стойкость повысилась в 3-7 раз.

Пуансоны с детонационными покрытиями по сравнению с хромированными стальными обладают от 10 до 20 раз большим сроком службы.

Витебский государственный технологический университет

6.2 Полимерные покрытия
6.2.1 Материалы покрытия

Для защиты металлов от коррозии широкое применение находят полимерные покрытия. Они не только защищают металл от коррозионных и прочих химических воздействий, но и придают изделию отличные электроизоляционные, декоративные, антисептические и другие свойства. По сравнению с лакокрасочным и эмалевым полимерные покрытия имеют ряд преимуществ. Они более прочны, эластичны, лучше связаны с металлом; в процессе эксплуатации стираются и растрескиваются значительно меньше, чем эмали.

Металлопласты состоят из основы, металлической подложки и полимерного покрытия. Материалами основы чаще всего являются стальные или алюминиевые листы, придающие металлопластом необходимую прочность и жесткость. Достоинство стальных листов - высокая прочность и незначительный по сравнению с алюминием коэффициент температурного расширения. По сравнению со стальными алюминиевые листы имеют незначительную массу и более гладкую поверхность, более высокую стойкость в кислой среде и промышленной атмосфере.

В качестве металлической подложки в металлопластах используется цинковое покрытие, получаемое методом погружения в расплавленный металл или электрогальванизацией. Толщина электролитического цинка редко превышает 8-10 мкм. Особенно важна оцинковка на торцах и около отверстий, где полимерные покрытия могут отсутствовать.

К полимерным покрытиям предъявляются чрезвычайно высокие требования. Пластик должен быть стоек к истиранию, ударным нагрузкам, действию химических реагентов, температурным и климатическим условиям эксплуатации. Последнее требование является очень важным, поскольку все полимерные материалы в большей или меньшей мере подвержены атмосферному старению. При старении значительно ухудшаются диэлектрические свойства полимера, изменяется естественная окраска и снижается устойчивость к действию различных химических реагентов.

Кроме вида полимера, используемого при изготовлении металлопласта, очень важным является выбор типа (состояния) материала, изготовленного для нанесения на металл. Применяются четыре типа: пластизоль, органозоль, готовая пленка, порошок.

Пластизоль - это свободная или почти свободная от растворителей смола, дисперсированная в веществах, называемых пластификаторами. Пластизоль имеет пастообразный вид и применяется

Витебский государственный технологический университет

для нанесения толстых (свыше 80 мкм) покрытий. Наличие пластификаторов придает поверхности из пластизолевого покрытия относительную мягкость.

В органозоле количество пластификаторов меньше, а растворителя больше. Толщина покрытия органозолем составляет 30-50 мкм. Поверхность покрытия в этом случае тверже, чем при нанесении пластизоля.

Покрытие пленкой имеет ограниченное применение. Оно используется для изделий, эксплуатирующихся преимущественно внутри помещений, с целью улучшения декоративных свойств. Толщина пленки составляет 50-500 мкм.

Порошкообразные вещества, используемые для покрытий, относятся к системе покрытий без растворителя. Достоинством этого вида покрытия является полноценное использование материала и возможность доведения толщины покрытий до 150 мкм при отсутствии пористых участков и трещин.

Наиболее широко распространен в качестве покрытия для металлов поливинилхлорид (ПВХ). Он обладает рядом ценных качеств. Поливинилхлоридное покрытие позволяет получать толщины широкого диапазона и цветовой гаммы. Оно стойко к кислотам, щелочам, растворителям, имеет хорошие диэлектрические свойства, довольно высокую прочность и эластичность. Недостатком ПВХ является низкая теплостойкость. Максимальная температура длительной эксплуатации +80 ºС, кратковременная +100 ºС. Применяются три основных типа виниловых покрытий: органозоли, пластозоли и пленки.

Применение органозолей и пластозолей обусловлено их высокими физико-механическими свойствами, атмосферостойкостью, химической стойкостью и хорошей антикоррозионной защитой. Большим достоинством этих материалов является высокое содержание сухого вещества (в пластиках 95-100 %, в органозолях до 60 %), что позволяет при нанесении одного-двух слоев материала получать покрытия толщиной 60-300 мкм и более (пластизоли) и 50-80 (органозоли).

Пленочный ПВХ - это пластифицированная поливинилхлоридная смола с добавлением стабилизаторов, наполнителей и пигментов. Молекулы пластификатора, распределяясь между молекулами полимера, уменьшают силы сцепления в пленке (отсюда снижается прочность пленки) и придают молекулам полимера большую свободу передвижения. При этом повышается эластичность пленки.

Кроме пленок ПВХ в качестве покрытий применяются полиэтиленовые пленки. У них высокое сопротивление большинству агрессивных сред и их паров, растворителей, масел и т. п. Полиэтилен

Витебский государственный технологический университет

незначительно адсорбирует влагу, в него почти не проникают водяные пары (примерно в 10 раз меньше, чем в поливинилхлоридные пленки). Диэлектрические свойства также намного превосходят показатели поливинилхлорида. Полиэтиленовая пленка практически не горит, а при высоких температурах только плавится.

6.2.2 Способы нанесения полимерных покрытий

Разработаны и реализованы следующие основные технологические принципы получения металлопластов:

- нанесение на металлическую основу пластизолей и пластифицированных органозолей;
- плакирование полимерной пленкой металла, предварительно покрытого адгезионным подслоем;
- плакирование металла полимерной пленкой, в состав которой входят компоненты, обеспечивающие прочную и долговечную связь покрытия с подложкой;
- нанесение на металлическую основу пластизолей и пластифицированных органозолей;

Технологическая схема процесса покрытия листовой стали и алюминия включает следующие основные группы операций:

- подготовка поверхности полосы;
- нанесение, полимерных покрытий и отделку поверхности покрытия.

Для нанесения покрытий типа пластизолей и органозолей применяются валковые машины (рис. 6.7). Наносимый материал, находящийся в желобе между двумя дозирующими валками 3, 4, захватывается и передается непосредственно на формообразующий валок 2. Зазор между дозирующим валком и формообразующим определяет толщину слоя покрытия металлической ленты 1.

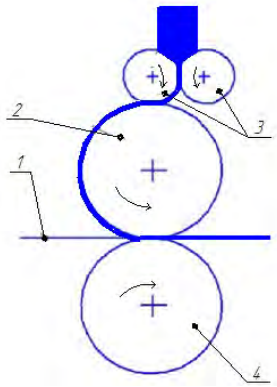


Рисунок 6.7 - Схема валковой машины для нанесения покрытий:
1 - металлическая лента; 2 - наносящий валок;

Витебский государственный технологический университет

3 - дозирующие валки; 4 - опорный валок

Валковые машины обеспечивают высокую скорость процесса нанесения покрытия (до 90 м/мин) и применяются для непрерывной обработки лент и рулонов. Эти машины включают несколько валковых агрегатов; позволяют без остановки всей машины переходить на формование покрытий другого типа, разных толщин, а также покрывать обе стороны металла. Валковые машины обычно размещают в отдельных изолированных боксах, где создается повышенное давление воздуха (0,7 МПа).

После нанесения на полосу пластизоля она поступает в сушильные печи, где происходит удаление растворителя. Время сушки в зависимости от материала и толщины покрытия, скорости движения ленты составляет 0,5 до 2 мин.

Плакирование металла полимерной пленкой осуществляется по следующей технологической схеме: подача (сматывание с рулона) металла, подготовка поверхности металла, нанесение подслоя (грунта) с одной или обеих сторон, нанесение основного (отделочного) слоя покрытия, сушка, сматывание в рулоны.

Предварительная подготовка поверхности может включать щеточную обработку, химическое или электролитическое обезжиривание, травление, промывку.

Однако предварительная обработка металлических поверхностей может быть недостаточна для надежного сцепления термопластов. Необходимо еще нанесение слоя грунта, в качестве которого применяются сополимеры термопластичных и термореактивных смол. Термореактивная часть сополимера хорошо сцепляется с металлом, а термопластичная перемещается по поверхности и хорошо совмещается с наносимым термореактивным покрытием. Толщина грунтового слоя зависит от состава и может изменяться от 50 мкм до 0,3 мм. Схема установки для нанесения покрытия представлена на рисунке 6.8.

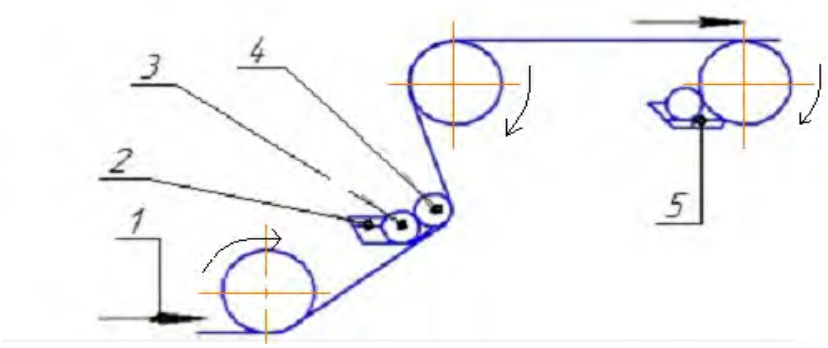


Рисунок 6.8 – Схема установки для нанесения покрытия:
1 - покрывающий валок; 2 - емкость с грунтом;

Витебский государственный технологический университет

3 -вспомогательный валок; 4 - натяжной валок; 5 - устройство для нанесения покрытия на нижнюю сторону полосы

Металл после грунтовки имеет температуру 160 ºС, пленка при этом тоже может быть нагрета до 40-50 ºС. Накладывается пленка двумя валками, покрытыми резиной (рис. 6.9). Скорость наложения может быть от 6 до 30 м/мин.

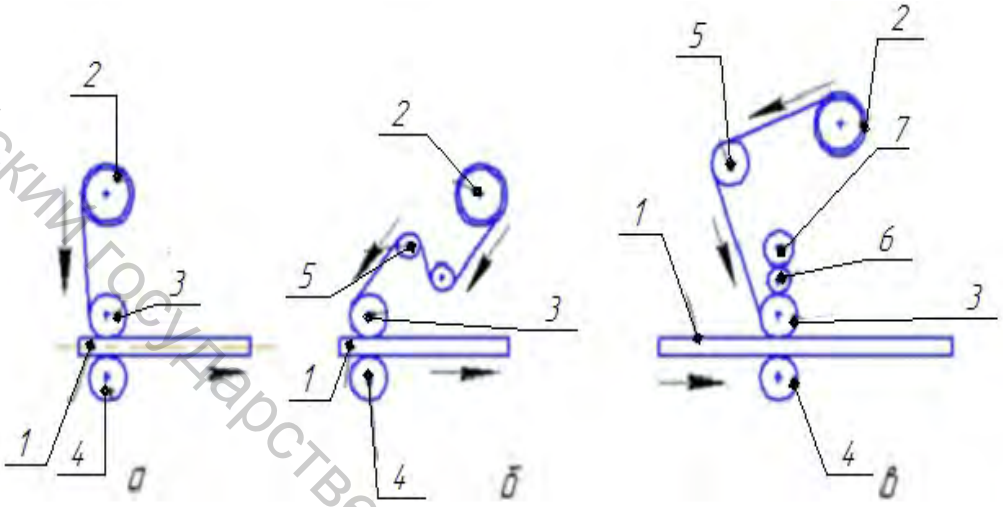


Рисунок 6.9 - Схемы расположения валков для покрытия металлической ленты полимерными пленками:
а - без натяжных роликов; б- с натяжными роликами; в - с натяжным и нижним опорным роликом;
1- лента; 2 - разматыватель с рулоном пленки; 3 - накатывающий валок; 4 - опорный валок; 5 - натяжной ролик; 6 -промежуточный ролик; 7 - верхний опорный валок

Нанесение порошковых полимеров на поверхность металлических материалов может осуществляться различными способами, основным из которых является электростатический.

Сущность электростатического способа напыления состоит в том, что заряженные частицы полимера под воздействием сил электрического поля движутся к изделию и осаждаются на его поверхности. Между напыляемым изделием и распылителем создается поле высокого напряжения, в котором частицы полимера электризуются.

Заряженные частицы образуют облако, которое осаждается на поверхности изделия. В зависимости от величины напряжения и давления воздуха частицы имеет различную степень проникновения в углубления изделия и разную рассеивающую способность. Порошок не осевший на изделие улавливается регенерирующим устройством и вновь используется.

Способом электростатического напыления наносят порошковые полимеры, лаки, эмульсии, смолы, фторопласт и др. На рисунке 6.10

Витебский государственный технологический университет

приведена схема установки для напыления полиэтилена на поверхность стальной ленты.

Первой стадией процесса является подготовка поверхности ленты, заключающаяся в промывке и травлении. После этого лента поступает в камеру предварительного индукционного нагрева. Нагретая лента подается в ионизационную камеру, в которой специальные распылители наносят порошок на непрерывную движущуюся ленту. Далее полоса поступает на оплавление в горизонтально расположенные индукторы, на выходе из которых охлаждается воздушными форсунками и наматывается в рулон.

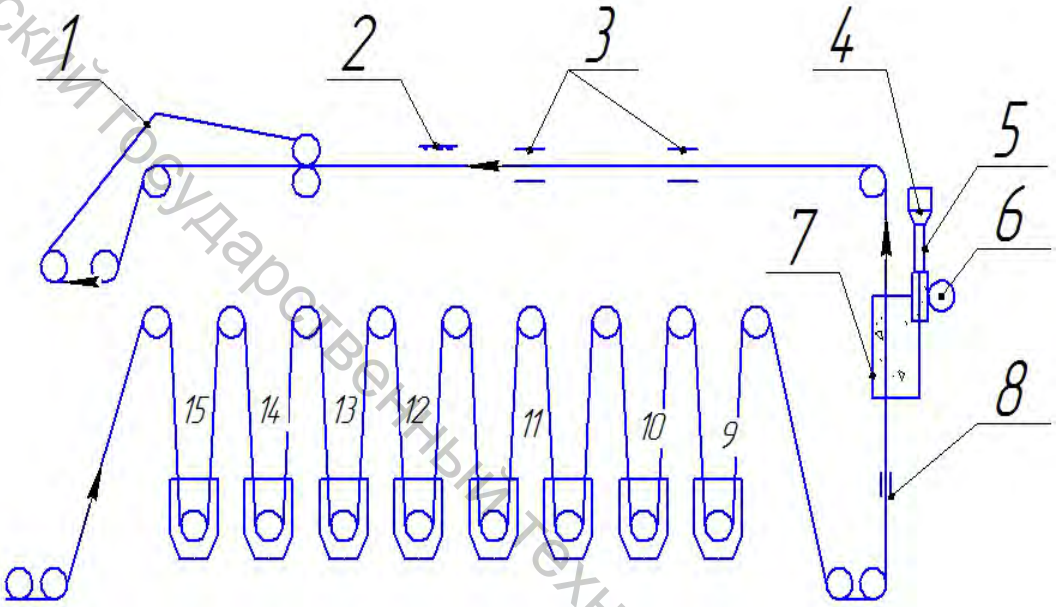


Рисунок 6.10 - Схема установки для получения полимерных покрытий электростатическим напылением:
1 - система наматывания полосы в рулон; 2 - воздушные форсунки; 3, 8 - индукторы; 4 - бункер; 5 - дозатор; 6 - распылитель; 7 - ионизационная камера; 9,14 - ванны промывки горячей водой; 10,12 - ванны струйной промывки; 11 - ванны хромирования; 13 - ванна травления; 15 - ванна обезжиривания

Применение полимерных покрытий

Широкое использование листового проката с полимерными покрытиями связано с его высокими антикорризионными свойствами в разнообразных условиях и широкой цветовой гаммы. Возможность переработки листов с полимерными покрытиями: применение гибки, профилирование, штамповка и др.

В зависимости от предполагаемой области применения могут быть усилены те или иные свойства: погодостойкость, химическая стойкость, стойкость к истиранию.

Листы из профилированного штампованного материала могут служить облицовкой или же входить в состав трехслойных панелей.

Витебский государственный технологический университет

В авиа-, вагоно- и судостроении металлопласт используется для внутренней обшивки, отделки, изготовления перегородок.

Металлопласт нашел применение для изготовления кожухов бытовых приборов, холодильников, стиральных машин, торгового оборудования.

Полимерные покрытия с проводящим слоем нашли широкое применение в электро- и электронной промышленности при производстве печатных схем конденсатора.

Витебский государственный технологический университет

Рекомендуемая литература

К главе 1

1. ГОСТ 15093-90. Лазеры и устройства управления лазерным излучением.
2. Коваленко, В.С. Справочник по технологии лазерной обработки / В.С. Коваленко. – Киев. «Техника», 1985. - 316 с.
3. Коваленко, В.С. Технология и оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки / В.С. Коваленко. – Киев : «Вища школа», 1983. -165 с.
4. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 211 с.
5. Астапчик, С.А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С.А. Астапчик. – Минск. «Белорусская наука», 2008. - 190 с.
6. Коваленко, В.С. Лазерная технология : учебник / В.С. Коваленко. – Киев. Высшая школа. Головное издательство, 1989. - 201 с.
7. Промышленные применения лазеров / под ред. Г. Кеблера; пер. анг. – Москва,1989. - 232 с.
8. Веденов, А.А. Физические процессы при лазерной обработке материалов / А.А. Веденов. – Москва : Энергомаш, 1985. - 190 с.
9. Волков, Ю.С. Электрофизические и электрохимические процессы обработки материалов / Ю.С. Волков. – Москва : Изд-во МГОУ, 2005. - 321 с.
10. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / под ред. В.А. Волосатова. – Ленинград : Машиностроение, 1988. - 540 с.
11. Паркин, А.А. Технология обработки концентрированными потоками энергии / А.А. Паркин. – Самара. Изд. СГТУ, 2005. - 311 с.
12. Клебанов, Ю.Д. Физические основы применения концентрированных потоков энергии в технологиях обработки материалов / Ю.Д. Клебанов. – Москва : НЦ МГТУ «Станкин» Янус-К, 2005. - 203 с.
13. Электроэрозионная обработка материалов / М.К. Мицкевич и др; под ред. И.Г. Некрашевича. – Минск : наука и техника. 1988. - 289 с.
14. Фотеев, Н.К. Технология электроэрозионной обработки / Н.К. Фотеев. – Москва : Машиностроение, 1980. - 321 с.
15. Золотых, Б.Н. Методы расчета технологических параметров электроэрозионной обработки. М.: Изд-во МГИЭМ.1999. - 303 с.
16. Елисеев, Ю.С. Электроэрозионная обработка деталей машин / Ю.С. Елисеев. – СПб.: Политехника, 2009. - 202 с.
17. Шиляев, А.С. Ультразвук в науке, технике и технологии / А.С. Шиляев. – Гомель : ГТУ, 2007. - 129 с.

Витебский государственный технологический университет

18. Физические основы, технологические процессы и оборудование ультразвуковой обработки материалов / Б.М. Бржозовский и др. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2006. - 453 с.

19. Приходько, В.И. Ультразвуковые технологии при производстве и ремонте техники / В.И. Приходько. – Москва : Техполиграфцентр, 2000. - 321 с.

20. Серебреницкий, П.П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование / П.П. Серебреницкий. – Санкт-Петербург : Лань, 2013. - 310 с.

К главе 2

1. Глазков, В.И. Совершенствование формообразующих операций листовой штамповки. / В.И. Глазков, М.Ф. Каширин – Москва : Машиностроение,1990. - 343 с.

2. Ильин, Л.Н. Технология листовой штамповки / И.Е. Семёнов. –Москва : Дрофа, 2009. - 231 с.

3. Ковалёв, В.Г. Технология листовой штамповки / С.В. Ковалёв. – Москва : 2010. - 198 с.

4. Береснев, Б.И. Физические основы и практическое применение гидроэкструзии / Б.И. Береснев [и др.] – Москва : Наука, 1981. - 130 с.

5. Богоявленский, К.Н. Гидропластическая обработка металлов / К.Н. Богоявленский, В.А. Вагин. – Ленинград : Машиностроение,1988. - 297 с.

6. Гордеенко, А.И. Структурные и фазовые превращения в титановых сплавах при быстром нагреве / А.И. Гордеенко. – Минск : Наука и техника, 1983. - 456 с.

7. Фиглин, С.З. Изотермическое деформирование металлов / В.В. Бойцов и др. – Москва : Машиностроение, 1978. - 421 с.

8. Новиков, И.И. Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном / И.И. Новиков, В.К. Портной. – Москва : Металлургия, 1981.

9. Новикова, И.И. Сверхпластическая формовка конструкционных материалов / пер. с англ.; под ред. О.И. Смирнова. – Москва : Металлургия, 1985. - 360 с.

10. Смирнов, О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности / О.М/ Смирнов. – Москва : Машиностроение, 1979. - 235 с.

11. Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы. Материалы международной конференции. – Витебск. 2014. - 32 с.

12. Хагин, В.Н. Никелид титана / В.Н. Хагин, В.Г. Пушин, В.В. Кондратьев. – Москва : Наука, 1992. - 120 с.

Витебский государственный технологический университет

13. Журавлёв, В.Н. Сплавы с термомеханической памятью и их применение в медицине / В.Н. Журавлёв, В.Г. Пушин. – Екатеринбург : УрО РАН, 2000. - 230 с.

14. Гюнтер, В.Э. Эффекты памяти формы и их применение в медицине / В.Э. Гюнтер, В.И. Итин. – Новосибирск : Наука, 1992. - 432 с.

15. Ильин, А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах / А.А. Ильин – Москва : Наука, 1994. - 267 с.

16. Корнилов, И.И. Никелид титана и другие сплавы с эффектом памяти / И.И. Корнилов, О.К. Белоусов. – М.; Наука, 1977. - 209 с.

17. Материалы с эффектом памяти формы. (Справочное издание) : в 2 т. / под ред. В.А. Лихачева. – Санкт-Петербург, 1997. - 160 с.

18. Хинджуа, А.Г. Эффект памяти формы и сверхупругость / А.Г. Хинджуа. – Москва : МГУ, 2010. - 234 с.

19. Солицев, Ю. П. Специальные материалы в машиностроении. / Е. И. Пряхин, В. Ю. Пирайнен. – Санкт-Петербург : Химиздат, 2004. - 431 с.

20. Сидельников, С.Б. Комбинированные и совмещённые методы обработки цветных металлов и сплавов / С.Б. Сидельщиков, Н.Н. Довженко. – Москва : МаксПресс, 2005. - 245 с.

21. Сергеев, В.М. Непрерывное листовое литьё-прессования цветных металлов / В.М. Сергеев и др. – Москва : Металлургия, 1990. - 213 с.

К главе 3

1. Гини, Э.Ч. Специальные технологии литья : учебник / Э.Ч. Гини, А.М. Зарубин. – Москва : МГТУ, 2010. - 320 с.

2. Марукович, Е.И. Литейные сплавы и технологии. Е.И. Марукович, М.И. Карненко. – Минск : «Беларуская навука», 2012. - 431 с.

3. Богодухов, С.И. Основы проектирования заготовок в автоматизированном производстве : учебное пособие / С.И. Богодухов и др. – Москва : Машиностроение, 2009. - 211 с.

4. Машиностроение. Энциклопедия. Раздел III. Том III-2. Технологии заготовительных производств. – Москва : Машиностроение, 1996. - 346 с.

5. Клименков, С.С. Проектирование и производство заготовок в машиностроении : учебник / С.С. Клименков. – Минск : Технoперспектива, 2008. - 320 с.

6. Кобелев, А.Г.. Производство слоистых композиционных материалов / А.Г. Кобелев и др. – Москва : Интермет Инжиниринг, 2002. - 300 с.

7. Степанов, Ю.А. Технология литейного производства : учебник / Ю.А. Степанов и др. – Москва : Машиностроение, 1983. - 290 с.

Витебский государственный технологический университет

8. Специальные способы литья : справочник / под общ. ред. В.А. Ефимова. – Москва : Машиностроение, 1991. - 310 с.

9. Цветное литье : справочник / под общ. ред. Н.М. Галдина. – Москва : Машиностроение, 1989. - 430 с.

К главе 4

1. Фролов, В.А. Технологические основы сварки и пайки в авиастроении : учебник для вузов / В.А. Фролов и др. – Москва : Интермет Инжиниринг, 2002. - 234 с.

2. Козловский, С.Н. Основы теории и технологии контактной точечной сварки / С.Н. Козловский. – Красноярск : СГАУ, 2006. - 250 с.

3. Люшинский, А.В. Современные технологии сварки : учебное пособие / А.В. Люшинский. – Москва : «Интеллект», 2013. - 212 с.

4. Сварка в самолетостроении : учеб. пособие / В.А. Саликов, М.Н. Шушпанов и др.; под общ. ред. В.В. Пешкова. – Воронеж : Изд-во ВГТУ, 2001. - 210 с.

5. Технологические основы сварки и пайки в авиастроении / В.А. Фролов и др.; под ред. Фролова В.А. – Москва : Интермет Инжиниринг, 2004. - 276 с.

6. Селиванов, В.В. Взрывные технологии / В.В. Селиванов. – Москва : Изд-во МГТУ, 2014. - 299 с.

7. Сварка и свариваемые материалы : справочник. В 3 т. – Москва : Изд-во МГТУ, 1998. - 476 с.

8. Сварка в машиностроении : справочник. В 4 т. – Москва : Машиностроение, 1979. - 567 с.

9. Сварка трением : справочник / под общ. ред. В. К. Лебедева. – Ленинград : Машиностроение. - 430 с.

10. Казаков, Н.Ф. Диффузионная сварка материалов : справочник / Н.Ф. Казаков. – Москва : Машиностроение, 1981. - 580 с.

К главе 5

1. Моргунов, Ю.А. Наукоемкие технологии машиностроительного производства : учебное пособие / Ю.А. Моргунов и др. – Москва : Форум 2013.- 240 с.

2. Никифоров, И.П. Современные тенденции шлифования и абразивной обработки : монография / И.П. Никифоров. – Старый оскол : ТНТ, 2012. - 311 с.

3. Ермаков, Ю.М. Комплексные способы эффективной обработки резанием : Библиотека технолога – Москва : Машиностроение, 2003. - 167 с.

4. Никофоров, А.Д. Высокие технологии размерной обработки в машиностроении : учебник для вузов / А.Д. Никифоров и др. – Москва : Высшая школа, 2007. - 345 с.

Витебский государственный технологический университет

5. Боровский, Г.В. Развитие машиностроения России на основе технологического перевооружения / Г.В. Боровский. – Москва : «ИТО», 2009. - 222 с.

6. Бржозовский, Б.М. Прогрессивные направления повышения эффективности использования металлорежущего инструмента : монография / Б.М. Бржозовский и др. – Старый Оскол, 2014. - 368 с.

7. Кожуро, Л.М. Обработка деталей машин в магнитном поле : монография / Л.М. Кожура, Б.П. Чемисов. – Мінск : Навука и тэхніка, 1995. - 300 с.

8. Кирсанов, С.В. Инструменты для обработки точных отверстий / С.В. Кирсанов и др. – Москва : Машиностроение, 2003. - 230 с.

9. Никифоров, И.П. Современные тенденции шлифования и абразивной обработки : монография / И.П. Никифоров. – Старый Оскол. ТНТ, 2012. - 230 с.

10. Абразивное изнашивание / Виноградов В.Н. [и др.] – Москва : Машиностроение, 1990. – 224 с.

11. Шманев, В.А. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД / В.А. Шманев. – Москва : Машиностроение, 1995. - 190 с.

12. Непомнящий Е.Ф. Трение и износ под воздействием струи твердых сферических частиц / Е. Ф. Непомнящий // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. – Москва : Наука, 1971. – С.190–200.

13. Виноградов, В.Н., Сорокин Г.М., Албагаичев А.Ю. Изнашивание при ударе / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, А.Ю. Албагаичев. – Москва : Машиностроение, 1982. –192 с.

14. Кошелев, А. А. Технология и оборудование для автоматизированной гидроабразивной обработки деталей // Автоматизация технологических процессов в области машиностроения для животноводства и кормопроизводства. – Ростов-на-Дону : НИИТМ, 1981. С. 37–47.

15. Мартынов, А. И. Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотнённым инерционными силами / А.И. Мартынов. – Саратов : Издательство Саратовского ун-та, 1981. – 212 с.

16. Проволоцкий, А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин / А.Е. Проволоцкий. – К.: Техника, 1989. – 177 с.

17. Шманёв, В.А., Мещеряков, А.В., Второв, Е.А. Особенности формирования поверхностного слоя при струйной гидроабразивной обработке лопаток ГТД // Сб. научных трудов «Поверхностный слой, точность и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов». – Москва : МДНТП, 1986. – С. 12–15.

18. Шманев, В.А. Применение щелевых сопел при струйной гидроабразивной обработке титановых и жаропрочных сплавов // Повышение стойкости инструмента, оснастки и приспособлений за счёт широкого внедрения прогрессивных методов изготовления и

Витебский государственный технологический университет

последующего нанесения покрытий. Методы и приборы контроля : техн. докл. областной научно-техн. конф. Куйбышева, 1987. – С. 13–14.

К главе 6

1. Ильин, А.А. Покрытия различного назначения для металлических материалов : учебное пособие / А.А. Ильин и др. – Москва : Альфо-М: Инфра-М, 2013. - 270 с.

2. Терхунов, А.Г. Комбинированные металлополимерные покрытия и материалы / А.Г. Терхунов, М.И. Черновол и др.– К. : Техника, 1983. -340 с.

3. Дорожкин, Н.Н. Импульсные методы нанесения порошковых покрытий / Н.Н. Дорожкин и др. – Минск : « Наука и техника», 1985. - 230 с.

4. Бортенев, С.С. Детонационные покрытия в машиностроении / Бортенев С.С и др. – Л.: Машиностроение, 1982. - 255 с.

5. Композиционные материалы : справочник / под ред. Д.М. Корпиноса. – Киев : Навукова думка, 1985. - 567 с.

6. Справочник по композиционных материалов / под ред. Дж. Любина; перевод с англ. – Москва : Машиностроение, 1988. - 480 с.

7. Ярошевич, В.К. Антифрикционные покрытия из металлических порошков / В.К. Ярошевич, М.А. Белоцерковский. – Минск : Наука и техника, 1981.- 346 с.

8. Чеботаревский, В.В. Технология лакокрасочных покрытий в машиностроении / В.В. Чеботаревский, Э.К. Кондрашов. – Москва : Машиностроение, 1978. - 390 с.

9. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология, оборудование / Г.В. Бобров. – Москва : Металлургия, 1992. - 235 с.

Витебский государственный технологический университет

Учебное издание

Клименков Степан Степанович

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ И ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Учебник

Редактор *Н.В. Медведева*
Компьютерная верстка *О.В. Романова*

Подписано к печати 20.07.17. Формат 60x90 $^{1}/_{16}$. Усл. печ. листов 19.5.
Уч.-изд. листов 22.1. Тираж 30 экз. Заказ № 234.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет» 210035, г. Витебск, Московский пр., 72.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.

Витебский государственный технологический университет