

Федеральное агентство по образованию  
Ульяновский государственный технический университет

**В. Н. Кокорин, Ю. А. Титов,  
В. Н. Таловеров, Л. В. Федорова**

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ  
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ  
(РАЗДЕЛ 1: ОБЩАЯ ЧАСТЬ)**

**Учебное пособие**  
для студентов специальности 150201

Ульяновск 2006

УДК 621.7 (075)

ББК 34.62 я7

К 59

Рецензенты: зам. генерального директора ФГУП «Ульяновский НИИТ» Марковцев В. А., главный инженер ПСП ОАО «УАЗ» Шашкин А. Н.

Утверждено редакционно-издательским советом Ульяновского государственного технического университета в качестве учебного пособия.

**К 59 Кокорин, В.Н.**

Специальные способы обработки металлов давлением: учебное пособие / В. Н. Кокорин, Ю. А. Титов, В. Н. Таловеров, Л. В. Федорова. — Ульяновск: УлГТУ, 2006. — 36 с.

ISBN 5 – 8914 6 – 700 – 0

Рассмотрены вопросы интенсификации процессов обработки металлов давлением. Предназначено для студентов специальности 150201, изучающих курс «Специальные способы обработки металлов давлением». Приведены специальные способы обработки листовых и объемных деталей с использованием прокатки, раскатки, раздачи, накатки, навивки, изготовления деталей с использованием явления сверхпластичности, штамповки поковок из жидкого металла.

**УДК 621.7 (075)**  
**ББК 34.62 я7**

© В. Н. Кокорин, Ю. А. Титов,  
В. Н. Таловеров, Л. В. Федорова, 2006  
© Оформление. УлГТУ, 2006

ISBN 5 – 8914 6 – 700 – 0

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Прокатка	4
1.1. Продольно-периодическая прокатка (ППП)	4
1.2. Поперечная, поперечно-клиновья, поперечно-винтовая прокатка	5
1.3. Дефекты поперечной прокатки	8
2. Раскатка кольцевых заготовок (радиальная)	9
3. Раздача	10
4. Безотходная штамповка листовых деталей деформирующимся металлом	11
5. Лазерная технология	11
6. Штамповка поковок из жидкого металла	13
7. Штамповка точных поковок из жидкого металла	14
8. Объемная изометрическая штамповка	16
9. Штамповка с использованием сверхпластичности	16
9.1. Область применения сверхпластичности при штамповке	17
9.2. Технологические процессы штамповки металлов в состоянии сверхпластичности	18
9.3. Схема процесса штамповки с использованием сверхтекучести	18
10. Накатка зубчатых профилей	21
11. Накатка резьб и профилей	22
12. Холодная торцовая раскатка деталей	23
13. Навивка пружин и гибка проволоки на автоматах	24
14. Изготовление заготовок и деталей из порошковых материалов	25
15. Магнитноимпульсная штамповка (ИМП)	29
16. Электрогидравлическая штамповка (ЭГШ)	29
17. Высокоскоростные методы штамповки	32
18. Контрольные вопросы	35
Заключение	35
Библиографический список	36

## ВВЕДЕНИЕ

Наряду с совершенствованием традиционной технологии обработки металлов давлением (ОМД) на базе автоматизации производства осуществляется поиск, развитие и совершенствование новых методов обработки.

Применение отдельных новых методов в ОМД в массовом производстве экономически нецелесообразно. Однако в условиях мелкосерийного и единичного производства, когда традиционные методы ОМД оказываются нецелесообразными, доля затрат на технологическую оснастку в структуре себестоимости и капитальных вложений имеет максимальное значение и достигает 80...95%, применение специальных методов ОМД наиболее эффективно: это штамповка полиуретаном, электроимпульсная штамповка, электромагнитная, магнитно-эластоимпульсная, взрывная, гидро- и газодинамическая и др.

Рассмотрим следующие специальные методы ОМД, имеющие наибольший удельный вес в промышленности:

1. Прокатка. 2. Раскатка. 3. Сферодвижная штамповка. 4. Накатка зубчатых профилей. 5. Штамповка на горячештамповочных автоматах. 6. Штамповка на высокоскоростных молотах. 7. Электровысадка. 8. Электрогидроимпульсная штамповка (ЭГИШ). 9. Гидроштамповка. 10. Штамповка жидкого металла. 11. Штамповка с использованием сверхпластичности. 12. Штамповка пористых металлов и др.

## 1. ПРОКАТКА

### 1.1. Продольно-периодическая прокатка (ППП)

ППП выполняют в двух- (а), трех- (б), четырех- (в) вальцевых станах, а также в стан-прессе (г) (рис. 1).

Периодические профили подразделяют на следующие типы:

- 1 – с периодичностью профиля лишь со стороны одного вала;
- 2 – с периодичностью профиля со стороны двух (или нескольких валков).

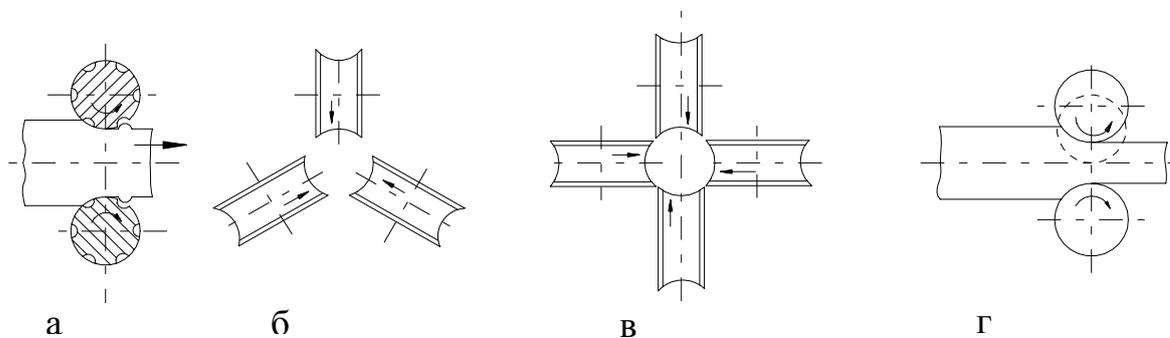


Рис. 1. Схемы станов ППП

а – двухвалковая; б – трехвалковая; в – четырехвалковая ; г – стан-пресс

*Первый тип:* калибр одного имеет переменный профиль, а на втором (или остальных) нарезается ручей постоянного сечения.

*Второй тип:* оба валка (или все валки) имеют переменный профиль ручьев; однако по углу поворота относительно друг друга валки могут быть устанавливаться произвольно, точного совпадения фигур не требуется.

Профили первого и второго видов можно прокатывать на сортовых прокатных станах или вальцах. Периодические профили с плавными переходами можно прокатывать на стане-прессе (рис. 1 г), имеющем гладкие валки постоянного радиуса, перемещающиеся в процессе прокатки относительно друг друга.

## 1.2. Поперечная, поперечно-клиновья, поперечно-винтовая прокатка

При поперечной прокатке инструмент придает заготовке вращательное движение, в связи с этим поперечная прокатка и ее разновидности (поперечно-винтовая и поперечно-клиновья) служат лишь для обработки тел вращения, обрабатывая металл в поперечном направлении.

Производительность процесса по сравнению с обработкой на токарных автоматах увеличивается более чем в 10 раз, коэффициент использования металла (КИМ) больше на 30...60%. Повышается качество продукции, прочность и износостойкость.

Поперечная прокатка может осуществляться в двухвалковом или трехвалковом прокатном стане (рис. 2 а-г), валки которого вращаются в одну сторону, придавая находящейся между ними заготовке вращение в обратную сторону.

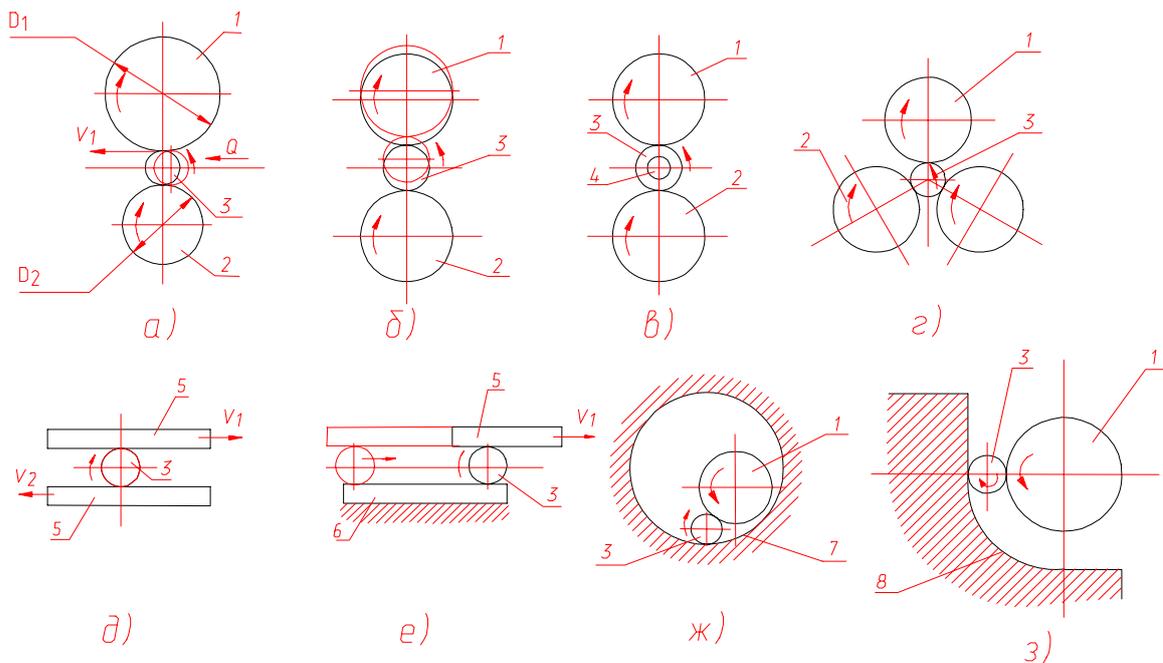


Рис. 2. Схемы поперечной прокатки:  
1,2 — валки; 3 — заготовка; 4 — оправка; 5 — подвижная плита;  
6 — неподвижная плита; 7 — барабан; 8 — сегмент

Для обеспечения непрерывности процесса при прохождении заготовки через зону деформации окружные скорости валков двухвалкового прокатного стана имеют неравные величины ( $V_1 > V_2$ ) за счет разных рабочих диаметров валков ( $D_1 > D_2$ ).

Для продвижения заготовки через очаг деформации применяются специальные проталкивающие устройства, т. е. прикладывается усилие  $Q$ .

Обжатие заготовки по мере ее вращения между валками производится сближением валков в процессе поперечной прокатки (б-г). Такой прием используют при прокатке шестерен. В этом случае применяется принудительное синхронное вращение заготовки с целью получения точных зубьев шестерен.

Поперечную прокатку полых изделий выполняют на оправке (в). Поперечную прокатку можно производить в поступательно движущемся инструменте (д, е), как без перемещения оси заготовки ( $V_1 = V_2$ , д), так и при ее перемещении ( $V_1 > V_2$ , е). Таким образом производят накатку резьбы на резьбонакатных станках.

Поперечную прокатку осуществляют также в барабанных станках (ж), в валково-сегментных станках (з).

Поперечно-винтовая прокатка (косая прокатка) — разновидность поперечной прокатки, когда валки двух- и трехвалкового стана располагаются под углом друг к другу и к оси заготовки, которая получает не только вращательное движение, но и движение вдоль оси заготовки, что способствует непрерывности процесса.

Поперечно-винтовую прокатку применяют при производстве труб и трубных заготовок на двух- и трехвалковых станах (рис. 3), втулок различных видов (рис. 4а, б), для подготовки заготовок под штамповку.

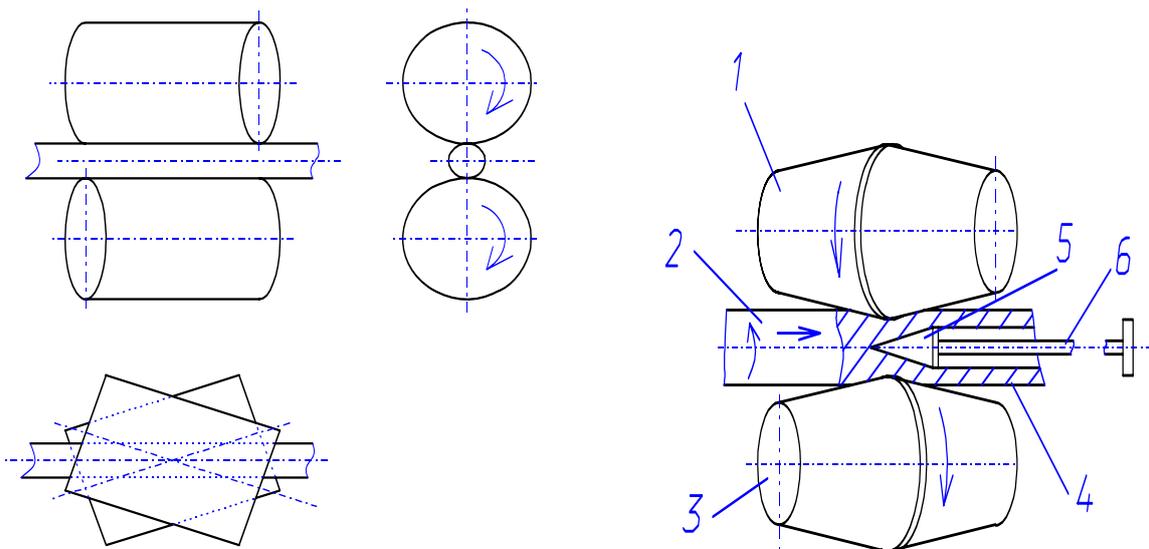


Рис. 3. Основные схемы поперечно-винтовой прокатки:  
1 – левый валок; 2 – заготовка; 3 – правый валок; 4 – гильза;  
5 – оправка; 6 – штанга

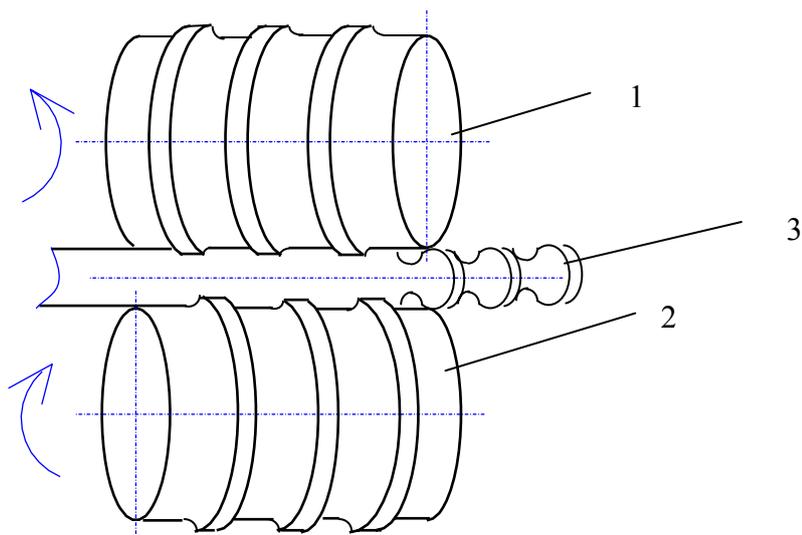


Рис. 4. Поперечно-винтовая прокатка в спиральных калибрах  
1, 2 — валки; 3 — заготовка

Поперечно-клиновую прокатку выполняют в инструменте, имеющем боковые наклонные грани, расположенные под углом к плоскости вращения.

В процессе прокатки эти грани заставляют перемещаться избытки металла, возникающие при внедрении инструмента в заготовку, т. е. способствуют перераспределению металла вдоль оси заготовки. Оставшаяся часть металла на данном участке прокатывается между инструментами, приобретая их профиль в продольном сечении тела вращения (рис. 5).

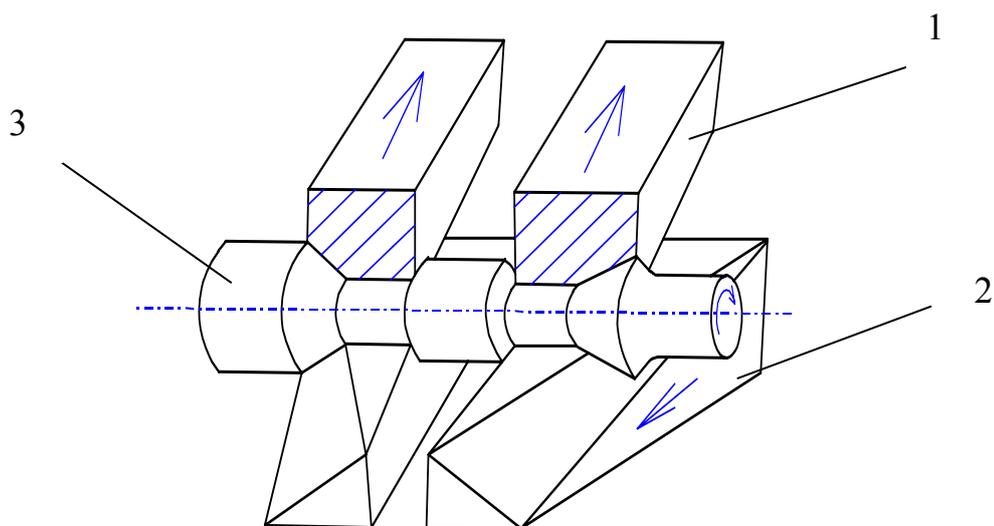


Рис.5. Схема поперечно-клиновой прокатки  
1,2 – инструмент; 3 – заготовка

При движении инструмента обжатие заготовки по мере ее вращения происходит постепенно (в зонах прямого контакта), форма инструмента имеет вид клина.

Поперечно-клиновой прокаткой получают как готовые изделия, так и заготовки под штамповку (рис. 6).

В двухвалковом стане (а) заготовка удерживается в рабочей зоне направляющими. Возможна прокатка изделий из прутка, что эффективно при изготовлении коротких деталей. Трехвалковые станы (б) снижают вероятность разрушения заготовки в ее осевой зоне. Валково-сегментный стан (в) работает только со штучной заготовкой при относительно невысоких требованиях по точности изделия.

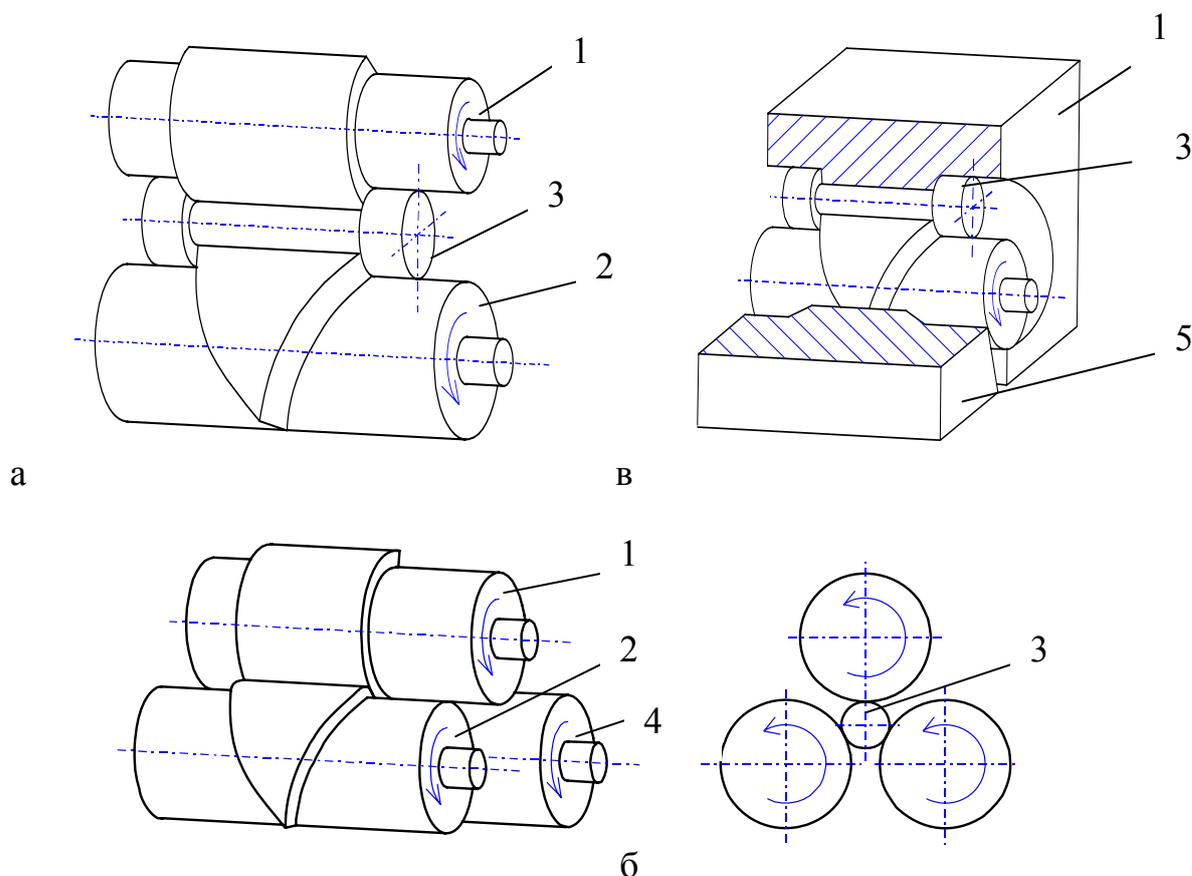


Рис. 6. Основные схемы поперечно-клиновой прокатки:  
 а — двухвалковый стан; б — трехвалковый стан; в — валково-сегментный стан  
 1,2,4 — валки; 3 — заготовка; 5 — сегмент

### 1.3. Дефекты поперечной прокатки

Дефекты поперечной прокатки могут иметь различный характер. Они во многом аналогичны дефектам, получаемым при обычной прокатке и штамповке: трещины, плены, закаты, завальцованные заусенцы, однако при поперечной

прокатке встречаются дефекты и виды брака, свойственные только поперечной прокатке.

Это осевая рыхлость, вскрытие осевой или кольцевой полости, образование трехгранных тел вращения, имеющих постоянный диаметр (рис. 7)

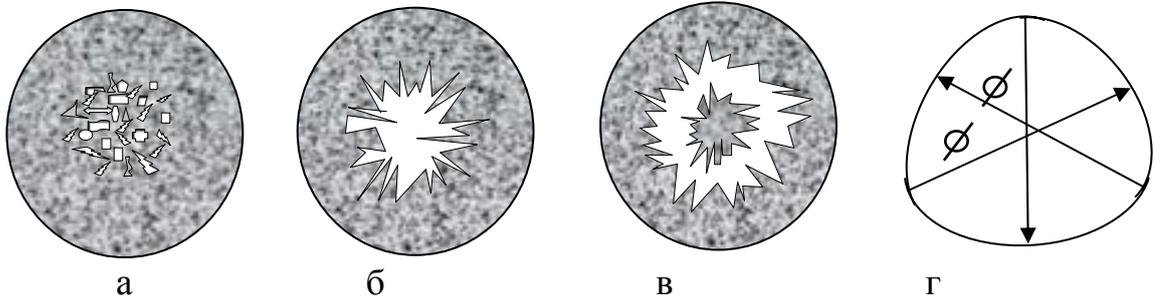


Рис. 7. Дефекты прокатки:

а — осевая рыхлость;

б — вскрытие осевой полости;

в — вскрытие кольцевой полости;

г — трехгранное тело вращения

Осевая рыхлость и вскрытие осевой рыхлости (а) и (б) возникают вследствие появления в зоне деформации растягивающих напряжений (свойственно при прокатке на двухвалковом стане). При прокатке на трех-, четырехвалковых станах (рис. 7 а и б) данные виды дефектов наблюдаются значительно реже. Трехгранная форма тела (г) образуется при больших обжатиях, когда наблюдается проскальзывание относительно прокатываемой заготовки то по одну, то по другую сторону валка.

Кроме того, могут присутствовать следующие дефекты:

- неметаллические включения вследствие засорения шлаками, продуктами раскисления, огнеупорными материалами; выявляются при резке заготовок и при просмотре микро- и макрошлифов;

- царапины допускаются не более 0,1 мм для  $\varnothing$  до 20 мм и не более 0,2 для  $\varnothing$  до 40 мм.

- волосовины — тонкие продольные трещины после прокатки (образуются за счет газо-пузырькового вытягивания);

- завальцованные заусенцы.

## 2. РАСКАТКА КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК (РАДИАЛЬНАЯ)

Радиальная раскатка — технологическая операция формоизменения, при которой происходит одновременное увеличение наружного диаметра и диаметра отверстия за счет уменьшения толщины стенки детали, при этом может быть также изменена форма поперечного сечения кольца.

Радиальная раскатка осуществляется в процессе деформации валками на специализированных кольцераскатных машинах и применяется для изготовления кольцевых деталей диаметром от 50...70 мм до 7000 мм, шириной от 5 – 7 мм до 1200 мм и массой от нескольких десятков граммов до 12,5 т.

Радиальная раскатка выполняется в горячем, полугорячем и холодном состояниях.

По схемам формоизменения радиальную раскатку кольцевых заготовок разделяют на: 1) открытую; 2) полуоткрытую; 3) полузакрытую; 4) закрытую.

Наиболее распространена открытая раскатка.

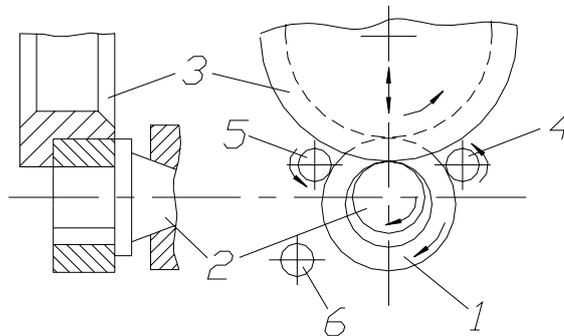
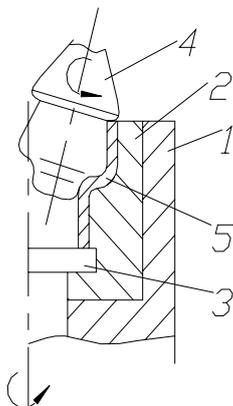


Рис. 8. Схема открытой радиальной раскатки:

- |                         |                           |
|-------------------------|---------------------------|
| 1 — исходная заготовка; | 4,5 — направляющие валки; |
| 2,3 — рабочие валки;    | 6 — контрольный ролик     |

### 3. РАЗДАЧА

Точность размеров деталей, получаемых раздачей, соответствует 8-11 качеству, шероховатость  $Ra$  —  $5 \div 0,63$  мкм. Раздача может осуществляться по схеме торцевой раскатки с использованием наклоненного валка 4.



- |                   |
|-------------------|
| 1-матричный блок  |
| 2-обойма матрицы  |
| 3-оправка         |
| 4-раскатной валок |
| 5-готовая деталь  |

Рис. 9. Схема раздачи

#### 4. БЕЗОТХОДНАЯ ШТАМПОВКА ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ДЕФОРМИРУЮЩИМСЯ МЕТАЛЛОМ

Использование в процессах вытяжки в качестве деформирующего инструмента резины, жидкости приводит к тому, что давление со стороны деформирующего металла достаточно для формообразования центральной части заготовки, но недостаточно для предотвращения складкообразования металла во фланцевой части заготовки. Это приводит к необходимости применения жестких прижимных колец, что в результате усложняет штамповую оснастку и нивелирует преимущество нежесткого универсального формообразующего инструмента.

Отмеченный недостаток устраняется при использовании в качестве деформирующего металла «мягкого» металла (например, свинца), который выполняет роль и пуансона, и прижима.

После штамповки необходимо обжать плоской плитой пластичный металл пуансона, следовательно, снижается производительность процесса.

Этот недостаток устраняют при использовании способа штамповки-вытяжки, где в качестве пластичного металла используют пакет заготовок из металла изделия, а высоту пакета задают более двух высот изделия (в процессе штамповки пакет восполняется).

Пакет смазанных или разделенных пленками заготовок устанавливают в контейнер, на матрицу, при рабочем ходе пресса подвергают обжатию плитой-пуансоном, прикрепленной к ползуну, — деталь отштампована.

#### 5. ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Лазерная технология в последнее время находит все более широкое применение в промышленности. С помощью лазерной технологии производятся следующие операции: прошивка точных отверстий в рубиновых часовых камнях, диафрагмах и фильерах, резка листового материала, раскрой тканей, разделение хрупких материалов, подготовка номиналов электронных приборов, сварка различных материалов. По сравнению с другими видами обработки увеличивается производительность, точность и качество обработки, улучшаются условия труда.

Стадии обработки:

1. Подвод лазерного излучения к материалу.
2. Поглощение светового потока и передача его энергии твердому телу.
3. Нагрев материала без видимого разрушения.
4. Расплавление материала.
5. Испарение и вымывание продуктов разрушения.
6. Остывание материала после окончания лазерного воздействия.

Характер протекания этих процессов зависит от свойств обрабатываемых материалов:

- коэффициента отражения поверхности на длине волны излучения;

- теплопроводимости;
- удельной теплоты плавления и испарения;
- теплоты плавления и испарения;
- плотности материала и т. п.

Чем короче длина волны излучения оптических квантовых генераторов (ОКТ), тем ниже отражательная способность металла и выше доля поглощенной световой энергии.

Большинство металлов плохо поглощает излучение  $\text{CO}_2$ —лазеров, имеющее длину волны 10,6 мкм. Для повышения лазерной обработки можно искусственно снизить отражательную способность, например, изменив шероховатость поверхности или, используя разного рода покрытия.

Температурный режим нагрева металла определяется плотностью мощности излучения лазера. При низкой плотности мощности (примерно до  $10^3 - 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>) происходит нагрев материала без его плавления или испарения, с повышением значения этой величины примерно до  $10^6 - 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> материал плавится, а при плотности мощности излучения, превышающей более  $10^6 - 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>, материалы разрушаются вследствие испарения.

Процессы, происходящие в материале при воздействии на него излучения, зависят не только от плотности его мощности, но и от длительности воздействия излучения на материал.

Регулируя эти две характеристики излучения, можно задать энергетические условия, при которых реализуются процессы сварки, прошивки отверстия, упрочнения в результате структурных превращений, лазерного глянцеваания, лазерного шокового упрочнения.

Поскольку время нагрева, толщина расплавленного слоя и степень прогревания основного материала очень малы, охлаждение при кристаллизации жидкого слоя происходит с высокой скоростью — до  $10^6$  °C/с. Это приблизительно в  $10^3$  быстрее скорости обычной закалки, в результате фиксируются структурные состояния, при которых раствор еще не успел разделиться на фазы или это разделение не успело завершиться полностью.

При высокой скорости охлаждения расплавленного железа фиксируется  $\gamma$ -фаза, углерод не успевает выделиться в виде цементных образований и остается в растворе или частично переходит в тетраэдрические полости Fe -  $\alpha$ , в результате чего образуется мартенсит.

Могут быть использованы твердотельные и газовые лазеры, в качестве активной среды используются твердые тела: рубин, специальное стекло, алюминат натрия гранат и др. Они могут работать в импульсном или в непрерывном режиме генерации излучения.

При работе в импульсном режиме для реализации процессов упрочнения важны следующие параметры лазерного излучения: энергия в импульсе, длительность импульса, расходимость излучения, диаметр луча, частота следования импульсов.

Более дешевые лазеры, в которых в качестве активных элементов используются стеклянные стержни с добавкой неодима.

К преимуществам газовых лазеров можно отнести: высокие мощности излучения, повышенный КПД, возможность изменять энергетические параметры установок в широких пределах.

## 6. ШТАМПОВКА ПОКОВОК ИЗ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

Это одна из наиболее прогрессивных технологий, позволяющих получать поковки с уменьшенными припусками под механическую обработку, КИМ до 95...98 %, с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Это синтез литейного и кузнечно-штамповочного производства.

По этой технологии можно получать сложные фасонные поковки типа фланцев, шестерен, крышек с низкой шероховатостью поверхности и точными геометрическими размерами, близкими к форме и размерам готовых деталей.

Технология штамповки поковок из жидкого металла позволяет использовать отходы от литья, штамповки (облой и перемычки), механической обработки (стружка, шлам) черных и цветных металлов.

При штамповке крупных партий поковок для каждого типа поковки изготавливается свой штамп, при штамповке в условиях мелко- и среднесерийного производства экономически целесообразно применять групповой метод, при котором используется универсальный групповой блок и изготавливается только сложный формообразующий инструмент (вставки, вкладыши).

Точность заготовок соответствует 11...12 квалитетам, а шероховатость поверхности  $Ra = 2,5...5$  мкм.

Большое количество деталей сложной конфигурации приборостроительной и электротехнической отраслей изготавливается отливкой в песчаной или металлической форме. Используется литниковая система и прибыли, на что расходуется до 40...50% металла.

При изготовлении данных деталей ковкой наблюдаются значительные припуски и напуски на механическую обработку (до 60...75%).

По сравнению с литьем под давлением штамповка жидкого металла позволяет получить поковки сложного профиля почти без пор и раковин.

Сущность штамповки из жидкого металла — жидкий металл подается не в специальную камеру сжатия (как при литье под давлением), а непосредственно в полость штампа, а затем под действием пуансона деформируется так же, как и при горячей объемной штамповке в закрытых штампах, и выдерживается под давлением до полной кристаллизации.

Применение давления при формообразовании позволяет устранить основной недостаток литья под давлением: пустоты, газовые и усадочные камеры.

Покówki простой формы без боковых выступов и впадин изготавливают в штампах с неразъемными матрицами, а заготовки сложной конфигурации с отростками и поднутрениями — в штампах с разъемной матрицей.

Штампуют как цветные, так и черные металлы. При этом металл находится в состоянии трехосного неравномерного сжатия, растягивающие напряжения отсутствуют, что дает возможность штамповать малопластичные сплавы.

Преимущества штамповки из жидкого металла перед ковкой с горячей штамповкой:

- уменьшение расхода металла из-за отсутствия потерь на резку;
- отпадает необходимость иметь на заводе большую номенклатуру проката;
- стоимость металла заготовок меньше на 30 – 60 %, т. к. материалом служит не сортовой прокат, а шихта, состоящая из чушек для переплава и отходов металла;
- мощность прессового оборудования меньше в 10...20 раз.

Недостатки штамповки из жидкого металла:

- производительность ниже, чем при ГОШ, ввиду необходимости выдержки жидкого металла в штампе под давлением;
- длительное воздействие жидкого металла со стенками инструмента ведет к появлению на них разгарных трещин – уменьшается стойкость штампов.

Штамповка из жидкого металла применяется в странах СНГ, Германии, США, Японии, Болгарии, Польше. Однако широкого применения эта технология в машиностроительной промышленности не нашла.

## 7. ШТАМПОВКА ТОЧНЫХ ПОКОВОК ИЗ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

К деталям электродвигателей, работающим в жидких средах под давлением, предъявляются повышенные требования на герметичность — поковки должны быть точными (крышки, щиты).

Штамповку осуществляют на гидравлическом прессе  $P = 1000$  кН. Материал-сплавы АЛ9 и АК 6. Штампы перед штамповкой нагревают до температуры 120...150 °С. Полость штампа смазывают следующим составом (%): стеариновая кислота – 32 %, парафин – 27 %, машинное масло – 32 %, алюминиевый порошок – 9 %. Смазка наносится тонким слоем при помощи пульверизатора.

Металл заливают мерной ложкой до определенного уровня непрерывной струей, затем при ходе ползуна прессы вниз в момент соприкосновения пуансона с зеркалом жидкого металла он (металл) кристаллизуется, после чего его штампуют. Затем заготовку снимают с пуансона, штамп продувают сжатым воздухом и смазывают.

Деталь имеет твердость по Бринелю 110 ед., что в 1,5 раза выше, чем у заготовок, изготовленных литьем.

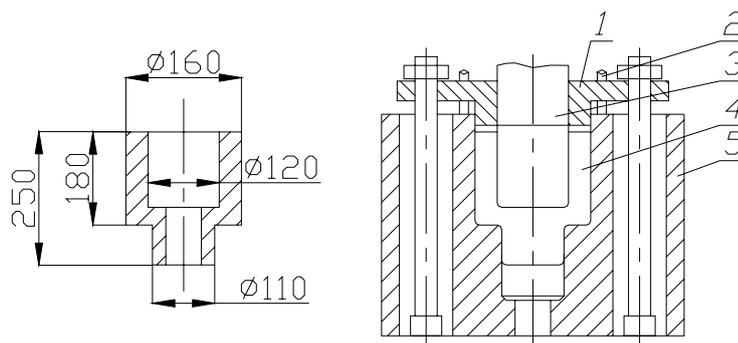


Рис. 11. Схема штамповки ползуна

1 – крышка; 2 – штифт; 3 – пуансон; 4 – деталь; 5 – обойма

Поковки ползуна штампуют в штампе, состоящем из неразъемной матрицы 5, траверсы 1, пуансона 3 с двумя направляющими шпильками 2 (рис. 11).

Поковку 4 штампуют по следующей технологии: в нагретую до 120...200°C и смазанную составом из олифы и серебристого графита матрицу заливают жидкий сплав бронзы при температуре 1120...1140°C и выдерживают под давлением 3 – 4 минуты до полной усадки и окончательного затвердевания.

При использовании литья под давлением используют 71 кг металла; при использовании штамповки из жидкого металла – 30 кг.

Необходимо нагревать пуансон до 200...250°C.

Таблица 1

*Эффективность изготовления поковок, штампованных из жидкого металла*

Деталь	Материал	Способ изготовления	Расход металла, кг	Масса детали, кг	Трудоемкость изготовления
Корпус	ЛН 56-3	Ковка	65	18	4
		Штамповка	21		2
		Экономия	44		2
Пуансон	БрА Мц10-2	Ковка	71	30	4
		Штамповки	30		3
		Экономия	41		1

## 8. ОБЪЕМНАЯ ИЗОМЕТРИЧЕСКАЯ ШТАМПОВКА

Этот вид штамповки совершается в закрытых или открытых штампах, в рабочей зоне которых поддерживается температура 800 – 1100°C. В штампе выдавливается заготовка: рабочий инструмент – матрица и пуансон. Готовая поковка выталкивателем удаляется из штампа; для этого крепежная плита, пуансонодержатель и пуансон, закрепленный кольцом и втулкой на опоре, поднимаются вверх. Нагревателями являются медные стержни, они соединены планками, от корпуса штампа изолированы. Ток подводится устройствами, температура фиксируется термопарой. Припуски на механическую обработку не более 0,3...1,0 мм. Коэффициент использования металла (КИМ) = 0,9 – 0,95

## 9. ШТАМПОВКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Состояние сверхпластичности можно определить совокупностью признаков:

1. Повышенная чувствительность  $\sigma_s$  к изменению скорости деформации:

$$m = \frac{\partial \sigma / \sigma}{\partial \dot{\xi} / \dot{\xi}} \geq 0,3 \quad (1)$$

2. Крайне незначительная величина деформационного упрочнения:

$$n = \frac{\partial \sigma / \sigma}{\partial \xi / \xi} \geq 0 \div 0,1 \quad (2)$$

3. Аномально высокий ресурс деформационной способности.

4. Напряжение текучести  $\sigma_s$  материала в состоянии сверхпластичности в несколько раз меньше предела текучести, характеризующего пластическое состояние данного материала.

Признаки свойств пластичности проявляются в определенных условиях:

- структурное состояние деформированного металла;
- температура;
- скорость деформации.

По структурному признаку различаются две разновидности сверхпластичности:

1. Сверхпластичность, проявляющаяся у металлов с особо мелким зерном ( $d \leq 10$  мкм). Зависимость эффекта сверхпластичности от исходного размера зерен (чем меньше зерно, тем больше склонность материала к скоростному упрочнению, соответственно больше его деформационная способность и меньше погрешность течения). При этом необходимо, чтобы зерна имели равноосную форму, а также в процессе нагрева до температуры деформирования и при последующем деформировании обладали устойчивостью против роста.

2. Сверхпластичность полиморфных металлов, проявляющаяся при деформировании их в процессе фазовых превращений.

В сверхмелкозернистое состояние сплавы обычно переводят предварительной термической или термомеханической обработкой.

Температурный интервал существования структурной сверхпластичности металлов может находиться от температуры начала рекристаллизации ( $0,4 T_{пл}$ ) до температуры ближе к температуре плавления ( $T_{пл}$ ).

Температура процесса сверхпластичности должна поддерживаться постоянной по объему деформируемого металла в течение всего периода деформирования, чтобы обеспечить равномерное течение материала (изотермические свойства пластичности).

Скорость деформации должна быть : а) достаточно малой, чтобы успевали протекать диффузные процессы; б) достаточно высокой, чтобы в условиях повышенных температур не допускать роста зерен. В основном  $\dot{\epsilon}$  от  $10^{-2}$  до  $10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , т. е. между скоростями высокотемпературной ползучести и скоростями деформации, используемыми (при обычной штамповке –  $0,3 \dots 0,6 \text{ м/с}$ ) в процессах ОМД –  $2 \dots 10 \text{ мм/с}$ .

Таблица 2

### *Характеристика состояния свойств пластичности сплавов*

Основа	Легирующие элементы	Марка сплава	$\sigma_s$ , МПа	$\dot{\epsilon}$ , $\text{с}^{-1}$	$t$ , °С	$\delta$ , %	Размер зерна, $d$ , мкм
Al	6% Cu; 0,5%Zr; 6,5%Mg; 0,6%Mn; 12%S; 17,6%Zn	В 96 Ц Supral- 100	1-4	$1,1 \cdot 10^{-3}$ $\dots 5 \cdot 10^{-5}$	390...500	$\approx 1000$ до (1600%)	1...10
Fe	(0,13...0,34%)C (0,5...1,5%) Mn, 0,1% V, 1% C, 1,4% Cr	- - aisi	7...10 40 120	$5 \cdot 10^{-5}$ $1,2 \cdot 10^{-4}$ $1,7 \cdot 10^{-4}$	300...900 650 650	270...380 700 330	2...4 1...0 12,0
Ti	6,5% Al; 3/5% Mo; 2% Zr	BT9	15	$10^{-3}$	900	2837	2,5
Ni	3% Mo; 1% V	IN-100	5	$5 \cdot 10^{-4}$	1080	1000	1...1,5

### ***9.1. Область применения сверхпластичности при штамповке***

1. Штамповка малопластичных и труднодеформируемых сплавов на основе Ni, Ti, Al, Fe и магния. Состояние сверхпластичности этих сплавов позволяет существенно увеличить деформацию: один технологический переход – переход к малооперационной технологии.

2. Штамповка деталей особо сложной формы (тонкостенные детали, сложной формы с ребрением).

3. Снижение усилий штамповки и мощности применяемого оборудования.

4. Улучшение качества готовой продукции: лучшее заполнение ручья штампа; повышается точность размеров; меньше шероховатость детали.

### ***9.2. Технологические процессы штамповки металлов в состоянии***

### сверхпластичности

Поковки, изготовленные за счет сверхпластичности, не нуждаются в обработке резанием (кроме сверления). На рис. 12 представлен анализ эффективности различных видов обработки при изготовлении детали сложной формы.

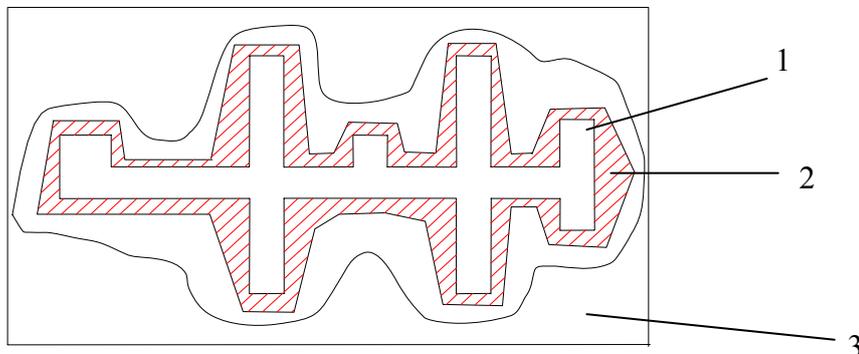


Рис. 12. Сопоставительный анализ эффективности процесса сверхпластичности  
1 — деталь; 2 — отход (ковка); 3 — отход (литье)

Штамповые уклоны  $\leq 1^\circ$ .

КИМ  $\geq 0,80$  (обработка на прессах — КИМ = 0,2...0,5), что очень важно при штамповке из дорогостоящих материалов.

### 9.3. Схема процесса штамповки с использованием сверхтекучести

Это напоминает литье в металлическую форму под давлением [6].

Выдавливание цилиндрической заготовки 1 через капели 2 в полость ручья штампа 3. Этот процесс позволяет получать деталь неограниченной сложности по форме и возможен для таких сверхпластичных металлов, как (Zn – 22 %; Al – 33 %; CuAl – 33 %; Si – 12 %).

Однако классические сверхпластичные материалы не нашли широкого промышленного применения. Поэтому более перспективны процессы обработки давлением промышленных сплавов в температурно-скоростном режиме сверхпластичности.

**Пример:** Процесс крип-штамповки поковок сложной формы (рис. 13) – колесо с ободом и ступицей  $D_{\text{наружн.}} = 100...380$  мм и толщина полотна 1,6...10,3 мм; из сплава следующего состава: Ti (основа); 6 % Al; 6 % V; при температурах 870...980°C на гидропрессах усилием до 27 МН.

Штампы отлиты из сплавов на основе Ni, разогреваются индукционными нагревателями до температур штамповки в течение 4...10 часов в зависимости от их массы.

Процесс крип-штамповки проходит при скорости деформирования в конце штамповки 0,04 мм/с и продолжается 3 – 5 мин (обычно скорость деформирования составляет 1 мм/с).

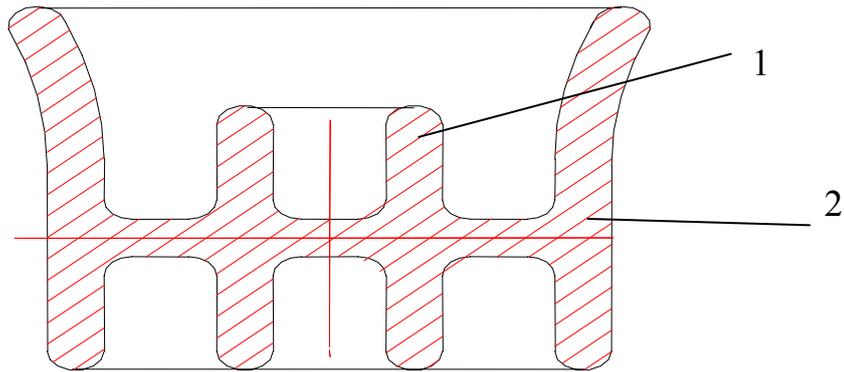


Рис. 13. Колесо с ободом и ступицей  
1 — ступица; 2 — обод

**Пример:** Поковка крупногабаритной панели с лучевым оформлением из магниевого сплава (рис. 14). Обычно такие панели штампуют с усилием 300...750 МН, т. к. удельное усилие при штамповке из Al и Mg сплавов равно 320...560 МПа.

Штамповка поковки при сверхпластичности осуществляется при усиллии 150 МН в штампе, предварительно нагреваемом до температуры штамповки.

Для обеспечения условий сверхпластичности также применяется крип-процесс, деталь выдерживают под нагрузкой в течение 1 – 3 мин при  $\epsilon = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ .

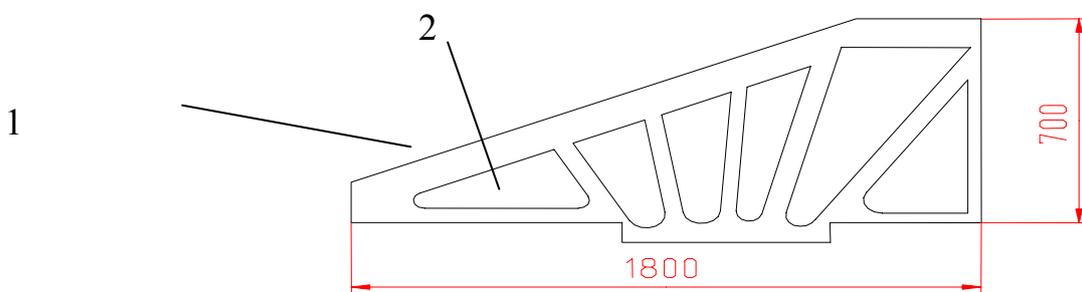
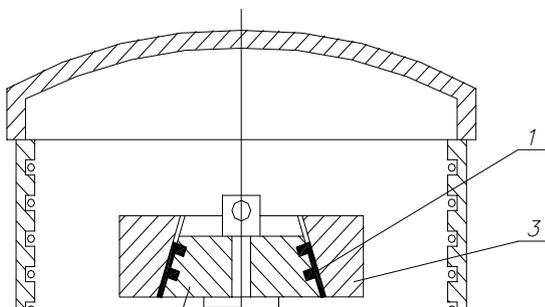


Рис. 14. Панель с лучевым оформлением  
1 — панель; 2 — сквозное отверстие

**Пример:** Штамповка цилиндрических и конических кольцевых оребренных оболочек на термоупругих прессах (рис. 15). Сущность процесса – усилие деформирования создается за счет термического расширения инструмента (рис. 15).

В массивный контейнер 3, нагретый до требуемой температуры, вводят сердечник 2, на наружной поверхности которого имеется рельеф, соответствующий оребрению. Между контейнером и сердечником находится заготовка 1.

Сердечник вместе с заготовкой нагревают в печи 4, при этом термическое расширение сердечника вызывает перемещение его наружной по-



верхности на определенную величину, необходимую для обеспечения рельефов металлом заготовки.

Регулируя скорость нагрева оправки, можно получить оптимальные температурно-скоростные условия деформации в состоянии сверхпластичности.

Рис. 15. Штамповка ребренных оболочек  
1 – деталь; 2 – сердечник; 3 – контейнер;  
4 – печь

Наряду с вышеперечисленными преимуществами изготовления деталей в состоянии сверхпластичности реализуются такие технологические процессы, как, например, бесфильтренное волочение, газостатическая формовка, термоупругая штамповка, которые вообще не нуждаются в прессовом оборудовании. Малые удельные усилия при деформировании в состоянии сверхпластичности способствуют существенному увеличению стойкости штампованного инструмента и позволяют заметно уменьшать его по стоимости.

Например, для развития новых отраслей науки и техники необходимы конструкционные материалы с особыми свойствами, способные обеспечить надежную работоспособность современных аппаратов в форсированных режимах эксплуатации, с высокой прочностью, удельной жесткостью, повышенной жаропрочностью, повышенной износостойкостью, высоким сопротивлением усталостным разрушениям, со способностью работать в космических приборах, в условиях криогенных и высоких (2500 – 3000 °С) температур.

К таким материалам относятся тугоплавкие металлы IV – VII групп (подгруппы А) периодической системы Менделеева (вольфрам W, молибден Mo, ниобий Nb, хром Cr, тантал Ta, ванадий V) с температурой плавления больше 1650 °С и сплавы на их основе. Так, из молибдена, ниобия и сплавов на их основе в настоящее время изготавливаются сотовые панели космических летательных аппаратов, теплообменники, оболочки возвращающихся на Землю капсул и ракет, тепловые экраны, обшивки кромок крыльев и стабилизаторы сверхзвуковых самолетов.

В очень тяжелых условиях работают некоторые детали прямоточных ракетных и турбореактивных двигателей (лопатки турбин, хвостовые юбки, заслонки форсунок, сопла ракетных двигателей, поверхности управления в ракетах с твердым топливом). От материала требуется не только высокая сопротивляемость окислению и газовой эрозии, но и сверхвысокая или долговременная прочность и сопротивляемость удару. До 1370 °С используют Mo, Nb и их сплавы. При температурах более 1370 °С – вольфрам; W и Nb применяют в ядерной энергетике.

Из вольфрама производят нити накала электроламп, детали радиоламп и выпрямители, катоды рентгеновских трубок, экранирующие сетки катодных

ламп, электрические контакты, термодпары, нагреватели вакуумных печей и другие изделия.

## 10. НАКАТКА ЗУБЧАТЫХ ПРОФИЛЕЙ

Накатку применяют как окончательную операцию обработки зубчатого венца при производстве зубчатых колес 15...16 квалитетов точности с модулем не более 4 мм. При накатке экономится 15 – 30 % металла, трудоемкость процесса меньше в 2 – 5 раз, усталостная прочность повышается на 15 – 20 %, прочность при изгибе увеличивается на 20 – 40 %. Температура накатки – 1000...1100 °С. Сущность метода: заготовка нагрета в индукторе, накатывается профиль между двумя зубчатыми колесами-инструментами, установленными на определенное межцентровое расстояние.

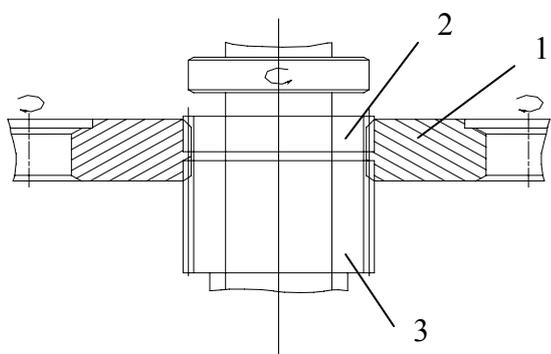


Рис. 16. Схема накатывания шестерен с осевой подачей заготовки

- 1 — зубчатое колесо (инструмент);
- 2 — эталонная шестерня;
- 3 — заготовка

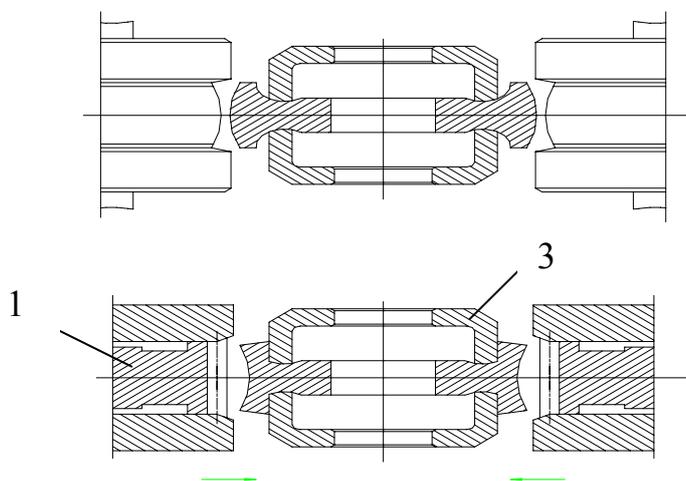


Рис. 17. Схема накатывания зубчатых колес с радиальной подачей валков

Технологический процесс осуществляется двумя парами валков: одна пара — гладкая, другая — зубчатая. Зубчатый и гладкий валок насажены на общий вал, так что зубчатый валок находится выше гладкого.

Заготовку зажимают гидравлическим устройством и располагают против гладких валков.

После нагрева заготовки валки сближают и производят обкатку обода, придавая ему точные размеры по диаметру и ширине. Далее валки разводят заготовку, устанавливая против зубчатых валков, после чего на нее производят накатку зубьев. При прокатке и накатке на валки подается смазочный материал.

Изготовление цилиндрических прямозубых и косозубых колес с модулем 1,5 – 3 мм и диаметром  $\leq 250$  мм осуществляется при накатывании с осевой подачей заготовки (рис. 16). Для изготовления крупногабаритных колес со значительным модулем используется накатка с радиальной подачей валков (рис. 17).

Заготовками служат штамповки или отрезанные от прутка дисковые заготовки.

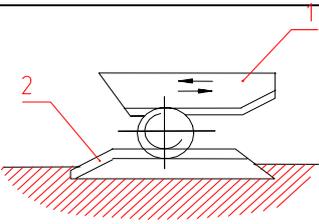
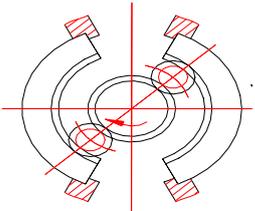
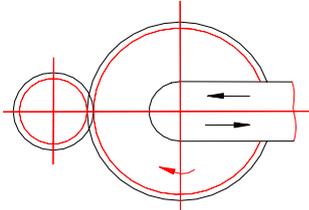
## 11. НАКАТКА РЕЗЬБ И ПРОФИЛЕЙ

Накатка — образование на заготовке резьбы или мелких рифлений непрерывным воздействием инструмента. Деформационное упрочнение поверхностного слоя при накатке и волокнистое строение структуры металла повышают циклическую прочность резьбовых соединений приблизительно в 1,6 раза по сравнению с нарезкой.

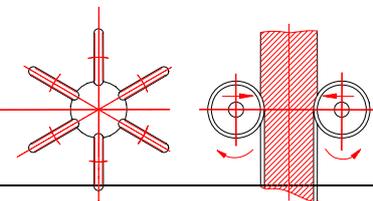
Методы накатки находят широкое применение не только при формообразовании различных резьб на сплошных и полых заготовках крепежных деталей, но и при получении различных профилей на деталях типа валов и осей, шлицевых соединений, червяков и винтов, зубчатых деталей, полученных обработкой резанием, и калибровки (правки) относительно длинных изделий.

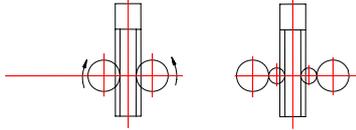
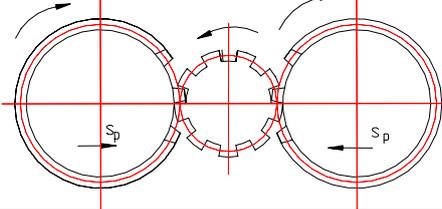
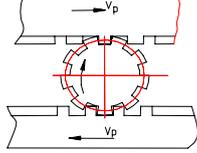
Таблица 3

### Технологические схемы накатки

Метод накатки	Схема накатки	Основные особенности
1. Плоским инструментом с тангенциальной подачей		Упрощается автоматизация процесса накатки. Универсальность — диапазон диаметров накатки резьбы 1,5...33 мм. Понижение стойкости с увеличением массы
2. С тангенциальной подачей: вращающимися резьбонакатными сегментами (подвижным и неподвижным)		Высокая производительность при ручной загрузке. Производительность повышается в 3 – 5 раз. Трудоемкость совмещения, сложность изготовления резьбового сегмента
3. С радиальной подачей одним роликом с винтовой нарезкой		Повышается долговечность, повышение производительности труда по сравнению с фрезерованием и нарезанием в 12 – 15 раз. Биение накатников

Окончание таблицы 3

Метод накатки	Схема накатки	Основные особенности
4. Продольная накатка многороликовой головки: с радиальной подачей роликов		Сквозные шлицы на жестких валах

5. Ударная накатка вращающимися роликами		Сквозные и закрытые шлицы любого профиля
6. Зубчатыми роликами с радиальной подачей инструмента (поперечная накатка)		Сквозные и закрытые шлицы и зубчатые колеса эвольвентного и треугольного профилей
7. Плоские зубчатые рейки		Сквозные и закрытые шлицы эвольвентного и треугольного профилей
8. Поперечно-винтовая прокатка зубьями	Зубчатые ролики с винтовыми формообразующими	Сквозные и закрытые шлицы эвольвентного и треугольного профилей, накатка напроход

## 12. ХОЛОДНАЯ ТОРЦОВАЯ РАСКАТКА ДЕТАЛЕЙ

Применение методов ротационной обработки значительно расширяет области использования процессов холодного объемного деформирования.

Локальный характер приложения нагрузок:

- уменьшает общую силу деформирования; контактные напряжения, действующие на инструмент; расходы металла на 30 %; трудоемкость изготовления детали приблизительно на 20 % по сравнению с обработкой резанием;
- увеличивает физико-механические свойства обрабатываемого металла, обеспечивает оптимальное расположение его волокон;
- увеличивает эксплуатационные свойства получаемых деталей.

*Преимущества:* низкая стоимость оснастки, незначительное время подготовки производства, использование оборудования относительно небольшой мощности при изготовлении крупногабаритных деталей, легкая автоматизация, можно применять в мелкосерийном производстве.

Освоены техпроцессы торцовой раскатки заготовок из сталей ШХ15, ШХ15СТ, 40Х, 20, 45 и Д16 и т. д.

В качестве заготовок используют отрезанные заготовки труб или прутков, устанавливаемые в матрицу свободно с зазором до 0,3 мм на сторону. Валки могут быть цилиндрической или конической формы (рис. 18). Формируют внутренние и наружные бурты по схеме высадки. Диаметр не зависит от размеров детали обычно 250 – 400 мм. Большие технологические возможности (угол 5 – 15° к оси вращения детали).

Получаемые детали – осесимметричные типа тел вращения, гладкие, с глухой полостью, имеющие развитый фланец (рис. 19).

*Недостаток* — сложность формы зависит от размеров и формы детали.

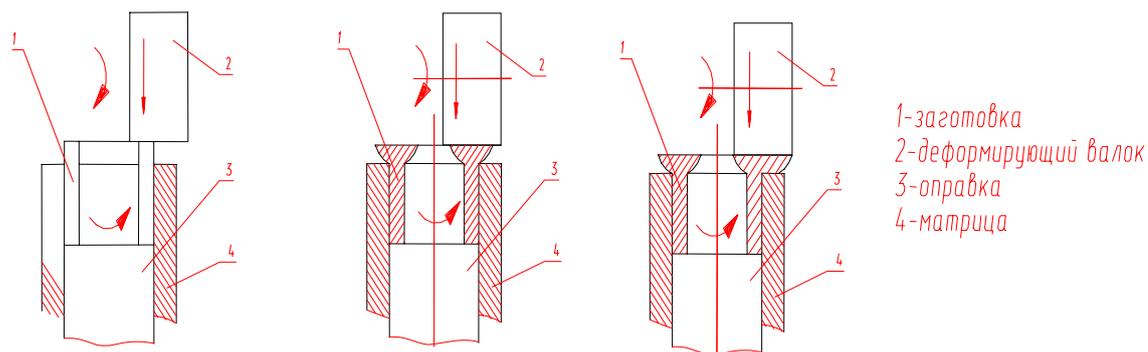


Рис. 18. Технологические схемы торцевой раскатки

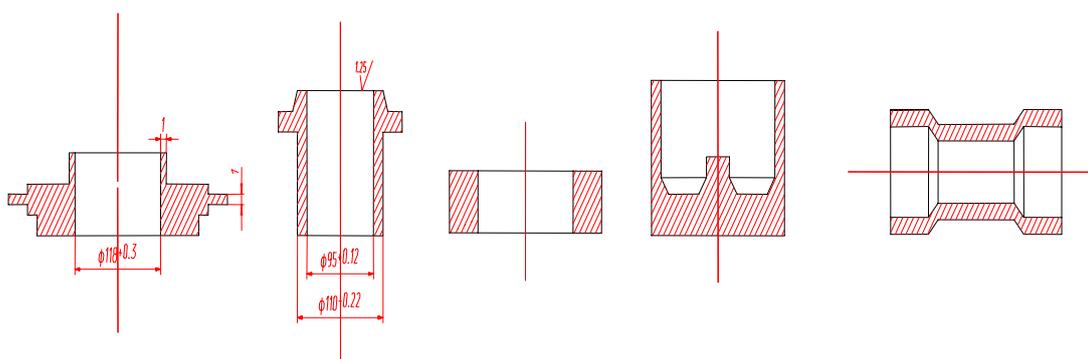


Рис. 19. Детали, изготовленные торцевой раскаткой

### 13. НАВИВКА ПРУЖИН И ГИБКА ПРОВОЛОКИ НА АВТОМАТАХ

Изготовление металлических изделий из проволоки гибкой и навивкой основано на применении различных автоматов: универсально-гибочных, пружинонавивочных, шайбонавивочных, правильноотрезных, шплинтовых, для навивки колец, для изготовления и склеивания в блок сшивающих скрепок, сеткоплетильных, цепевязальных и др.

Изготовление пружин из проволоки или горячекатаной сортовой стали диаметром до 16 мм. Нагрев и охлаждение в расплавленном свинце или соли («патентирование»).

В зависимости от технических свойств: I, II, III классы проволоки.

Универсально-гибочные и навивочные автоматы по техническому уровню конструкции соответствуют наиболее прогрессивному кузнечно-прессовому оборудованию.

Это оборудование особенно распространено в автомобильной, электро- и радиотехнической промышленности.

Особенно экономически выгодно при партиях деталей больше 10 – 14 тыс. шт. по сравнению с изготовлением на универсальных прессах по переходам или навивкой по оправке с помощью универсального металлорежущего инструмента.

Технология изготовления метизов штамповкой на универсально-гибочных автоматах позволяет получить полностью готовые детали.

*Гибка на автоматах оснащена:* дополнительной поперечной подачей материала усиленным ползуном реза, устройствами для нарезания резьбы, клепки, сварки, вращающимися оправками для навивки пружин, ползунами, резцовыми головами и т. п.

Преимущество — высокая производительность.

## **14. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЗАГОТОВОК И ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### *Прессование порошков подвижными средами*

Порошковая металлургия является одним из самых эффективных технологических процессов, обеспечивающих получение изделий с заданными свойствами и формой, минимальными отходами и низкой трудоемкостью.

Использование порошковой металлургии в массовом производстве повышает производительность труда в 1,5 – 2 раза, сокращается количество операций до трех раз, потери материалов составляют 5 – 10 %. Эти и другие преимущества порошковой металлургии обусловили ее широкое применение в промышленности всех развитых стран мира.

Прогресс в порошковой металлургии в значительной степени определяется совершенствованием важнейшей технологической операции — прессования, которое определяет не только форму и размеры деталей, но и их эксплуатационные свойства. В настоящее время прессование деталей и порошков осуществляется разнообразными способами, использующими статические и ударные нагрузки, различные передающие среды. Многообразие существующих и непрерывно появляющихся новых способов вызвало необходимость их классификации на основе объективных критериев общности:

1. Вид формующей (энергопередающей) среды; 2. Характер приложения нагрузки (скорость, периодичность, вид движения формующего инструмента или среды); 3. Температура формования; 4. Условия трения; 5. Состояние исходной заготовки.

В настоящее время наибольшее промышленное применение получил способ холодного статического прессования в жестких закрытых пресс-формах, отличающийся высокими технико-экономическими показателями. Однако таким способом получают преимущественно простые по форме и небольшие по габаритным размерам детали.

Силы трения по контактным с инструментом поверхностями приводят к значительной неравноплотности деталей.

Применение различных способов прессования подвижными средами, называемых также часто изостатическим прессованием, позволяет свести к минимуму недостатки, присущие прессованию в жестких пресс-формах. Давление при этом для достижения одинаковой плотности в 1,5 – 2 раза меньше, чем при двухстороннем, и почти втрое меньше, чем при одностороннем прессовании в жестких пресс-формах.

Особенности: высокий уровень прикладываемой энергии на неограниченной площади, что позволяет получать высокоплотные детали больших размеров.

*Преимущества:*

1. Возможность создания в порошке оптимальных схем напряженно-деформированного состояния, что позволяет получать детали весьма сложной формы.

2. Практическое отсутствие сил трения по контактным поверхностям инструмента, что позволяет повысить плотность и равномерность ее распределения; уменьшить энергоемкость процесса.

3. Снижение стоимости оснастки и повышения ее универсальности.

4. Увеличение плотности и уменьшение неравноплотности.

К *недостаткам* можно отнести: низкую производительность и меньшую точность размеров деталей.

При прессовании подвижными средами, к которым относятся жидкости, газы и эластомеры, используют как статическое, так импульсное приложение нагрузки. К ним относят: гидростатическое, газостатическое, эластостатическое (самое простое и универсальное), взрывное, гидродинамическое, электрогидроимпульсное прессование и другие способы.

Технологический процесс получения изделий из тугоплавких металлов начинается с переработки исходного сырья в порошок.

Развитие порошковой металлургии началось с развития продукции из тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена).

Основные направления:

1. Производство порошков как товарной продукции для непосредственного применения в различных отраслях техники, например для покрытий, в качестве легирующих добавок для сварочной техники, катализаторов и т. д.

2. Создание материалов и изделий с особыми свойствами и структурой для работ при повышенных температурах и нагрузках, например, псевдосплавы W-Cu, Fe-C, твердые сплавы, фрикционные и антифрикционные изделия сложного состава и др.

3. Создание пористых материалов для работы при повышенных температурах, например, пористые фильтры и др.

4. Изготовление деталей с окончательными размерами без дополнительной механической обработки; создание различных инструментальных материалов (для сверл, фрез и др), обладающих высокой стойкостью при обработке резанием или давлением.

Производство порошковой металлургии особенно широко применяют в автомобильной и электротехнической, химической, металлургической, нефтяной, тракторной, авиационной промышленности, судостроении, сельхозмашиностроении и др.

Общая схема технологического процесса: а) получение порошков с требуемыми свойствами; б) формование порошков; в) спекание сформованных заготовок при определенной температуре в средах регулируемого состава (воз-

можно термическая и химико-термическая обработка после этого), обработка давлением с приложением сдвиговых деформаций.

Прессование представляет собой формование тел путем приложения давления к порошку в закрытой форме или оболочке.

Разработаны следующие процессы прессования порошков:

1. В закрытой пресс-форме.
2. С применением вибрации.
3. Ударное.
4. Изостатическое.
5. Взрывом.

#### Схема холодного прессования

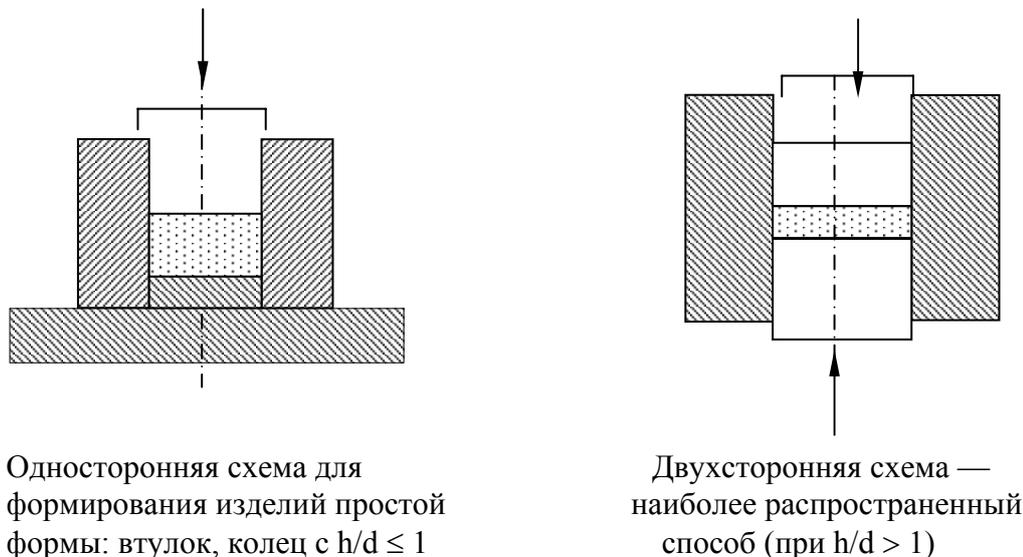


Рис. 20. Схемы прессования порошков

*Недостаток* — требуется высокое давление.

При свободной засыпке в замкнутом объеме полости матрицы между шайбами сохраняются пустоты, поры вследствие хаотического расположения частиц, образуются так называемые арки и мостики. Поры занимают 60 – 70% общего объема, их величина зависит от формы частиц порошка, состояния поверхности.

При предварительной утряске порошка в пресс-форме пористость снижается, улучшается взаимное расположение частиц, уменьшается неравномерность распределения плотности в прессуемом полуфабрикате.

Изменение пористости, %, свободно засыпанных порошков (I) и после утряски (II):

Материал	I	II
Fe электролитич.	68,5	60,7
Al чешуйчатый	93,0	85,3
Сталь пер.	69,5	59,7
W	77,9	64,0

При прессовании порошков пластичных металлов дальнейшее уплотнение происходит за счет деформации частиц, причем деформация в начале ограничена приконтактными участками, а затем распространяются в глубь частицы.

Процесс формирования складывается из трех основных стадий: I – плотная упаковка; II – упругое сопротивление; III – деформация – стадия пластической деформации.

Изготавливаются: режущие инструменты, вкладыши подшипников, фрикционные диски, щетки электродвигателей и др.

*Преимущества:* возможность получения в массовом количестве однотипных деталей точных размеров, не требующих дополнительной обработки. Кроме того, пористость, высокая твердость, тепло- и износостойкость, возможность получения сплавов из металлов и неметаллов и др.

Исходный материал (проволока, стружка и др.) измельчают в защитной атмосфере и просеивают по фракциям. Затем к порошку-основе, например, для инструмента к карбидам вольфрама (WC) или (WC + TiC) добавляют составляющую.

Для инструмента – кобальт. Полученную шихту прессуют в стальных пресс-формах с полостью, соответствующей конфигурации будущего изделия. Спекание проводят в печах при соответствующей температуре в защитной атмосфере.

Пористые сплавы на медной основе спекают при температуре 600 – 800°C, на железной основе при 1000 – 1300°C, твердые сплавы для инструмента при 1500 – 1600°C в среде водорода. Твердость HRA 92.

Основная номенклатура: трубы из порошка (редко), чаще детали простой формы и небольших размеров — шестерни, кольца, втулки.

Энергия взрыва перспектива и для получения изделий из порошка. При взрывном прессовании и благодаря колоссальным давлениям и исчезающе малой продолжительности процесса исключается теплообмен между порошком и пресс-формой, и без всякой дополнительной обработки сразу получают изделия с нулевой пористостью. Изменяя параметры процесса, можно изменять и пористость в широких пределах плюс взрывное упрочнение.

## 15. МАГНИТОИМПУЛЬСНАЯ ШТАМПОВКА (ИМП)

Металлы с высокой электропроводимостью (малым электросопротивлением) – Cu, Al, латунь лучше деформируются ИМП, чем металлы с низкой электропроводимостью – сталь, титан. Они деформируются при условии покрытия их тонким слоем Cu и Al или алюминиевых прокладок в виде фольги, установленных между заготовкой и индуктором.

Выпускаются установки для штамповки ИМП: состоящие из зарядного устройства, блока-накопителя и пульта управления, мощностью 15 кДж при ра-

бочем напряжении 5 кВ. Возможности ИМП: штамповка деталей толщиной  $S$  до 1,5 мм, пробивка в них отверстий  $d_{\max}$  150 мм; формовка деталей диаметром до 1000 мм (обечайка) и длиной до 1500 мм.

Технологические параметры ИМП: мощность 40 кДж, рабочее напряжение 50 кВ.

КПД ИМП составляет 3...10 %.

*Недостатки* – низкая стойкость индукторов, большие размеры установок, специальная подготовка обслуживающего персонала, шум при электро-разряде.

## 16. ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ШТАМПОВКА (ЭГШ)

Электрогидравлической штамповкой обычно изготавливают детали из листовых заготовок толщиной 0,8...2 мм. При этом минимальные радиусы кривизны поверхности детали, как правило, составляют не менее 2...4 мм. Габаритные размеры плоских заготовок деталей сложной формы, изготавливаемых ЭГШ, достигают 1500 × 2000 мм. Глубина штампуемых деталей — до 500 ...600 мм. На специальных электрогидравлических установках с перемещаемой одной или несколькими разрядными камерами штампуют плоские крупногабаритные (до 3...3,5 м) детали с различными рифтами либо местными рельефами. Детали сложной формы штампуют за несколько переходов через эластичную диафрагму и с использованием многоэлектродных разрядных камер. Максимальные диаметр и длина оболочек, штампуемых на специализированных установках, обычно не достигают 1000 мм.

Существуют два метода преобразования электрической энергии в механическую: разряд конденсатора через зазор в жидкости и разряд конденсатора через проволочку. При ЭГШ металл деформируют периодически повторяющимися импульсами высокого давления, генерируемыми высоковольтными разрядами в жидкости или электрическим взрывом проводников.

На рис. 21 показаны схемы ЭГШ. Технологические установки выполняют с открытой (рис. 21, а) или закрытой (рис. 21, б, в) камерой (емкостью).

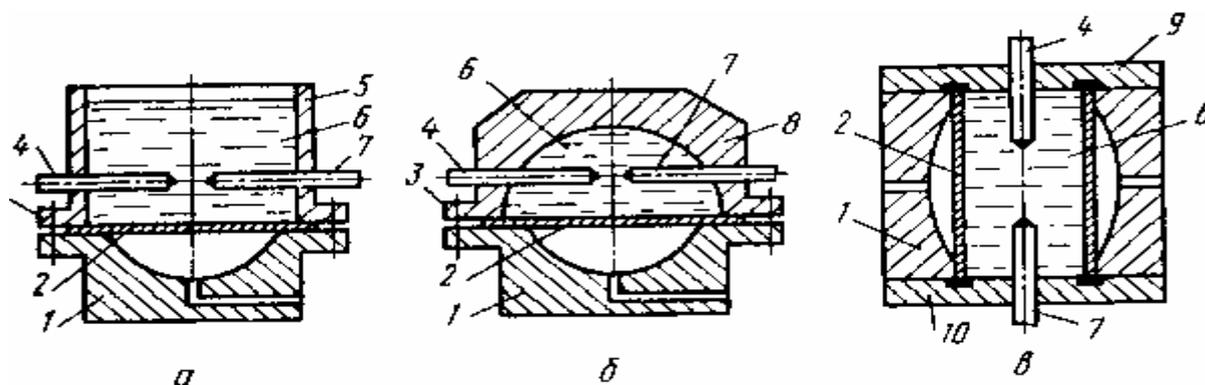


Рис. 21. Схемы электрогидравлической штамповки деталей из плоской заготовки: а – в открытой; б — закрытой камерах; в – из трубчатой заготовки в закрытой камере  
7 – матрицы; 2 – заготовки, 3 – прижимы, 4, 7 – электроды, 5, 8 – открытая и закрытая камеры, 6 – вода, 9,10 – верхняя и нижняя крышки

Листовую заготовку 2 (рис. 21, а) укладывают на матрицу 1 и с помощью устройства 3 прижимают к ней. Емкость 5 заполняют передающей средой (водопроводной водой) 6. В воде на определенном расстоянии от заготовки 2 размещают рабочие электроды 4 и 7 (положительный и отрицательный), соединенные с генератором импульсов тока электрогидравлической установки.

При высоковольтном электрическом разряде между электродами 4 и 7 возникает токопроводящий искровой канал. Расширение канала разряда приводит к возникновению в жидкости ударной волны. Под действием ударной волны, давления, образующегося при расширении парогазовой полости, и сопутствующего гидропотока, сопровождаемого кавитацией, происходит деформирование заготовки 2 по матрице 1. Коэффициент полезного действия (КПД) электрогидравлической штамповки составляет 5...20%. Наибольший КПД достигается в установках с замкнутым объемом жидкости. На рис. 21 показано размещение рабочих электродов 4 и 7 в закрытой камере 8. Электроды 4 и 7 могут быть установлены также внутри трубчатой заготовки 2, помещенной в закрытую камеру, образуемую матрицей 1 и крышками 9 и 10 (рис. 21, в).

При высоковольтном разряде в жидкости генерируются импульсы с амплитудой давления, достигающей  $10^9$  Па, и частотой 0,1...10 Гц, следствием чего являются высокая скорость деформирования листовых и трубчатых заготовок (десятки и сотни м/с) и незначительное ( $10^{-4}$ ... $10^{-5}$  с) время деформации. Несмотря на столь короткие промежутки времени деформации в материале успевают произойти такие внутренние изменения, которые влияют не только на структуру и свойства заготовки после обработки, но и на результаты технологического процесса.

Возбуждаемые при электрическом разряде ударные волны передаются от источника через жидкость к заготовке. Со звуковой скоростью они достигают поверхности заготовки, вначале воздействуя на нее перпендикулярно, а затем - по периферии. Источник ударных волн действует периодически с частотой  $\nu = 0,1...10$  Гц и может при этом перемещаться на заданный шаг по предварительно установленной программе. В результате воздействия ударной волны начинается деформирование заготовки, а в материале ее возбуждаются волны напряжений. Скорость деформирования может достигать 20...400 м/с, а волны напряжений в материале, перемещаясь со скоростью звука, быстро проходят сквозь всю толщину заготовки и до очередного импульса успевают отразиться несколько раз.

Главным фактором, определяющим фронт ударной волны при разряде через зазор в жидкости, является форма электродов и рефлекторов (отражателей).

Форма фронта ударной волны зависит от расстояния между электродами (рис. 22). При незначительном расстоянии между ними в результате разряда образуется волна со сферическим фронтом (рис. 22, а), при достаточно большом (несколько сантиметров) – волна с цилиндрическим фронтом (рис. 22, б).

Разряд через зазор в жидкости характеризуется неустойчивостью, а выходную мощность трудно регулировать. Не всегда удается повлиять на форму

ударной волны путем изменения формы электродов и отражателей.

Чтобы облегчить управление формой и амплитудой генерируемых волн давления и повысить КПД искрового промежутка, электроды закорачивают между собой проводниками в виде перемычки (мостика). Перемычку выполняют из тонкой проволоочки б, свернув ее спиралью, или из фольги (рис. 22, б, в). Благодаря этому путь электрического разряда может быть predetermined по направлению и форме. Соединяя электроды проволочкой, удается поставить параметры ударной волны в зависимость от формы разряда между электродами.

Наличие проволоочки позволяет увеличить длину разряда при одинаковых мощности установки и рабочей среде. При разряде конденсатора через проволочку превращение энергии более эффективно, так как свободный разряд и испарение жидкости заменяются «ударным» испарением проволоочки. Это явление называется *электрическим взрывом проводника*. Применение взрывающейся проволоочки дает возможность снижать рабочие напряжения, так как с ее помощью одно и то же напряжение «перекрывает» большее межэлектродное расстояние. Этим преимуществом полностью компенсируется недостаток метода, заключающийся в необходимости заменять проволочку после каждого разряда при многоразрядной штамповке деталей.

При обработке трубчатых заготовок проволочку используют для создания цилиндрической ударной волны. Применение разряда через проволочку не приводит к заметному увеличению деформации при одинаковых параметрах (запасенной энергии и емкости конденсаторов), однако в этом случае можно увеличить зазор между электродами и, как следствие, повысить равномерность раздачи трубы.

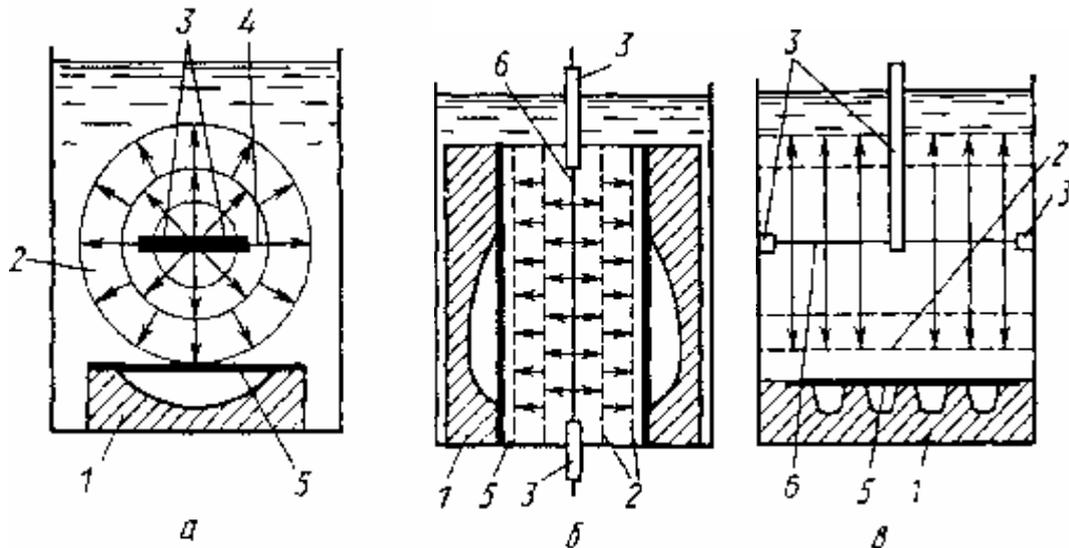


Рис. 22. Схемы формирования фронтов ударной волны  
 а — сферического; б — цилиндрического; в — плоского:  
 1 — матрицы, 2 — фронты ударной волны, 3 — электроды,  
 4 — разрядные промежутки, 5 — заготовки, 6 — взрывающиеся проволочки

Применение взрывающейся проволочки позволяет увеличить расстояние между электродами до 300 мм и более, при этом влияние проводимости жидкости на возникновение разряда значительно уменьшается.

## 17. ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ МЕТОДЫ ШТАМПОВКИ

Штамповку деталей традиционными (статическими) методами выполняют на гидравлических, фрикционных, эксцентриковых и кривошипных прессах, ковочных машинах и молотах. Развитие кузнечно-прессового оборудования (увеличение его кинетической энергии) в основном осуществлялось за счет роста мощностей привода, габаритных размеров и массы маховиков, подвижных и ударных частей, а также штамповой оснастки прессов и молотов при сравнительно небольших (0.1...6 м/с) скоростях деформирования металла.

При высокоскоростном деформировании металла увеличение мощности (энергии) процесса осуществляется за счет высокой скорости (50...300 м/с) преобразования энергии, что является основным отличием этого метода штамповки от статических методов. К высокоскоростным деформирующим процессам обработки металлов относятся: штамповка взрывом, электрогидравлическая штамповка, магнитно-импульсная штамповка.

В большинстве случаев эти процессы осуществляются с применением упрощенной штамповой оснастки (без пуансона или матрицы), что является их важным преимуществом. Несложность оснастки, ее низкая стоимость по сравнению с инструментальными штампами, применяющимися при обработке металлов статическими методами, а также возможность осуществления без применения мощного (энергоемкого) прессового оборудования обеспечивают эффективное использование высокоскоростных методов штамповки деталей.

фективное использование высокоскоростных методов штамповки деталей. Эти преимущества особенно проявляются при изготовлении крупногабаритных деталей из труднодеформируемых сталей и сплавов в опытном и мелкосерийном производстве.

К преимуществам высокоскоростных методов штамповки можно отнести также сравнительно небольшие затраты на организацию производственного участка: оснащение, эксплуатацию установок, ускорение сроков подготовки производства, обеспечивающее мобильность последнего при изготовлении крупногабаритных, сложных деталей из труднодеформируемых сталей и др.

С помощью взрыва и магнитно-импульсной обработки можно не только изготавливать листовые и трубчатые детали, но и выполнять операции плакирования и сварки металлов, штамповки металлокерамики, получать неразъемные соединения (например, при сборке деталей), осуществление которых другими методами невозможно или неэкономично. В процессе высокоскоростной штамповки отмечается увеличение прочностных характеристик ( $\sigma_v$ ,  $\sigma_T$ , НВ) — металл значительно упрочняется. Кроме того, отсутствует (уменьшается) пружинение при формообразовании труднодеформируемых металлов с одновременным повышением их пластичности, что обеспечивает получение точных форм и размеров сложных деталей.

К недостаткам высокоскоростных процессов обработки следует отнести: специфические, а иногда и довольно сложные требования безопасности при выполнении штамповки взрывом и использовании мощных электрических разрядов; трудности реорганизации сложившегося машиностроительного производства; недостаточность информации об экономичности и результатах внедрения этих процессов в производство; сравнительно высокая стоимость пороховых и бризантных зарядов и сложность расчета взрывных разрядов; возможность местных разрушений штампуемых металлов. В связи с этим высокоскоростные методы штамповки не заменяют полностью традиционные методы, особенно в массовом и серийном производстве.

Одним из высокоскоростных методов штамповки является штамповка взрывом, характеризуемая высоким давлением, прикладываемым к заготовке в течение тысячных долей секунды. С ее помощью выполняют вытяжку, отбортовку, раздачу и обжим труб, формовку ребер жесткости, калибровку, правку, вырубку и другие операции.

При штамповке взрывом заряд размещают либо на поверхности заготовки (при этом взрывная волна непосредственно воздействует на заготовку), либо на некотором расстоянии от нее (в этом случае энергия взрыва передается через промежуточную среду: газ, жидкость, песок и др.).

Основными достоинствами штамповки взрывом являются следующие: низкая стоимость оснастки; небольшие капитальные затраты; сокращение числа технологических переходов; высокая точность обработки; возможность изготовления деталей сложной формы из труднодеформируемых и хрупких сплавов. К недостаткам относятся неэкономичность при большом объеме производства, трудность управления процессом, опасность и неудобство работы с взрывчатым веществом. Вследствие этого штамповку взрывом применяют только при изготовлении опытных или единичных образцов, а также в тех случаях, когда нельзя применить штамповку на прессе, например для получения тонкостенных деталей (особенно деталей больших габаритных размеров).

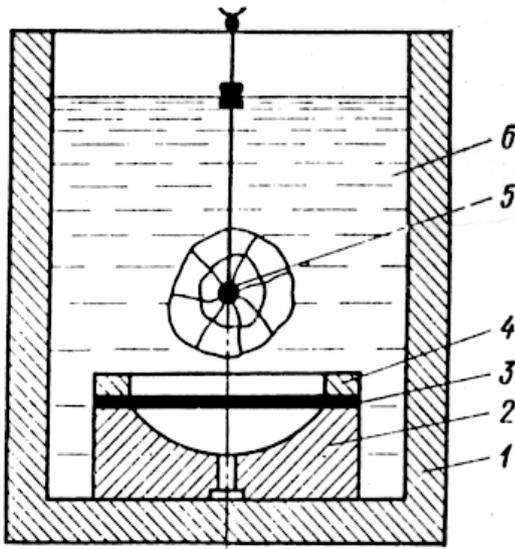


Рис. 24. Схема штамповки взрывом:  
1 – бассейн; 2 — матрица; 3-заготовка;  
4 - прижимное кольцо; 5 - заряд ВВ;  
6 - промежуточная среда

При штамповке взрывом (рис. 24) заготовка деформируется ударной волной полусферического фронта. Заготовку 3 укладывают на матрицу 2 и прижимают к зеркалу матрицы прижимом 4, чтобы уменьшить возможность складкообразования. Пространство между матрицей 2 и заготовкой 3 должно быть разреженным, поэтому воздух из матриц выкачивают вакуум-насосом. Над заготовкой 3 помещают заряд взрывчатых веществ (ВВ) 5 и установку заливают водой в бассейне 1.

При взрыве заряда образуются газы. Высокое давление возникшего газового шара вызывает появление в воде ударной волны, давление которой через слой воды передается на поверхность заготовки. Часть энергии ударной волны расходуется на ускорение заготовки, часть — на пластическую деформацию. Масса заряда определяется с учетом расстояния до заготовки, вида взрывчатых веществ, диаметра, толщины и материала заготовки, а также глубины штамповки.

Расширение образовавшихся при взрыве газов тормозится инерционными силами частиц воды. При этом слой воды, окружающий газовый шар, получает импульс, возбуждающий первичную ударную волну, во фронте которой существует очень высокое давление. В ударную волну переходит до 40 % энергии взрыва. Таким образом, энергия сконцентрирована в тонком слое воды. Большая часть энергии взрыва остается в газовом шаре, который вновь расширяется (но менее интенсивно) после возникновения первичной ударной волны. Предполагается также, что газовый шар пульсирует, т. е. сжимается и расширяется. При его повторных расширениях возникает вторичная ударная волна, однако с меньшей энергией. В конце процесса газы поднимаются к поверхности воды.

Расширение образовавшихся при взрыве газов тормозится инерционными силами частиц воды. При этом слой воды, окружающий газовый шар, получает импульс, возбуждающий первичную ударную волну, во фронте которой существует очень высокое давление. В ударную волну переходит до 40 % энергии взрыва. Таким образом, энергия сконцентрирована в тонком слое воды. Большая часть энергии взрыва остается в газовом шаре, который вновь расширяется (но менее интенсивно) после возникновения первичной ударной волны. Предполагается также, что газовый шар пульсирует, т. е. сжимается и расширяется. При его повторных расширениях возникает вторичная ударная волна, однако с меньшей энергией. В конце процесса газы поднимаются к поверхности воды.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Схема продольно-периодической прокатки.
2. Схемы поперечно-клиновой, поперечно-винтовой прокатки.
3. Основные дефекты прокатки листа и сортового проката.
4. Номенклатура деталей радиальной раскатки.
5. Назначение и схема раздачи заготовок.
6. Виды безотходной штамповки деформирующимся металлом.
7. Назначение и режимы лазерной технологии обработки деталей.
8. Штампы при производстве поковок из жидкого металла.
9. Объемная изометрическая штамповка.
10. Область применения сверхпластичности при штамповке.
11. Технологические режимы процессов штамповки в состоянии сверхпластичности.
12. Технологические схемы накатки зубчатых профилей и резьб.
13. Технологические схемы торцовой раскатки.
14. ИПМ ЭГШ при изготовлении деталей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специальные способы процессов ОМД экономически целесообразны в мелкосерийном и серийном производствах при изготовлении заготовок и деталей сложной пространственной формы из малопластичных материалов, в том случае, когда использование классических способов и методов ОМД оказывается либо не эффективным, либо невозможным. Рассмотренные специальные способы ОМД позволяют существенно расширить технологические возможности промышленных предприятий при изготовлении широкой номенклатуры деталей.