

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «САМАРСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

## **Инновационные процессы обработки металлов давлением с большими интенсивными пластическими деформациями в прокатно-прессовом производстве**

Электронный учебно-методический комплекс дисциплины

Работа выполнена по мероприятию блока 1 «Совершенствование образовательной деятельности» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка магистерской программы и образовательных контентов «Структурирование сплавов до наноуровневого размера в металлургических циклах с применением инновационных технологий способов литья и обработки металлов давлением с воздействием электромагнитных источников» Соглашение № 1/11 от 03 июня 2013 г.

САМАРА 2013

УДК 662.2.8  
И 665

Автор-составитель: **Ерисов Ярослав Александрович**

**Инновационные процессы обработки металлов давлением с большими интенсивными пластическими деформациями в прокатно-прессовом производстве** [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс дисциплины / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. Я. А. Ерисов. - Электрон. текстовые и граф. дан. - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В состав учебно-методического комплекса входят:

1. Курс лекций.
2. Методические указания к лабораторным работам.
3. Методические указания к практическим занятиям.

УМКД «Инновационные процессы обработки металлов давлением с большими интенсивными пластическими деформациями в прокатно-прессовом производстве» предназначен факультета, обучающихся по направлению подготовки магистров 150400.68 «Металлургия» в А семестре.

УМКД разработан на кафедре обработки металлов давлением.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

Я. А. Ерисов

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ  
ДАВЛЕНИЕМ С БОЛЬШИМИ ИНТЕНСИВНЫМИ  
ПЛАСТИЧЕСКИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ В ПРОКАТНО-  
ПРЕССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

**Электронный конспект лекций**

САМАРА 2013

УДК 662.2.8  
Е 714

Автор: **Ерисов Ярослав Александрович**

**Ерисов, Я.А. Инновационные процессы обработки металлов давлением с большими интенсивными пластическими деформациями в прокатно-прессовом производстве [Электронный ресурс]: электрон. конспект лекций / Я.А. Ерисов; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т) - Электрон. текстовые и граф. дан. ( 3,81 Мбайт). - Самара, 2013.**

Рассмотрены современные методы получения ультрамелкозернистых и наноструктурных металлических материалов на основе процессов обработки металлов давлением с большими пластическими деформациями в прокатно-прессовом производстве. Приведены классификация наноматериалов, их физико-механические свойства и возможные области их применения.

Лекции предназначены для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по магистерской программе «Структурирование сплавов до наноуровневого размера в металлургических циклах с применением инновационных технологий способов литья и обработки металлов давлением с воздействием электромагнитных источников» по направлению подготовки 150400.68 «Металлургия» (ФГОС-3), изучающих дисциплину «Инновационные процессы обработки металлов давлением с большими интенсивными пластическими деформациями в прокатно-прессовом производстве» в А семестре.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ.....	6
1.1 Основные понятия и определения .....	6
1.2 Классификация наноматериалов.....	6
1.3 Современные методы получения объемных наноструктурных материалов	10
1.3.1 Порошковые технологии.....	11
1.3.2 Методы интенсивной пластической деформации.....	13
2 МЕТОДЫ ИПД ОСНОВЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ .....	17
2.1 Сущность процесса прессования .....	17
2.2 Равноканальное угловое прессование .....	17
2.2.1 РКУП с противодавлением .....	22
2.2.2 РКУП с вращающейся оснасткой .....	24
2.2.3 РКУП в многоканальной оснастке .....	25
2.3 «Винтовое» прессование.....	29
2.4 Прессование через матрицу «песочные часы».....	31
2.5 Прессование со сдвигом .....	34
3 МЕТОДЫ ИПД НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ.....	37
3.1 Сущность процесса прокатки .....	37
3.2 Косовалковая прокатка .....	38
3.3 Продольная прокатка с поперечным сдвигом.....	39
3.4 Прокатка в рифленых валках.....	40
3.5 Знакопеременный изгиб.....	42
3.6 Асимметричная прокатка .....	43
3.7 Аккумулирующая прокатка с соединением .....	44
4 МЕТОДЫ ИПД НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ.....	48
4.1 Конформ-процесс .....	48
4.1.1 РКУП-конформ-процесс.....	50
4.1.2 Непрерывный ограниченный полосовой сдвиг .....	51
4.2 Экстроллинг-процесс.....	52
4.2.1 Асимметричный экстроллинг-процесс .....	53
4.2.2 Экстроллинг-процесс с матрицей для РКУП.....	56
4.2.3 Неравноканальное угловое прессование-прокатка .....	57
4.3 Непрерывное РКУП .....	57
5 СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	59
5.1 Структура и свойства УМЗ материалов .....	59
5.1.1 Структурные особенности материалов после ИПД .....	60
5.1.2 Механические свойства материалов после ИПД.....	63
5.2 Применение наноматериалов в технике .....	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	69
СПИСОКЛИТЕРАТУРЫ.....	70

## ВВЕДЕНИЕ

Сегодня во многих отраслях наблюдается интенсивное развитие исследований в области «нанотехнологий». В металлургическом производстве это является реакцией на состояние, близкое к исчерпыванию возможностей создания требуемых свойств у сплавов традиционными методами. Еще великий русский металлург Д.К. Чернов указывал, что в литом металле можно получить свойства деформированного металла, если создать при затвердевании ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру. Таким образом, минимизация зерна – это путь к возможной отмене всех процессов обработки металлов давлением вообще.

Уменьшение размеров частиц, составляющих объект, придает ему в целом новые свойства. Это вызвано: во-первых, влиянием развитых границ, т.к. приграничные условия отличаются от внутризеренных; а во-вторых, отсутствием внутри зерна условий, которые проявляются в большом объеме. Поэтому наноразмеры зерен способны придать при сохраняющемся химическом составе существенно новые качества тому же самому сплаву.

В настоящее время еще не изучен действительный тонкий механизм указанного влияния. Но некоторые проявления в виде отдельных аномально высоких свойств обнаруживаются. Поэтому предсказания Д.К. Чернова сбываются и проявляются в виде развития нового мощного направления – создания объемных наноструктурированных кристаллических материалов.

Получение металлических наноматериалов в виде заготовок с объемом, достаточным для производства изделий, может быть осуществлено тремя путями: компактированием порошков с наноразмерными частицами, интенсивной пластической деформацией и специальными способами литья.

Наиболее привлекательным способом получения объемных нанокристаллических материалов является интенсивная пластическая деформация (ИПД), которая заключается в многократном деформировании обрабатываемых материалов в условиях близких к простому сдвигу. Основными методами, с помощью которых достигаются большие деформации, приводящие к заметному измельчению зерна без разрушения образца, являются проглаживание поверхности твердым

индентором, кручение под высоким давлением, равноканальное угловое прессование, всесторонняя ковка, «винтовое» прессование и т.д.

С одной стороны, вышеперечисленные методы интенсивной пластической деформации позволяют наряду с уменьшением среднего размера зерна получать массивные образцы с практически беспористой структурой, что невозможно достичь компактированием высокодисперсных порошков. С другой – их основным недостатком является низкая производительность, что сдерживает промышленное производство изделий с достоинствами свойств, присущих наноструктуре.

Поэтому в последние годы широкое применение приобрели высокоэффективные способы получения УМЗ материалов на основе процессов прокатки и прессования.

# 1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

## 1.1 Основные понятия и определения

Термин «нанотехнология» впервые был использован японским ученым К. Танигучи в 1974 г. при обсуждении проблем обработки хрупких материалов. Принципиальное значение малоразмерных объектов было подчеркнуто нобелевским лауреатом Р.Фейнманом в 1959 г.. Его лекция с аллегорическим названием «Внизу полным полно места: приглашение в новый мир физики» акцентировала внимание на важность работ в области сжатия информации, создания миниатюрных компьютеров, дизайна материалов и устройств методами молекулярной архитектуры с учетом особенностей биологических объектов.

Концепция наноматериалов впервые были сформулированы применительно к металлическим материалам Г.Глейтером (1981 г.); им же был введен термин «нанокристаллические» материалы (НК), позже стали использоваться такие термины, как «наноструктурные». Главная роль согласно этой концепции была отведена поверхностям раздела (границам зерен) как фактору, позволяющему существенно изменить свойства твердых тел путем модификации структуры.

В настоящее время *к наноматериалам* условно относят дисперсные и массивные материалы, содержащие структурные элементы (зерна, кристаллиты, блоки, кластеры), геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками.

К *нанотехнологиям* можно отнести технологии, обеспечивающие возможность контролируемым образом создавать и модифицировать наноматериалы, а также осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба.

## 1.2 Классификация наноматериалов

Наноматериалы условно разделяют на четыре категории (Балоян, Б.М., и др., 2007), рис. 1.

Первая категория включает материалы в виде твердых тел, размеры которых в одном, двух или трех пространственных координатах не превышают 100 нм. К таким материалам можно отнести наноразмер-

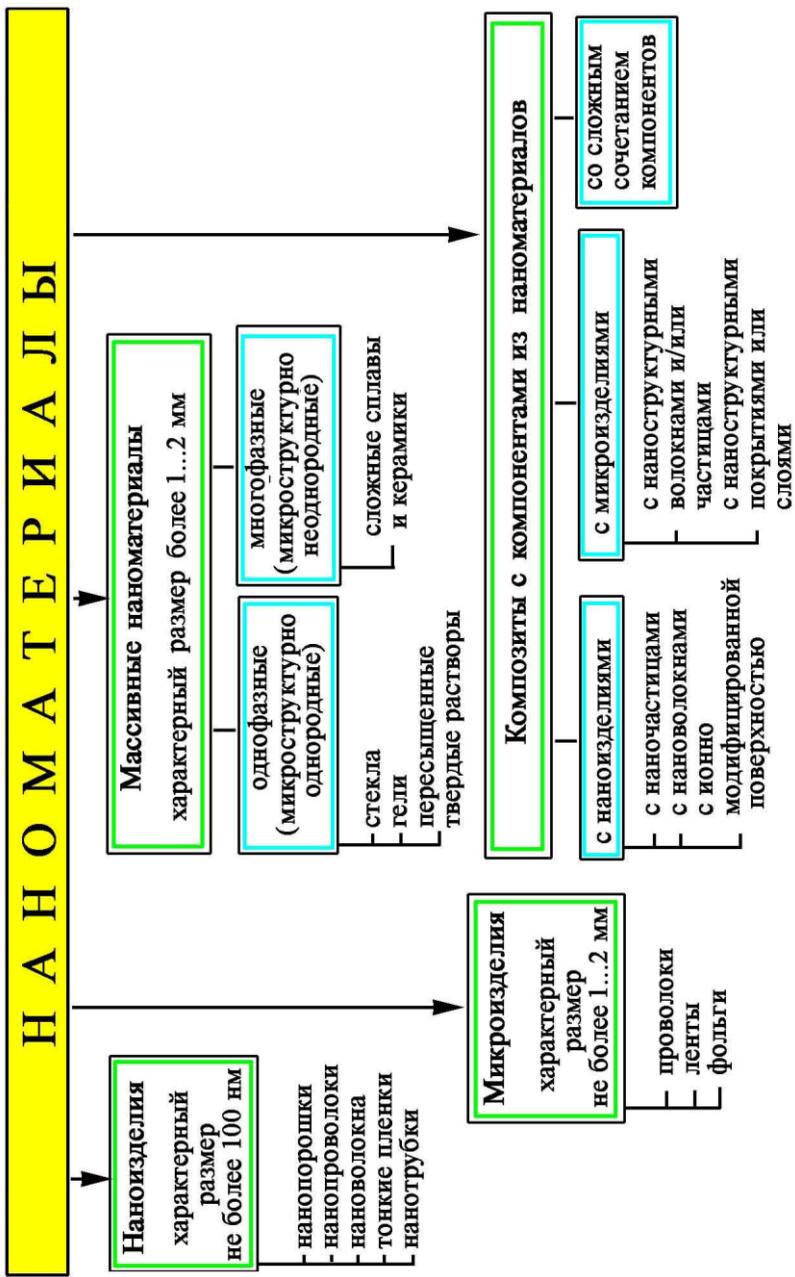


Рис. 1. Классификация наноматериалов(Балоян, Б.М., и др., 2007)

ные частицы (нанопорошки), нанопроволоки и нановолокна., очень тонкие пленки (толщиной менее 100 нм), нанотрубки и т.п. Первую категорию можно классифицировать как наноматериалы с малым числом структурных элементов или наноматериалы в виде nanoизделий.

Вторая категория включает в себя материалы в виде малоразмерных изделий с характеризующим размером в примерном диапазоне 1 мкм - 1 мм. Обычно это проволоки, ленты, фольги, т.е. наноматериалы в виде микроизделий.

Третья категория представляет собой массивные (или иначе объемные) наноматериалы с размерами изделий из них в макродиапазоне (более нескольких мм). Такие материалы состоят из очень большого числа наноразмерных элементов (кристаллитов) и фактически являются поликристаллическими материалами с размером зерна 1-100 нм. В свою очередь третью категорию наноматериалов можно разделить на два класса. В первый класс входят однофазные материалы: стекла, гели, пересыщенные твердые растворы. Ко второму классу можно отнести микроструктурно неоднородные материалы, которые состоят из наноразмерных элементов (кристаллитов, блоков) с различной структурой и/или составом. Это многофазные материалы, например, на основе сложных металлических сплавов.

К четвертой категории относятся композиционные материалы, содержащие в своем составе компоненты из наноматериалов. При этом в качестве компонентов могут выступать наноматериалы, отнесенные к первой и/или второй категорий.

В свою очередь свойства массивных консолидированных наноматериалов (третьей категории) в значительной степени определяются характером распределения, формой и химическим составом кристаллитов (наноразмерных элементов), из которых они состоят. В связи с этим принято классифицировать структуры таких наноматериалов по этим признакам (рис. 2).

По форме кристаллитов наноматериалы можно разделить на слоистые (пластинчатые), волокнистые (столбчатые) и равноосные. Разумеется толщина слоя, диаметр волокна и размер зерна при этом принимают значения порядка 100 нм и менее. Исходя из особенностей химического состава кристаллитов и их границ обычно выделяют четыре группы наноматериалов. К первой относят такие материалы, у которых химический состав кристаллитов и границ раздела одинаковы. Их называют также однофазными. Примерами таких материалов

Хим. состав Форма	Состав и распределение			
	Однофазный	Многофазный		
		Статистическое		Матричное
		Идентичные границы	Неидентичные границы	
Пластинчатая				
Столбчатая				
Равноосная				

Рис. 2. Классификация консолидированных наноматериалов по составу, распределению и форме структурных составляющих

являются чистые металлы с нанокристаллической равноосной структурой и слоистые поликристаллические полимеры. Ко второй группе относят материалы, у которых состав кристаллитов различается, но границы являются идентичными по своему химическому составу. Третья группа включает наноматериалы, у которых как кристаллиты, так и границы, имеют различный химический состав. Четвертую группу представляют наноматериалы, в которых наноразмерные выделения (частицы, волокна, слои) распределены в матрице, имеющей другой химический состав. К этой группе относятся в частности дисперсно-упрочненные материалы.

Однако реальное разнообразие структурных типов может быть и более широким за счет смешанных вариантов, наличия пористости, трубчатых и луковичных структур, полимерных составляющих и т.д.

### 1.3 Современные методы получения объемных наноструктурных материалов

Для получения объемных нанокристаллических материалов используют ряд методов, которые по основному физическому процессу можно разделить на четыре группы (табл. 1):

- 1) компактирование нанопорошков (метод порошковой металлургии);
- 2) интенсивная пластическая деформация;
- 3) кристаллизация из аморфного состояния;
- 4) формирование высокопористых структур, пленок и покрытий (слоистые гидроксиды, мезопористые молекулярные сита).

Разумеется, эта классификация условна, поскольку границы между отдельными методами, как правило, размыты. Так, при проведении интенсивной пластической деформации или при нанесении покрытий часто в виде исходного сырья используют порошки, т.е. эти методы могут быть отнесены и к порошковой технологии. Стоит также упомянуть такие методы получения наноструктур, как облучение большими дозами нейтронов и ионов, интенсивную деформацию при трении и др.

Табл. 1. Методы получения объемных наноструктурных материалов

Метод	Вариант метода	Объекты
Порошковая технология	Газофазное осаждение и компактирование. Обычное прессование и спекание. Электроразрядное спекание. Горячая обработка давлением (горячее прессование, ковка, экструзия).	Металлы, сплавы, керамика, металлокерамика, композиты
Интенсивная пластическая деформация	Деформация кручением при высоких давлениях. Равноканальное угловое прессование. Всесторонняя ковка. Обработка давлением многослойных композитов. Фазовый наклеп.	Пластичные металлы и сплавы
Контролируемая кристаллизация из аморфного состояния	Кристаллизация при обычном давлении. Кристаллизация при повышенном давлении.	Аморфные вещества
Технология пленок и покрытий	Химическое осаждение из газовой фазы. Физическое осаждение из газовой фазы. Электроосаждение. Зольгельтехнология.	Металлы, сплавы, соединения

### 1.3.1 Порошковые технологии

К настоящему времени наибольшее распространение среди перечисленных методов получения объемных наноструктурных материалов получило компактирование порошков, которые получают разными способами. Среди них ультрадисперсные порошки, полученные газовой конденсацией в атмосфере инертного газа или плазмохимическим методом, аэрозольными химическим синтезом, а также измельчением порошков в шаровой мельнице и др. Некоторые из этих методов были успешно использованы для создания объемных наноструктурных материалов. Это, прежде всего, газовая конденсация с последующим компактированием и обработка порошков в шаровой мельнице с последующей консолидацией.

Технология компактирования нанопорошков включает две основные операции: прессование нанопорошков и последующее спекание полученных прессовок. Компактированию подвергаются нанопорошки металлов и керамики, которые обычно имеют средние размеры от 1-2 нм до 80-100 нм – в зависимости от способа синтеза. Обычно обработка осуществляется в атмосфере инертного газа или в вакууме.

Образцы, полученные компактированием нанопорошков, являются пористыми. Снижение пористости может быть обеспечено за счет повышения уплотняемости нанопорошков, которая оценивается их способностью уменьшать занимаемый объем под воздействием давления. Уплотняемость нанопорошков тем выше, чем выше их дисперсности, т.е. чем меньше размеры составляющих их наночастиц. С другой стороны, с повышением дисперсности уменьшается прессуемость нанопорошков, которая оценивается их способностью образовывать под воздействием давления тело с заданными размерами, формой и плотностью. Физической причиной плохой прессуемости нанопорошков являются межчастичные адгезионные силы, величина которых возрастает с уменьшением размера наночастиц.

При реализации этой технологии необходимо избегать укрупнения зерен на стадии спекания. Причиной укрупнения зерен является рекристаллизация, заключающаяся в переносе вещества при общей границе с частицы меньшего размера на частицу большего размера, который происходит путем перемещения атомов через межчастичные границы в сторону частиц с меньшей свободной энергией. С ростом межчастичных контактов границы получают возможность более активно

передвигаться (прорасти) из одной частицы в другую. Такая межчастичная рекристаллизация в значительной мере зависит от размера частиц нанопорошка, так как с его уменьшением также уменьшается размер пор в порошковом теле и вместе с тем увеличивается их тормозящее действие на движение межчастичных границ.

Для снижения пористости и предотвращения нежелательного укрупнения зерен необходимо обеспечивать высокую плотность прессовок, что позволяет проводить их спекание при относительно низкой температуре  $T < 0,5 T_{пл}$  ( $T_{пл}$  – температура плавления), которая еще не вызывает интенсивной рекристаллизации материала.

Разновидностью технологии компактирования нанопорошков является горячее прессование, при котором прессование и спекание осуществляются одновременно.

Для компактирования нанопорошков весьма эффективно использовать методы импульсного прессования, которые имеют ряд преимуществ по сравнению со статическими методами, основанными на применении прессового оборудования преимущественно гидравлического типа. Методы импульсного прессования обеспечивают высокие скорости приложения нагрузок (5-10 м/с и выше) и, как следствие, малую продолжительность процесса уплотнения порошка (тысячные доли секунды). При этом благодаря чрезвычайно высокому давлению достигаются большие плотности прессовок (вплоть до 100%).

В зависимости от вида источника энергии, обеспечивающего высокие скорости приложения нагрузок, различают взрывное, электрогидравлическое и электромагнитное прессование. Взрывное прессование основано на использовании заряда взрывчатых веществ. Процесс электрогидравлического прессования заключается в инициировании электрического разряда в жидкости, который вызывает ее быстрое испарение, сопровождающееся возникновением ударных волн. При электромагнитном прессовании используется энергия мощного импульсного магнитного поля.

В целом, методы порошковой технологии явились основой для многочисленных исследований структуры и свойств нанокристаллических и нанофазных материалов. Вместе с тем до сих пор существуют проблемы в развитии этих методов, связанные с сохранением некоторой остаточной пористости при компактировании, загрязнением образцов при подготовке порошков или их консолидации, увеличе-

нием геометрических размеров получаемых образцов, практическим использованием данных методов.

С другой стороны, беспористые наноструктурированные материалы можно получить кристаллизацией из аморфного состояния, но этот метод пригоден только для сплавов, которые можно закалить из расплава в аморфное состояние. Кристаллизацию аморфных сплавов проводят при обычном и высоком давлении, совмещая с деформационной обработкой.

Кроме того, технология интенсивного пластического деформирования также позволяет получать массивные образцы практически беспористых нанокристаллических материалов, чего не удастся достичь компактированием нанопорошков.

### **1.3.2 Методы интенсивной пластической деформации**

Многие из упомянутых проблем могут быть преодолены при использовании методов обработки, получивших название интенсивной пластической деформацией (ИПД). Задачей методов ИПД является формирование наноструктур в массивных металлических образцах и заготовках путем измельчения их микроструктуры до наноразмеров.

Пластическая деформация известна как эффективное средство формирования структуры металлов, сплавов и некоторых других материалов. В процессе деформации повышается плотность дислокаций, происходит измельчение зерна, возрастёт концентрация точечных дефектов и дефектов упаковки. Совокупность этих изменений способствует образованию специфической микроструктуры. Однако полученные структуры являются обычно ячеистыми структурами или субструктурами, имеющими границы с малоугловыми разориентировками. Вместе с тем рассматриваемые наноструктуры являются УМЗ структурами зеренного типа, содержащими преимущественно большеугловые границы зерен.

Таким образом, традиционные процессы пластической деформации, такие, как прокатка, волочение, прессование, ковка и др., не обеспечивают эффективного решения задач структурообразования. Более того при реализации этих методов ресурс пластичности в значительной степени исчерпывается непосредственно в процессе деформации, вследствие чего обработанные материалы обладают низкой пластичностью, а эффекты деформации реализуются лишь частично. Возможность достижения высокой интенсивности деформации при

таких процессах связана с многократным уменьшением поперечных размеров обрабатываемых изделий, что, в свою очередь, приводит и к значительным давлениям обработки и проблематичности получения высоких свойств в больших сечениях.

Недостатки традиционных процессов обработки стимулируют поиск и разработку новых схем пластического деформирования, позволяющих более полно реализовать возможность пластической деформации как одного из наиболее эффективных средств формирования структуры металлов и сплавов.

Основным механизмом пластической деформации является сдвиг, поэтому однородность напряженного и деформированного состояний можно обеспечить, если направления и интенсивность сдвига совпадают по всему деформируемому объему.

Схема простого сдвига обеспечивает возможность многократного циклического деформирования путем изменения направления действия касательных напряжений на границах деформируемого объема после очередного цикла обработки. Это позволяет достигать сколь угодно высоких значений интенсивности накопленных деформаций, причем на каждом цикле деформирования можно обеспечить заданную величину сдвига.

Важная особенность простого сдвига – неизменность в процессе деформирования сечения, перпендикулярного плоскости течения. Это создает определенные перспективы для пластического деформирования изделий больших поперечных сечений.

В целом, достижению больших степеней деформации без разрушения образца способствуют следующие условия:

- 1) неизменность начального и конечного поперечного сечения образца;
- 2) приближение деформации к простому сдвигу;
- 3) знакопеременность деформации;
- 4) высокие давления.

Для создания наноструктур необходимо достичь очень больших деформаций (истинная степень деформации  $\epsilon = 7-10$ ) при относительно низких температурах ( $T < (0,3-0,4) T_{пл}$ ) в условиях высоких приложенных давлений. Однако следует, отметить, что диапазон размеров зерен материалов, получаемых методами ИПД, как правило, составляет все же более 100 нм.

Для реализации указанных вышеусловий были использованы и развиты специальные схемы механического деформирования, позволяющих достичь больших деформаций материалов при относительно низких температурах, а также определение оптимальных режимов обработки материалов. К настоящему времени большинство результатов получено с использованием двух методов ИПД – кручения под высоким давлением и равноканального углового (РКУ) прессования. Имеются также работы по получению нано- и субмикроструктур в ряде металлов и сплавов путем использования всесторонней ковки, РКУ-вытяжки, метода «песочных часов», мультиосевой деформации и др.

Перечисленные схемы ИПД можно разделить на две группы. В первой невозможны большие гидростатические давления. Это мультиосевая деформация, знакопеременный изгиб и аккумулируемая прокатка соединением Ко второй группе, использующей высокие гидростатические давления, можно отнести кручение под гидростатическим давлением, винтовое прессование и равноканальное угловое прессование.

Схемы ИПД из первой группы обычно используются в условиях теплой деформации и способствуют в основном получению субмикроструктурной структуры (100 нм – 1 мкм). При реализации схем ИПД второй группы возможно формирование нанокристаллической структуры (< 100 нм).

В настоящее время наноструктура в ходе ИПД получена на алюминии, железе, магнии, вольфраме, никеле, титане и их сплавах. Такая структура приводит к изменению физических и механических свойств материалов (значительное повышение прочности при хорошей пластичности, повышение износостойкости, проявление высокоскоростной и низкотемпературной сверхпластичности).

С одной стороны, вышеперечисленные методы интенсивной пластической деформации позволяют наряду с уменьшением среднего размера зерна получать массивные образцы с практически беспористой структурой, что невозможно достигнуть компактированием высокодисперсных порошков. В том числе, технологию интенсивного пластического деформирования также можно использовать для прессования металлических порошков. С другой – их основным недостатком является низкая производительность, что сдерживает промышленное

производство изделий с достоинствами свойств, присущих наноструктуре.

Поэтому в последние годы широкое применение приобрели высокоэффективные способы получения УМЗ материалов на основе процессов прокатки и прессования.

В целом, можно сформулировать несколько требований к методам ИПД, которые следует учитывать при их развитии для получения наноструктур в объемных образцах и заготовках. Это, во-первых, важность получения УМЗ структур, имеющих преимущественно большеугловые границы зерен, поскольку именно в этом случае происходит качественное изменение свойств материалов. Во-вторых, формирование наноструктур, однородных по всему объему образца, что необходимо для обеспечения стабильности свойств полученных материалов. В-третьих, образцы не должны иметь механических повреждений или разрушений несмотря на их интенсивное деформирование.

## 2 МЕТОДЫ ИПД ОСНОВЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ

### 2.1 Сущность процесса прессования

Прессование – это процесс выдавливания металла из замкнутого объема контейнера через отверстие по форме изделия. Схема процесса прессования приведена на рис. 3.

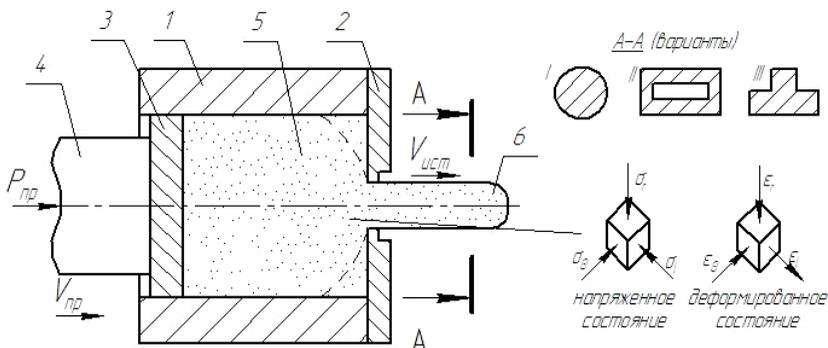


Рис. 3. Прямое прессование: 1 – контейнер; 2 – матрица; 3 – прессшайба; 4 – прессштемпель; 5 – заготовка (слиток); 6 – изделие

Осуществляя давление на заготовку, помещенную в контейнер, по всему объему заготовки создают всестороннее неравномерное сжатие, которое благоприятно для деформирования любых материалов. Поэтому, прессованием изготавливают изделия, как из пластичных, так и из малопластичных и хрупких материалов. Схема напряженного состояния – всестороннее неравномерное сжатие – является важнейшим достоинством процесса.

Деформация простого сдвига, являющаяся основной чертой методов ИПД, достигается специальными методами прессования: при равноканальном угловом прессовании, «винтовом» прессовании, «сдвиг»-прессовании, прессовании через матрицу с профилем «песочные часы» и т.д. Следует заметить, что эти способы прессования в настоящее время нуждаются в отработке на промышленном уровне и являются перспективными в реализации.

### 2.2 Равноканальное угловое прессование

Способ равноканального углового прессования (РКУП), реализующий деформацию массивных образцов простым сдвигом, был разработан В.М. Сегалом в 70-х годах для того, чтобы подвергать мате-

риалы пластическим деформациям без изменения поперечного сечения образцов, что создает возможность для их повторного деформирования. В начале 90-х годов Р.З. Валиевым данный способ был развит и впервые применен как метод ИПД для получения УМЗ структур (Валиев, и др., 2007).

При реализации РКУП заготовка неоднократно продавливается в специальной оснастке через два канала с одинаковыми поперечными сечениями, пересекающимися обычно под углом  $90^\circ$ - $150^\circ$  (рис. 4). Метод позволяет формировать УМЗ структуру со средним размером зерен в диапазоне от 200 до 500 нм.

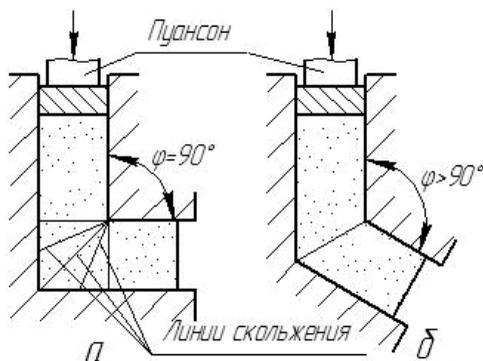


Рис. 4. Схема равноканального углового прессования

Когда внешний угол  $\Psi = 0^\circ$ , а внутренний угол  $\Phi$  произволен (рис. 5), величину степени деформации  $e_i$  при сдвиге в ходе каждого цикла прессования может быть определена по формуле (Валиев, и др., 2000):

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg} \Phi / 2 \quad (1)$$

Как следует из зависимости (1), наиболее целесообразно использование углов  $\Phi$ , близких к  $90^\circ$ , при которых достигается самый высокий уровень интенсивности деформаций. С увеличением угла пересечения каналов  $\Phi$  степень достигаемой деформации уменьшается. Это значит, что если один проход при угле пересечения каналов  $90^\circ$  даст степень деформации близкую к 1,15, то такая же степень деформации может быть достигнута при двух проходах с углом пересечения каналов  $125^\circ$ .

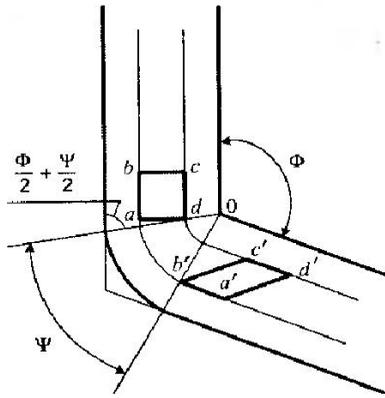


Рис. 5. Принцип РКУП:  $abcd$  – элементарный объем материала до и после РКУП;  $\Phi$  и  $\Psi$  – внутренний и внешний углы

Поскольку при РКУП заготовка продавливается через пересекающиеся каналы несколько раз, та накопленная степень деформации будет равна:

$$e_{\Sigma} = N e_i \quad (2)$$

где  $N$  – число циклов.

Более общее соотношение, позволяющее рассчитывать степень деформации образца за один проход РКУП, имеет следующий вид (Валиев, и др., 2007):

$$e_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2 \operatorname{ctg} \left( \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left( \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (3)$$

Для оценки значений возможных степеней деформации, достигаемых при РКУП, можно привести пример сравнения интенсивности деформации сдвига для РКУП и волочения. Восемь проходов при РКУП с углом пересечения каналов  $90^\circ$  дает интенсивность сдвига такую же, как волочение с вытяжкой 10 000.

По сравнению с другими методами пластической деформации РКУП позволяет получить наиболее однородную УМЗ структуру материала. При этом процесс РКУП является весьма сложным многофакторным экспериментом. Его успешная реализация зависит от геометрии оснастки (угол пересечения каналов, их форма и размеры, внешний и внутренний радиусы закругления в зоне пересечения каналов и др.), параметров РКУП (скорость, число проходов, маршрут,

температура, смазка, определяющая коэффициент трения между заготовкой и оснасткой, и др.), природы деформируемого материала.

В результате лишь определенный набор указанных параметров позволяет успешно реализовать РКУПи получать целостные наноструктурные заготовки. В случае неоптимального режима РКУП заготовка деформируется крайне неоднородно и уже после первых проходов происходит расслоение объемной заготовки. Оптимальный режим РКУП позволяет многократно продавливать заготовку через оснастку. При этом получается целостная заготовка без трещин с однородной наноструктурой и комплексом уникальных физических и механических свойств.

Наиболее оптимальными маршрутами деформирования при РКУП являются (рис. 6): ориентация заготовки остается неизменной при каждом проходе (маршрут А); после каждого прохода заготовка поворачивается вокруг своей продольной оси на угол  $90^\circ$  в различных направлениях (маршрут В); после каждого прохода заготовка поворачивается вокруг своей продольной оси на угол  $90^\circ$  в одном направлении (маршрут С); после каждого прохода заготовка поворачивается вокруг своей продольной оси на угол  $180^\circ$  (маршрут D). Кроме того возможны различные сочетания приведенных маршрутов, но, как показали экспериментальные исследования, данные комбинации не приводят к дополнительному улучшению механических свойств.

Данные маршруты различаются направлениями сдвига при повторных проходах заготовки через пересекающиеся каналы и приводят к формоизменению сферической ячейки в теле заготовки в ходе РКУ прессования (Валиев, и др., 2007). В ходе первого прохода в результате простого сдвига при РКУП в месте пересечения каналов ячейка приобретает форму эллипсоида (рис. 7, а). Последующие проходы в ходе реализации маршрута А приводят к удлинению оси 1 и эллипсоид вытягивается. При этом направление сдвига поворачивается на угол  $2\varphi$  вокруг оси, перпендикулярной продольному сечению каналов, что наглядно продемонстрировано на рис. 7, б.

Повторный проход при маршруте С приводит к изменению направления сдвига; при этом плоскость сдвига поворачивается на угол  $120^\circ$  (при  $2\varphi = 90^\circ$ ).

В ходе реализации деформации по маршруту D повторный проход приводит к сдвигу в той же плоскости, но в противоположном направ-

лении. При этом ячейка вновь приобретает сферическую форму(рис. 7, в).

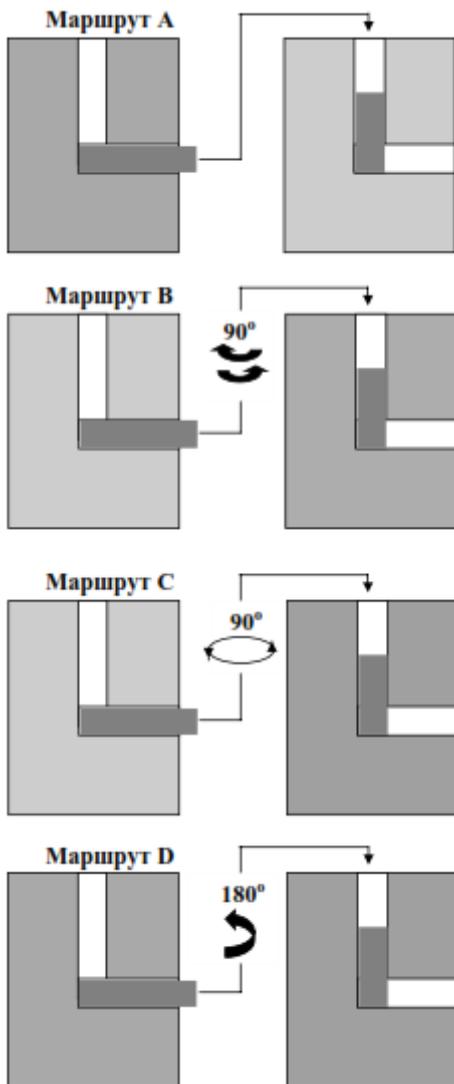


Рис. 6. Варианты маршрутов РКУП

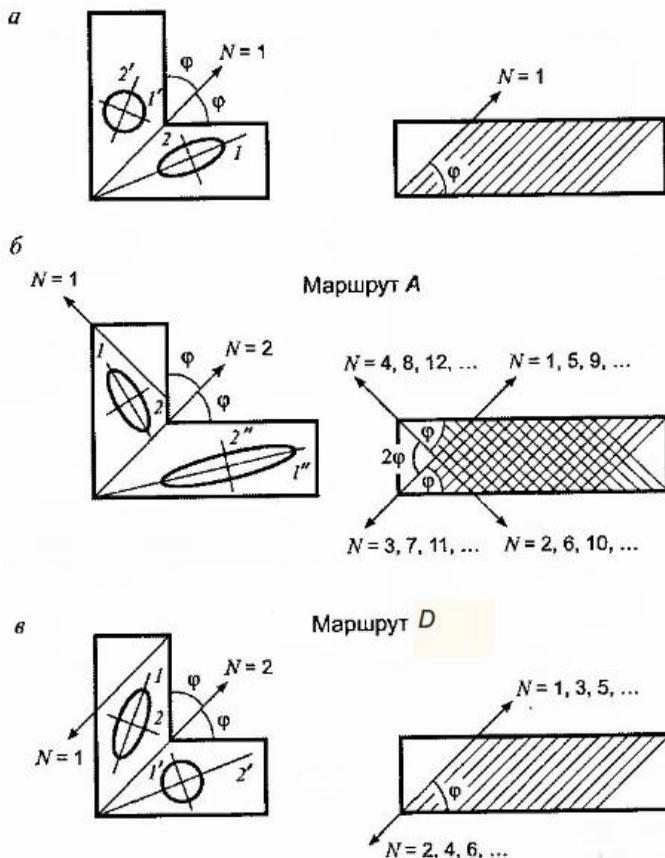


Рис. 7. Простой сдвиг при РКУП: а – одноцикловое деформирование; б – многоцикловое деформирование, маршрут А; в – то же, маршрут D

В связи с тем, что РКУП является наиболее простым и в то же время эффективным методом, обеспечивающим в процессе деформирования состояние близкое к чистому сдвигу, в последние годы были предложены многочисленные способы, в основе которых лежит РКУП.

### 2.2.1 РКУП с противодавлением

РКУП характеризуется рядом недостатков. Так, например, в процессе перемещения в оснастке на поверхности заготовки, контактирующей с внутренним углом пересечения каналов, происходит резкое изменение характера напряжений с сжимающего на растягивающий.

Это приводит к образованию макротрещин на этой поверхности и разрушению заготовки после нескольких проходов прессования. Кроме того при РКУП наблюдается искажений концевых частей заготовок. При этом необходимо отметить, что деформация сдвигом имеет место только в случае ее протекания в плоскости пересечения каналов, иначе деформация осуществляется изгибом.

С целью уменьшения растягивающих напряжений в заготовке, устранения искажения формы заготовки и локализации деформации простым сдвигом на линии пересечения каналов был предложен процесс РКУП с противодавлением (рис. 8), который заключается в приложении дополнительного давления к заготовке на выходе из матрицы (Валиев, и др., 2007).

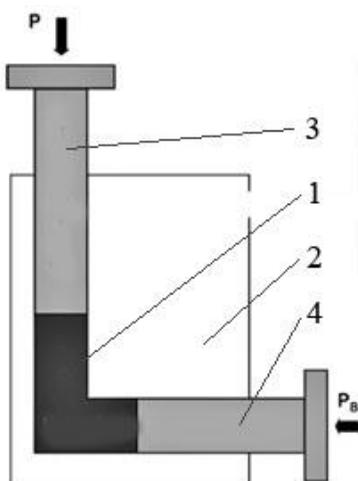


Рис. 8. Схема РКУП с противодавлением: 1 – заготовка; 2 – оснастка; 3, 4 – пуансоны

Противодавление способствует интенсификации процесса измельчения структуры, увеличению количества неравновесных границ зерен и уменьшению среднего размера фрагментов структуры вплоть до 190 нм. Это благотворно влияет на однородность получаемой микроструктуры.

Однако, при использовании противодавления особое внимание следует уделить геометрии области сопряжения каналов. Так, например, при использовании радиусов сопряжения, равных нулю, в нижней части заготовки формируется зона неоднородной деформации.

Повышение однородности деформации достигается путем оптимизации геометрии сопряжения каналов.

### 2.2.2 РКУП с вращающейся оснасткой

При традиционном РКУП заготовку приходится после каждого прохода вынимать из оснастки, а затем перед очередным проходом вновь помещать ее во входной канал с учетом ориентации, зависящей от выбранного маршрута. Для устранения этого недостатка предложена схема РКУП с вращающейся оснасткой (рис. 9).

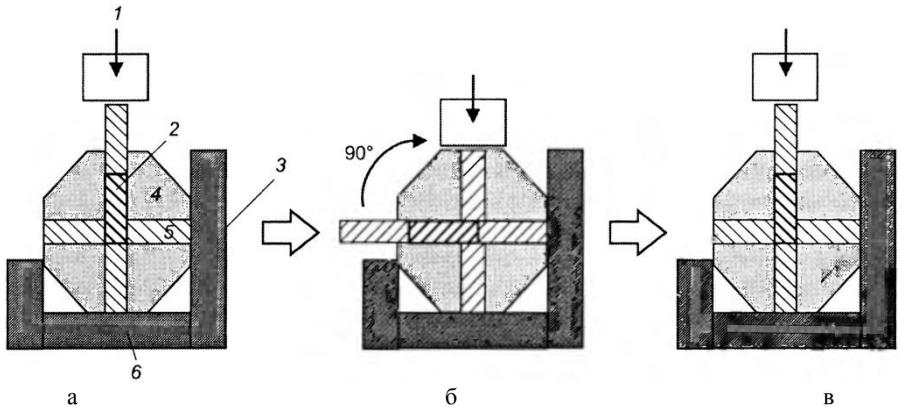


Рис. 9. Схема РКУП с вращающейся оснасткой: 1 – поршень; 2 – заготовка; 3 – стенка; 4 – оснастка; 5 – пуансон; 6 – основание оснастки (Валиев, и др., 2007)

В данном случае оснастка 4 состоит из четырех каналов, пересекающихся под прямыми углами и имеющих одинаковые размеры поперечного сечения. Перед началом РКУП заготовка 2 помещается в верхний вертикальный канал (рис. 9, а). При этом она своим передним концом упирается в нижний вертикальный пуансон. В правый горизонтальный канал оснастки также вставляется пуансон, который упирается в заготовку и в правую стенку 3 оснастки, препятствуя ее продвижению в данном канале вправо. Таким образом, заготовка может продвигаться только из верхнего вертикального канала в левый горизонтальный канал. После 1-го цикла РКУП (рис. 9, б) оснастка вместе с заготовкой поворачивается на угол  $90^\circ$  по часовой стрелке и цикл прессования повторяется (рис. 9, в).

Использование данной схемы позволяет существенно упростить РКУП. В то же время у данной схемы есть целый ряд недостатков. В частности, отношение длины к поперечному размеру заготовок при

использовании данной схемы мало, что приводит к существенной неоднородности заготовки. В ходе РКУП можно реализовать только маршрут А (рис. 6), а угол пересечения каналов может быть равен только  $90^\circ$ .

Также приведенная выше схема получила развитие в методе бокового прессования. При этом используются четыре автоматизированных устройства, способных создавать большие растягивающие и толкающие усилия (рис. 10). Заготовка помещается в оснастку и продавливается через ее каналы с помощью пуансона 1 при некотором дополнительном давлении, создаваемом пуансоном 3. При повторном РКУП заготовка продавливается уже из горизонтального левого канала в вертикальный нижний и т.д. Как и в предыдущем случае, процесс осуществляется только по маршруту А (рис. 6).

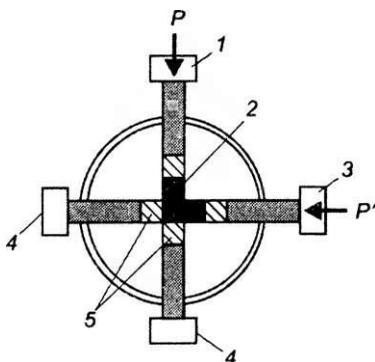


Рис. 10. Схема установки для бокового прессования: 1, 3 – подвижные пуансоны; 2 – заготовка; 4 – неподвижный пуансон; 5 – прокладка (Валиев, и др., 2007)

### 2.2.3 РКУП в многоканальной оснастке

Еще одним из направлений развития процесса РКУП является применение многоканальной оснастки с различным количеством каналов и углов их пересечения. Данное направление не требует использования сложного прессового оборудования. При этом, однако, требуется сконструировать многоканальную оснастку.

Самый простой пример такой многоканальной оснастки изображен на рис. 11. В оснастке сделан изогнутый канал с шестью коленами. Пять углов изгиба канала равны по  $90^\circ$  каждый.

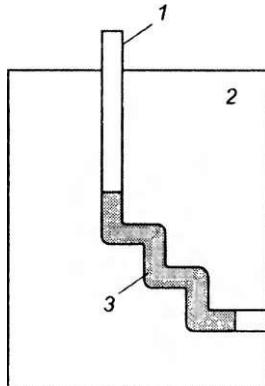


Рис. 11. Схема многопроходной оснастки: 1 – пуансон; 2 – оснастка; 3 – заготовка

Сформировавшаяся микроструктура и микротвердость в областях заготовки, прошедших различное число углов изгиба многопроходной оснастки, аналогичны тем, которые характерны для заготовок, перенесших соответствующее число проходов через оснастку с одним углом пересечения каналов.

Поиск способа измельчения зерна при использовании РКУП с одновременным уменьшением трудоемкости получения изделий привел к появлению модернизированного способа: *РКУП с параллельными каналами* (рис. 12).

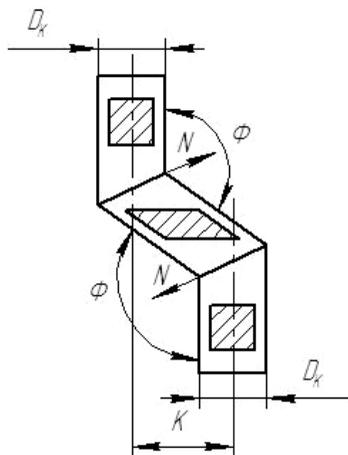


Рис. 12 Схема равноканального углового прессования с параллельными каналами:  
N – направление сдвига

Отличительной особенностью данного способа является одновременная реализация сдвиговой деформации в двух очагах, соответствующих двум последовательным пересечениям каналов в оснастке. В результате существенно уменьшается число проходов, необходимое для обеспечения формирования УМЗ структуры. Так, например, УМЗ структуры, сформировавшиеся при РКУП с параллельными каналами, соответствуют восьми проходам при традиционном РКУП (Валиев, и др., 2007).

Еще одним важным преимуществом схемы РКУП с параллельными каналами является то, что форма заготовки после РКУП полностью соответствует таковой после его завершения. Это обеспечивает уменьшение отходов на продавленные концевые участки и демонстрирует однородность течения материала заготовки, в том числе в ее концах.

В ДонФТИ НАНУ (Пашинская, 2009) предложен метод сочетающий преимущества двух описанных выше схем РКУП – *равноканальное многоугловое прессование* (РКМУП). В данном случае истечение металла происходит через матрицу, образованную четырьмя рабочими пересекющимися каналами одинакового по размеру сечения (рис. 13).

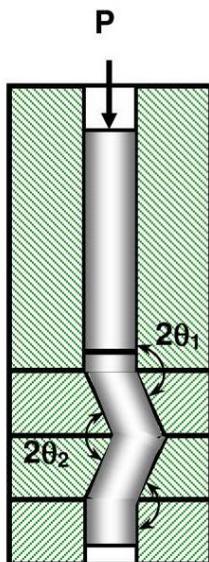


Рис. 13. Схема процесса равноканального многоугольного прессования

При этом для формирования равноосной структуры сплава заготовку в каждом последующем цикле прессования поворачивают на  $180^\circ$  вокруг поперечной оси и на  $90^\circ$  относительно продольной оси. Накопление деформации осуществляется повторением циклов прессования.

Величину деформации за цикл можно определить по формуле:

$$e_i = \frac{2 \operatorname{ctg} \theta_1 + \operatorname{ctg} \theta_2 + \operatorname{ctg} \theta_3}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

где  $\theta$  – половинный угол пересечения каналов; а накопленную деформацию – по формуле (2).

Характерной особенностью РКМУП является то, что в одном цикле прессования при относительно малых углах пересечения каналов суммарная величина пластической деформации за цикл не превосходит таковую для РКУП и в каждой зоне реализуется с малой интенсивностью.

Одновременно с этим РКМУП сопровождается изменением направления сдвига в очередной зоне, в том числе на противоположное. В каждой зоне главные оси деформации претерпевают поворот, а при прохождении материала через каждую последующую зону направление поворота осей меняется на противоположное. С точки зрения характера структурообразования это важно, поскольку означает изменение знака деформации. Это способствует эффективному дроблению структурных составляющих, в результате чего и наблюдается мелкодисперсная структура и формируется изотропия структуры в каждом цикле деформирования.

Также в ДонФТИ НАНУ (Пашинская, 2009) группой исследователей разрабатывается схема РКУП с истечением материала из вертикального канала в два боковых выходных канала, при этом горизонтальные каналы пересекаются с вертикальным под углом  $2\Phi = 90^\circ$ . Такой процесс назван *равноканальным T-образным прессованием*. На рис. 14 представлена схема устройства для реализации процесса.

При многократном прессовании после полного истечения материала из вертикального канала заготовка извлекается и повторно загружается для очередного деформирования (без обрезания искаженных их концов между переходами).

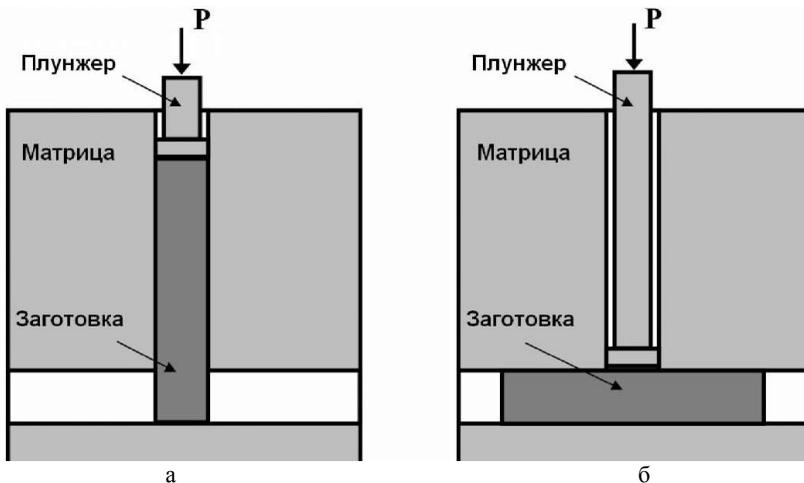


Рис. 14. Схема процесса равноканального Т-образного прессования

Недостатком процесса является то, что после однократного прессования наблюдается неравномерная степень упрочнения материала по длине деформированных прутков, что связано с неравномерным распределением деформаций (наличие слабдеформированных участков заготовки на концах и в ее центральной части). Однако, многократное повторение процесса приводит к выравниванию степени упрочнения по длине заготовки.

Результаты теоретического анализа и эксперимента свидетельствуют, что при Т-образном прессовании интенсивность деформации материала больше, чем при РКУП через матрицу с  $2\Phi = 90^\circ$ . Так, например, после трехкратного прессования медной заготовки наблюдается такой же уровень твердости, как после 6-го перехода РКУП, причем достигается практически равномерное упрочнение материала по длине прутка. Это позволяет рекомендовать способ Т-образного прессования для упрочнения материалов.

### 2.3 «Винтовое» прессование

Этот метод базируется на прямой экструзии призматических заготовок через матрицу с винтовым каналом и по этой причине назван «винтовым» прессованием. Угол  $\beta$  наклона винтовой линии к направлению оси экструзии изменяется по высоте матрицы, причем на ее начальном и конечном участках он равен нулю (рис. 15). Указанные

особенности геометрии канала приводят к тому, что при выдавливании через него форма заготовки не изменяется, что позволяет осуществлять ее многократное прессование с целью накопления деформации.

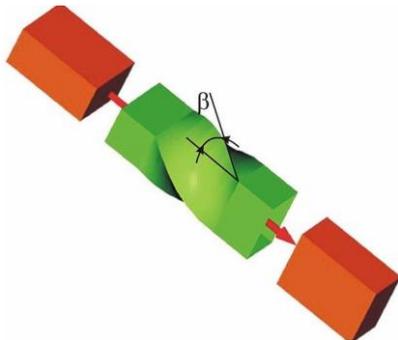


Рис. 15. Схема "винтового" прессования

Основным недостатком «винтового» прессования является неоднородность деформации в поперечном сечении деформируемой заготовки, поэтому был предложен способ, совмещающий процесс «винтового» и РКУ-прессования (Пашинская, 2009). Он заключается в выдавливании заготовки через матрицу с двумя пересекающимися каналами (рис. 16). При этом вертикальный канал 1 в средней части выполнен винтовым с постоянным вдоль оси сечением  $B$  и с изменяющимся по высоте канала углом наклона винтовой линии к оси прессования. Причем на начальном и конечном участках он имеет нулевое значение.

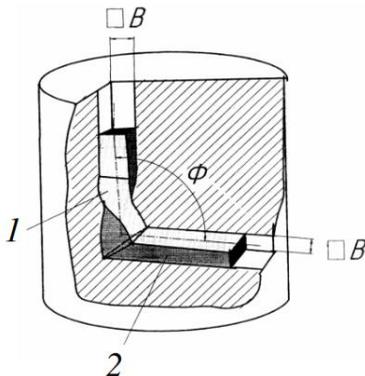


Рис. 16. Совмещение процессов винтового и равноканального углового прессования

При вдавливании заготовки сначала осуществляется ее деформация кручением в средней винтовой части вертикального канала, а затем –РКУП при переходе в горизонтальный канал.

При прессовании через винтовой канал матрицы заготовка испытывает интенсивную сдвиговую деформацию (преимущественно в поперечном сечении), на которую при РКУП накладывается однородная интенсивная объемная сдвиговая деформация, что приводит к более изотропному структурному состоянию.

Это объясняется тем, что на менее однородную по своей природе деформацию кручением накладывается более однородная и интенсивная деформация сдвигом при РКУП, которая сглаживает возникшую неоднородность после кручения, как в структурном плане, так и в смысле получения более однородных свойств. Обратная же последовательность приведет к наложению более неоднородного состояния на однородное, которое и зафиксируется в заготовке после прессования, что нежелательно.

Как показывают полученные результаты, предложенный способ обработки металлов позволяет значительно повысить прочность и пластичность материала заготовки, достигая при этом равномерной УМЗ структуры и изотропии свойств.

#### **2.4 Прессование через матрицу «песочные часы»**

Применение специализированного гидропресса с подвижным контейнером для прессования изделий с использованием активных сил трения может быть использовано для осуществления встречно-возвратного прессования через матрицу типа «песочные часы». Схема процесса показана на рис. 17.

Заготовка 5 выпрессовывается через матрицу с плавно сужающимся, а затем расширяющимся каналом (типа «песочные часы») в изделие 6 (рис. 17, а). Затем движением встречного пуансона 4 «изделие» 6, становящееся заготовкой 7, вновь выдавливается в левую часть контейнера и становится изделием 8 (рис. 17, б).

Такое прессование методом «туда – обратно» обеспечивает глубокую проработку металла и при многократном повторении способно приводить к УМЗ структуре. Предполагают, что такая технология позволит получать наноструктурный материал в большом количестве и объеме.

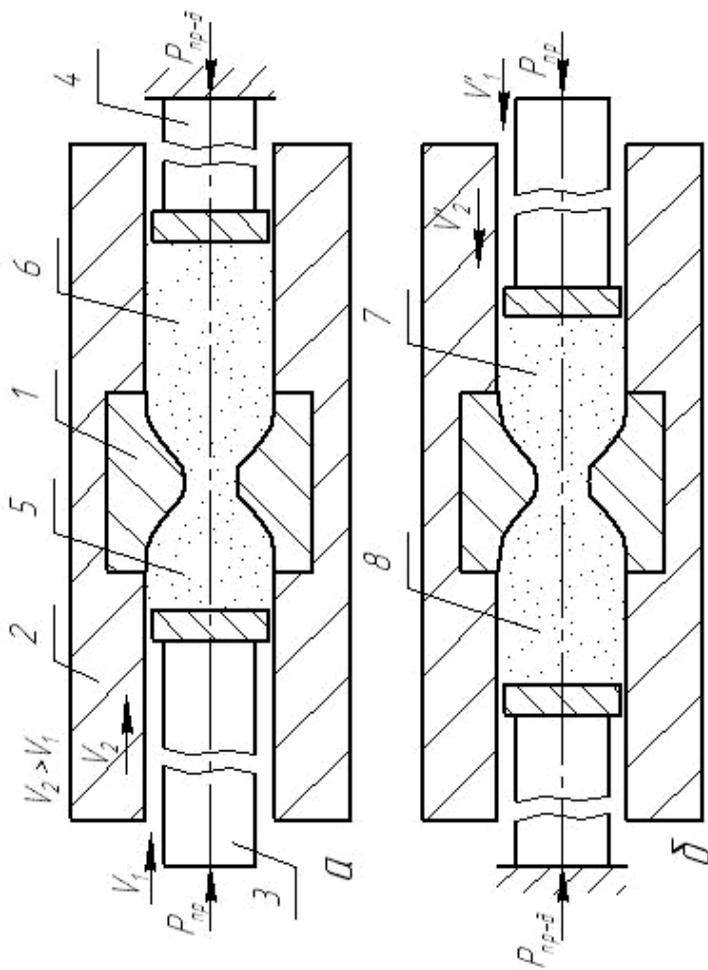


Рис. 17. Схема многократного встречно-возвратного прессования с активным трением через матрицу типа «песочный» для получения наноструктуры: а – первоначальное прессование; б – последующее (встречное) прессование; 1 – матрица «песочные часы»; 2 – подвижный контейнер; 3, 4 – встречные пуансоны; 5 – прессуемый металл заготовки; 6 – металл изделия; 7 – металл заготовки в последующем цикле; 8 – металл изделия последующего цикла

Основным недостатком описанного метода является необходимость применения специализированного оборудования, поэтому был предложен вариант такого прессования на обычном прессе (Пашинская, 2009).

Для этого используют инструмент, имеющий контейнеры 1 и 7, пуансоны 3 и 6, расположенную в канале контейнера матрицу типа «песочные часы» 4 (рис. 18).

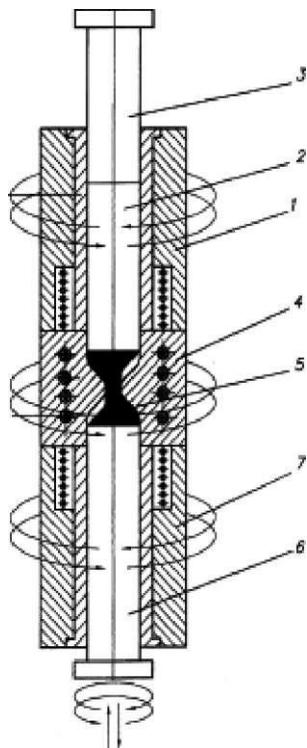


Рис. 18. Принципиальная схема устройства: 1 и 7 – соответственно верхний и нижний контейнеры; 2 – заготовка; 3 и 6 – соответственно верхний и нижний пуансоны; 4 – матрица; 5 – наполнитель

Заготовку 2 в виде прутка устанавливают в верхний контейнер 1, при этом в нижнем контейнере 7 предварительно установлен нижний пуансон 6. Полость матрицы 4 заполняют порошковым материалом 4 (чешуйчатый графит), который одновременно служит смазкой и обеспечивает подпор между нижним пуансоном и заготовкой. Объем наполнителя подбирают с таким расчетом, чтобы при создании предва-

рительного объемно-напряженного состояния всестороннего сжатия в материале заготовки нижний торец заготовки не попадал в канал матрицы. Сжатие заготовки до напряжения, близкого к напряжению текучести, обеспечивают движением верхнего пуансона 3, нижний пуансон поддерживали гидроцилиндром выталкивателя.

При движении верхнего пуансона 3 происходит выпрессовывание заготовки 2 из верхнего контейнера 1 в нижний 7. По окончании прессования собранную оснастку переворачивают на  $180^\circ$  на столе гидравлического прессы и продолжают прессование. Накопление деформации осуществляется повторением циклов прессования.

Когда большая часть заготовки находилась в верхнем контейнере, обеспечили.

При необходимости можно снизить усилие деформирования на 20-30%, путем обеспечения вращения пуансонов и контейнеров в противоположных направлениях.

В целом, предложенный способ позволяет достигать накопления больших степеней деформации без нарушения сплошности обрабатываемой заготовки при высокой однородности микроструктуры по всему сечению заготовки, тем самым обеспечить высокие стабильные физико-механические свойства.

## **2.5 Прессование со сдвигом**

Еще одним методом ИПД для производства металлических профилей с УМЗ структурой является прессование со сдвигом (Пашинская, 2009).

Как и при обычном прессовании, цилиндрическая заготовка 1 помещается внутрь контейнера 2 (рис. 19). Под действием напряжений  $\sigma_z$ , создаваемых пуансоном прессы (на рисунке не показан), заготовка 1 выдавливается из контейнера 2 через матрицу 3 со скоростью  $V$ . При этом форма выходного отверстия 4 матрицы 3 определяет геометрию прессуемого профиля. В отличие от традиционного способа, матрица 3, состоящая из форкамеры 5 (поперечное сечение которой отлично от круглого) и переходной конусной части 6 (которая предотвращает попадание смазки внутрь отпрессованной заготовки), вращается с угловой скоростью  $\omega$  относительно контейнера 2.

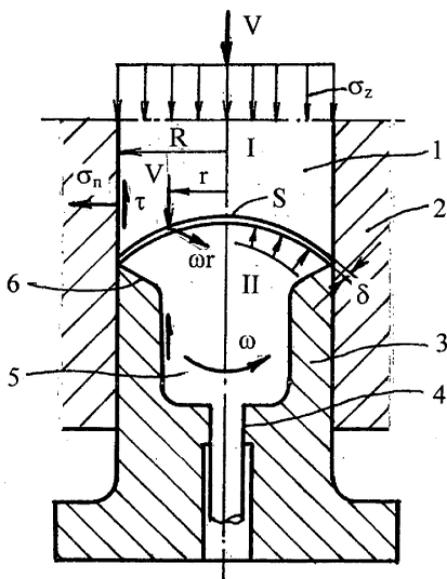


Рис. 19. Схема прессования со сдвигом

Т.к. в процессе прессования напряжения  $\sigma_z$  намного превышают предел текучести материала, то заготовка I находится в пластическом состоянии, которое уравнивается нормальными напряжениями  $\sigma_n$ , действующими на стенках контейнера. Это приводит к возникновению больших контактных напряжений трения  $\tau$  между стенками контейнера и заготовкой, что предотвращает вращение объема I заготовки, находящегося внутри контейнера. Такие же напряжения, действующие вдоль стенок форкамеры, а также ее некруглое поперечное сечение, заставляют объем II материала, находящийся внутри форкамеры 5, вращаться вместе с ней. Как следствие, внутри тонкого слоя S между объемами I и II возникают интенсивные сдвиговые деформации.

Величину деформации сдвига  $\gamma$ , которую претерпевает материал на расстоянии  $r$  от оси заготовки при пересечении слоя S, можно рассчитать по формуле:

$$\gamma = r\omega / V \quad (5)$$

Как видно из формулы, величина деформации сдвига прямо пропорциональна расстоянию от оси заготовки и при  $r = 0$  —  $\gamma = 0$ . Одна-

ко, т.к. скорость вращения матрицы  $\omega$  является независимым технологическим параметром, то можно подобрать такую ее величину, чтобы получить требуемую деформацию сдвига  $\gamma$  в любой точке  $r$ .

Сдвиг любой требуемой интенсивности во время одностадийной обработки и при высоком гидростатическом давлении приводит к измельчению структуры сплавов с низкой пластичностью и может применяться для производства длинномерных изделий с различным поперечным сечением. Кроме того, данный метод может быть реализован при прямом, обратном и полунепрерывном прессовании, а также при прессовании пустотелых профилей через «язычковые» матрицы со сварочной камерой.

Все рассмотренные выше методы ИПД на основе процесса прессования не являются непрерывными и позволяют получать изделия ограниченной длины. Существуют способы, позволяющие сделать прессование непрерывным процессом или хотя бы максимально приблизить к непрерывному. Данные способы будут подробно рассмотрены в гл. 4.

### 3 МЕТОДЫ ИПД НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ

#### 3.1 Сущность процесса прокатки

Одним из наиболее распространенных способов производства изделий из цветных металлов и сплавов является продольная прокатка (рис. 20), которую применяют для получения листов и лент в горячем и холодном состояниях, а также производства профилей и проволоки.

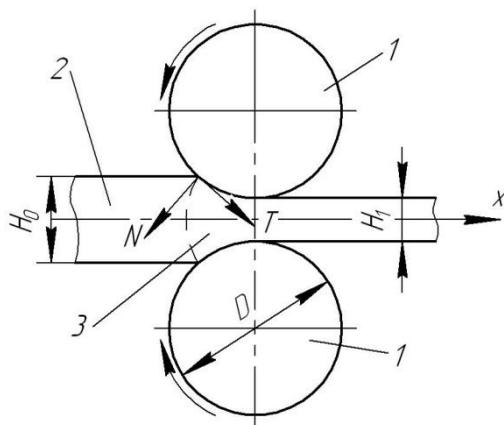


Рис. 20. Схема продольной прокатки в двухвалковом стане:

1 – рабочие валки; 2 – прокатываемая полоса; 3 – очаг пластической деформации

Пластическую деформацию, при которой заготовка из металла деформируется вращающимися валками, называют прокаткой. Заготовка 2 под действием сил трения  $T$  втягивается в зазор между валками 1, деформируется ими и приобретает заданную форму и размеры.

При прокатке сечение заготовки уменьшается, ширина и длина увеличиваются. Форма сечения получаемой продукции зависит от формы валков. Например, на гладких валках прокатывают листы, полосы и ленту. В так называемых калиброванных валках катают круг, квадрат, шестигранник, рельсы, уголки и т. п. Для производства труб, шаров, шестерен и других профилей используют специальные прокатные станы, в которых применяется более двух валков; форма валков может быть конической, винтообразной и др.

С точки зрения ИПД традиционная прокатка обладает существенным недостатком, ограничивающим ее применение с целью получения УМЗ структуры в материале. Так суммарная накопленная деформация ограничена при обычной прокатке многократным уменьшени-

емтолщины прокатываемой заготовки. В связи с этим в последние годы был предложен ряд специализированных способов прокатки, позволяющих устранить данный недостаток.

### 3.2 Косовалковая прокатка

Одним из способов устранения необходимости многократного деформирования заготовки при прокатке является интенсификация процесса путем увеличения доли деформаций сдвига. Это можно осуществить за счет деформирования листовой заготовки в рабочих валках, оси которых повернуты в плоскости листа на угол  $\theta$  относительно поперечного направления (рис. 21). Данный способ известен как косовалковая прокатка (Song, К.Н., и др., 2011).

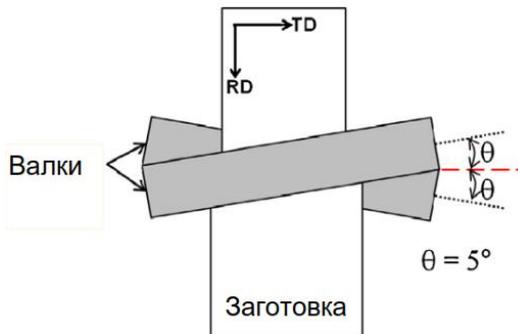


Рис. 21. Схема косовалковой прокатки

Принято считать, что при обычной прокатке имеет место плоское деформированное состояние, т.е.  $\varepsilon_{11} = -\varepsilon_{33}$  при  $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{12} = \varepsilon_{23} = \varepsilon_{31} = 0$  (необходимо отметить, что на практике при прокатке  $\varepsilon_{31} \neq 0$ ). В тоже время при косовалковой прокатке наблюдается объемная схема деформаций, т.к. угловые (сдвиговые) деформации  $\varepsilon_{12}$ ,  $\varepsilon_{23}$  и  $\varepsilon_{31}$  отличны от нуля. При этом возникающие сдвиговые деформации значительно увеличивают энергию формообразования по сравнению с традиционной прокаткой, что и приводит к образованию ультрамелкозернистой структуры со средним размером зерен до 600 нм.

### 3.3 Продольная прокатка с поперечным сдвигом

Еще одним способом интенсификации деформации сдвига при прокатке является продольная прокатка с принудительным поперечным смещением заготовки (Chen, Y.-T., и др., 2012).

Для реализации данного метода был разработан специальный двух-валковый прокатный стан, отличительной чертой которого является индивидуальный привод каждого рабочего валка от гидравлического серводвигателя. При этом нижний рабочий валок помимо вращения получает еще и осевые возвратно-поступательные движения от гидравлического вибратора. Для управления подачей масла от гидростанции в вибратор и серводвигатели используется компьютер, который и синхронизирует вращение и осевые колебания валков (рис. 22, а).

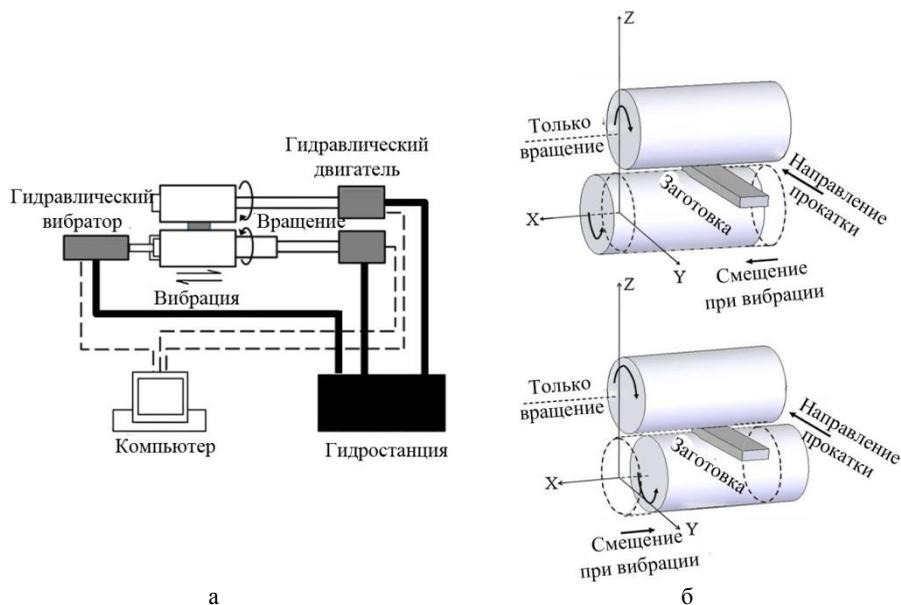


Рис. 22. Продольная прокатка с поперечным сдвигом

Как видно из рис. 22, б, разработанный стан обеспечивает весьма благоприятные условия для ИПД. Так при вращении валков в материале возникают большие сжимающие напряжения, а возвратно-поступательные движения нижнего валка в направлении перпендикулярном направлению прокатки приводят к деформациям сдвига. Как

следствие, при продольной прокатке с поперечным сдвигом наблюдается интенсивное уширение полосы.

В данном случае основными параметрами влияющими на процесс структурообразования являются степень обжатия, коэффициент трения между валками и заготовкой, частота и амплитуда колебаний нижнего валка. При этом величина обжатия за проход должна быть достаточно большой для того, чтобы возникающие при прокатке силы трения обеспечивали не только захват и подачу металла в очаг деформации, но и сдвиг материала при осевом смещении нижнего валка.

### **3.4 Прокатка в рифленых валках**

Получение УМЗ структуры и повышение механических и функциональных свойств возможно при последовательной прокатке в рифленых и плоских валках.

Способ включает многопроходное обжатие плоской заготовки по толщине с формированием рифов на ее поверхностях парой валков с опоясывающими выступами, и последующее многопроходное обжатие в гладких валках (рис. 23). Формирование мелкозернистой структуры в прокате обеспечивается за счет того, что опоясывающие выступы выполнены на половине длины бочки валков, причем между проходами заготовку поворачивают в ее плоскости на угол  $180^\circ$ , и на поверхности заготовки формируют рифы высотой 3-20 мм. Чередующиеся обжатия с поворотом заготовки между проходами обеспечивают многоцикловую трансформацию поверхностей заготовки от рифленого состояния к гладкому, и наоборот. Возникающие макросдиговые деформации приводят к глубокой механической проработке заготовки, измельчению кристаллитов, диспергированию зерен микроструктуры. Это, в свою очередь, обеспечивает формирование мелкозернистой структуры в листовом прокате.

Недостатком описанного выше способа является его применимость только для обработки достаточно толстых листов. Известен способ прокатки тонких листов и лент, в котором сдвиговые деформации возникают за счет интенсификации поперечного направлению прокатки течения металла заготовки (Ren, T., и др., 2010). Способ заключается в прокатке тонкого листа между рифленным и гладким валками, при этом наблюдается локальное уменьшение толщины отдельных участков и выдавливание части металла в пространство между выступами (рис. 24). На втором и последующих проходах неравно-

мерность толщины в поперечном сечении и волны устраняются путем прокатки в гладких валках. При этом удается значительно увеличить долю поперечных деформаций, так при прокатке полосы шириной 100 мм и толщиной 1 мм с 90% обжатием уширение составило 5 мм.

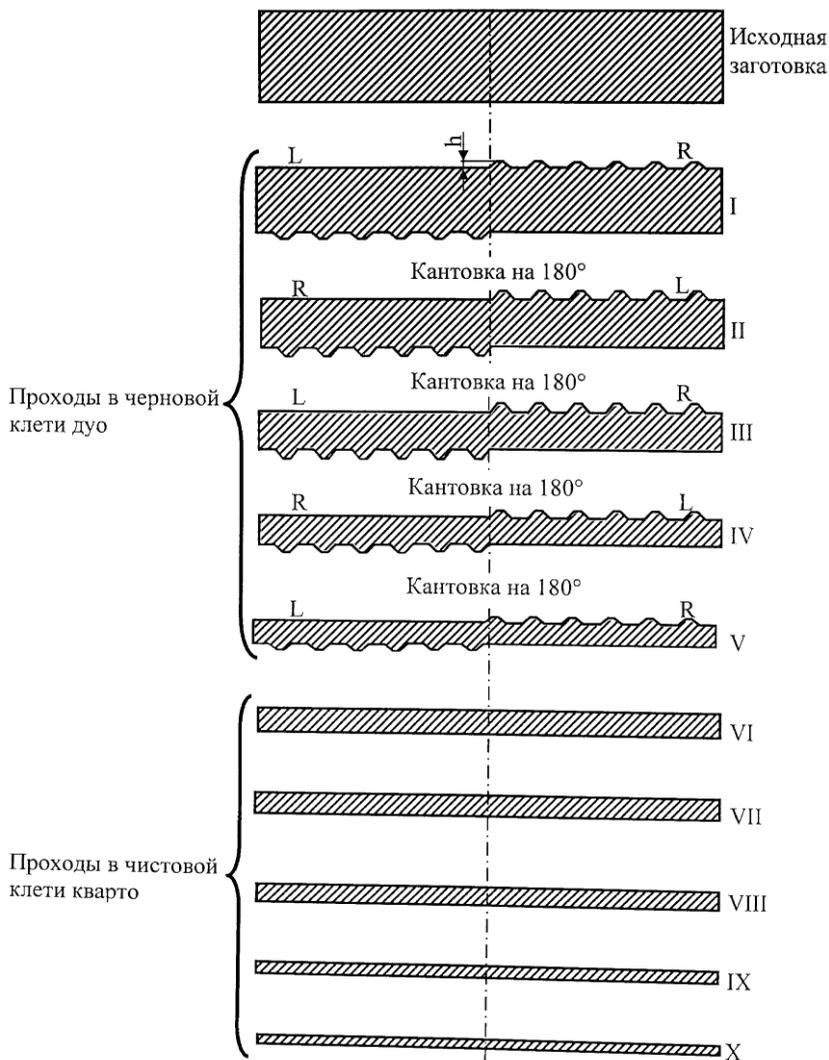


Рис. 23. Прокатка толстых листов в рифленых и гладких валках

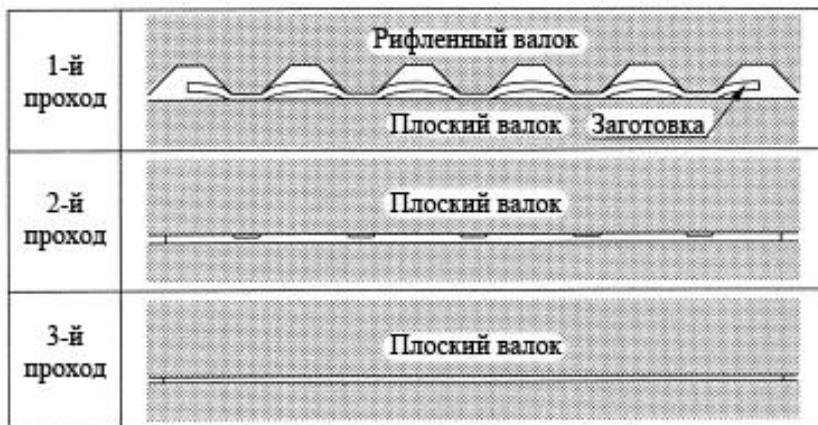


Рис. 24. Прокатка тонких листов в рифленых и гладких валках

### 3.5 Знакопеременный изгиб

Большие степени деформации без изменения начальных размеров образца можно аккумулировать при непрерывном циклическом знакопеременном изгибе ленты в гладких валках (рис. 25, а). При этом происходит повторение операций изгиба и выпрямления полосы. Хотя максимальная степень деформации за один цикл изгиба мала ( $\epsilon = 0,1056$ ), не представляется сложным практически неограниченно увеличивать накопленную деформацию за счет многократного повторения процесса.

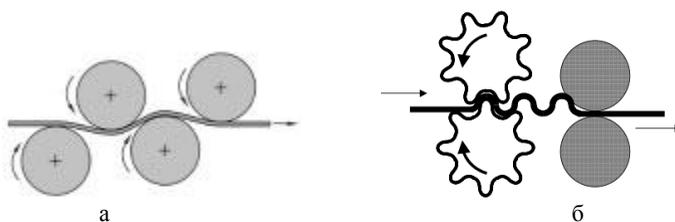


Рис. 25. Способы многократного изгиба и выпрямления полосы

Однако, как показали исследования (Tsuji, N., и др., 2003), непрерывный циклический изгиб не обеспечивает получения УМЗ структуры. Это, скорее всего, связано с тем, что большие деформации, накопленные как сумма малых, недостаточны для структурообразования материала.

С другой стороны, известен способ знакопеременного изгиба при последовательной прокатке полосы врифленых и гладких валках (Добаткин, 2007), который успешно использовался для измельчения структуры медных листов (после 12 циклов обработки средний размер зерна составил 500 нм). Принципиальная схема реализации данного способа представлена на рис. 25, б. Основным отличием данного способа от предыдущего является большая степень деформации за проход, что очевидно и способствует получению УМЗ структуры.

### 3.6 Асимметричная прокатка

Основным недостатком предыдущих способов является необходимость применения специализированного оборудования и/или деформирующего инструмента для их осуществления. Поэтому одним из наиболее перспективных и высокоэффективных способов получения УМЗ структуры является асимметричная прокатка (Ji, Y.H., и др., 2009), которая отличается от традиционной только тем, что заготовка деформируется между валками разного диаметра или валками, вращающимися с различной скоростью (рис. 26).

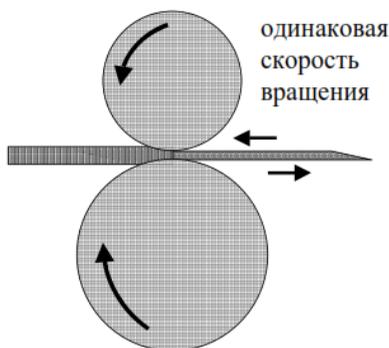


Рис. 26. Асимметричная прокатка в валках разного диаметра

До настоящего времени асимметричная прокатка (между валками неравного диаметра) применялась преимущественно при изготовлении блюмов, слябов, заготовок и крупных фасонных профилей для изгиба полосы вверх за счёт разницы окружных скоростей в целях предотвращения удара выходящей из валков полосы о ролики рольганга, а также при прокатке в сортовых станах для изгиба полосы на нижние проводки в целях прямолинейного выхода её из проводок.

Вследствие различия скоростей вращения валков или их диаметров – на контактных поверхностях металла с валками сопротивление деформации верхнего и нижнего слоя полосы неодинаково, что влияет на длину дуги контакта металла с валком, распределение контактных напряжений и среднюю величину контактного давления. Т.е. при асимметричной прокатке формируется несимметричный очаг пластических деформаций, который приводит к возникновению больших сдвиговых деформаций, а как уже было сказано – это является необходимым условием ИПД и получения УМЗ структуры.

Поэтому в настоящее время активно проводятся исследования асимметричной прокатки листов и лент. Так, например, при асимметричной прокатке листов из магниевого сплава был получен средний размер зерна 820 нм (Kim, W.J., и др., 2009).

### **3.7 Аккумулирующая прокатка с соединением**

Аккумулирующая прокатка с соединением (АПС) может быть использована в непрерывном процессе производства листовых УМЗ материалов с использованием возможностей обычного прокатного оборудования. При этом в отличие от уже рассмотренных методов ИПД на основе процесса прокатки в ходе АПС не происходит уменьшения поперечных размеров обрабатываемых изделий, что позволяет практически неограниченно накапливать деформации в материале.

На рис. 27 представлена схема АПС. Два листа с очищенной и обезжиренной поверхностью складываются пакетом, который прокатывается с разовым обжатием не менее 50% для обеспечения соединения отдельных слоев. Затем полученная полоса, состоящая из двух сваренных слоев, режется на две части, соединяемые стороны которых очищают, складывают в пакет, нагревают и снова прокатывают. Процесс повторяют вплоть до достижения заданного числа циклов прокатки.

Для получения в конечном итоге единого твердого тела накапливаемое соединение прокаткой должно быть не только деформационным процессом, но и процессом соединения материалов за счет вынужденной диффузии в тонких приповерхностных слоях. Для лучшего соединения поверхность листовых материалов тщательно очищается. Кроме того данный способ прокатки иногда осуществляют при повы-

шенных температурах деформации (но ниже температуры рекристаллизации) для лучшего соединения заготовок и уменьшения усилий прокатки.

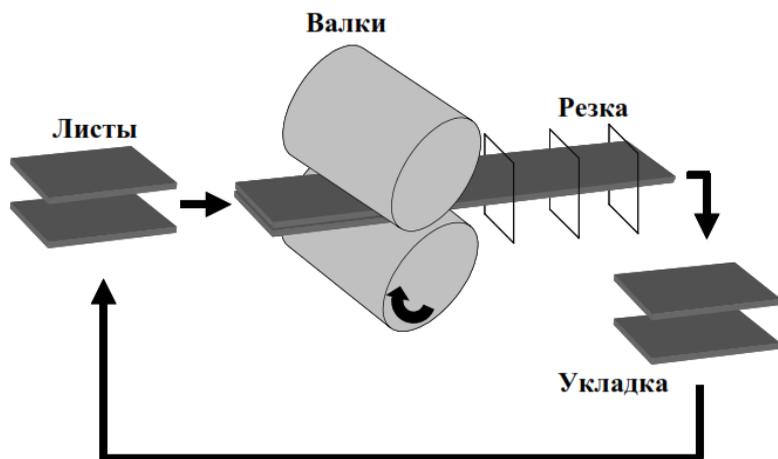


Рис. 27. Аккумулятивная прокатка с соединением

При АПС с равными обжатиями за каждый цикл толщину  $t_n$  отдельного слоя после  $n$  циклов можно рассчитать по формуле (Tsuji, N., и др., 2003):

$$t_n = t_0 \mu^n, \quad (6)$$

где  $t_0$  – исходная толщина отдельного слоя;  $\mu = t_k / t_n$  – коэффициент обжатия пакета за цикл;  $t_n$  и  $t_k$  – толщина пакета до и после прокатки соответственно.

При этом суммарное относительное обжатие  $\varepsilon_n$  отдельного слоя за  $n$  циклов составит:

$$\varepsilon_n = 1 - \frac{t_n}{t_0} = 1 - \mu^n \quad (7)$$

Тогда, используя выражение для интенсивности деформаций с учетом плоского деформированного состояния при прокатке и условия несжимаемости, получим формулу для определения накопленной интенсивности деформаций за  $n$  циклов:

$$e_n = -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{t_n}{t_0} = \frac{2}{\sqrt{3}} n \ln \frac{1}{\mu} \quad (8)$$

Таким образом, при прокатке пакета, составленного из двух полос исходной толщиной  $t_0 = 0,5$  мм (начальная толщина пакета  $t_H = 1$  мм), с обжатием 50% за цикл (конечная толщина пакета  $t_K = 0,5$  мм, коэффициент обжатия  $\mu = 0,5$ ) после 5 циклов толщина отдельного слоя составит  $t_5 = 1 / 64$  мм = 15,625 мкм, суммарное обжатие –  $\varepsilon_5 = 96,875\%$  и накопленная деформация –  $e_5 = 4$ . В случае 10 циклов АПС толщина отдельного слоя составит  $t_{10} = 1 / 2048$  мм = 0,488 мкм, суммарное обжатие –  $\varepsilon_{10} = 99,902\%$  и накопленная деформация –  $e_{10} = 8$  и т.д. (рис. 28).

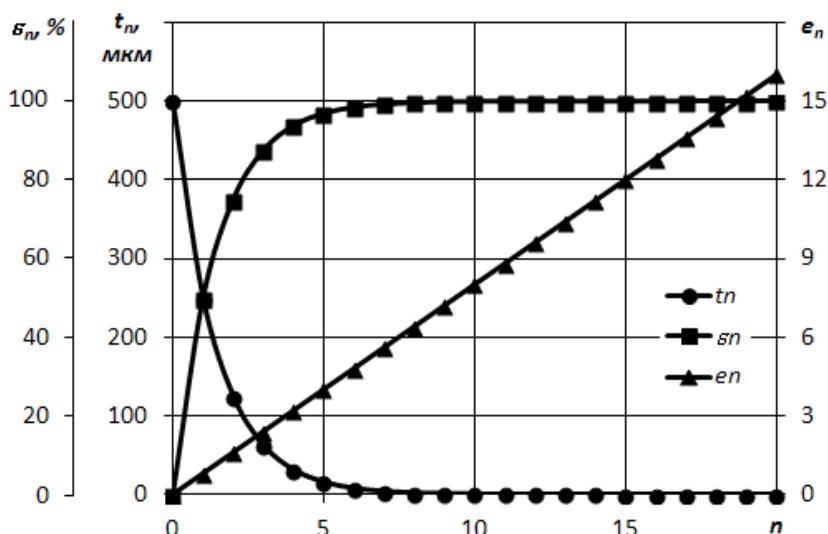


Рис. 28. Зависимость толщины отдельного слоя  $t_n$ , суммарного обжатия  $\varepsilon_n$  и накопленной интенсивности деформаций  $e_n$  от числа циклов  $n$  АПС ( $t_0 = 0,5$  мм,  $\mu = 0,5$ )

Как видно из приведенных расчетов (рис. 28) при АПС могут быть достигнуты высокие значения деформаций (> 6-8), что является неперенным условием формирования сильно фрагментированной и разориентированной УМЗ структуры.

При этом можно подобрать такое количество слоев пакета и величину его обжатия за цикл (например, 2 слоя – обжатие 50%, 3 слоя – обжатие 66,7% и т.д.), при которых АПС может прово-

даться практически неограниченное число циклов. Однако, на практике с увеличением числа циклов длина и ширина полосы будут постоянно уменьшаться из-за необходимости проводить обрезку растрескавшихся кромок.

Способ накапливаемого соединения прокаткой успешно опробован на алюминиевых сплавах и низкоуглеродистых сталях, в которых был получен средний размер зерна 80-300 нм. К недостаткам следует отнести то, что из-за большого количества операций в каждом цикле данный способ является относительно сложным(Валиев, и др., 2007).

## **4 МЕТОДЫ ИПД НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ**

Для производства УМЗ металлических материалов в промышленных масштабах требуется решить целый ряд важных проблем, связанных, в том числе с разработкой таких процессов, которые позволили бы сделать методы ИПД непрерывным. К настоящему времени в этом направлении достигнут определенный прогресс. В первую очередь он касается получения длинномерных УМЗ заготовок с использованием комбинированных процессов прокатки и РКУП.

Одни из первых исследований в данном направлении были связаны с развитием экстролинг и конформ-процессов, которые изначально были разработаны для непрерывного прессования проволок и профилей малого сечения. При реализации таких совмещенных процессов прокатки и прессования проталкивание заготовки в матрицу для РКУП осуществляется с помощью сил трения, возникающих между вращающимися на встречу друг другу валками (экстролинг-процесс) или между вращающимся валком и неподвижной матрицей (конформ-процесс).

### **4.1 Конформ-процесс**

Из всех процессов непрерывного прессования наиболее применимым и доведенным до промышленного внедрения является конформ-процесс, предложенный Д. Грином в 1970 г. Процесс обеспечивает очень большие степени деформации. Так, по данным фирмы Babcock Wire Equipment (Великобритания) занимающейся изготовлением установок для конформ-процесса, при выдавливании алюминиевой заготовки удалось получить коэффициент вытяжки равный 160.

Схема конформ-процесса представлена на рис. 29. В качестве заготовки используется пруток 2, который задается в ручей, выполненный на рабочем валке 1 в виде кольцевой канавки. На внутренней поверхности прижимного башмака 3 также выполнен ручей, охватывающий заготовку 2 сверху. Также в башмаке 3 закреплен блок инструмента с прессовой матрицей 4.

При подаче прутковой заготовки в зазор между башмаком и валком она продвигается в камеру прессования под действием сил трения, действующих по поверхности контакта с вращающимся валком, и достигает матрицы.

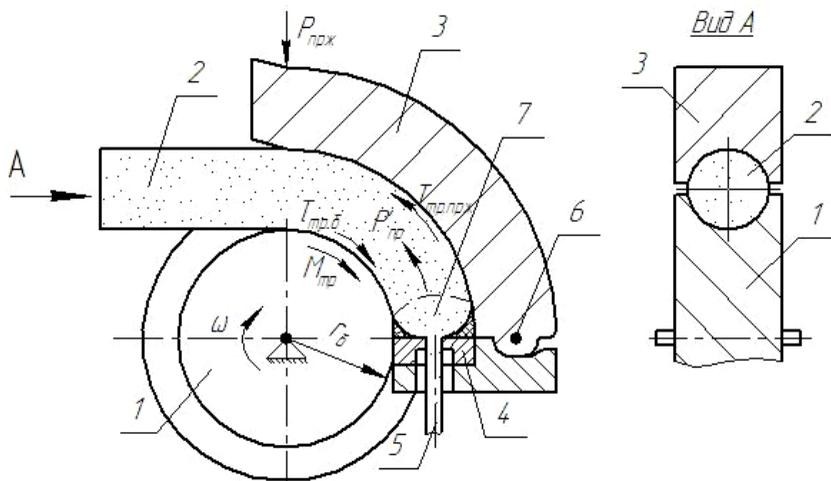


Рис. 29. Схема конформ-процесса: 1 – валок; 2 – заготовка; 3 – башмак; 4 – матрица; 5 – изделие; 6 – ось поворота башмака; 7 – очаг пластической деформации

В зоне непосредственно перед матрицей заготовка подвергается интенсивному пластическому деформированию и заполняет все сечение ручья (зона захвата при выдавливании); это приводит к увеличению сил трения между поверхностью ручья и заготовкой. По мере поворота вала 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 ручья (зона первичного захвата) служит для развития давления, необходимого для пластического деформирования материала и заполнения объема в зоне перед матрицей.

Повышая скорость вращения вала, можно добиться высокой скорости истечения. Производительность процесса высока и достигает 500 кг/час.

КНФ применяют для изготовления мелких по сечению профилей 2-10 мм. Кроме сплошных, изготавливают полые профили, устанавливая язычковые матрицы. При соединении заготовок в торец за пределами устройства процесс реализуется, как полунепрерывный, а если в качестве заготовки используется проволока, то реализуется технология непрерывного прессования.

### 4.1.1 РКУП-конформ-процесс

Перспективным направлением развития является встраивание матрицы РКУП в механизм конформ-прессования (рис. 30). Это позволяет увеличить выход годного и существенно поднять производительность получения полуфабрикатов в наноструктурном состоянии (Уллах, 2006).

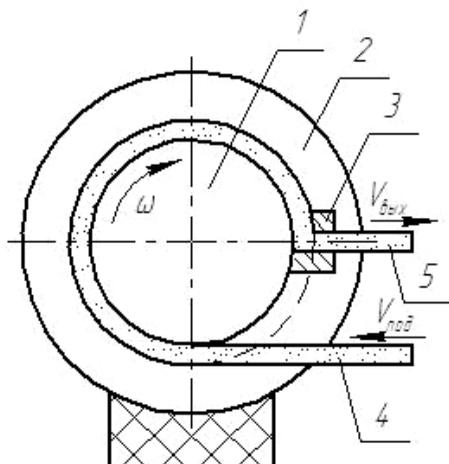


Рис. 30. Принципиальная схема РКУП-конформ-процесса: 1 – подвижный валок; 2 – неподвижный корпус; 3 – матрица; 4 – заготовка; 5 – изделие

При совмещении РКУП и конформ-процесса для создания силы трения, обеспечивающей проталкивание заготовки, используется та же идея, что и в случае традиционного конформ-процесса. Как видно из рис. 30, между вращающимся центральным валком 1 и неподвижным корпусом 2 имеется ручей, в который загружается заготовка 4. Между заготовкой и валком при его вращении возникают силы трения, которые увлекают заготовку вслед ним. Неподвижный корпус направляет заготовку в горизонтальный канал матрицы 4, где материал испытывает сдвиговую деформацию, как и при обычном РКУП. РКУП-конформ-процесс является практически непрерывным.

В рассматриваемой установке угол пересечения между ручьем и каналом матрицы составляет  $90^\circ$ . При этом есть возможность использования иных значений параметров РКУП (угол пересечения ручья и канала, скорость деформации и др.). Так при неоднократном продавливании заготовки через данную оснастку, можно обеспечить реали-

зацию наиболее эффективных с точки зрения формирования УМЗ структур маршрутов РКУП прессования (рис. 6), а также обеспечить скорости прессования, близкие к скорости прокатки.

РКУП-конформ-процесс может быть эффективно использован для измельчения зерен, формирования УМЗ структур и повышения свойств металлических длинномерных изделий и проволок.

#### 4.1.2 Непрерывный ограниченный полосовой сдвиг

Дальнейшей реализацией конформ-процесса является непрерывный ограниченный полосовой сдвиг (Ullah, 2006), в котором втапливание заготовки в матрицу для равноканального углового прессования осуществляется с помощью планетарного прокатного стана (рис. 31). При этом в отличие от предыдущих способов в данном случае используется заготовка в виде полосы или ленты.

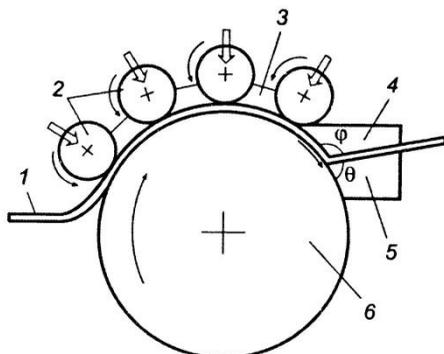


Рис. 31. Способ непрерывного ограниченного полосового сдвига: 1 – заготовка; 2, 6 – вспомогательные и центральный валки; 3 – направляющий башмак; 4, 5 – матрица

Металлическая полоса 1 обжимается между вращающимися большим центральным валком 6 и маленькими вспомогательными сателлитными валками 2. При этом линейные скорости, соответствующие точкам поверхности вращающихся валков, одинаковы, а изгибание листа предотвращается направляющим башмаком 3. Валки обладают вращательным моментом, достаточным для создания усилия, необходимого для проталкивания заготовки, претерпевающей сдвиговую деформацию, через два канала, пересекающихся под углом  $\varphi$ .

Как показали экспериментальные исследования (Валиев, и др., 2007) наиболее интенсивное измельчение структуры происходит при угле пересечения каналов  $\varphi = 65^\circ$ .

## 4.2 Экстролинг-процесс

Экстролинг-процесс был запатентован в 1975 г. Б. Авитцуром и представляет собой способ совмещения процессов прокатки и прессования в одном очаге деформации (Сидельников, С.Б., и др., 2005). В отличие от конформ-процесса в данном случае роль подающих элементов выполняют два вала с ручьями, которые при вращении втягивают заготовку в очаг деформации и выдавливают ее через прессовую матрицу (рис. 32). Возникающие при этом активные силы трения суммарно должны быть равны силе прессования.

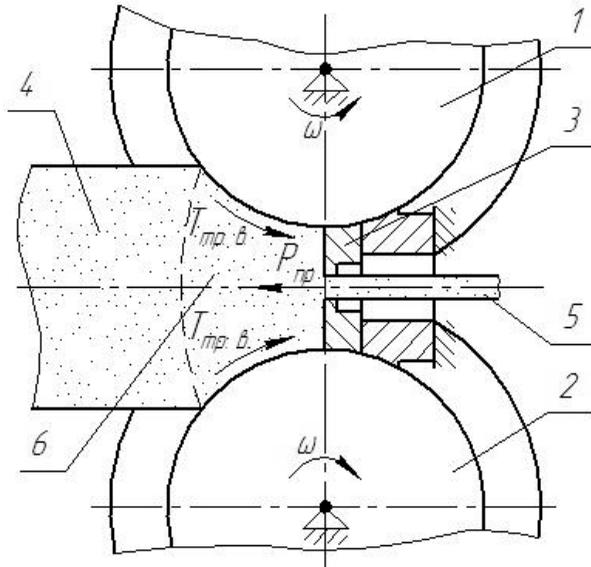


Рис. 32. Схема экстролинг-процесса: 1, 2 – подающие валки; 3 – матрица; 4 – заготовка; 5 – изделие; 6 – очаг пластической деформации

Для осуществления процесса исходная заготовка 4 непрерывно задается в ручей подающих валков 1 и 2, обжимается в нем, что полностью соответствует стадии прокатки, и выдавливается в канал матрицы 3, установленной на выходе из ручья.

Рассматриваемый процесс сочетает в себе низкие потери на трение и малую продолжительность обработки, характерные для прокатки, и большие степени деформации, возможные при прессовании.

Однако экстролинг-процесс не нашел должного применения в промышленности, т.к. предложенное техническое решение (использо-

вание открытого калибра, расположение матрицы на общей вертикальной оси валков и т. д.) не обеспечивало устойчивого протекания процесса и создания необходимых для прессования металла давлений. Поэтому было создано только одно в СНГ прессопрокатное устройство ППУ-600 в УкрГосНИИКМ «Прометей» (г. Мариуполь) для изготовления на нем сложных алюминиевых профилей судостроительной промышленности.

#### 4.2.1 Асимметричный экстролинг-процесс

С целью устранения приведенных выше недостатков экстролинг-процесса было предложено использовать асимметричную прокатку вместо обычной, т.е. для втягивания заготовки в очаг деформации используются валки неодинакового диаметра (рис. 33).

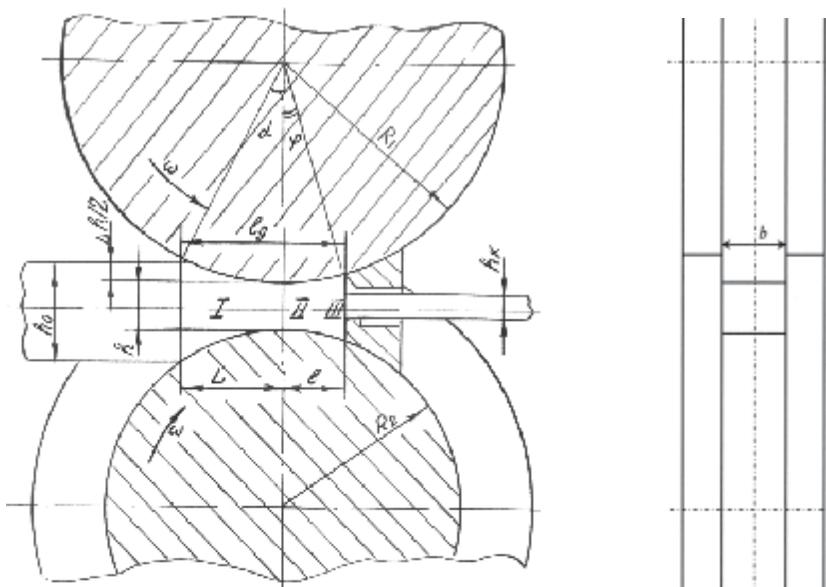


Рис. 33. Схема асимметричного экстролинг-процесса

Т.к. процесс выдавливания металла через канал матрицы осуществляется за счет активных сил трения, создаваемых поверхностями валков, то периферийный слой металла не только не отстает от центральных, но и может опережать последние, что позволяет сделать истечение металла более равномерным.

Одним из наиболее важных вопросов, возникающих при разработке технологии и проектировании оснастки для асимметричного экстролинг-процесса, является его устойчивость, под которой понимается стабильность установившегося процесса деформации металла, т.е. непрерывное выдавливание пресс-изделия. Для оценки устойчивости используется соотношение (Беляев, 2009):

$$P_1 > P_2, \quad (9)$$

где  $P_1$  – усилие, подводимое при помощи валков;  $P_2$  – усилие, необходимое для выдавливания пресс-изделия.

Усилие  $P_1$  определяется по формуле:

$$P_1 = \sigma_s (F_1 + F_2), \quad (10)$$

где  $\sigma_s$  – сопротивление металла деформации (предел текучести);

$F_1$  и  $F_2$  – площади контакта заготовки с гребнем выступа верхнего валка и дном ручья нижнего и заготовки со стенками ручья соответственно:

$$F_1 = 2 R_{cp} b \sin \alpha, \quad (11)$$

$$F_2 = 2 R_{cp} h \sin \alpha, \quad (12)$$

$R_{cp}$  – средний радиус валков:

$$R_{cp} = \frac{2 R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (13)$$

$R_1$  – радиус гребня выступа верхнего валка;

$R_2$  – радиус ручья нижнего валка;

$\alpha$  – угол захвата металла валками:

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{\Delta h}{2 R_{cp}} \right)^2} \quad (14)$$

$\varphi$  – угол, определяющий положение матрицы от общей оси валков;

$$\sin \varphi = \frac{l}{R_{cp}} \quad (15)$$

$l$  – удаление матрицы от общей оси валков;

$\Delta h$  – величина абсолютного обжатия при прокатке:

$$\Delta h = h_0 - h \quad (16)$$

$h_0$ —начальная толщина заготовки;  
 $h$ — высота калибра в наименьшем сечении;  
 $b$ — ширина калибра.

Оптимальными условиями для осуществления асимметричного экстрелинг-процесса является соотношение радиусов ручья  $R_2$  и гребня выступа  $R_1$  равное  $R_2/R_1 = 0,6 \div 1,0$  и удаление матрицы от общей оси валков  $l = 0,1 \div 0,7 R_2$ .

Подставив зависимости (11) и (12) в формулу (10), получим выражение расчета для усилия  $P_1$ :

$$P_1 = 2 \alpha + \varphi R_{cp} \sigma_s \left( b + h + \frac{h^2}{2R_{cp}} \right) \quad (17)$$

Усилие  $P_2$ , необходимое для выдавливания пресс-изделия в виде прутка, рассчитывается по формулам, известным из теории прессования:

$$P_2 = R_M + T_M + T_n, \quad (18)$$

где:  $R_M$  — усилие, идущее на осуществление деформации:

$$R_M = 2 F_M \sigma_s \ln \lambda, \quad (19)$$

$T_M$  — усилие, идущее на преодоление силы трения металла по поверхности матрицы:

$$T_M = 0,5 \sigma_s F_M f \ln \lambda, \quad (20)$$

$T_n$  — усилие, идущее на преодоление силы трения изделия о калибрующий пояска матрицы:

$$T_n = \pi \sigma_s r_M l_M f \lambda, \quad (21)$$

$r_M$  — радиус канала матрицы (радиус прессуемого прутка);

$l_M$  — длина калибрующего пояска матрицы;

$f$  — коэффициент трения при прессовании;

$F_M$  — площадь контакта распрессованной заготовки с матрицей:

$$F_M = b \left[ 2R_{cp} (1 - \cos \varphi) + h \right] \quad (22)$$

$\lambda$  — коэффициент вытяжки при прессовании:

$$\lambda = \frac{F_M}{\pi r_M^2} \quad (23)$$

Подставив зависимости (19)-(21) в формулу (18), получим выражение расчета для усилия  $P_2$ :

$$P_2 = \sigma_s \left[ 2 F_M \ln \lambda + 0,25 f + \pi r_M l_M f \lambda \right] \quad (24)$$

Исходя из вышеприведенных формул, основными факторами, влияющими на устойчивость асимметричного экстроллинг-процесса, являются диаметры валков, расстояние от зеркала матрицы до общей оси валков, а также величина абсолютного обжатия при прокатке и коэффициент вытяжки при прессовании.

#### 4.2.2 Экстроллинг-процесс с матрицей для РКУП

Одним из вариантов интенсификации сдвиговых деформаций при экстроллинг-процессе является использование матрицы для РКУП (рис. 34). В данном случае заготовка обжимается валками, распрессовывается до первоначальных размеров перед матрицей, а затем подвергается РКУП. Такую операцию совмещенной прокатки-прессования можно повторять требуемое число циклов до достижения УМЗ структуры, т.к. при деформировании заготовка не изменяет формы и размеров.

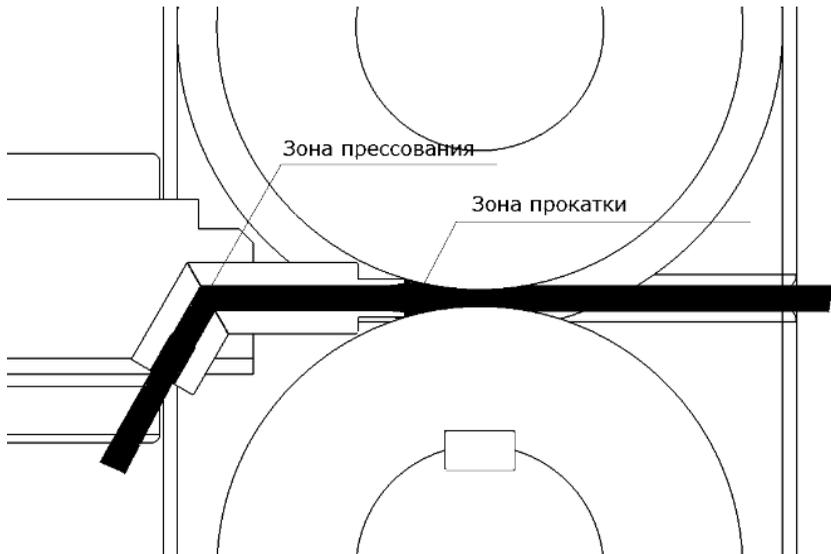


Рис. 34. Схема экстроллинг-процесса с матрицей для РКУП

### 4.2.3 Неравноканальное угловое прессование-прокатка

Экстроллинг-процесс получил развитие в виде способанеравноканального углового прессования-прокатки (рис. 35), который заключается в том, что лента 1 подается в зазор 3 между направляющим 2 и подающим 5 валками и при этом обжимается с уменьшением толщины на 5-10%. В дальнейшем деформируемый материал выдавливается в выходной канал 4, где его исходная толщина восстанавливается (Валиев, и др., 2007).

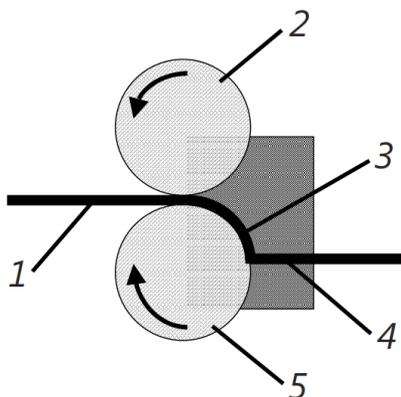


Рис. 35. Способ неравноканального углового прессования-прокатки:  
1 – заготовка; 2, 5 – направляющий и подающий валки; 3, 4 – каналы

Введение термина «неравноканальный» связано с небольшой разницей в толщине заготовки при ее прохождении через каналы 3 и 4.

### 4.3 Непрерывное РКУП

Отдельно необходимо отметить способ полунепрерывного РКУП (Пашинская, 2009), суть которого заключается в следующем (рис. 36). Длинная заготовка 3 при помощи подающих валков 4 и 5 задается во входной канал 2 матрицы 1 для РКУП. На выходе из канала 8 заготовка вытягивается вспомогательными валками 6 и 7. Характерной особенностью данного способа является многократное РКУП заготовки через последовательность матриц при помощи подающих и тянущих валков. Это приводит к значительной интенсификации процесса измельчения зерен и получению УМЗ структуры.

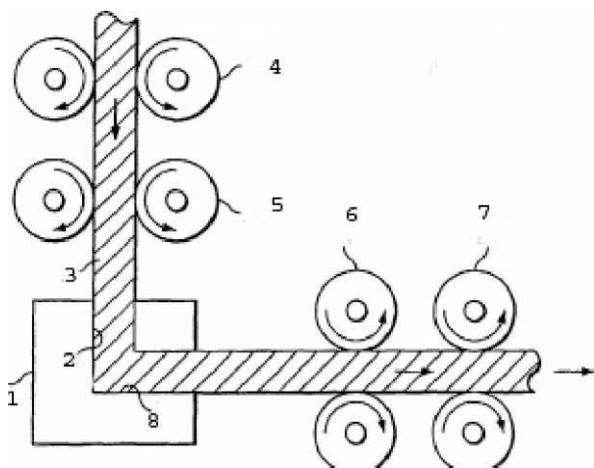


Рис. 36. Схема устройства полунепрерывного РКУП

## 5 СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 5.1 Структура и свойства УМЗ материалов

Формирование УМЗ структур приводит к кардинальному изменению свойств, в частности, к значительному повышению механических характеристик

Первым было детально проанализировано влияние размера зерна на предел текучести, в результате чего получено соотношение, называемое законом Холла-Петча:

$$\sigma = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}, \quad (25)$$

где  $\sigma$  – предел текучести;

$\sigma_0$  – внутреннее напряжение, препятствующее движению дислокации;

$k_y$  – коэффициент, связанный с проницаемостью границы зерна движению дислокаций;

$d$  – размер зерна;

Таким образом, как следует из зависимости (25), для повышения предела текучести, а значит и твердости, необходимо уменьшать размер зерен. Однако, проведенные исследования твердости материалов в зависимости от размеров зерен выявили аномальную зависимость (Азаренков, и др., 2009), а именно снижение твердости с уменьшением размера зерна (рис. 37).

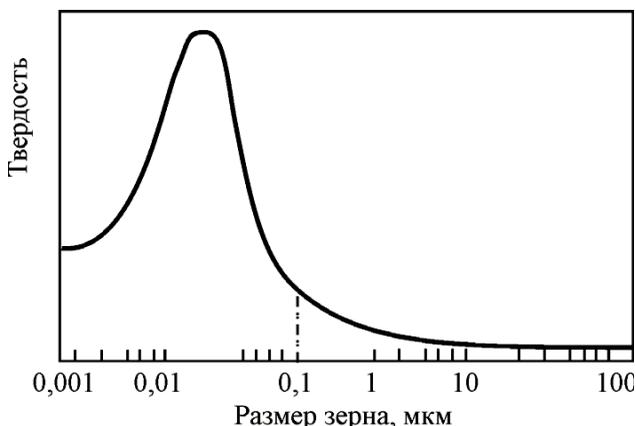


Рис. 37. Схема изменения твердости при уменьшении размера зерна

При уменьшении размера зерен до 7 нм и ниже вместо повышения твердости наблюдается обратный эффект Холла-Петча, т.е. имеет место разупрочнение с уменьшением размера зерна.

Природа экстремальной зависимости показателя прочности нанокристаллических тел от размера зерен оказалась довольно сложной. Чтобы ее понять, необходимо учитывать специфику механизма деформирования наноструктурных материалов, а именно – взаимное проскальзывание зерен по границам (иногда называемое ротационным разупрочнением), которое носит не дислокационный характер.

### **5.1.1 Структурные особенности материалов после ИПД**

При холодной деформации происходит измельчение зерна. Деформация же с нагревом одновременно вызывает рост зерен вследствие рекристаллизации. Вместе с тем холодная деформация ограничена исчерпыванием ресурса пластичности, вследствие чего деформирование прекращают из-за появления в некоторых местах трещин разрушения. При этом ресурс пластичности по изделию в целом к моменту местного трещинообразования не достигает предела. На физическом уровне холодную деформацию традиционно заканчивают после насыщения плоскостей скольжения зерен дислокациями.

Применение простого сдвига в методах ИПД для сильно нагартованного металла позволяет продолжать деформирование и не только избежать разрушения, но и добиться включения нового механизма деформации – ротационного гранично-зеренного перемещения. Деформация простого сдвига после исчерпывания плоскостей легкого скольжения дислокаций приводит к фрагментации (дроблению) зерен путем отрыва по дислокационным границам. После этого вступает в действие механизм ротационного перемещения фрагментов зерен в веществе межзеренных прослоек. Дальнейшая деформация на микроуровне происходит за счет продолжающегося дробления зерен при их ротационном зернограничном перемещении.

Изложенный упрощенный механизм пластической деформации, приводящий к образованию наноструктурного состояния, изображен нарис. 38.

Таким образом, переход от крупнозернистых материалов к УМЗ характеризуется уменьшением размера зерен и, соответственно, повышением доли межзеренных границ в объеме материала. Вместе с этим

происходит изменение структурных характеристик, как зерен, так и самих межзеренных границ.

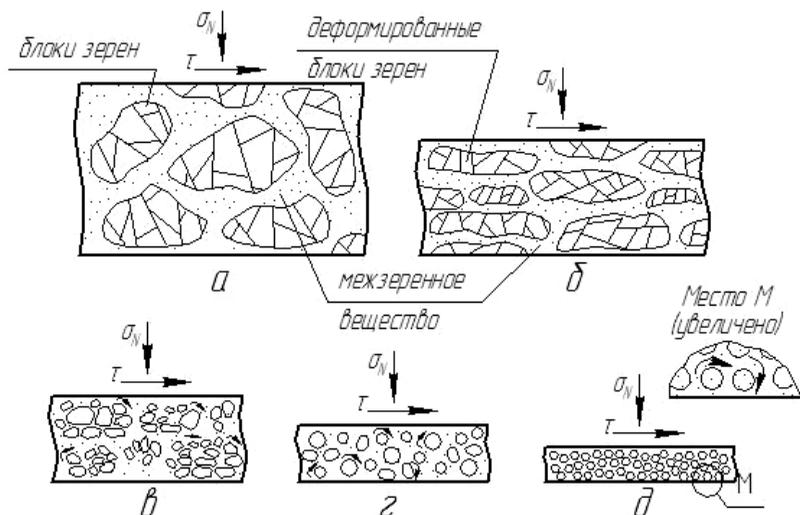


Рис. 38 Схема механизма деформации при получении наноструктурного состояния: а – начало деформационного процесса (деформация по плоскостям скольжения); б – внутривиточная и внутривиточная деформация дислокаций; в – фрагментация зерен разрывом по дислокационным границам; г – ротационная деформация зерен по механизму зернограничного перемещения с продолжающейся фрагментацией; д – предел деформационного измельчения зерен

Для наночастиц доля атомов, находящихся в тонком поверхностном слое, по сравнению с мезо- и микрочастицами заметно возрастает. Действительно, доля приповерхностных атомов будет пропорциональна отношению площади поверхности частицы  $S$  к ее объему  $V$ . Если обозначить характерный размер кристаллита как  $d$ , то:

$$\frac{S}{V} \propto \frac{d^2}{d^3} \propto \frac{1}{d} \quad (26)$$

У поверхностных атомов, в отличие от находящихся в объеме твердого тела, задействованы не все связи с соседними атомами. В результате в приповерхностном слое возникают сильные искажения кристаллической решетки. Другим аспектом, является тот факт, что точечные и линейные дефекты (вакансий и дислокаций) стремятся перейти на свободную поверхность. При малых размерах частиц этот эффект заметно возрастает, что может приводить к выходу большин-

ства структурных дефектов на поверхность и очистке материала наночастицы от дефектов структуры и химических примесей (Азаренков, и др., 2009).

Межзеренные границы играют ключевую роль в структуре УМЗ материалов и позволяют существенно изменять свойства материалов. Можно выделить объемную долю следующих составляющих: границ раздела, границ зерен и тройных стыков.

Объемную долю границ раздела можно оценить по формуле:

$$\Delta V_{zp} = 1 - \frac{d - s}{d^3}, \quad (27)$$

где  $s$  – толщина границ раздела. Объемную долю границ зерен – по формуле:

$$\Delta V_{z3} = \frac{3s}{d^3} (d - s)^2, \quad (28)$$

а объемную долю тройных стыков – как разность:

$$\Delta V_{mc} = \Delta V_{zp} - \Delta V_{z3} \quad (29)$$

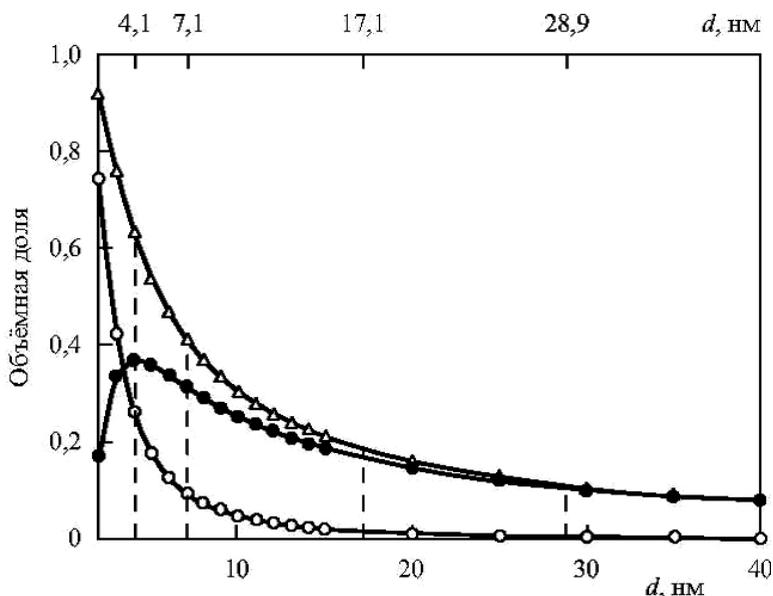


Рис. 39. Зависимость объемных долей границ раздела, границ зерен и тройных стыков на структурных материалах (Андреевский, и др., 2005)

Из зависимостей (27)-(29) видно, что с уменьшением размера зерна от 1 мкм до 2 нм объемная доля межзеренной компоненты увеличивается с 0,3 до 87,5 %. Объемные доли межзеренной и внутризеренной компонент достигают одинакового значения (по 50%) при размере зерна порядка 5 нм. После уменьшения размера зерна ниже 10 нм начинает сильно возрастать доля тройных стыков (рис. 39).

Комплексные экспериментальные исследования показали, что границы зерен носят неравновесный характер, обусловленный присутствием зернограничных дефектов с высокой плотностью. Эта неравновесность характеризуется избыточной энергией границ зерен и наличием дальнедействующих упругих напряжений; границы зерен имеют кристаллографически упорядоченное строение, а источниками упругих полей выступают зернограничные дислокации и их комплексы. Неравновесность границ зерен вызывает возникновение высоких напряжений и искажения кристаллической решетки, изменение межатомных расстояний и появление значительных смещений атомов, вплоть до потери дальнего порядка.

Все это сказывается на физико-химических, физико-механических и других свойствах, влияя, тем самым, на эксплуатационные ресурсы наноматериалов. Перейдем теперь к рассмотрению влияния структурных элементов на основные механические свойства УМЗ материалов.

### **5.1.2 Механические свойства материалов после ИПД**

Металлы и сплавы с УМЗ структурой, полученной различными методами ИПД, обладают уникальным (даже противоречивым) сочетанием механических свойств. Так в отличие от традиционных конструкционных материалов, обладающих либо высокой прочностью, либо высокой пластичностью (рис. 40), УМЗ материалы превосходят их одновременно по обоим параметрам (табл. 2). В отдельных случаях низкая пластичность нанокристаллических материалов вызывается, по-видимому, сложностью образования, размножения и движения дислокаций, а также наличием пор, микротрещин и включений в этих материалах.

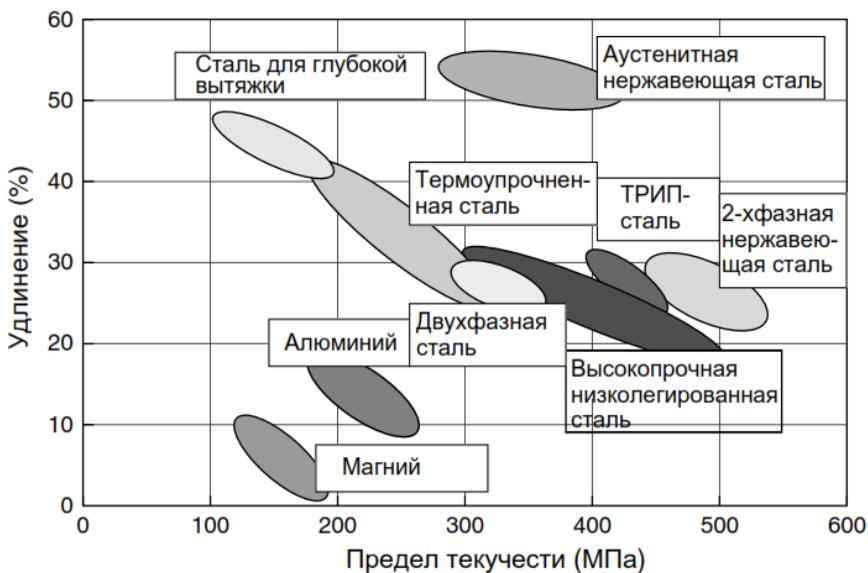


Рис. 40. Механические свойства традиционных конструкционных материалов

Табл. 2. Изменение механических свойств в зависимости от размеров зерна

Материал	Размер зерна, мкм	T, °C	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение до разрушения, %
Титановый сплав BT1-00	50	20	380	29
	0,1		730	18
Титановый сплав BT6	10	20	1050	9
	0,4		1300	7
	10	600	585	46
	0,4		200	200
Титановый сплав BT8	5	20	1050	45
	0,06		1400	53
Никелевый сплав RSR Rene 80	100	20	375	30
	0,2		850	33
Сплав Al-Mg-LiSc-Zr	10	20	450	5
	0,2		600	6
Сталь Fe-25%Cr-0,2%Ti-0,12C	50	20	485	26
	0,2		730	17

Рассмотрим результаты механических испытаний медных образцов после РКУП со средним размером зерен 200-300 нм (Валиев, и др., 2007). Типичными особенностями кривой деформации УМЗ меди в сравнении с хорошо отожженным крупнозернистым состоянием в данном случае являются: более высокое значение предела текучести; значительное деформационное упрочнение в узком интервале степеней деформации (примерно 5 %) на начальной стадии деформации; практически полное отсутствие деформационного упрочнения на последующей стадии деформации (рис. 41). Последнее, очевидно, обусловлено изменением механизма деформации в наноструктурных металлах, когда наряду с действием внутриверхнего дислокационного скольжения развивается зернограничное проскальзывание.

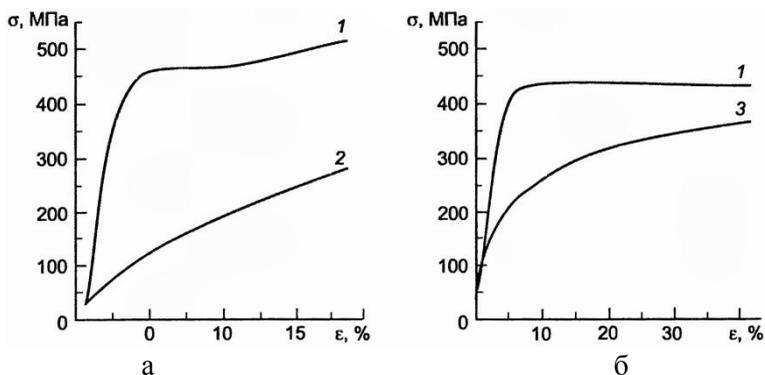


Рис. 41. Кривые упрочнения образцов наноструктурной Сипри комнатной температуре: а – растяжение; б – сжатие; 1 – РКУП; 2 – отжиг (500°C, 1 час); 3 – отжиг (500°C, 3 мин.)

В табл. 3 приведены результаты механических испытаний различных металлов и сплавов в зависимости от метода ИПД – РКУП или АПС (Ullah, 2006).

Таким образом, полученные в результате обработки материалы в УМЗ состоянии имеют самые разнообразные свойства:

- традиционные твердые сплавы на алюминиевой основе (Д16) имеют повышенную прочность, но низкую пластичность, поэтому целесообразность их обработки до наноструктуры требует дальнейшего исследования;

Табл. 3. Влияние метода ИПД на уровень механических свойств

Сплав	Метод ИПД	Т, °С	Предел прочности, МПа		Относительное удлинение, %	
			До ИПД	После ИПД	До ИПД	После ИПД
Al 1100	АПС	200	80	300	44	6
Al1100	АПС	200	50	250	30	3
A8011	АПС	200	50	150	48	10
AA8011	АПС	-	35	160	42	18
AA8011	АПС	200	35	155	48	10
Низкоуглеродистая сталь	АПС	515	183	695	75	4
IF-сталь	АПС	500	274	751	57	6
Al-Mg5083	АПС	200	319	551	25	6
Ti	РКУП	500	1000	1400	-	-
Cu	РКУП	-	120	450	46	4
Cu	РКУП	200	120	400	-	-
Al-10.8Ag	РКУП	-	175	275		
Al 3004	РКУП	-	80	400	32	14

– мягкие сплавы системы Al-Mg-Mn, наоборот, приобретают повышенную прочность (до 560 МПа) при удовлетворительной пластичности, что позволяет рекомендовать их применение в силовых элементах конструкций;

– чистый титан приобретает свойства высокопрочных сплавов, поэтому используется уже в настоящее время взамен их в различных областях медицинского протезирования.

Итак, УМЗ структуры материалов открывают уникальные возможности для получения нового уровня свойств: высокой прочности, твердости, износостойкости при достаточно высокой пластичности.

## 5.2 Применение наноматериалов в технике

Возможные направления применения УМЗ материалов, полученных методами ИПД, приведены в табл. 4. Наиболее перспективным среди них является использование эффекта сверхпластичности, который наблюдается практически у всех УМЗ материалов (Чувильдеев, В.Н., и др., 2006).

Сверхпластичность – способность материала с определенной структурой при оптимальных температурно-скоростных условиях ис-

пытывать очень большие (несколько сотен процентов) деформации без разрушения.

Табл. 4. Промышленное применение наноматериалов

Материалы	Область применения	Потенциальные заказчики
Высокопрочные магниевые сплавы с эффектом сверхпластичности	Детали кузова автомобиля Элементы двигателя Корпуса электронных приборов (корпуса ноутбуков, сотовых телефонов и пр.)	Предприятия авиакосмического комплекса Предприятия автомобильной промышленности Предприятия электронной промышленности
Высокопрочные алюминиевые сплавы с эффектом высокоскоростной сверхпластичности	Элементы фюзеляжа, обтекатели Элементы корпуса и переборки	Предприятия авиакосмического комплекса Судостроительные предприятия
Высокопрочные титановые сплавы	Крепеж Медицинские имплантаты	Предприятия авиакосмического комплекса Медицинские учреждения
Поршневые сплавы с уникальными механическими свойствами	Высокопрочные и высоко ресурсные поршни двигателей внутреннего сгорания	Предприятия автомобильной промышленности Моторостроительные предприятия

Эффект сверхпластичности наблюдается в сравнительно узком температурно-скоростном интервале, параметры которого зависят от структуры материала.

Наиболее перспективным методом получения готовых изделий из материалов, обладающих эффектом сверхпластичности, является сверхпластическая формовка, которая позволяет значительно снизить себестоимость изготовления изделия, его вес, а также значительно упростить технологический процесс изготовления изделий сложной формы.

Еще одним перспективным направлением является использование наноструктурных титановых сплавов для медицинских имплантатов и устройств. Например, медицинское сообщество в области травматологии и стоматологии проявляет большой интерес к этим материалам для имплантатов из-за их высоких физических, химических и механических свойств. Это связано с тем, что, во-первых, титан и его сплавы имеют высокую коррозионную стойкость во многих средах. Во-

вторых, титановые сплавы обладают исключительной биосовместимостью с человеческими тканями и не провоцируют аллергических реакций, воспалений, как, например, нержавеющие стали или кобальто-хромовые сплавы. В-третьих, титан и титановые сплавы имеют высокую прочность и низкий модуль упругости, которые наиболее предпочтительны для применения в ортопедии и травматологии.

Однако разработки современных медицинских имплантатов предъявляют требования не только к дальнейшему увеличению прочности, но к повышению сопротивляемости материала имплантата высоким усталостным нагрузкам, что можно осуществить методами ИПД.

Например, исследован метод получения полуфабрикатов из технически чистого титана Grade 2 и Grade 4, диаметром 6-8 мм и длиной до 1м, с использованием комбинированных схем, включающих обработку ИПД, термических и термомеханических обработок кузнечной протяжкой, прокаткой, волочением. Универсальная технологическая схема позволяет получать наноструктурные титановые полуфабрикаты, прочность которых в 2,5 раза превышает прочность титана в исходном состоянии. Усталостная прочность таких титановых прутков достигала 450 МПа, по сравнению с 240 МПа в отожженном прутке.

Также была исследована возможность конструкционного применения наноструктурного титана для высокопрочных резьбовых крепежных изделий в автомобилестроении. На заготовки, полученные РКУП, накатывалась резьба на специальной установке. Полученные резьбовые шпильки служили образцами для испытаний на малоцикловую усталость. Схема нагружения представляла собой знакопостоянное растяжение при пульсирующем цикле.

По результатам испытаний установлено, что формирование наноструктуры в матрице шпильки позволило существенно повысить циклическую долговечность резьбы в малоцикловой области (число циклов до разрушения для шпилек из исходного и наноструктурного титана составляло, соответственно, 4211 и 17504).

Несмотря на успешную демонстрацию физико-химических свойств в титане и его сплавах, за счет формирования в них наноструктурных состояний, получение объемных титановых заготовок с УМЗ-структурой в промышленных условиях со стабильно высокими свойствами представляет собой сложную самостоятельную проблему.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уменьшение размеров частиц, составляющих объект, придает ему в целом новые свойства. Это вызвано: во-первых, влиянием развитых границ, т.к. приграничные условия отличаются от внутризеренных; а во-вторых, отсутствием внутри зерна условий, которые проявляются в большом объеме. Поэтому наноразмеры зерен способны придать при сохраняющемся химическом составе существенно новые качества тому же самому сплаву.

Для получения УМЗ структур в металлах и сплавах были использованы и развиты специальные схемы механического деформирования, позволяющих достичь больших деформаций материалов при относительно низких температурах, а также определение оптимальных режимов обработки материалов. К настоящему времени наибольшее распространение получили методы ИПД на основе процессов прокатки и прессования, которые обеспечивают высокую эффективность и производительность. Имеются также работы по получению нано- и субмикроструктур в ряде металлов и сплавов путем использования всесторонней ковки, РКУ-вытяжки, мультиосевой деформации и др.

В настоящее время наноструктура в ходе ИПД получена на алюминии, железе, магнии вольфраме, никеле, титане и их сплавах. Такая структура приводит к изменению физических и механических свойств материалов (значительное повышение прочности при хорошей пластичности, повышение износостойкости, проявление высокоскоростной и низкотемпературной сверхпластичности).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Angella, G., Dellasega, D. и Fare, S. A comparison between asymmetric rolling and accumulative roll bonding as means to refine the grain structure of an Al-Mg-Si alloy [Статья] // Metallurgical Science and Technology. - 2010 г.. - 28-1. - стр. 22-26.
2. Chen, Y.-T., Wang, D.-A. и Uan, J.-Y. Tensile strength and deformation microstructure of Al-Mg-Si alloy sheet by through-width vibration rolling process [Статья] // Materials Science and Engineering A. - [б.м.] : Elsevier, 2012 г.. - 551. - стр. 296-300.
3. Ji, Y.H. и Park, J.J. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes [Статья] // Materials Science and Engineering A. - [б.м.] : Elsevier, 2009 г.. - 499. - стр. 14-17.
4. Kim, W.J., Lee, K.E. и Choi, S.-H. Mechanical properties and fine-grained copper prepared by a high-speed-ratio differential speed rolling microstructure of ultra [Статья] // Materials Science and Engineering A. - [б.м.] : Elsevier, 2009 г.. - 506. - стр. 71-79.
5. Lenard J.G. Primer on flat rolling [Book]. - [s.l.] : Elsevier.
6. Ren, T., Shan, D. и Chen, Y. Surface plastic deformation distribution and microstructural evolution in the compound rolling of Ti-50Al billet [Статья] // Materials and Design. - [б.м.] : Elsevier, 2010 г.. - 31. - стр. 3457-3462.
7. Song, K.H., Kim, H.S. и Kim, W.Y. Enhanced grain refinement and mechanical properties in a severely plastic deformed Ni-30Cr alloy [Статья] // Materials Science and Engineering A. - [б.м.] : Elsevier, 2011 г.. - 528. - стр. 7968-7973.
8. Tsuji, N., Sato, Y. и Lee, S.-H. ARB (accumulative roll-bonding) and other new techniques to produce bulk ultrafine grained materials [Статья] // Advanced Engineering Materials. - Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2003 г.. - 5. - стр. 338-344.
9. Ullah W. Development of ultra-fine grained aluminium by severe plastic deformation [Книга]. - Ranchi : Birla Institute of Technology, 2006.
10. Азаренков Н.А., Береснев, В.М. и Погребняк, А.Д. Наноматериалы, нанопокртия, нанотехнологии [Книга]. - Харьков : ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009.
11. Андриевский С.А. и Рагуля А.В. Наноструктурные материалы [Книга]. - М. : Издательский центр "Академия", 2005.
12. Анищик, В.М., Борисенко, В.Е. и Жданок, С.А. Наноматериалы и нанотехнологии [Книга]. - Минск : Изд. центр БГУ, 2008.
13. Балоян, Б.М., Колмаков, А.Г. и Алымов, М.И. Наноматериалы: классификация, особенности свойств, применение и технологии получения [Книга]. - Москва : [б.н.], 2007.
14. Беляев С.В. Расчет контактных напряжений при совмещенной прокатке-прессовании [Статья] // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. - 2009 г.. - 2. - стр. 167-176.
15. Валиев Р. З. и Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией [Книга]. - М. : Логос, 2000.
16. Валиев Р.З. и Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства [Книга]. - М. : ИКЦ "Академкнига", 2007.

17. Волокитин, А.В. и Фефелов, А.М. Развитие совмещенного способа деформирования "прессование-волочение" с использованием равноканальной ступенчатой матрицы [Статья] // Вестник науки Сибири. - 2011 г. - 1. - стр. 691-694.
18. Добаткин С. В. Наноматериалы. Объемные металлические нано- и субмикроструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией [Книга]. - М. : МИСиС, 2007.
19. Довженко, Н.Н., Сидельников, С.Б. и Беляев, С.В. Определение усилия прижима матрицы при реализации процесса совмещенной прокатки-прессования [Статья] // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. - 2012 г. - 2. - стр. 29-34.
20. Ковшов, А.Н., Назаров, Ю.Ф. и Ибрагимов, И.М. Основы нанотехнологии в технике [Книга]. - Москва : МГОУ, 2006.
21. Матренин С.В. и Овечкин, Б.Б. Наноструктурные материалы в машиностроении [Книга]. - Томск : Томский политехнический университет, 2010.
22. Пашинская Е.Г. Физико-механические основы измельчения структуры при комбинированной пластической деформации [Книга]. - Донецк : Изд-во "Вебер", 2009.
23. Сидельников, С.Б., Довженко, Н.Н. и Загиров, Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов [Книга]. - Москва : Макс Пресс, 2005.
24. Чернов Д.К. Избранные труды по металлургии и металловедению [Книга]. - Москва : Наука, 1983.
25. Чувильдеев, В.Н., Пирожникова, О.Э. и Грязнов, М.Ю. Нано- и микрокристаллические материалы, полученные методами интенсивного пластического деформирования [Книга]. - Нижний Новгород : [б.н.], 2006.
26. Шабалов, И.П. и Шафигин, З.К. Обобщение исследований по снижению затрат при производстве толстолистовой стали на реверсивном и планетарном станах [Книга]. - Москва : Теплоэнергетик, 2003.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ  
ДАВЛЕНИЕМ С БОЛЬШИМИ ИНТЕНСИВНЫМИ  
ПЛАСТИЧЕСКИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ В ПРОКАТНО-  
ПРЕССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

**Электронные методические указания  
к лабораторным работам**

САМАРА 2013

УДК: 620.22:539.37

Е 714

Составитель: **Ерисов Ярослав Александрович**

**Инновационные процессы обработки металлов давлением с большими интенсивными пластическими деформациями в прокатно-прессовом производстве** [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания к лаб. работам / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост. Я.А. Ерисов. – Электрон. текстовые и граф. дан. ( 0,49 Мбайт). - Самара, 2013.

Дано описание лабораторных работ по инновационным процессам обработки металлов давлением с большими интенсивными пластическими деформациями в прокатно-прессовом производстве. Выполнение каждой работы предполагает предварительное знакомство студентов с методикой ее проведения, теорией и осуществляемыми расчетами и замерами.

Указания предназначены для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по магистерской программе «Структурирование сплавов до наноуровневого размера в металлургических циклах с применением инновационных технологий способов литья и обработки металлов давлением с воздействием электромагнитных источников» по направлению подготовки 150400.68 «Металлургия» (ФГОС-3), изучающих дисциплину «Инновационные процессы обработки металлов давлением с большими интенсивными пластическими деформациями в прокатно-прессовом производстве» в А семестре.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ  
ДАВЛЕНИЕМ С БОЛЬШИМИ ИНТЕНСИВНЫМИ  
ПЛАСТИЧЕСКИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ В ПРОКАТНО-  
ПРЕССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

**Электронные методические указания  
к практическим занятиям**

САМАРА 2013

УДК: 620.22:539.37

И665

Составитель: **Ерисов Ярослав Александрович**

**Инновационные процессы обработки металлов давлением с большими интенсивными пластическими деформациями в прокатно-прессовом производстве** [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания к практ. занятиям / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); -сост. Я.А. Ерисов. – Электрон. текстовые и граф. дан. ( 0,22 Мбайт). - Самара, 2013.

Даны методические указания по расчету устойчивости процесса совмещенной прокатки-прессования – асимметричного экстрелинг-процесса. Приводится краткое описание сущности процесса и расчетные формулы.

Указания предназначены для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по магистерской программе «Структурирование сплавов до наноуровневого размера в металлургических циклах с применением инновационных технологий способов литья и обработки металлов давлением с воздействием электромагнитных источников» по направлению подготовки 150400.68 «Металлургия» (ФГОС-3), изучающих дисциплину «Инновационные процессы обработки металлов давлением с большими интенсивными пластическими деформациями в прокатно-прессовом производстве» в А семестре.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2013



Т.к. процесс выдавливания металла через канал матрицы осуществляется за счет активных сил трения, создаваемых поверхностями валков, то периферийный слой металла не только не отстает от центральных, но и может опережать последние, что позволяет сделать истечение металла более равномерным.

Одним из наиболее важных вопросов, возникающих при разработке технологии и проектировании оснастки для асимметричного экстрелинга-процесса, является его устойчивость, под которой понимается стабильность установившегося процесса деформации металла, т.е. непрерывное выдавливание пресс-изделия. Для оценки устойчивости используется соотношение:

$$P_1 > P_2, \quad (1)$$

где  $P_1$ – усилие, подводимое при помощи валков;  $P_2$ – усилие, необходимое для выдавливания пресс-изделия.

Усилие  $P_1$  определяется по формуле:

$$P_1 = \sigma_s (F_1 + F_2), \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  – сопротивление металла деформации (предел текучести);

$F_1$  и  $F_2$ – площади контакта заготовки с гребнем выступа верхнего валка и дном ручья нижнего и заготовки со стенками ручья соответственно:

$$F_1 = 2 (\alpha + \varphi) R_{cp} b, \quad (3)$$

$$F_2 = (\alpha + \varphi) (2 R_{cp} h + h^2) \quad (4)$$

$R_{cp}$ – средний радиус валков:

$$R_{cp} = \frac{2 R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

$R_1$ – радиус гребня выступа верхнего валка;

$R_2$ – радиус ручья нижнего валка;

$\alpha$ – угол захвата металла валками:

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{\Delta h}{2 R_{cp}} \right)^2} \quad (6)$$

$\varphi$ – угол, определяющий положение матрицы от общей оси валков;

$$\sin \varphi = \frac{l}{R_{cp}} \quad (7)$$

$l$  – удаление матрицы от общей оси валков;

$\Delta h$  – величина абсолютного обжатия при прокатке:

$$\Delta h = h_0 - h \quad (8)$$

$h_0$  – начальная толщина заготовки;

$h$  – высота калибра в наименьшем сечении;

$b$  – ширина калибра.

Оптимальными условиями для осуществления асимметричного экстроллинг-процесса является соотношение радиусов ручья  $R_2$  и гребня выступа  $R_1$  равное  $R_2/R_1 = 0,6 \div 1,0$  и удаление матрицы от общей оси валков –  $l = 0,1 \div 0,7 R_2$ .

Подставив зависимости (3) и (4) в формулу (2), получим выражение расчета для усилия  $P_1$ :

$$P_1 = 2 \alpha + \varphi R_{cp} \sigma_s \left( b + h + \frac{h^2}{2R_{cp}} \right) \quad (9)$$

Усилие  $P_2$ , необходимое для выдавливания пресс-изделия в виде прутка, рассчитывается по формулам, известным из теории прессования:

$$P_2 = R_m + T_m + T_n, \quad (10)$$

где:  $R_m$  – усилие, идущее на осуществление деформации:

$$R_m = 2 F_m \sigma_s \ln \lambda, \quad (11)$$

$T_m$  – усилие, идущее на преодоление силы трения металла по поверхности матрицы:

$$T_m = 0,5 \sigma_s F_m f \ln \lambda, \quad (12)$$

$T_n$  – усилие, идущее на преодоление силы трения изделия о калибрующий пояска матрицы:

$$T_n = \pi \sigma_s r_m l_m f \lambda, \quad (13)$$

$r_m$  – радиус канала матрицы (радиус прессуемого прутка);

$l_m$  – длина калибрующего пояска матрицы;

$f$  – коэффициент трения при прессовании;

$F_m$  – площадь контакта распрессованной заготовки с матрицей:

$$F_M = b \left[ 2 R_{cp} (1 - \cos \varphi) + h \right] \quad (14)$$

$\lambda$  – коэффициент вытяжки при прессовании:

$$\lambda = \frac{F_M}{\pi r_M^2} \quad (15)$$

Подставив зависимости (11)-(13) в формулу (10), получим выражение расчета для усилия  $P_2$ :

$$P_2 = \sigma_s \left[ 2 F_M \ln \lambda + 0,25 f + \pi r_M l_M f \lambda \right] \quad (16)$$

Исходя из вышеприведенных формул, основными факторами, влияющими на устойчивость асимметричного экстролинг-процесса, являются диаметры валков, расстояние от зеркала матрицы до общей оси валков, а также величина абсолютного обжатия при прокатке и коэффициент вытяжки при прессовании.

### Задание

Установить влияние величины удаления  $l$  зеркала матрицы от оси валков и абсолютного обжатия  $\Delta_h$  на стадии прокатки на возможность осуществления экстролинг-процесса (его устойчивость).

Расчеты выполнить на примере прессования свинцового прутка диаметром 10 мм из заготовки размерами 20x20 мм. Предел текучести свинца  $\sigma_s = 20$  МПа.

Установка для экстролинг-процесса установлена на базе прокатного стана Дуо 300. Радиус ручья  $R_2$  принять равным 95 мм, а гребня выступа  $R_1 = 120$  мм. Ширина калибра  $b=22$  мм; длина калибрующего пояска матрицы  $l_M = 2$  мм. Коэффициент трения  $f = 0,2$ .

### Порядок выполнения работы

1. По формулам (2)-(16) рассчитать возможность осуществления экстролинг-процесса при величине удаления  $l$  зеркала матрицы от оси валков на 0, 10 и 25 мм и при величине абсолютного обжатия  $\Delta_h = 0, 2, 4, 6, 8$  мм. Результаты расчетов занести в табл. 1.

2. Построить графики расчетной зависимости  $\frac{P_1 - P_2}{P_1} 100\%$  от величины удаления  $l$  зеркала матрицы при различных значениях абсолютного обжатия  $\Delta_h$ .

Табл. 1. Результаты расчетов

$\Delta h$ , мм	l, мм	$\alpha$	$\varphi$	h, мм	$F_m$ , мм <sup>2</sup>	$\lambda$	$P_1$ , кН	$P_2$ , кН	$\frac{P_1 - P_2}{P_1} 100\%$
0	0								
	10								
	25								
2	0								
	10								
	25								
4	0								
	10								
	25								
6	0								
	10								
	25								
8	0								
	10								
	25								

3. Сделать выводы о влиянии величины удаления зеркала матрицы от оси валков и абсолютного обжатия на стадии прокатки на устойчивость экстролдинг-процесса.

### Содержание отчета

1. Краткое описание работы.
2. Схема экстролдинг-процесса и расчетные формулы (1)-(16).
3. Результаты расчетов (табл. 1).
4. Графики расчетной зависимости от величины удаления зеркала матрицы при различных значениях абсолютного обжатия.
5. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Что такое полунепрерывное прессование и каковы области его применения?
2. Какие виды непрерывного прессования применяются в производстве?
3. Что такое процесс экстролдинг-процесс?
4. Укажите преимущества и недостатки экстролдинг-процесса?
5. Каковы области применения экстролдинг-процесса?

6. Как рассчитываются технологические параметры экстралинг-процесса?

7. Что характеризует устойчивость экстралинг-процесса?

### **Список рекомендуемой литературы**

1. Валиев Р.З. и Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства [Книга]. - М.: ИКЦ "Академкнига", 2007.

2. Сидельников, С.Б., Довженко, Н.Н. и Загиров, Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов [Книга]. - Москва: Макс Пресс, 2005.

3. Перлин, И.Л. Теория прессования металлов [Книга]. – М.: Металлургия, 1975 – 448 с.

