

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Лысьвенский филиал

Кафедра Технические дисциплин
Направление подготовки 22.03.02 «Металлургия»
Направленность (профиль) «Обработка металлов и сплавов давлением»

Допускается к защите
И.о.зав. кафедрой, доцент
_____/Т.О. Сошина/
« ____ » _____ 20 ____ г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему: «Исследование напряженно-деформационного состояния заготовки при равноканальном угловом прессовании (РКУП)»

Студент Струк А.А. / _____ /

Состав ВКР:

1. Пояснительная записка на _____ стр.
2. Графическая часть на _____ листах.

Руководитель Трофимов В.Н. / _____ /

Лысьва, 2020 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 45 страниц пояснительная записка формата А4, 23 рисунков, 2 формулы, 20 литературных источников, три раздела состоящая из:

- общий раздел;
- технологический раздел;
- научно-технологическая часть.

Цель работы: исследование напряженно-деформационного состояния заготовки при равноканальном угловом прессовании (РКУП)

Объект исследования: заготовка из алюминиевого сплава Д16 и титанового сплава ВТ6.

Предмет исследования: исследование особенностей формирования заготовки из алюминиевого сплава марки Д16 и титанового сплава марки ВТ6 при равноканальном угловом прессовании(РКУП).

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие основные задачи:

- разработать модель процесса равноканального углового прессования(алюминиевого сплава Д16 и титанового сплава ВТ6);
- провести моделирование процесса РКУП (алюминиевого сплава Д16, титанового сплава ВТ6);
- провести анализ полученных результатов

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ:

σ_B - Предел кратковременной прочности , [МПа]

σ_T - Предел пропорциональности (предел текучести для остаточной деформации), [МПа]

δ_5 - Относительное удлинение при разрыве , [%]

ψ - Относительное сужение , [%]

КСУ - Ударная вязкость , [кДж / м²]

НВ- Твердость по Бринеллю , [МПа]

T- Температура, при которой получены данные свойства , [Град]

E- Модуль упругости первого рода , [МПа]

α - Коэффициент температурного (линейного) расширения (диапазон 20°-T)

λ -Коэффициент теплопроводности (теплоемкость материала) , [Вт/(м·град)]

ρ -Плотность материала , [кг/м³]

C-Удельная теплоемкость материала (диапазон 20°-T) , [Дж/(кг·град)]

R-Удельное электросопротивление, [Ом·м]

Содержание

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| 1.1 Общие сведения об обработке металлов давлением | 7 |
| 1.2 Сущность пластической деформации | 8 |
| 2. Анализ научно-технической и патентной литературы по методам ИПД. | 15 |
| 2.1 Основы метода ИПД | 15 |
| 2.2 Технологические способы, реализующие ИПД..... | 18 |
| 2.3. Особенности процесса РКУП | 22 |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ..... | 30 |
| 3. Постановка задачи исследования | 32 |
| 4. Моделирование процессов РКУП | 36 |
| 4.1. Моделирование для Алюминия Д16 | 36 |
| 4.2 Моделирование для Титанового сплава ВТ6 | 39 |
| 4.3 Сравнительный анализ результатов при равноканальном угловом прессовании (РКУП)..... | 42 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 43 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 44 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А | |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы работы. В настоящее время большое внимание уделяется объемным наноструктурным материалам (титановым и алюминиевым) сплавам, которые характеризуются чрезвычайно привлекательными механическими свойствами. Получение данных материалов осуществляется методами интенсивной пластической деформации (ИПД), при которых в заготовке накапливаются пластические деформации до 200-400%. В результате обработки материалов методами ИПД удается существенно увеличить их механические свойства. Так, например, предел текучести и усталостная прочность титановых сплавов возрастают практически в 1,5-2 раза, при этом пластичность уменьшается незначительно.

Повышенная прочность и твёрдость ультрамелкозернистых материалов обычно объясняется зависимостью Холла-Петча:

$$\sigma = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}; H = H_0 + k_H d^{-1/2},$$

Где d – размер зёрен, k_y и k_H – коэффициенты, σ_0 и H_0 – постоянные материала, соответствующие пределу текучести и твёрдости монокристалла.

Наиболее распространённым среди методов ИПД, которые приводят к образованию в материале наноструктурного состояния, является равноканальное угловое прессование (РКУП). Данный процесс характеризуется достаточно большим количеством факторов, влияющих на распределение накопленных пластических деформаций и технологических остаточных напряжений, к числу которых относятся многопроходная схема деформирования, трение между заготовкой и штампом, специфика геометрии зоны пересечения каналов, размеры внешнего и внутреннего радиуса сопряжения каналов и т.д. Таким образом, в заготовке из объемного наноматериала, полученного путем РКУП, формируются значительные накопленные пластические деформации.

Деформация сдвигом при РКУ прессовании за N проходов, описывается формулой:

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | 5 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | | | | |

$$\varepsilon_N = N \left[\frac{2ctg(\varphi/2 + \psi/2) + \psi \cos ec(\varphi/2 + \psi/2)}{\sqrt{3}} \right].$$

При внешнем угле $\psi = 0^\circ$ формула приобретает упрощенный вид:

$$\varepsilon_N = \frac{2}{\sqrt{3}} Nctg(\varphi/2).$$

Несмотря на большое число работ по изучению процесса РКУП, проблема оценки влияния технологической наследственности (остаточных напряжений и накопленных пластических деформаций) в заготовке на напряженно-деформированное состояние (НДС) и прочность элементов конструкций, выполненных из объемных наноматериалов, недостаточно изучена и является актуальной задачей.

Объект исследования: заготовка из алюминиевого сплава Д16 и титанового сплава ВТ6.

Предмет исследования: исследование особенностей формирования заготовки из алюминиевого сплава марки Д16 и титанового сплава марки ВТ6 при равноканальном угловом прессовании(РКУП)

Целью работы : исследование процессов интенсивной пластической деформации, в частности равноканального углового прессования.

.Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие основные задачи:

- Разработать модель процесса равноканального углового прессования(алюминиевого сплава Д16 и титанового сплава ВТ6);
- Провести моделирование процесса РКУП (алюминиевого сплава Д16, титанового сплава ВТ6);
- Провести анализ полученных результатов

ГЛАВА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

1.1 Общие сведения об обработке металлов давлением

Обработка металлов давлением известна с древнейших времен. Холодная ковка самородной меди и метеоритного железа была известна еще до того, как люди начали добывать металлы из руд (VII в. до н. э.). Техника обработки металлов давлением получила развитие в X...XIII веках, когда кузнецы научились изготавливать многослойные мечи и топоры со стальными закаливаемыми лезвиями, а также предметы бытового назначения, инструменты и ремесленные приспособления. Ручная ковка была исторически первым из применяемых до сих пор способов формоизменяющей обработки металлов. Первый паровой молот, появившийся в 1843 г., деформировал металл силой падения груза, а для поднятия которого использовался пар. В 1888 г. появился молот двойного действия, у которого верхняя «баба» при движении вниз дополнительно разгонялась силой пара. Прокатка металлов возникла позжековки и волочения. Первые сведения о прокатке относятся к XV в. (прокатка свинцовых полос). Основоположником современных методов прокатки принято считать английского изобретателя Г. Корта, изготовившего первый прокатный стан в 1783 г.

В основе всех процессов обработки металлов давлением (ОМД) лежит способность металлов и их сплавов под действием внешних сил пластически деформироваться, т. е., не разрушаясь, необратимо изменять свою форму и размеры. При этом изменяется структура металла, его механические и физические свойства.

Обработка металлов давлением — группа методов получения полуфабрикатов или изделий требуемых размеров и формы путем пластического деформирования заготовок за счет приложения внешних усилий.

Основными процессами ОМД являются: прокатка, прессование, волочение, ковка, объемная и листовая штамповка.

Преимуществами методов ОМД являются следующие:

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | 7 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | | | | |

- 1) низкая трудоемкость процессов и, следовательно, их высокая производительность;
- 2) рациональное использование металла (коэффициент использования металла (КИМ) приближается к единице);
- 3) стабильность размеров и относительно высокая точность изготавливаемых деталей при большой сложности их форм;
- 4) универсальность используемого прессового оборудования;
- 5) возможности для механизации и автоматизации технологических процессов;
- 6) простота осуществления процесса.

Главными недостатками методов ОМД являются следующие: относительно высокая стоимость инструмента (в условиях серийного производства она составляет до 14 % от себестоимости деталей), а также сложность и уникальность прессового оборудования.

1.2 Сущность пластической деформации

Следует отметить, что металлы характеризуются наличием металлической связи, когда в узлах атомно-кристаллической решетки расположены положительно заряженные ионы, окруженные электронным газом. Наличие такой металлической связи и придает металлу способность подвергаться пластической деформации.

Пластичность — свойство твердого тела под действием внешних сил или внутренних напряжений, не разрушаясь, необратимо изменять свою форму и размеры. Такое изменение формы и размеров металлического тела называют пластической деформацией.

Деформация — изменение формы и размеров твердого тела под влиянием приложенных внешних сил. Деформация может быть упругой, исчезающей после снятия нагрузки, и пластической, остающейся после снятия нагрузки.

Механизмы пластической деформации. Как бы не были малы приложенные к металлу усилия, они вызывают его деформацию. Начальные деформации всегда являются упругими, и величина их находится в прямой зависимости от

нагрузки (закон Гука). При упругой деформации под действием внешних сил изменяются расстояния между атомами в кристаллической решетке. После снятия нагрузки атомы под действием межатомных сил возвращаются в исходное положение, и металл восстанавливает свои первоначальные размеры и форму.

Пластическая деформация обусловлена движением дислокаций, что вызывает макропластическую деформацию материала. Основными механизмами пластической деформации - скольжение и двойникование (рисунок 1.2.1.а,б). Металлы и сплавы в большинстве случаев деформируются путём скольжения.

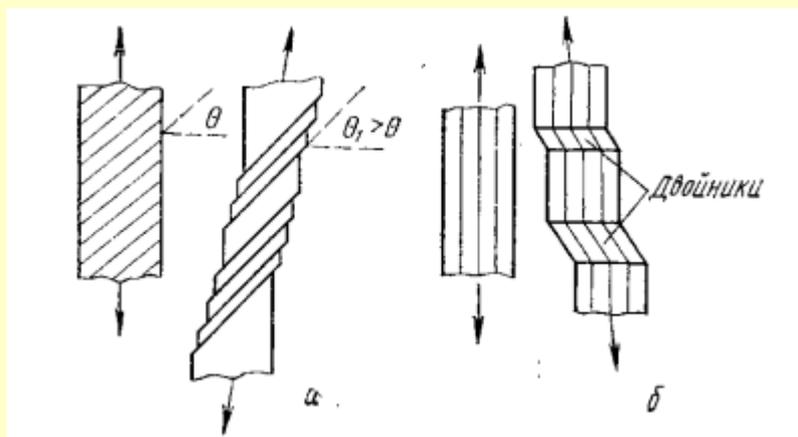


Рисунок 1.2.1 а,б Схемы пластической деформации скольжением (а) и двойникованием(б).

Величина макропластической деформации связана с плотностью дислокаций, длиной пробега и вектором Бюргерса \vec{b} следующей формулой:

$$g = \rho \vec{b} l \quad (1.1)$$

Скольжение. При пластической деформации одна часть кристалла необратимо сдвигается по отношению к другой на целое число периодов атомно-кристаллической решетки — смещается по так называемым плоскостям сдвига (скольжения). Следует отметить, что ими являются кристаллографические плоскости, в которых находится наибольшее количество атомов. Расположение этих плоскостей зависит от типа атомно-кристаллической решетки металла. У железа, вольфрама, молибдена и других металлов с объемноцентрированной кубической (ОЦК) решеткой имеется шесть плоскостей сдвига (в каждой из них имеется по два направления сдвига) и так называемая система скольжения

(имеет $6 \times 2 = 12$ элементов сдвига) (рисунок 1.2.2, а). При этом γ -железо, медь, алюминий и другие металлы с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой имеют четыре плоскости сдвига с тремя направлениями скольжения в каждой, т. е. $4 \times 3 = 12$ элементов сдвига (рисунок 1.2.2, б). У цинка, магния и других металлов с гексагональной плотноупакованной (ГПУ) решеткой имеется одна плоскость с тремя направлениями скольжения, т. е. три элемента сдвига (рисунок 1.2.2, в).

Чем больше элементов сдвига в решетке, тем выше пластичность металла.

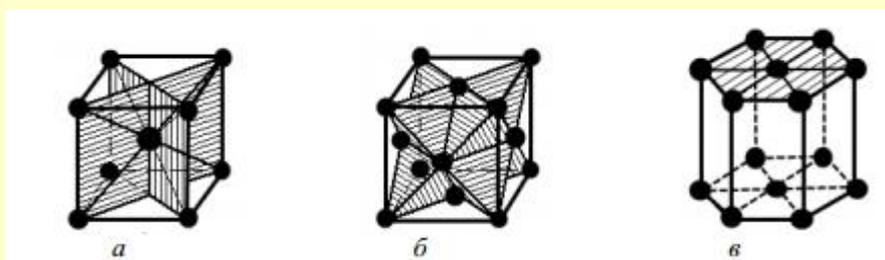


Рисунок 1.2.2. Плоскости и направления (заштрихованные плоскости) сдвига в кристаллической решетке: а — ОЦК; б — ГЦК; в — ГПУ

Наиболее легкий сдвиг по определенным плоскостям и направлениям объясняется тем, что при таком перемещении атомов из одного устойчивого равновесного положения в другое усилия будут минимальными, следовательно, будут наименьшими необходимые для этого затраты энергии.

При снятии нагрузки, перемещенная часть кристалла не возвратится на старое место и деформация сохранится. Наличие плоскостей скольжения в кристалле подтверждается при микроструктурном исследовании пластически деформированных металлов.

Двойникование. Скольжение или сдвиг по определенным кристаллографическим плоскостям является основным, но не единственным механизмом пластической деформации металлов. При некоторых условиях пластическое деформирование может также происходить путем двойникования. При пониженных температурах у металлов с ОЦК решеткой наблюдается переход от ме-

ханизма скольжения к механизму двойникования. Сущность двойникования заключается в том, что под действием касательных напряжений одна часть зерна оказывается смещенной по отношению к другой части, занимая симметричное положение и являясь как бы ее зеркальным отражением (рисунок 1.2.3).

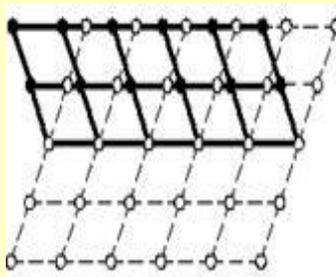


Рисунок 1.2.3 Схема процесса двойникования

Дислокационный механизм пластической деформации выглядит следующим образом. Атомы, расположенные в поле дислокации, возбуждены (их энергия повышена) и выведены из устойчивого положения равновесия с минимальной свободной энергией. Такое состояние кристалла является метастабильным. Поэтому для того чтобы ограниченная группа атомов в области дислокации сдвинулась и приняла устойчивое положение равновесия, достаточно приложить существенно меньшее напряжение, чем при их синхронном сдвиге, т. е. совершить незначительную работу тратя при этом минимум энергии (рисунок 1.2.4).

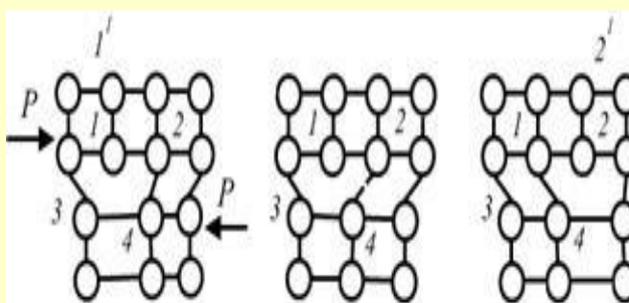


Рисунок 1.2.4 Схема перемещения дислокаций на атомном уровне

Силы взаимодействия атомов зависят от расстояния. В зоне дислокации расстояния атомов 3 и 4 от краевого атома 1 экстраплоскости $1 - 1^1$ увеличены и связи между этими атомами утрачены. Под действием сдвигающей силы P смещение плоскостей приводит к уменьшению расстояния $1 - 4$ и увеличению

расстояния 2 – 4. В результате этого связь между атомами 1 и 4 восстанавливается, а между атомами 2 и 4 обрывается. Дислокация перемещается на одно межатомное расстояние.

Таким образом, движение дислокации — это процесс последовательного разрыва и восстановления связей в кристаллической решетке. В результате пробега дислокации от одной границы кристалла до другой происходит смещение части кристалла на одно межатомное расстояние. Из совокупности пробегов дислокаций складывается общая деформация кристаллического тела.

Деформационное упрочнение металлических монокристаллов

При низкотемпературной пластической деформации неизбежно такое явление, как деформационное упрочнение. Данное явление проявляется в том, что для продолжения деформации требуется постоянное увеличение прилагаемого напряжения.

Деформационное упрочнение обусловлено торможением дислокаций. Чем труднее перемещение дислокаций в материале, тем больше коэффициент деформационного упрочнения, характеризующий наклон кривой деформации. В процессе испытаний данный коэффициент меняется, и его изменения в итоге определяют геометрию диаграммы деформации. Для анализа закономерностей деформационного упрочнения необходима диаграмма деформации в координатах истинного напряжения (S или t) – деформация (e или g). Так как пластическая деформация скольжением в металлах происходит за счёт движения дислокаций в определённых плоскостях под действием касательных, а не нормальных напряжений, необходимо строить кривые $t – g$. На практике, в этих координатах строятся диаграммы растяжения монокристаллов, используемые в теоретических работах для выяснения принципиальных вопросов деформационного упрочнения.

Величина t_n в определенной системе скольжения (приведенное напряжение сдвига) функционально связана с растягивающим напряжением

$$t_n = S \cos \theta \cos \gamma \quad (1.2.1)$$

где Θ – угол между нормалью к плоскости скольжения и осью растяжения; γ – угол между направлением скольжения и осью растяжения.

Произведение $\cos \Theta \cos \gamma$ определяет фактор ориентации: чем он меньше, тем ниже касательные напряжения в данной системе скольжения при заданном растягивающем усилии.

Из формулы (2) видно, что когда $t_n = 0$, когда ось растяжения перпендикулярна плоскости скольжения ($\gamma = 90^\circ$) или параллельна ей ($\Theta = 90^\circ$). Наибольшее значение $t_{max} = 0.5S$ получается, если $\cos \Theta \cos \gamma = 0,5$ что соответствует $\gamma = \Theta = 45^\circ$.

Рассмотрим кривую деформационного упрочнения г.ц.к. монокристалла (рисунок 1.2.5), благоприятно ориентированного для скольжения в одной системе, т.е. для уже рассмотренного нами.

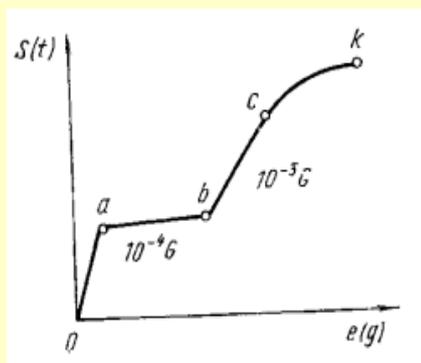


Рисунок 1.2.5 Кривая деформационного упрочнения г.ц.к. монокристалла, благоприятно ориентированного для скольжения в одной системе.

Кривая деформационного упрочнения состоит из нескольких участков, и каждый характеризуется своим законом изменения напряжения в функции деформации. Первый участок Oa соответствует упругой деформации. На этом участке коэффициент деформационного упрочнения определяется модулем упругости, а упрочнение на данном участке обратимое. Первый участок на экспериментальных кривых практически совпадает с осью напряжений, т.к. величина упругой деформации обычно очень мала.

Пластическая деформация начинается в точке a. Касательное напряжение, вызвавшее начало пластической деформации называется критическим

приведённым напряжением сдвига $t_{кр}$. Первой стадии деформационного упрочнения соответствует прямолинейный участок ab , соответствующий стадии лёгкого скольжения. Дислокации здесь перемещаются почти беспрепятственно, обеспечивая прогрессирующее удлинение без заметного роста действующих напряжений.

В точке b начинается множественное скольжение, число барьеров и дислокаций резко возрастает, что приводит к усилению эффективности торможения дислокаций. В точке c достигается уровень напряжений, достаточный для интенсивного поперечного скольжения винтовых дислокаций.

На участке CK закон изменения напряжения от деформации параболический: степень упрочнения уменьшается с увеличением деформации. Основным механизмом деформационного упрочнения является торможение за счёт упругого взаимодействия между дислокациями.

Последние исследования поведения материалов при больших пластических деформациях позволили обнаружить стадию IV , а также стадию V деформационного упрочнения, которые достигаются при степенях деформации $\epsilon > 1 \div 2$. Наличие и протяженность IV и V стадий деформационного упрочнения определяются особенностями материала (монокристалл, поликристалл, химический состав, тип кристаллической решетки, энергия дефекта упаковки и т.д.) и условиями его деформирования (температура, скорость деформации и т.д.).

2. Анализ научно-технической и патентной литературы по методам ИПД.

2.1 Основы метода ИПД

Интенсивная Пластическая Деформационная обработка — это новая технология обработки металлов давлением, позволяющая получать объемные наноструктурные материалы с уникальными свойствами посредством сильного измельчения зерна до наноразмеров.

Для осуществления больших пластических деформаций в принципе можно использовать традиционные процессы обработки давлением: прокатку, волочение, прессование и др. Но этому, прежде всего, мешает недостаточно высокая пластичность металлов. Притом, монотонное формоизменение заготовки (постоянное увеличение длины при прокатке и волочении, уменьшение высоты при осадке), приводит к тому, что при больших деформациях ее размер, хотя бы в одном из направлений, становится чрезвычайно малым [16].

Исследования показывают, что эффект больших деформаций при определенных условиях можно получить путем немонотонного формоизменения заготовок, что как раз и используется в процессах обработки давлением, основной целью которых является накопление деформации в заготовках, а не изменение их формы. Такие процессы причисляют, в настоящее время, к ИПД. Так как форма заготовки после ИПД практически совпадает с исходной, то имеется возможность их многократной обработки для накопления достаточной деформации.

Операции ИПД являются процессами обработки давлением. Поэтому их реализация невозможна без решения характерных для таких процессов задач: определения напряженно-деформированного состояния заготовки, расчета силовых параметров процесса, проектирования и изготовления деформирующего инструмента и оснастки, подбора смазок и т.д. ИПД — это не обычные операции обработки давлением, целью которых является, прежде всего, формоизменение заготовок, а процессы, призванные формировать структуру материалов, обеспечивающую заданные физико-механические свойства. Поэтому для

эффективного применения ИПД необходимо иметь представления о возможностях тех или иных схем нагружения в плане структурообразования, о влиянии температурно-скоростных режимов деформирования на структуру и свойства обрабатываемых материалов.

Физические характеристики материалов, подвергаемых ИПД

Следует отметить, что ИПД применима в основном к пластически деформируемым материалам. Для достижения больших деформаций используются кручение под квазигидростатическим давлением, равноканальное угловое прессование, прокатка, раскатка, всесторонняя ковка. Сущность этих методов заключается в многократной интенсивной пластической деформации сдвига обрабатываемых материалов. Использование интенсивной пластической деформации позволяет, наряду с уменьшением среднего размера зерен, получать массивные образцы с практически беспористой структурой материала.

Как известно, металлы и сплавы имеют кристаллическое строение, характеризующееся тем, что атомы в кристаллах располагаются в местах устойчивого равновесия в строго определенном для каждого металла порядке. При особых условиях охлаждения металл затвердевает в виде большого кристалла правильной формы, называемого монокристаллом. Строение монокристалла определяется соответствующей кристаллической решеткой. В промышленных условиях это не возможно, и затвердевание металла начинается одновременно во многих центрах кристаллизации. Поэтому после затвердевания такой металл состоит не из одного кристалла, а из большого числа прочно сросшихся друг с другом кристалликов неправильной формы, называемых кристаллитами, гранулами или зернами. Металлы такого строения называются поликристаллическими

Имеется градиент размеров структурных элементов. Структура от ультрамелкозернистой изменяется до нанокристаллической, где размер зерен уже измеряется нанометрами. В таком состоянии металлы имеют повышенные твердость, предел текучести и предел прочности. Так твердость увеличивается в 2 — 6 раз. Увеличение твердости материала в поверхностном слое приводит к

уменьшению вероятности возникновения межгранулярных переломов. Это связано с уменьшением количества микротрещин между гранулами, так как именно они являются первопричиной прогрессирующего межгранулярных разрывов и, как следствие, переломов имплантатов. Предел прочности данных материалов в поверхностном слое возрастает по оценкам экспертов в 4 — 10 раз.

Достоинства и недостатки метода пластического деформирования

Достоинства:

- Пластическое деформирование металлов в холодном состоянии позволяет заменять чистовую обработку резанием. При пластическом деформировании сочетается высокая степень чистоты поверхности с упрочнением поверхностного слоя металла. У деталей, обработанных пластическим деформированием, повышается твердость поверхностного слоя, его прочность, предел текучести и, в особенности, предел усталости. Как известно, наклеп обуславливает в поверхностных слоях деталей возникновение благоприятных сжимающих внутренних напряжений.

- Высокая производительность, сравнительно низкая стоимость инструментов и простота операций являются преимуществами обработки пластическим деформированием перед чистовой обработкой резанием. Инструменты для ПД обладают высокой стойкостью, сохраняют стабильное состояние рабочих поверхностей во времени, чем создают благоприятные условия для автоматизации процессов обработки давлением. Использование данного метода позволяет получить изделия, обладающие высокой износостойкостью и качеством поверхностного слоя.

Недостатки:

- Следует отметить, что ИПД применима в основном к пластически деформируемым материалам, что ограничивает применение данного метода обработки для хрупких и твердых материалов.

- Также к недостаткам метода следует отнести необходимость проектирования специального инструмента и осуществления переналадки оборудования.

2.2 Технологические способы, реализующие ИПД

В настоящее время методы получения УМЗ структур развиваются, появляются новые методы, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Условно, методы реализующие ИПД, существующие к данному моменту, можно разделить на две группы: первая – это лабораторные методы с возможностью получения образцов, как правило, ограниченных размеров; и вторая – это опытно-промышленные методы получения длинномерных полуфабрикатов и изделий с УМЗ структурой.

Разработка объемных (крупногабаритных) наноструктурных и ультрамелкокристаллических материалов в последние годы становится одной из важнейших задач современного материаловедения, поскольку это открывает возможности разработки технологий получения различных стальных полуфабрикатов в виде листов, прутков, проволоки и других металлоизделий, обладающих уникальными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. В настоящее время достигнуты большие успехи в получении и исследовании материалов с ультрамелкозернистой (УМЗ) и нанокристаллической (НК) структурой, сформированной методами интенсивного пластического деформирования (ИПД). Формирование УМЗ и НК структур методами ИПД оказывает значительное, а иногда коренное влияние на деформационное поведение и механические свойства металлов и сплавов, что позволяет считать ИПД весьма перспективным методом управления структурой и свойствами.

Технологические методы ИПД:

- Кручение под высоким давлением (ИПДК);
- всесторонняя ковка;
- гидростатическое волочение;
- радиально-сдвиговая протяжка;
- способ волочения с кручением и знакопеременным изгибом;
- разноканальное угловое прессование;

ИПД кручением под высоким давлением (ИПДК)

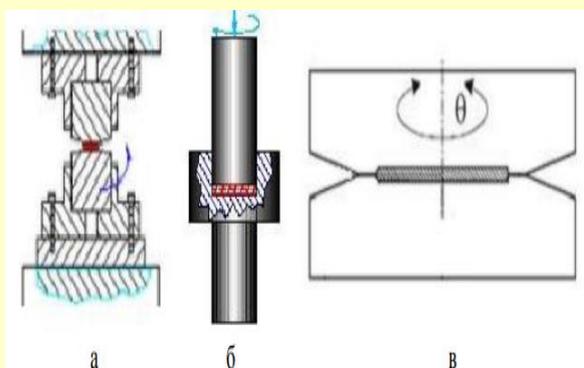
Технологические особенности:

Метод ИПД при котором, образец обычно имеющий форму диска диаметром 10-22мм и толщиной 0,3-1,0 мм подвергается деформации кручением в условиях высокого приложенного давления(рисунок 2.2.1).

В зависимости от исходной пластичности материала применяют различные схемы ИПДК.

Достоинства: сохранение формы модельного образца с целью многократного повторения единичного акта процесса деформации.

Недостатки: малая производительность, материальные затраты.



Рисунке 2.2.1. Схемы метода: а – с открытыми бойками; б – с боковой поддержкой; в – с полостью

Всесторонняя изотермическая ковка

Технологические особенности:

Применяется для деформационной обработки объемных заготовок. Схема позволяет подавить локализацию деформации в объемах материала с уже рекристаллизованной микроструктурой, и представляет собой совокупность операций осадки, контовки и протяжки(рисунок.2.2.2).

Достоинства метода: заготовка приобретает форму и размеры почти совпадающие с исходными; позволяет обеспечить цикличность деформационной обработки. Формирование однородной микроструктуры с размером зерен вплоть до наноразмерного; использование относительно дешевого инструмента; удается уйти от многопереходности технологического процесса; высокий ко-

оэффициент использования материала; возможность деформации при низких температурах.

Недостатки метода: ограничение степени деформации вносимой в материал за одну операцию осадки, связанное с необходимостью сохранения начальной объемной заготовки.

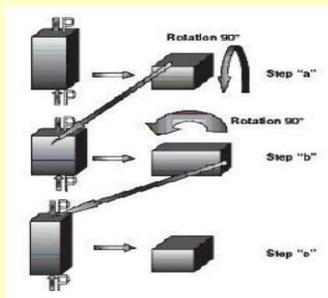


Рисунок 2.2.2. Схема трех циклов осадки со сменой оси деформации

Гидростатическое волочение

Технологические особенности:

Заготовка подается в камеру высокого давления с жидкостью, в камере расположен блок с винтовым каналом, заготовка проходит через деформирующий блок, с помощью которого осуществляется деформация металла.

Достоинства метода: позволяет получать длинномерные заготовки прямоугольного сечения по схеме винтовой экструзии.

Недостатки метода: сложность оснастки, необходимость геометричности рабочей полости, нестабильность процесса вследствие неоднородности контактных напряжений в очаге деформаций(рисунок 2.2.3).

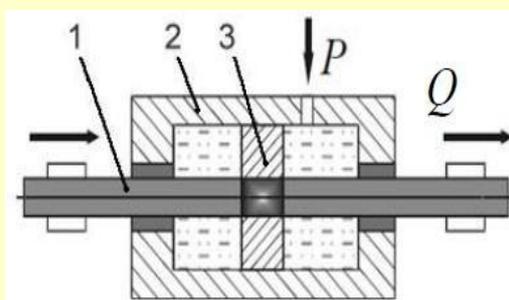


Рисунок 2.2.3 Схема процесса гидростатического волочения: 1 – заготовка; 2 – камера высокого давления; 3 - блок с винтовым каналом; P - давление жидкости; Q – сила протяжки

Радиально-сдвиговая протяжка

Технологические особенности:

Применяется для производства заготовок круглого сечения и является развитием радиально-сдвиговой прокатки, определяющаяся как частный случай винтовой прокатки в области больших углов подачи. Деформация осуществляется тремя неприводными роликами, расположенными под углом 120° друг к другу. В ходе процесса деформации в роликовых волоках, происходит немонотонная деформация по системе круг в круг (рисунок 2.2.4).

Достоинства метода: радиально-сдвиговой протяжкой можно получать проволоку со значительной мелкодисперсной структурой.

Недостатки метода: создание сложного спец. инструмента, необходимость согласования скоростей деформационного узла при работе установки.

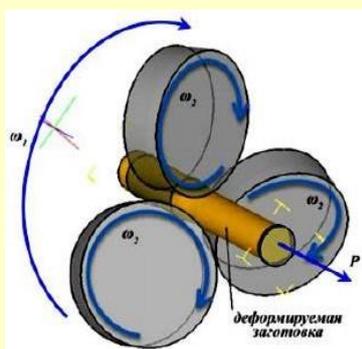


Рисунок 2.2.4 Схема радиально-сдвиговой протяжки: ω_1 – скорость вращения кассеты; ω_2 – скорость вращения роликов; P – усилие протяжки

Волочение с кручением и знакореремненным изгибом

Используется для получения проволоки с УМЗ структурой. Схема способ- вращения блока 2 с роликами реализуется сдвиговая дформация проволоки между волоками за счет скручивания металла (рисунок 2.2.5).

Достоинства метода: возможность совмещения традиционных способов деформации.

Недостатки метода: низкий вклад наложения сдвиговой деформации в упрочнение после многоциклового обработки, причем прочность возрастает незначительно.

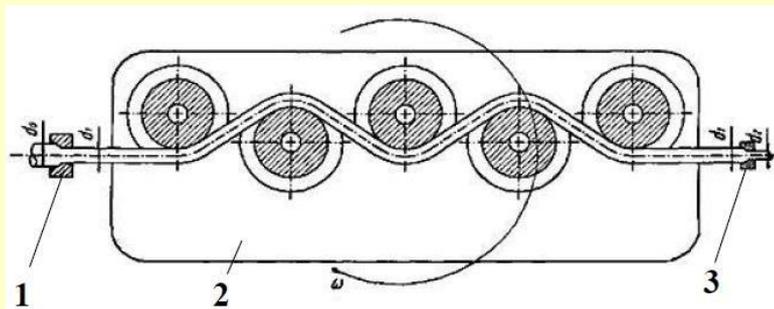


Рисунок 2.2.5 Схема процесса волочения с кручением и знакопеременным изгибом: 1- волока $d_1 > d_2$; 2 – узел вращения; 3 – волока $d_2 > d_3$

Одной из наиболее эффективных технологий деформационного получения объемных металлических материалов с размером зерна порядка сотен нанометров является технология равноканального углового прессования (РКУП).

2.3. Особенности процесса РКУП

Равноканальное угловое прессование сокр., РКУП (англ. equal channel angular pressing) – метод интенсивной пластической деформации, при котором заготовка последовательно продавливается через несколько каналов одинакового поперечного сечения, пересекающихся под некоторым углом.

Метод реализуется простым сдвигом в области пересечения каналов с одинаковой площадью поперечного сечения. Образец неоднократно прессуется через два канала равного сечения, расположенных, как правило, под углом от 90° до 120° (рисунок 2.3.1).

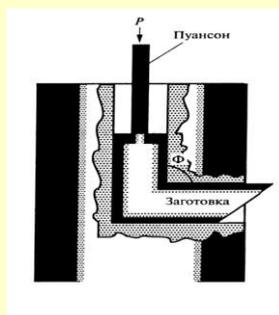


Рисунок 2.3.1. Интенсивная пластическая деформация РКУП прессованием

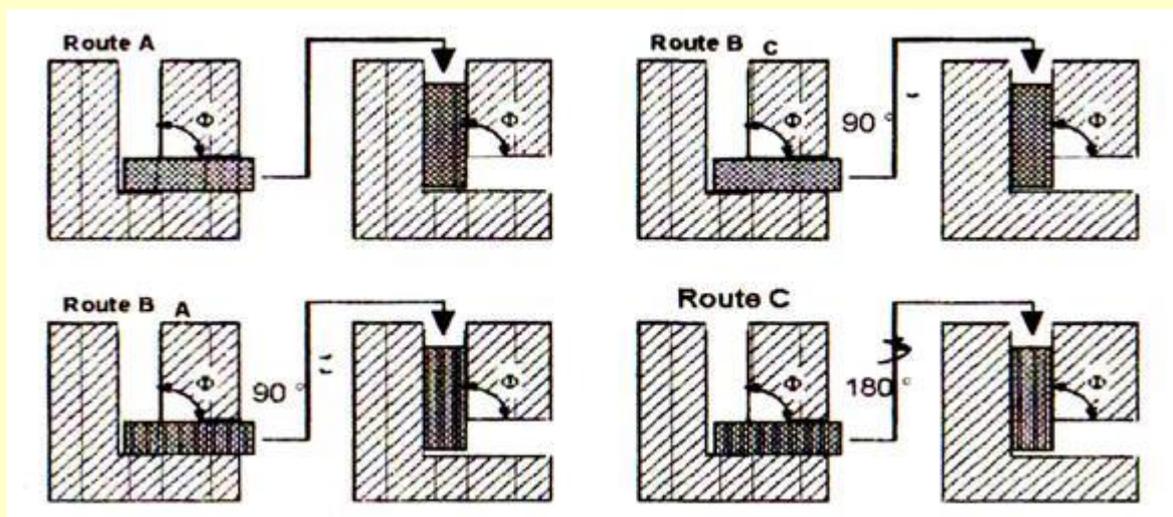
Особенностью РКУ прессования являются:

- относительно малый объём очага деформации, позволяющий выполнить процесс прессования с заметно меньшим, до 2 раз усилием деформации, по сравнению с прямым прессованием, выполняемым с эквивалентной степенью деформации и противодействием сил трения;
- отсутствие редуцирования поперечного сечения заготовки при деформации и его результирующего изменения после деформации, что позволяет многократно её деформировать в одном и том же инструменте;
- возможность изменения направления деформирования заготовки путём изменения её ориентации по отношению к первоначальной. Что позволяет изменять маршрут прессования, поворачивая заготовку вокруг продольной оси перед проходами и меняя входной и выходной концы местами. Изменение маршрута прессования изменяет траекторию деформации, увеличивая или уменьшая её немонотонность, управляя тем самым структуро- и текстуробразованием в образце;
- невозможность выдавливания заготовки из оснастки путём однократного рабочего хода пуансона без применения промежуточной вязкой среды, обычно состоящей из смеси порошкового графита с маслом или последующей заготовки, выталкивающей по мере продвижения в канале предыдущую заготовку;
- неполная деформационная проработка концевых частей заготовки, искажение их формы. Эти недостатки, во многом, устраняются при РКУП активным противодавлением, которое способствует повышению однородности деформации, измельченной структуры деформации, и повышению коэффициента использования металла. Но при этом возрастают нагрузки на инструмент, усложняется процесс прессования и конструкция оснастки.

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | 23 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | | | | |

Условия и разновидности РКУП

Основными параметрами РКУП являются: угол пересечения каналов, температура, число деформационных проходов, маршрут прессования, который зависит от вращения образцов вокруг своей оси при повторяющейся деформации. Формирование структур существенно зависит от схемы осуществления РКУП (рисунок 5).



. Рисунок 2.3.2. Схемы маршрутов при РКУП формирующие полосовую структуру [14]

Маршрут А выполняется без переориентации образца. Маршрут В_С – создается с предварительным поворотом образца на 90° относительно продольной оси в одну сторону перед каждым проходом. Маршрут В_А отличается от маршрута В_С тем, что перед каждым последующем проходом заготовку поворачивают в противоположную сторону относительно поворота, выполненного в предыдущем проходе. Маршрут С выполняют с поворотом образца перед каждым проходом на 180°.

Лучшие результаты с точки зрения формирования однородной мелкозернистой структуры получаются после прессования по маршруту В_С. Прессование по маршрутам А и С приводит к формированию полосовой структуры

Параметры влияющие на характер УМЗ структуры при РКУП

(рисунок 2.3.3):

- маршрут;
- число проходов;
- степень деформации на каждом проходе;
- угол пересечения каналов оснастки Φ
- угол кривизны или внешний угол оснастки (ψ);
- скорость и температура РКУП прессования;
- повышения температуры деформируемого материала в ходе РКУ прессования;
- приложенное пртиводавление.

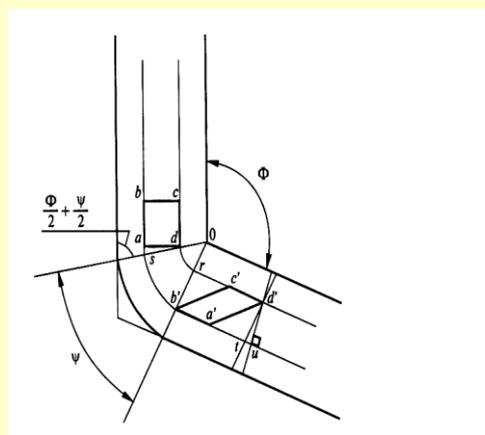


Рисунок 2.3.3. Принцип РКУ прессования

В работах по использованию РКУ прессования для получения УМЗ структур было установлено, что сильное измельчение структуры наблюдается уже после 1-2 проходов. Однако получаемые ячеистые структуры имели в основном малоугловые границы.

Формирование преимущественно большеугловых границ наблюдали при увеличении числа проходов до 8 и более.

Это в который раз подтверждает, что УМЗ структуры с высокоугловыми границами не могут быть сформированы при использовании традиционных способов обработки металлов давлением, даже в результате применения очень большого числа проходов. Данное ограничение обусловлено относительно небольшими приращениями деформации на каждом этапе такой деформации.

Методы РКУП постоянно совершенствуется, разрабатываются его новые модификации. В целях повышения деформируемости, однородности и большего измельчения зерен в выходном канале устанавливают противодавление. Для этого используют вязкопластичные материалы или жесткий пуансон. Недостатком данного метода является невозможность его применения для трудно деформируемых материалов без нагрева до высокой температуры, усложнение конструкции оснастки, увеличение числа переходов в операции прессования и длительности последней.

Новые модификации метода РКУП:

- РКУП с параллельными каналами;
- РКУП-конформ;
- Мульти-РКУП-Конформ
- РКУ протяжка.

РКУП с параллельными каналами

Технологические особенности:

Такая модификация РКУП как «прессование в параллельных каналах» позволяет за один проход реализовать два последовательных прохода, осуществляемых по маршруту С. В данном случае повышается однородность деформированного состояния, существенно уменьшается число проходов, необходимое для обеспечения формирования УМЗ структуры (рисунок 2.3.4).

- Угол пересечения каналов инструмента: 90-150град;
- Многоцикловая обработка;
- Деформация в холодном стоянии или при повышенных температурах;

Размер и форма заготовки

Объемня заготовка кругого или квадратного сечения

Достоинства метода:

- Одновременная сдвиговая деформация заготовки в двух очагах деформации;
- В процессе деформации объем и геометрические размеры исходных образцов сохраняются

Недостатки метода:

- Ограниченный размер УМЗ образцов;
- Дискретность и низкая технологичность процесса.

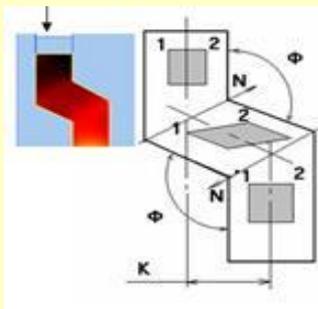


Рисунок 2.3.4 РКУП с параллельными каналами

РКУП –конформ

Технологические особенности:

Для обработки длинномерных заготовок простым сдвигом методом равноканального углового прессования (РКУП) в непрерывном режиме разработано устройство на основе схемы «Конформ»(рисунок 2.3.5).

Для формирования УМЗ структуры РКУП совмещают с конформ-процессом.

Достоинства метода: РКУП-конформ процесс позволяет получать длинномерные изделия – прутки с относительно небольшим диаметром ≤ 10 мм, а также тонкостенную проволоку с практически неограниченной длиной, РКУП-конформ процессе предусматривается возможность неоднократного продавливания заготовки через оснастку.

Недостатки метода:

- необходимость создания специального оборудования, геометрия инструмента не позволяет обрабатывать заготовку по схеме «круг – круг», в процессе деформации данным способом возникают сложности трибологического характера, т.к. сила деформирования формируется за счет сил активного трения
- высокая энергоемкость процесса, так как затраты на преодоление сил трения по поверхностям инструментального узла требуют применения для привода электродвигателей большой мощности;

- неравномерность деформации;
- достаточно сложная конструкция прессового узла.

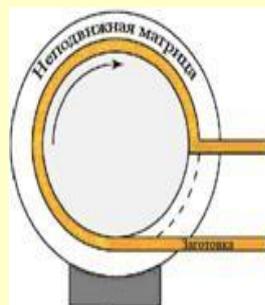


Рисунок 2.3.5 РКУП –конформ

Мульти-РКУП-Конформ [14]

Технологические особенности:

Способ применяется для получения длинномерных изделий из цветных металлов и сплавов в виде прутка и катанки. В Мульти-РКУП-Конформ происходит совмещения метода РКУП в параллельных каналах с непрерывным процессом РКУП-«Конформ». Деформация происходит в три последовательных этапа, после каждого этапа происходит смена направления течения материала заготовки на угол $90-120^{\circ}$, после этого осуществляется окончательное пластическое формование прутка (рисунок 3.6).

Достоинства метода: Этот способ дает возможность получать степень деформации $\epsilon \geq 2,4$ за один цикл деформации.

Недостатки метода: необходимость специального оборудования, возникают сложности трибологического характера.

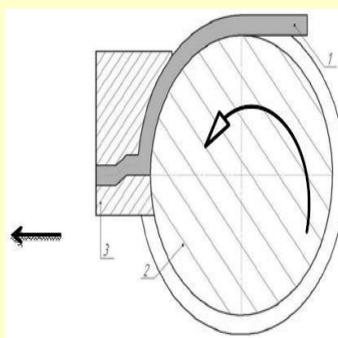


Рисунок 2.3.6 Мульти-РКУП-Конформ

РКУ-протяжка

Технологические особенности:

Такая модификация РКУП как «РКУ протяжка» позволяет осуществить многократно протяжкой проволоки через специально разработанный инструмент, схема которого представлена на (рисунок 2.3.7). Этот способ выглядит следующим образом: углеродистая проволока протягивается через сборный инструмент специального профиля. Непрерывность процесса деформационной обработки обеспечивается сочетанием РКУ протяжки с традиционным способом волочения проволоки.

Достоинства метода:

- повышает механические характеристики проволоки;
- достигается высокая точность;
- малая шероховатость;
- возможность упрочнения обработанной поверхности;

Недостатки метода:

- несимметричная схема деформации приводит к формированию неоднородной структуры и свойств по сечению проволоки;
- низкая стойкость инструмента;
- горизонтальная протяженность (станки занимают большую площадь)

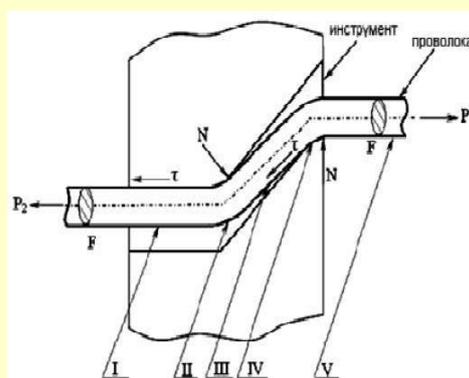


Рисунок 2.3.7 Схема РКУ-протяжка
P1 – сила волочения; P2 – сила натяжения

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ:

Исследования в сфере формирования УМЗ структур демонстрируют, что различные металлы и сплавы, несмотря на почти похожий механизм пластической деформации требуют применение различных методик деформирования.

Подбор методик деформирования обуславливается не только свойствами Подобранного материала, но и способом применения заготовки.

Необходимо принимать во внимание и радиус и длину конечного изделия, а так же окончательный размер зерна, чтобы правильно рассчитать количество проходов (например РКУП).

Метод равноканального углового прессования (РКУ) прессования был разработан В.М. Сегалом и основан на деформации образцов простым сдвигом. Он позволяет многократно подвергать пластической деформации образцы через два канала, пересекающиеся под углом 90° без изменения их поперечного сечения, как при нормальной, так и при повышенной температуре.

Главной задачей ИПД является измельчение зерен до субмикронного размера. Но не меньшее значение, чем размер зерна, имеет и строение получающихся границ. В Нанометрах она оказывает еще большее влияние на механические свойства, чем в обычных поликристаллических.

Преимущество данных методов в возможности получения меж- зеренных границ с большими углами разориентировки, доля которых доходит до 70.. 79 %.

Именно большеугловые границы играют решающую роль в упрочнении материала. Создание структур с высокоугловыми границами упрощает зерно-границное проскальзывание за счет чего растет ресурс пластичности, чего нельзя ожидать от малоугловых границ.

Область применения нанокристаллических материалов пролегает от автомобилестроения до авиационного и космического использования. Уникальные свойства нанокристаллических материалов востребованы не только в машиностроении, но и в медицине. Уже сегодня применяются имплантанты изготовленные из нанокристаллического титана. Хирургические наборы для кор-

3. Постановка задачи исследования

Материалы исследования:

1. **Алюминиевый сплав Д16** – дюралюминий повышенной прочности системы Al–Cu–Mg с легируемыми добавками марганца. По твердости и механической прочности он не уступает стали, но, в отличие от нее, обладает в 3 раза более легким удельным весом. В связи с этим, он активно используется во всех областях промышленности, особенно в авиастроении, при изготовлении силовых конструктивных элементов.

Однако, дюралюминий Д16 обладает одним главным недостатком – низкой коррозионной стойкостью и нуждается в специальных антикоррозионных средствах защиты. В большинстве своем сплав плакируют или анодируют, что существенно повышает его сопротивление коррозии.

Химический состав алюминия Д16 в % представлен в таблице 3.1

| Химический состав в % материала Д16 | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--------|-----------|--------|---------|-------------|-----------|-----------|---------|---------------------------------|-------------|
| ГОСТ 4784 - 97 | | | | | | | | | | |
| Fe | Si | Mn | Cr | Ti | Al | Cu | Mg | Zn | Примесей | - |
| до 0.5 | до 0.5 | 0.3 - 0.9 | до 0.1 | до 0.15 | 90.9 - 94.7 | 3.8 - 4.9 | 1.2 - 1.8 | до 0.25 | прочие, каждая 0.05; всего 0.15 | Ti+Zr < 0.2 |

Дюралюминий Д16 относится к алюминиевым сплавам, содержащим до 94,7% алюминия. Остальное приходится на легируемые элементы – медь, магний, марганец, а также ряд примесей.

Примечание: Al - основа; процентное содержание Al дано приблизительно

Примеси железа и кремния негативно сказываются на прочности и пластичности сплава Д16, поэтому их содержание строго регламентируется стандартом – доля каждого из них не должна превышать 0,5-0,7%.

Физическо-механические свойства алюминия Д16 представлен в таблице 3.2

| Температура плавления, С° | Плотность, кг/м ³ | Твердость, НВ | σ_b , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ ,% |
|---------------------------|------------------------------|---------------|------------------|----------------------|-------------|
| 650 °С. | 2770 | 105 | 245-390 | 280-320 | 19 |

Марганец не входит в состав упрочняющих фаз, но его присутствие в дюралюминии повышает его антикоррозийность, улучшает механические свойства и увеличивает температуру рекристаллизации. В связи с этим, сплав Д16 удовлетворительно куется, режется и фрезеруется с помощью размерного травления, а также сваривается точечной сваркой.

2.Титановый сплав ВТ6 выпускается по ГОСТ 19897-74 и является самым востребованным в России, а также пользуется большим спросом за рубежом. Данный вид металла незаменим в авиа-моделировании, крупногабаритных сборных конструкциях и медицине. Титан ВТ6 имеет очень высокое качество, благодаря легирующим добавкам. В титановый сплав входит алюминий, который благоприятно влияет на жаропрочность и прочность продукции, а также ванадий, способный повысить прочность металла и сделать его более пластичным.

Химический состав титана ВТ6 в % представлен в таблице 3.3

| Fe | C | Si | V | N | Ti | Al | Zr | O | H | Примесей |
|--------|--------|---------|-----------|---------|---------------|-----------|--------|--------|----------|------------|
| до 0.3 | до 0.1 | до 0.15 | 3.5 - 5.3 | до 0.05 | 86.485 - 91.2 | 5.3 - 6.8 | до 0.3 | до 0.2 | до 0.015 | прочих 0.3 |

Сплав ВТ6 имеет превосходную пластичность и легко деформируется в разогретом состоянии. Для работы с титаном подходит любой вид сварки, включая диффузионную. При использовании ЭЛС, сварочный шов имеет прочность идентичную продукции, что говорит о высоком качестве металла. Титан

BT6 производится в отожженном, технически упрочненном состоянии. Отжиг продукции выполняется при температуре 750 – 800 градусов, после чего подвергается охлаждению. В данный момент решается вопрос о другом температурном режиме, который будет достигать 950 градусов.

Физическо-механические свойства титана BT6 представлен в таблице
таблице 3.4

| Температура плавления, С ⁰ | Плотность, кг/м ³ | Твердость, НВ | $\sigma_{в}$, МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ ,% |
|---------------------------------------|------------------------------|---------------|--------------------|----------------------|-------------|
| 1720°С. | 4430 | 250-360 | 830-1110 | 795 | 10 |

Титан имеет высокую прочность, низкую чувствительность к водороду, низкую склонность к коррозии и высокую технологичность. Данная продукция обладает небольшим весом и это говорит о его потребности при сборке воздушного транспорта. Строительство масштабных металлоконструкций, также нуждается в титановом прокате и причиной тому служит легкий вес и высокая прочность.

На титановую продукцию влияет кислород, водород и азот, поэтому при сварке следует на это обращать особое внимание. Титан имеет поверхностный альфицирующий слой, который предохраняет сплав от окисления при воздействии с кислородом. При сварочных работах металл нагревается, в связи с чем происходит появление оксидов, которые обладают высокой прочностью и довольно низкой пластичностью. Воздействие титана с азотом наступает при температуре 500 градусов, при этом проявляются нитриды, способные улучшить прочность и твердость металла, одновременно делая его менее пластичным. Водород также влияет на титан не лучшим образом и значительно ухудшает его свойства при температуре 200 – 300 градусов.

Область возможного применения нанокристаллических материалов пролегалет от автомобилестроения (например, поршни двигателей и другие детали должны обладать высокими показателями прочности и пластичности, а также износостойкости) до авиационного и космического использования. Уникальные

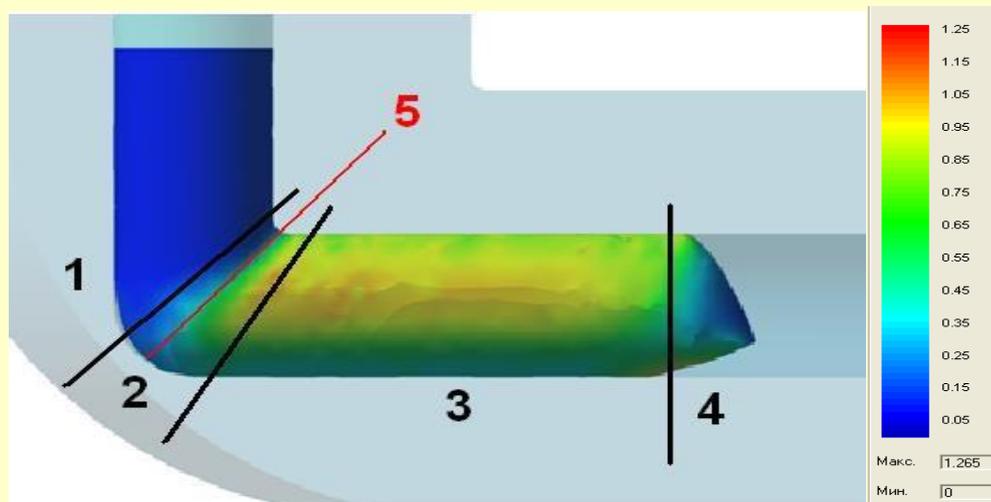


Рисунок 4.1.6 Степень деформации

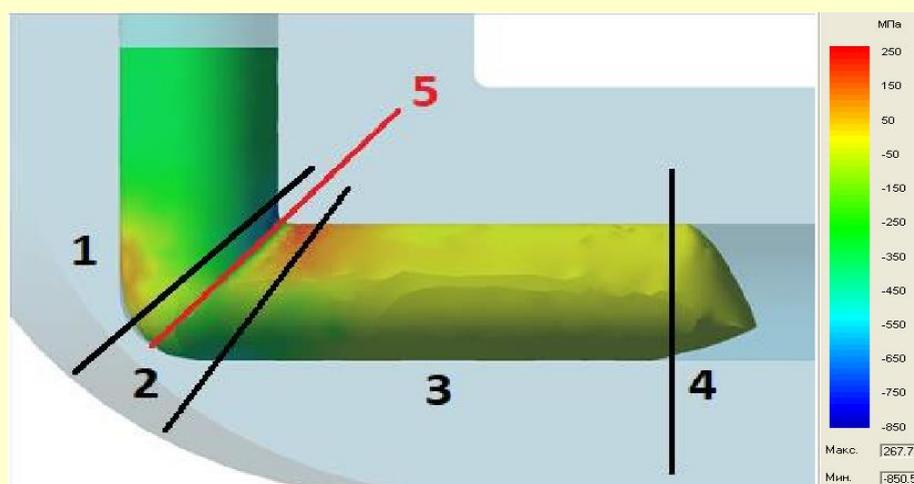


Рисунок 4.1.3 Среднее напряжение

Вывод: На рисунках 4.1.1-4.1.3 можно выделить 4 зоны, в которых осуществляется деформация заготовки. В зоне 1 интенсивность напряжений равна 207 МПа. В зоне 2 за счёт искривления линий тока частиц металла происходит резкое увеличение интенсивности напряжений, накопление степени деформации. В зоне 3 происходит резкое уменьшение интенсивности напряжений и увеличение степени деформации по сравнению

4.2 Моделирование для Титанового сплава ВТ6

Сплав титана ВТ6 90°, Температура 20°

3D модель является наиболее приближенной к реальной установке для выполнения РКУП.

Образец имеет круглое поперечное сечение, диаметр заготовки 10 мм, длина заготовки 60 мм, угол матрицы 90°.

На рисунках 4.2.1 – 4.2.4 приведены результаты моделирования процесса РКУП для титанового сплава ВТ6

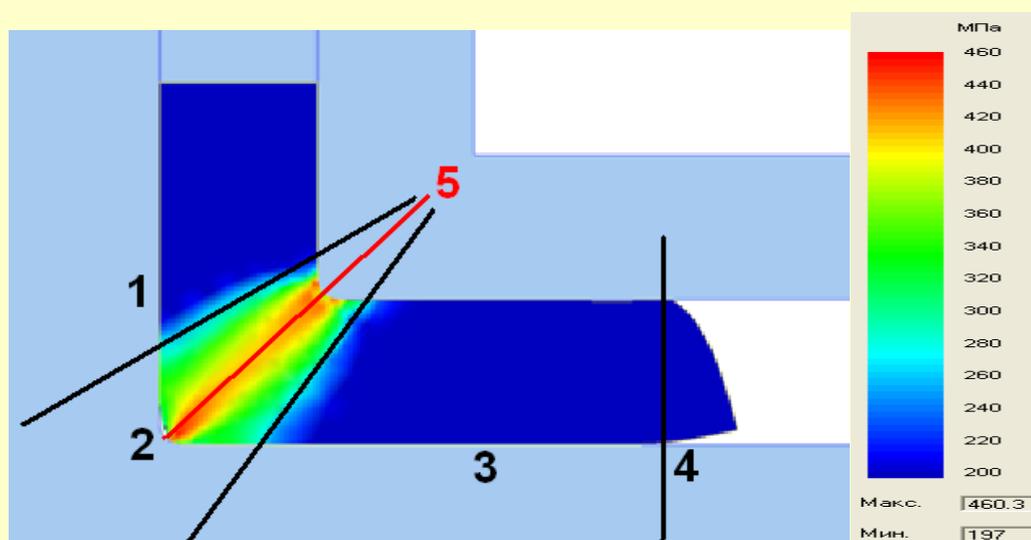


Рисунок 4.2.1 Интенсивность напряжений

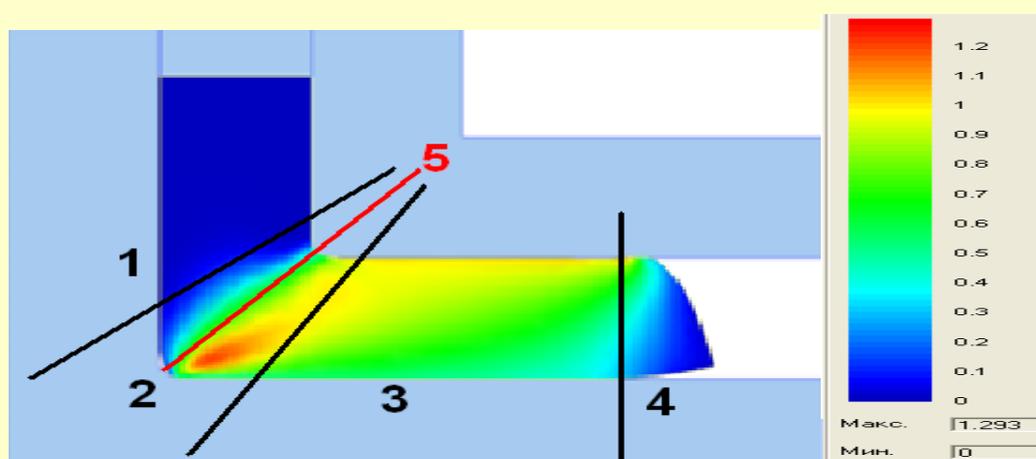


Рисунок 4.2.2 Степень деформации

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

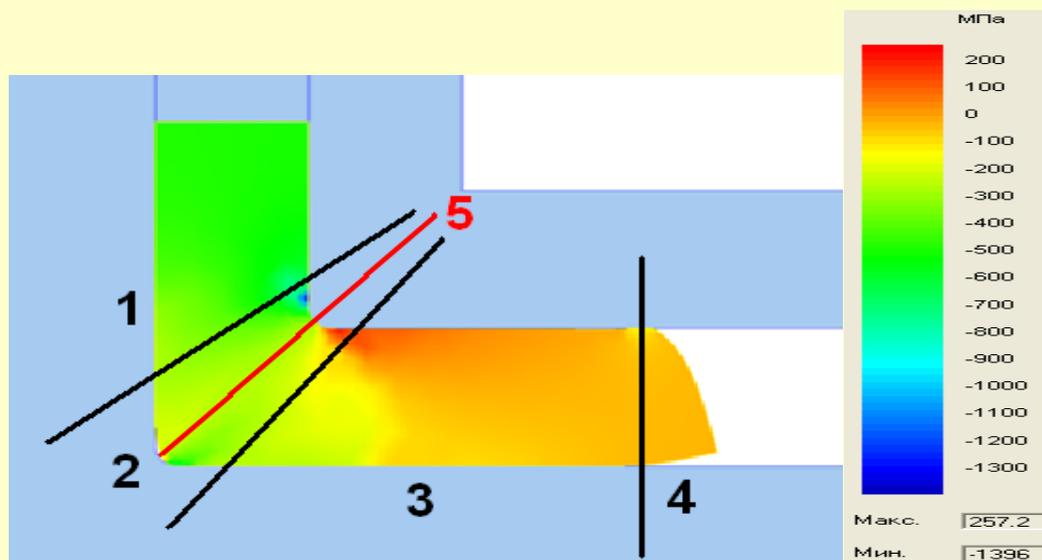


Рисунок 4.2.3 Среднее напряжение

Вывод: На рисунках 4.2.1-4.2.3 можно выделить 4 зоны, в которых осуществляется деформация заготовки. В зоне 1 интенсивность напряжений равна 197 МПа. В зоне 2 за счёт искривления линий тока частиц металла происходит резкое увеличение интенсивности напряжений, накопление степени деформации. В зоне 3 происходит резкое уменьшение интенсивности напряжений и увеличение степени деформации по сравнению с достигнутой в зоне 2 и их стабилизация. В зоне 4 за счет образования свободной поверхности интенсивности напряжений и степени деформации снижаются.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что наибольшая интенсивность напряжений наблюдается в зоне пересечения каналов(2).

В плоскости сдвига (5) среднее напряжение – сжимающее во всех точках сечения. При этом наблюдается существенная неравномерность эпюры распределения среднего напряжения в плоскости сдвига. На внутреннем угле канала среднее напряжение достигает величины -1396 МПа, а

на внешнем – порядка -200 МПа. Наличие сжимающих средних напряжений препятствует образованию трещин и разрушению заготовки в процессе деформации.

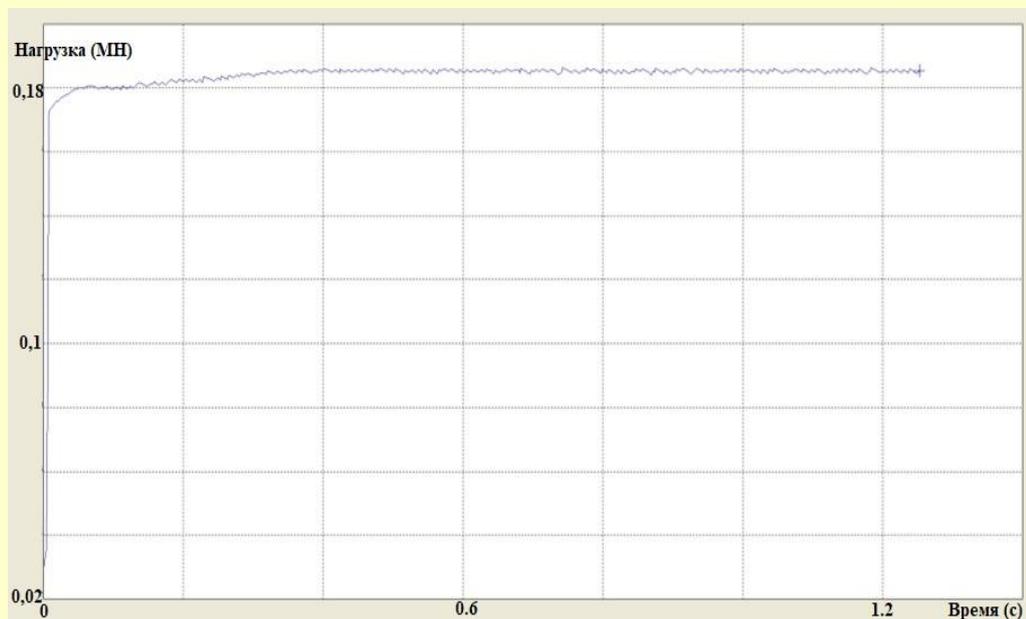


Рисунок 4.1.5 Усилие

Вывод: Графики зависимости нагрузки от времени говорит о том, что при температуре 20⁰С и матрицы с углом 90⁰ что усилие, необходимое для прессования остается на прежне уровне или снижается незначительно.

При прессовании через матрицу с углом 90⁰ титанового сплава Д16 за один проход степень деформации равна 1,2.

4.3 Сравнительный анализ результатов при равноканальном угловом прессовании (РКУП)

Анализ результатов показывает, что характер деформирования титана ВТ 6 аналогичен характеру деформирования алюминия Д16. Также выделяются 4 характерных участка, на линии максимальных сдвигов 5 наблюдаются максимальные средние напряжения:

1. Алюминий Д16(угол матрицы 90°, Температура 20°, Объёмная).

На внутреннем угле канала среднее напряжение достигает величины -850 МПа, а на внешнем – порядка -50 МПа.

2. Титан ВТ6 90°, (угол матрицы 90°, Температура 20°).

На внутреннем угле канала среднее напряжение достигает величины -1396 МПа, а на внешнем – порядка -200 МПа.

Наличие сжимающих средних напряжений препятствует образованию трещин и разрушению заготовки в процессе деформации.

Степень деформации при равноканальном угловом прессовании (РКУП) :

- При прессовании через матрицу с углом 90⁰ алюминиевого сплава Д16 за один проход степень деформации равна 1,1.
- При прессовании через матрицу с углом 90⁰ титанового сплава Д16 за один проход степень деформации равна 1,2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

В результате выполнения выпускной квалификационной работы получены следующие результаты:

- разработана модель процесса равноканального углового прессования(алюминиевого сплава Д16 и титанового сплава ВТ6);
- проведено моделирование процесса РКУП (алюминиевого сплава Д16, титанового сплава ВТ6);
- проведен анализ полученных результатов

| | | | | | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | 43 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | | | | | |

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Борисова М.З. особенности нано (субмикро)-кристаллических материалов полученных РКУП // Фундаментальные исследования. – 2004. – № 6. – С.107-107;
URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=6417> (дата обращения: 12.06.2020).
2. Третьяков Зюзин Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.
3. Логинов Ю.Н. Прессование как метод интенсивной деформации металлов и сплавов. Екатеринбург, 2016-156 с.
4. Документация QForm Программа для моделирования процессов обработки металлов давлением Версия 5. Начало работы часть 1.
5. Марочник металла <http://metallicheckiy-portal.ru>
6. Valiev, R. Z. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. / R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov // Prog. Mater. Sci. – 2000. – V. 45. – P. 103 – 189.
7. Валиев, Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы:
8. получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. // М.: ИКЦ «Академкнига». – 2007. – 398 с.
9. Zhilyaev, A. P. Using high– pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. / A. P. Zhilyaev, T. G. Langdon. // Prog. Mater. Sci. – 2008. – V.53. – P. 893 – 979.
11. Патент 2560474 Российская Федерация, МПК В 21 С 23/00. Способ непрерывного равноканального углового прессования металлических заготовок в виде прутка / Г.И. Рааб, Э.И. Фахретдинова, В.М. Капитонов, Р.З. Валиев;
12. Бейгельзимер, Я. Е. Новые схемы накопления больших пластических деформаций с использованием гидроэкструзии / Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, С.Г. Сынков // Физика и техника высоких давлений. - 1999.

- Т. 9. - № 3. - С. 109-112.

13. Valiev, R. Z. Principles of equal– channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. / R. Z. Valiev, T. G. Langdon. // Prog. Mater. Sci. – 2006. –

14. Колобов, Ю. Р. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных
ных

15. Лякишева, Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем.

16. Справочник. В 3– х т. / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. // М.: Машиностроение. – 1996. – Т. 1. – 992 с.

17. Massalski, T. B. Binary Alloy Phase Diagrams: American Society for Metals.

18. Ohio: Metals Park. – 1986. – 2224 p.

19. Watanabe, C. Mechanical properties of Cu – Cr system alloys with and

20. without Zr and Ag / C. Watanabe, R. Monzen, K. Tazaki // J. Mat. Sci. – 2008. – V.43. – P. 813– 819.

ПРИЛОЖЕНИЕ А