

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 кузнечно-штамповочном 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: **Попов Игорь Петрович**

Инновационные процессы обработки металлов давлением с большими интенсивными пластическими деформациями в кузнечно-штамповочном 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. И. П. Попов. - 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 кузнечно-штамповочном производстве» предназначен для студентов инженерно-технологического 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)

И. П. Попов

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ
ДАВЛЕНИЕМ С БОЛЬШИМИ ИНТЕНСИВНЫМИ ПЛАСТИЧЕСКИМИ
ДЕФОРМАЦИЯМИ В КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Электронный конспект лекций

Самара 2013

УДК 662.2.8
П 58

Автор: **Попов Игорь Петрович**

Попов, И.П. Инновационные процессы обработки металлов давлением с большими интенсивными пластическими деформациями в кузнечно-штамповочном производстве [Электронный ресурс]: электрон. конспект лекций / И.П. Попов; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т) - Электрон. текстовые и граф. дан. (3,29 Мбайт). - Самара, 2013..

Приводятся инновационные процессы обработки металлов давлением с большими интенсивными пластическими деформациями.

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 кузнечно-штамповочном производстве» в А семестре.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

1 Природа и особенности холодной пластической деформации поликристаллов	4
1.1 Механизм упрочнения.....	5
1.2 Повышение энергетического уровня металлов	8
2 Способы больших интенсивных пластических деформаций, основанные на процессах без изменения размеров исходной заготовки	10
2.1 Способ сдвига кручением	10
2.2 Равноканальное угловое выдавливание.....	11
2.3 Всесторонняя ковка	19
2.4 Прессование, сдвиг, осадка сплошных заготовок	20
3 Технология изготовления наноструктурированных изделий и материалов большими пластическими деформациями, прессованием, сдвигом, всесторонней ковкой и их совмещением.....	23
3.1 Разработка технологии получения наноструктурированных изделий, основанной на способах прессования и осадки полых цилиндрических заготовок без изменения их размеров большими интенсивными пластическими деформациями.....	23
3.3 Разработка технологии получения наноструктурированных изделий основанной на всесторонней ковке заготовки без изменения ее размеров большими интенсивными деформациями	42
3.4 Моделирование способа многопереходной всестороннейковки. 44	
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	55

1 Природа и особенности холодной пластической деформации поликристаллов

Технические металлы и сплавы являются поликристаллами, состоящими из большого количества зерен (кристаллитов), и обладают некоторыми особенностями по сравнению с монокристаллами. Эти особенности необходимо учитывать при ковке и штамповке, а также при эксплуатации изделий. Кристаллографические оси зерен, составляющих поликристалл, могут быть ориентированы произвольным образом, благодаря чему поликристалл обладает примерно одинаковыми свойствами в разных направлениях, т.е. является квазиизотропным, хотя составляющие его отдельные зерна анизотропны. Форма зерен поликристалла не соответствует типу кристаллической решетки, поскольку одновременный рост множества зерен в условиях кристаллизации мешает оформлению правильных граней и заметно искажает кристаллическую решетку вблизи границ. Как показано ранее, любое искажение кристаллической решетки приводит к накоплению потенциальной энергии. Следовательно, атомы, расположенные вблизи поверхности, обладают большим количеством энергии (свободной), которую называют поверхностной. Посторонние примеси, как правило, также скопляются вблизи границ зерен, что приводит к дополнительным искажениям кристаллической решетки, а значит, к дополнительному накоплению свободной энергии [1].

Деформирование поликристаллов возможно в результате деформирования отдельных зерен (внутризеренная деформация) и смещения зерен друг относительно друга (межзеренная деформация). Основным способом пластического деформирования поликристалла считают внутризеренную деформацию.

Следствием холодной пластической деформации является упрочнение.

1.1 Механизм упрочнения

На диаграмме касательное (сдвиговое) напряжение - угловая (сдвиговая) деформация, полученной в условиях холодной деформации (испытание на растяжение образца, вырезанного из монокристалла), можно наблюдать три стадии упрочнения (рисунок 1.1).

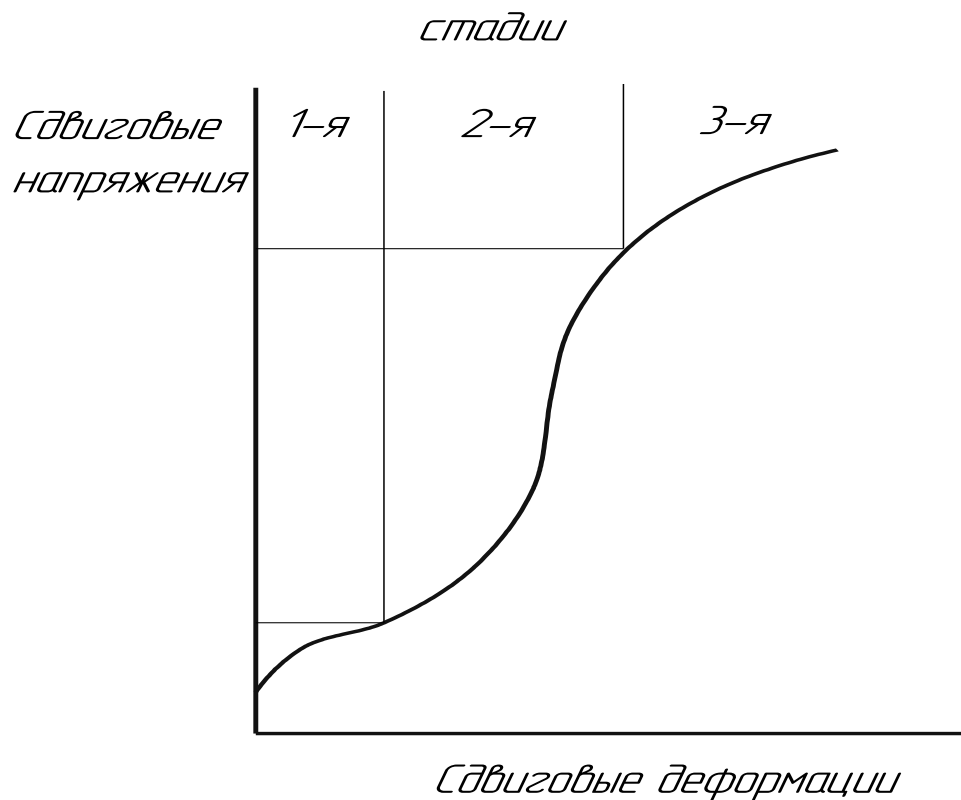


Рисунок 1.1- Кривая упрочнения монокристалла

Результаты экспериментальных исследований упрочнения, полученные разными исследователями, приведены в [1]. Согласно этим исследованиям величина угловой деформации соответствует первой стадии чистоты, ориентировки плоскостей и направлений скольжения, размером и формой монокристалла, а также условием на поверхности. Так, поверхность первой

стадии, определяемая угловой деформацией у чистых металлов выше, чем у металлов, содержащих примеси. Однако для твердых растворов отмечено увеличение протяженности первой стадии. При более благоприятной ориентировке плоскостей и направлений скольжения монокристалла протяженность первой стадии больше. Чем больше размеры, тем меньше протяженность первой стадии. Форма монокристалла также влияет на протяженность первой стадии. Оказывается, что скольжение не всегда в первую очередь происходит в плоскости с наиболее благоприятной ориентировкой. В ряде случаев скольжение происходит в плоскостях, в которых дислокациям требуется пройти наименьшее расстояние до выхода на поверхность. Угловая деформация, определяющая протяженность первой стадии, меньше, если на поверхности имеется окисная пленка.

Вторая стадия характеризуется почти линейной зависимостью упрочнения от деформации, причем модуль упрочнения на порядок выше по сравнению с «легким скольжением». На интенсивность упрочнения в процессе второй стадии также влияют ориентировка, размеры, форма и условия на поверхности монокристалла. Однако это влияние не так ярко выражено, как на первой стадии.

Третья стадия упрочнения характеризуется почти гиперболической зависимостью упрочнения от деформации и является преобладающей в процессе деформирования. Рассмотренные выше факторы в еще меньшей степени влияют на характер упрочнения.

В настоящее время существует несколько теорий, объясняющих упрочнение с позиций теорий дислокаций на рассмотренных выше стадиях деформирования. Основа этих теорий – взаимодействие дислокаций в процессе их движения. Согласно этой теории дислокации, движущиеся в параллельных плоскостях скольжения, взаимодействуют с так называемыми дислокациями

«леса», расположенными в других плоскостях. При пересечении скользящими дислокациями дислокаций «леса» на первых образуются ступеньки, препятствующие дальнейшему движению дислокаций. Для образования ступенек, как показано выше, необходимо затратить дополнительную работу.

В соответствии с этой моделью касательное напряжение τ , необходимое для поддержания скольжения дислокаций, можно представить в виде суммы двух слагаемых τ_1 и τ_2 .

Величина τ_1 определяется взаимодействием дислокаций, скользящих в первичных параллельных плоскостях. Размеры полей внутренних напряжений взаимодействующих дислокаций определены расстояниями между ними (для отоженных металлов 10^{-4} см). Эти расстояния в масштабах кристаллической решетки являются достаточно большими, поэтому тепловые флуктуации (временные случайные отклонения от равномерного распределения молекул в жидком металле, возникающие в результате теплового движения) не оказывают существенного влияния на облегчение скольжения. Следовательно, τ_1 не зависит от температуры.

Величина τ_2 определена взаимодействием скользящих дислокаций при пересечении дислокаций «леса» и образования ступенек. При повышенных температурах требуется меньшая затрата механической работы для образования ступенек. Согласно этой теории, энергия активации, необходимая для скольжения дислокации, определяется выражением:

$$U = U_0 - v\tau_1, \quad (1.1)$$

где U_0 - величина энергии активации, определяется скоростью деформации;

v - активационный объем, $v = bdl_0$;

b - вектор Бюргерса;

d - расстояние, на котором совершается работа пересечения дислокаций «леса»;

l_0 - расстояние между дислокациями «леса», пересекаемыми скользящей дислокацией.

При достаточно высоких температурах τ_2 становится равным нулю, поскольку термическая активация обеспечивает движение первичных скользящих дислокаций через «лес», не требуется дополнительных затрат энергии.

Приведенные выше рассуждения подтверждены экспериментальными данными.

В поликристалле, состоящем из отдельных произвольно ориентированных кристаллитов, даже в условиях простого растяжения отдельные кристаллиты не находятся в условиях одноосной схемы напряжений. Границы между деформируемыми кристаллами остаются общими, а скольжения внутри из-за различия ориентировки осей происходят в разных направлениях. Следовательно, соседние кристаллиты будут накладывать ограничения на деформацию друг друга. Ввиду указанных особенностей упрочнение в поликристалле будет отличаться от рассмотренного выше; на диаграммах напряжения – деформация поликристалла различают также три стадии упрочнения. Вторая стадия характеризуется линейной зависимостью упрочнения от деформации. Что касается первой и третьей, то для их описания более приемлема параболическая зависимость.

1.2 Повышение энергетического уровня металлов

Для пластического деформирования металлов необходимо затратить некоторое количество механической энергии, большая часть которой выделяется в виде теплоты. В результате температура деформируемой заготовки может заметно повыситься. Однако точные измерения показывают, что количество выделившейся теплоты всегда меньше количества

механической энергии, накопленной в металле, увеличивается с увеличением деформации до некоторой предельной величины (порядка 0,5-0,2 кал на 1гр металла). По достижении этого количества запасенной энергии дальнейшего накопления не происходит. Следовательно, энергия накапливается в результате увеличения количества несовершенств кристаллической решетки, в частности увеличения числа дислокаций, плотность которых в холоднодеформированном металле достигает порядка $\rho_A = 10^{12} \text{ см}^{-2}$, дальнейшего увеличения плотности дислокаций практически не происходит. Это является одной из причин измельчения зерен. Если это не произойдет в деформированном металле появляются остаточные напряжения, которые подразделяются на макронапряжения, уравнивающиеся в объемах с размерами не менее 1 мкм, и микронапряжения – в объемах с размерами нескольких $\rho_A = 10^{-8} \text{ см}$.

В технологии обработки давлением принята классификация остаточных напряжений, отличная от указанной выше. Это напряжения I, II и III родов.

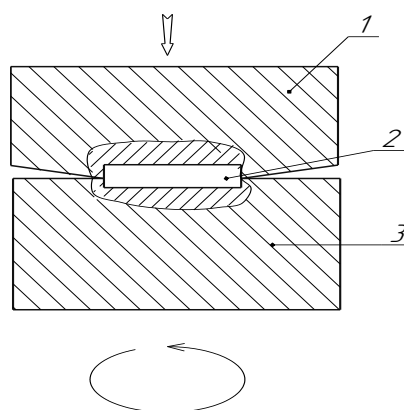
Остаточные напряжения, появившиеся в поковке в результате пластической деформации, свидетельствуют о накоплении потенциальной энергии, величина которой не превышает 10% от количества израсходованной на деформирование механической работы. Эта энергия оказывает заметное влияние на термодинамические процессы, протекающие в металлах и сплавах.

Очень важное следствие накопления энергии в результате пластической деформации состоит в возрастании химической активности изделия. Если изделие подвергается коррозионному воздействию, то накопленная потенциальная энергия уменьшает срок его эксплуатации. Так, латунные изделия в условиях повышенной влажности (осенью) могут растрескиваться, что носит название «сезонной болезни».

2 Способы больших интенсивных пластических деформаций, основанные на процессах без изменения размеров исходной заготовки

2.1 Способ сдвига кручением

Интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК) – это метод ИПД, при котором образец, обычно имеющий форму диска диаметром 10-20 и толщиной 0,3-1,0 мм, подвергается деформации кручением в условиях высокого приложенного гидростатического давления. Диск помещается внутрь полости, прилагается гидростатическое давление (P), и пластическая деформация кручением достигается за счет вращения одного из бойков (рисунок 2.1).



1 – верхняя половина штампа, 2 – заготовка, 3 – нижняя половина штампа

Рисунок 2.1 – Деформация кручением

Если в процессе ИПДК не происходит истечения материала образца из полости, толщина диска остается постоянной и величина деформации кручением составит [2]:

$$\gamma = (r/h), \quad (2.1)$$

где γ - деформация кручением;

r - расстояние от центра диска;

h - толщина образца.

Анализ формулы выявляет, что деформации образца крайне неравномерны: от нуля в центре образца до максимума на периферии.

При проведении ИПДК существенное измельчение структуры металлов и сплавов наблюдается при деформации уже в пол-оборота или один полный оборот. Однако для получения однородной структуры с размерами зерен до 100 нм необходимо несколько оборотов. Равномерность деформации объясняется, видимо, перемещением частиц из одного положения в другое. Рассмотренный способ применим для небольших размеров заготовки из необходимости создания очень больших усилий.

2.2 Равноканальное угловое выдавливание

РКУВ один из распространенных способов получения структуры кристаллических материалов с размерами зерен близких к наноразмерным с пределом измельчения зерна, величину которого можно оценить по формуле [3]:

$$(d'')^{0.5} = \chi \frac{K}{Y} \cdot \frac{\delta D^* 9Q}{C_v A_1 \xi KT}, \quad (2.2)$$

где (d'') - величина зерна;

A_1 - численный термодинамический табличный параметр;

D^* - коэффициент диффузии по неравномерным границам зерен;

T - термодинамическая температура;

K - постоянная Больцмана;

Q - атомный вес;

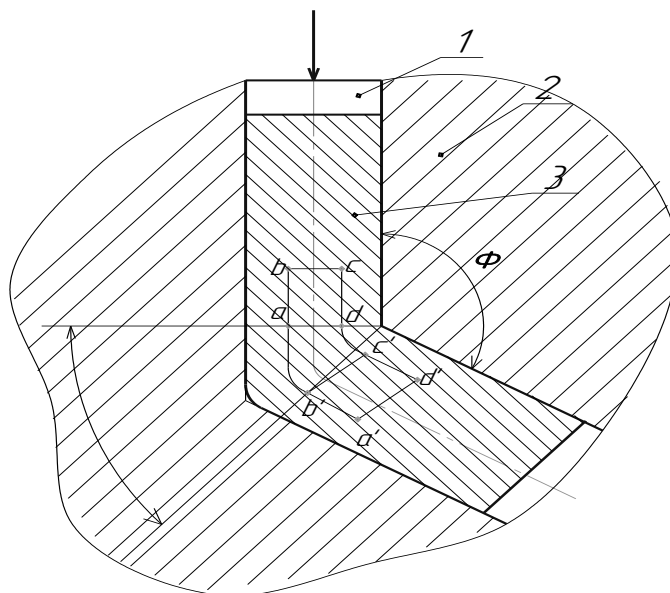
χ - геометрический коэффициент;

ξ - коэффициент однородности пластической деформации;

c_v - численный параметр.

РКУВ, позволяющий реализовывать деформацию объемных заготовок различных металлических материалов простым сдвигом, был разработан В.М.Сегалом с сотрудниками в начале 80-х годов [2]. Деформация сдвигом происходит, когда заготовка проходит через зону пересечения каналов (рисунок 2.2), так как размеры заготовки в поперечном сечении не изменяются, выдавливание может производиться многократно с целью достижения исключительно высоких степеней деформации.

В начале 90-х годов Р.З. Валиевым с соавторами метод РКУВ был развит и впервые использован как метод ИПД для получения УМЗ структур с зерном вплоть до нанометрических размеров. До настоящего времени РКУВ является наиболее применяемым методом ИПД, и несколько его модификаций получили дальнейшее развитие[5].



1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – заготовка

Рисунок 2.2 – Схема РКУВ

Величина эквивалентной деформации ε , реализуемой в процессе РКУВ, определяется соотношением, включающим угол сопряжения между двумя каналами Φ , и углом, представляющим собой внешний радиус сопряжения, где пересекаются две части канала ψ (рисунок 2.2). Это соотношение выглядит следующим образом [4]:

$$\varepsilon = (N / \sqrt{3}) [2 \operatorname{ctg} \{(\Phi / 2) + (\psi / 2)\} + \psi \cos \operatorname{ec} \{(\Phi / 2) + (\psi / 2)\}] , \quad (2.3)$$

где N - это число циклов прессования.

При реализации одного цикла прессования (при допущении отсутствия трения и $\psi=0$) приращение деформации ($\Delta \varepsilon_i$) в материале, составляет [2]:

$$\Delta \varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg} \frac{\Phi}{2} . \quad (2.4)$$

При $\Phi=90^\circ$ ее значение составляет $\sim 1,16$, и равно приращению деформации при прямом прессовании с вытяжкой с коэффициентом 3 или при деформации осадкой со степенью $\sim 70\%$. При многократном повторении циклов обработки (N) деформация суммируется, что обеспечивает в заданном исходном сечении истинную (абсолютную) деформацию :

$$\varepsilon_i = N \Delta \varepsilon_i . \quad (2.5)$$

В процессе многократно повторяющихся циклов прессования в заготовке накапливается деформация сдвигом, что в результате приводит к формированию в материале однородной УМЗ структуры.

В процессе РКУВ в обрабатываемых материалах могут быть задействованы различные системы скольжения за счет вращения заготовки вокруг ее продольной оси между каждым проходом [2]. На практике осуществляют четыре основных маршрута вращения: маршрут А – без вращения заготовки; маршруты В_А и В_С, предполагающие вращение на 90° в разных направлениях или в одном направлении, соответственно, и маршрут С, предполагающий на 180° (рисунок 2.3).

Экспериментально показано, что при использовании оснастки с углом пересечения каналов $\Phi=90^\circ$, реализация маршрута V_C наиболее эффективна для формирования УМЗ структуры, состоящей из однородных и равноосных зерен.

Среди новых направлений в развитии метода РКУВ – обработки металлов и сплавов, в том числе, обладающих пониженной технологической пластичностью, которая может быть осуществлена при использовании противодавления. Экспериментальное и теоретическое моделирование процесса РКУВ, связанное с исследованиями напряженно-деформированного состояния, контактных напряжений и условий трения, позволило сконструировать оснастку для получения заготовок из различных металлов, включая титановые сплавы и вольфрам с однородной УМЗ структурой.

Наглядно преимущественно метода РКУВ с противодавлением по сравнению с обычным РКУВ, демонстрируют результаты исследований микроструктуры и механических свойств медных заготовок [6]. Было установлено, что противодавление способствует интенсификации процесса измельчения структуры и уменьшенного среднего размера зерен вплоть до 190 нм. В отсутствие противодавления средний размер зерна медных заготовок составил 280 нм. При этом доля большеугловых границ в спектре разориентировок также возрастает при наличии противодавления.

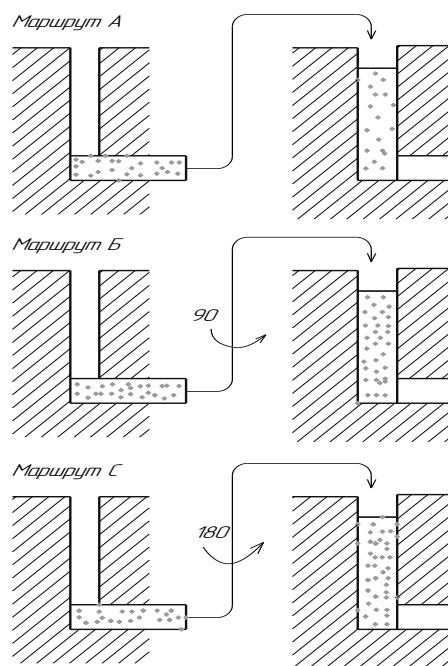


Рисунок 2.3 – Маршруты РКУВ с вращением вокруг оси

Развитие РКУВ плоских заготовок необходимо для формирования УМЗ состояния в листах, потребность в которых в различных отраслях техники также очень высока [2].

Исследования, которые в настоящее время активизировались в данном направлении, представляют большой практический интерес, поскольку полуфабрикаты в виде плит, наряду с прутковыми заготовками, широко используются в промышленности.

Важно отметить, что при реализации РКУП для обработки плоских заготовок (плит), используют две новые принципиально различные конфигурации оснастки, схематически представленные на рисунке 2.4.

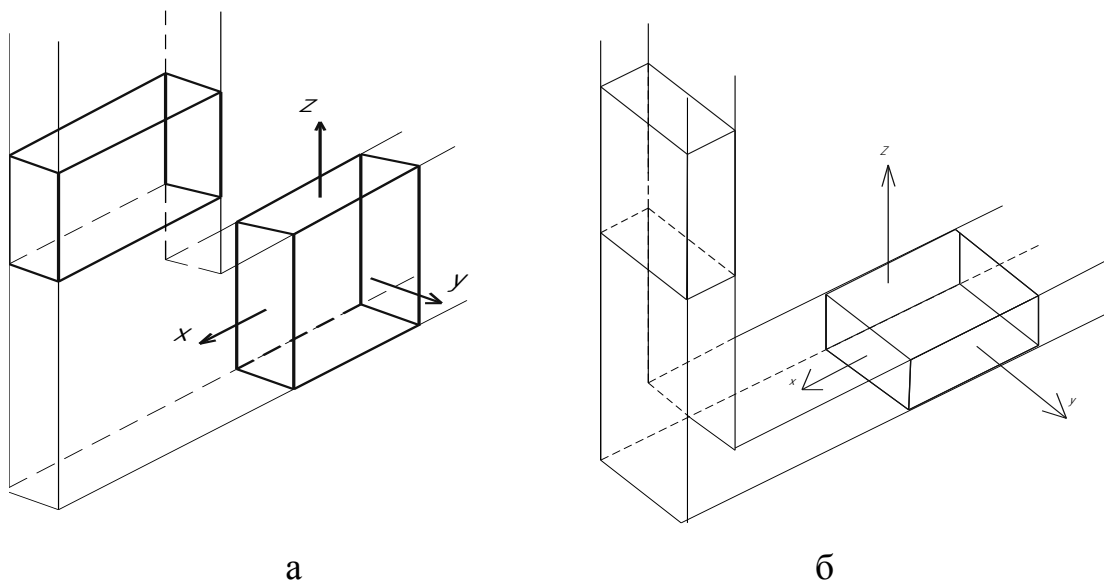


Рисунок 2.4 – Схемы реализации РКУП при осуществлении обработки заготовок в виде плиты/пластины при вертикальном (а) и горизонтальном (б) размещении заготовки в оснастке

Еще одной недавно предложенной разновидностью РКУП является РКУП во вращающейся матрице (Rotary-die ECA pressing). При традиционном процессе РКУВ заготовку приходится после каждого прохода вынимать из оснастки, а затем перед очередным проходом вновь помещать ее во входной канал, ориентируя в соответствии с выбранным маршрутом обработки.

Такая операция нетехнологична, так как приводит к увеличению времени обработки и к охлаждению заготовки в случае, если процесс осуществляется при повышенных температурах. Именно для устранения этих недостатков и предложена весьма простая схема РКУВ с вращающейся оснасткой (рисунок 2.5).

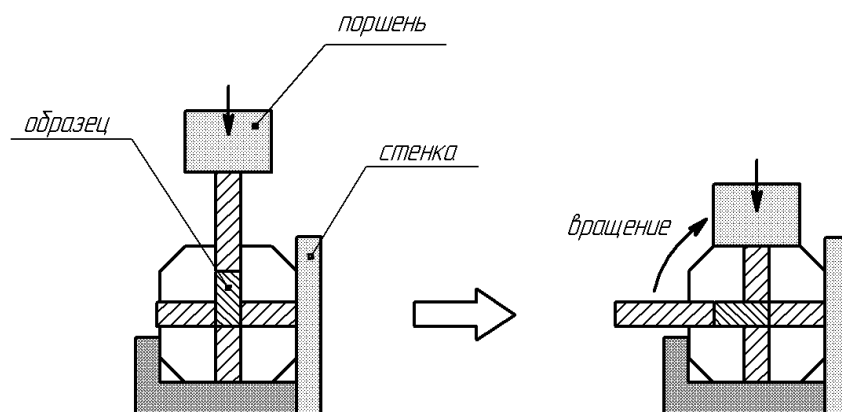


Рисунок 2.5 – Схема реализации метода РКУВ с вращающейся оснасткой (матрицей)

В то же время, у данной модификации РКУВ есть целый ряд недостатков. В частности, отношение длины к поперечному размеру заготовок при использовании данной схемы мало.

В результате формирования относительно обширной зоны низкой проработки материала в заходной и выходной части заготовки приводит к существенной неоднородности, как ее структуры, так и механических свойств.

Помимо этого, в ходе осуществления РКУВ по такой схеме возможно использование оснастки только с углом сопряжения каналов 90° . Также возможно возникновение трудностей, связанных с нанесением смазочных покрытий в процессе обработки.

Новым направлением развития традиционного РКУВ для получения УМЗ заготовок является его реализация в оснастке с двумя параллельными каналами (ПК) (рисунок 2.6). Описание данного модифицированного метода РКУП приведено в работах [4].

Недавние работы, в которых было также проведено моделирование методом конечных элементов в сочетании с экспериментальными исследованиями, убедительно продемонстрировали преимущества данного метода. Отличительной особенностью РКУП в ПК, разработанного в ИФПМ УГАТУ, является реализация простого сдвига последовательным в двух очагах деформации, соответствующих двум последовательным пересечениям каналов в оснастке. В результате может существенно уменьшиться число проходов, необходимое для обеспечения формирования УМЗ структурных состояний в материалах.

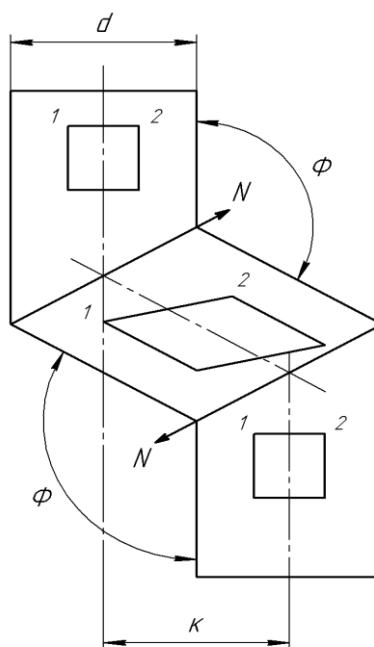


Рисунок 2.6 – Способ БИПД – РКУВ в параллельных каналах

Как показали исследования способ РКУВ позволяет достичь явление сверхпластичности и истинного зернограницного проскальзывания.

Однако рассмотренный способ применим только для сплошных полуфабрикатов, кроме того требует значительных энергетических нагрузок и не реализуется для крупногабаритных заготовок.

2.3 Всесторонняя ковка

Суть этого метода заключается в проведении многоэтапной деформации. Каждый этап обработки состоит из нескольких высотных осадок заготовки со степенью деформации 40-60% и последующей ее протяжки на исходный размер. Причем поворот заготовки после каждого цикла «осадка - протяжка» осуществляется таким образом, чтобы ось ее симметрии была повернута на 90° по отношению к оси предыдущего цикла.

Теоретическое обоснование данного метода базируется на том, что, во-первых, пластичность материала увеличивается с измельчением исходной структуры; во-вторых, уменьшение размеров зерен обеспечивается уменьшением температуры деформации.

В работе [2] представлена схема всесторонней ковки (рисунок 2.7). Недостаток схемы в том, что предусматривает изотермические условия, в противном случае заготовка разрушается. Кроме того имеет место несовпадение размеров исходной заготовки и полученного полуфабриката.

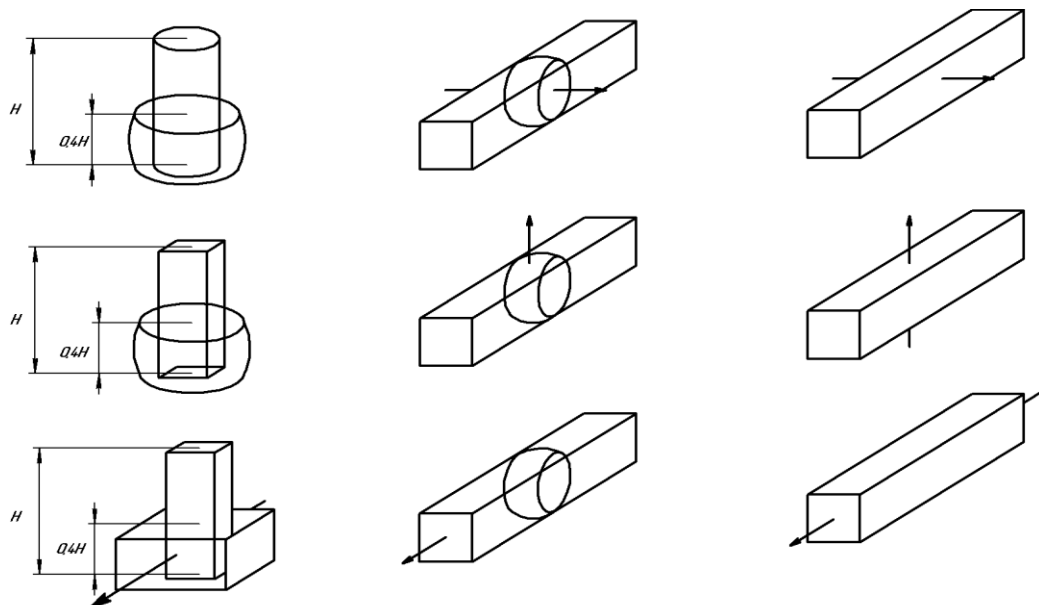


Рисунок 2.7 – Схема БИПД всесторонней ковкой

2.4 Прессование, сдвиг, осадка сплошных заготовок

Известен способ структурообразования [7], в котором заготовка многократно деформируется прессованием (выдавливанием) с одной стороны и одновременной осадкой выдавленной части с другой противоположной стороны. При этом у заготовки сохраняются первоначальная форма и размеры. В последующем цикле деформирования происходит смена направления выдавливания и осадки на противоположные. Деформирование при этом способе происходит в условиях всестороннего сжатия.

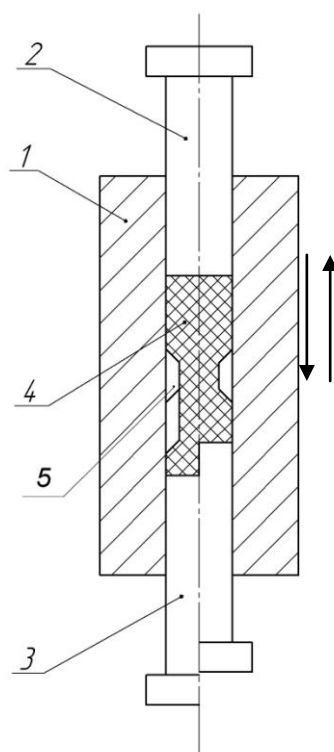
Недостатком способа является высокое давление, вследствие этого невысокая стойкость инструмента, большие усилия деформирования и малые степени деформации.

Недостатком известного технического решения является невозможность деформировать легированные и конструкционные стали и сплавы. Осадка выдавленной части заготовки, проводимая одновременно с выдавливанием, действует как подпор и значительно повышает напряжение на инструменте при выдавливании. Именно этот фактор в совокупности с высокими механическими свойствами и низкой пластичностью при комнатной температуре легированных и конструкционных сталей и сплавов делает невозможным процесс деформирования этих материалов.

Расширение возможностей способа пластического структурообразования для деформирования заготовок высокопрочных легированных сталей и сплавов может быть достигнута способом пластического структурообразования, включающим многократное деформирование заготовки с сохранением ее первоначальной формы и размеров после каждого цикла деформирования. Направление выдавливания в каждом последующем цикле меняют на противоположное относительно направления выдавливания в предыдущем цикле.

В каждом цикле деформации сначала производят прессование (выдавливание) небольшой части заготовки через рабочий поясок матрицы, прессование прекращают, осаживают выдавленную часть заготовки вторым пуансоном во второй части матрицы, затем повторяют поочередно выдавливание части заготовки и ее осадку до тех пор, пока вся заготовка не будет продеформирована. Длина выдавленной через рабочий поясок части заготовки при этом не должна превышать 2,5 диаметров рабочего пояска матрицы (рисунок 2.8).

Рассмотренный способ позволяет уменьшить усилие процесса, однако сохраняет те же недостатки, контейнара присущи предыдущему способу, а именно значительная неравномерность деформации.



1 – контейнер, 2 – верхний пуансон, 3 – нижний пуансон,
4 - заготовка, 5 – рабочий пояс

Рисунок 2.8 – Прессование, сдвиг, осадка сплошных заготовок

3 Технология изготовления наноструктурированных изделий и материалов большими пластическими деформациями, прессованием, сдвигом, всесторонней ковкой и их совмещением

3.1 Разработка технологии получения наноструктурированных изделий, основанной на способах прессования и осадки полых цилиндрических заготовок без изменения их размеров большими интенсивными пластическими деформациями

Аналогом и прототипом предлагаемого способа являются способы, основанные на так называемой схеме «песочные часы» [7]. Принципиальное отличие нового способа заключается в том, что в процессе деформирования перемещение очага деформации обеспечивается движением наружных элементов устройства при неподвижном в этот момент пуансоне. На рисунке 3.1 представлена принципиальная схема устройства для реализации способа многопереходных процессов выдавливания-осадка полых цилиндрической заготовки. Устройство содержит два пуансона 1, контейнер 2, внутри которого имеется сечение в виде пояска 4 меньшего диаметра и помещена заготовка 3. Заготовка помещается внутрь, затем осаживается и создаётся внутри заготовки схема всестороннего сжатия. Процесс прессования происходит при движении контейнера вверх или вниз за счёт уменьшения площади сечения заготовки при прохождении через поясок. Выдавленная часть заготовки, упираясь в пуансон, расположенный с противоположной стороны, осаживается одновременно до исходных размеров заготовки. Процесс заканчивается в момент, когда поясок достигнет торца одного из пуансонов. Затем процесс повторяется при движении контейнера в обратную сторону. За каждый проход заготовка получает деформацию, которую можно оценить

$$e_i = 2 \ln \left| \frac{(R_k^2 - r^2)}{(R_n^2 - r^2)} \right| \quad (3.1)$$

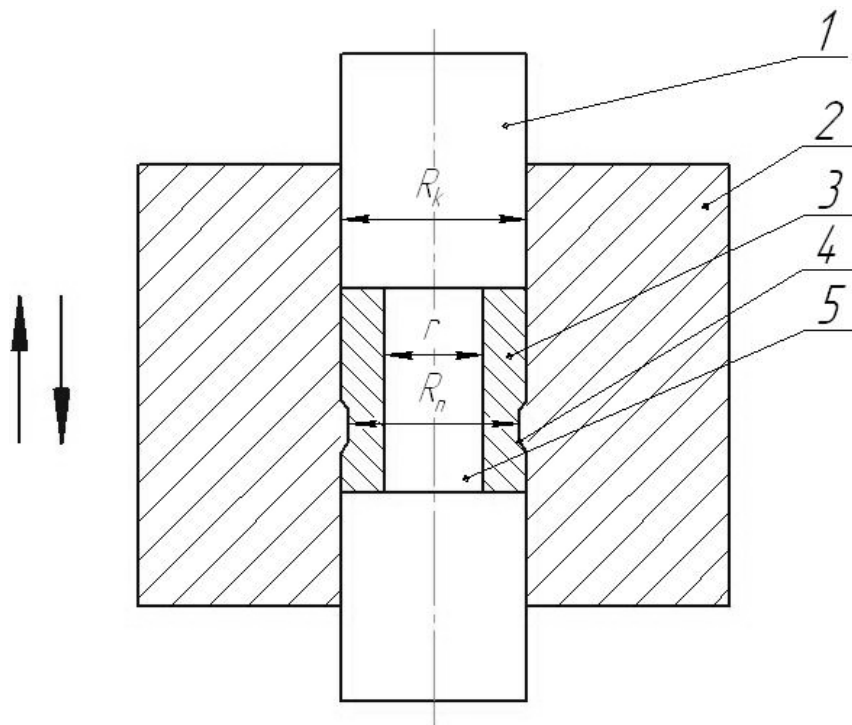
где e_i - интенсивность деформации за 1 проход,

R_k - радиус внутренней поверхности контейнера,

R_n - радиус рабочего пояса,

r - радиус оправки.

Удвоенное значение интенсивности объясняется процессами выдавливания путём уменьшения сечения образца и осадкой восстановлением исходных размеров.



1 – пуансон; 2 – контейнер; 3 – заготовка; 4 – пояс; 5 – оправка

Рисунок 3.1 – Схема способа многопереходных процессов выдавливания-осадки полей цилиндрической заготовки

3.2 Моделирование способа прессования, сдвига, осадки с большими пластическими деформациями

Проведено компьютерное моделирование методом конечных элементов процесса деформации полос полых цилиндрической заготовки в штампе по схеме рисунка 3.1 в специализированном программном комплексе DEFORM – 2D. Числовой расчет формоизменения полых заготовок в холодном состоянии большими интенсивными пластическими деформациями проводили с размерами: наружный диаметр 19,5мм, внутренний диаметр 11,5мм, толщина стенки 4мм, длина заготовки 25мм. Материал заготовки алюминий марки Al-1100.

Для описания свойств материала трубной заготовки Al-1100 при холодной деформации принята модель упрочняющейся пластической среды (рисунок 3.2). Напряжение течения σ_i представлено в виде кусочно-линейной зависимости упрочнения материала от величины деформации ϵ_i . Из рисунка видно, что при холодной деформации алюминий Al-1100 интенсивно упрочняется.

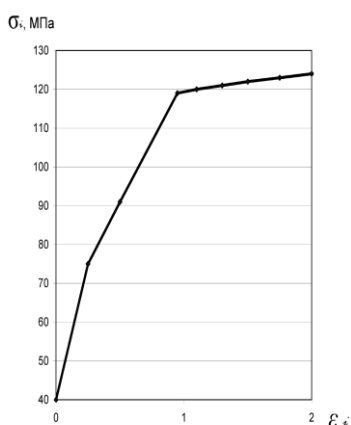
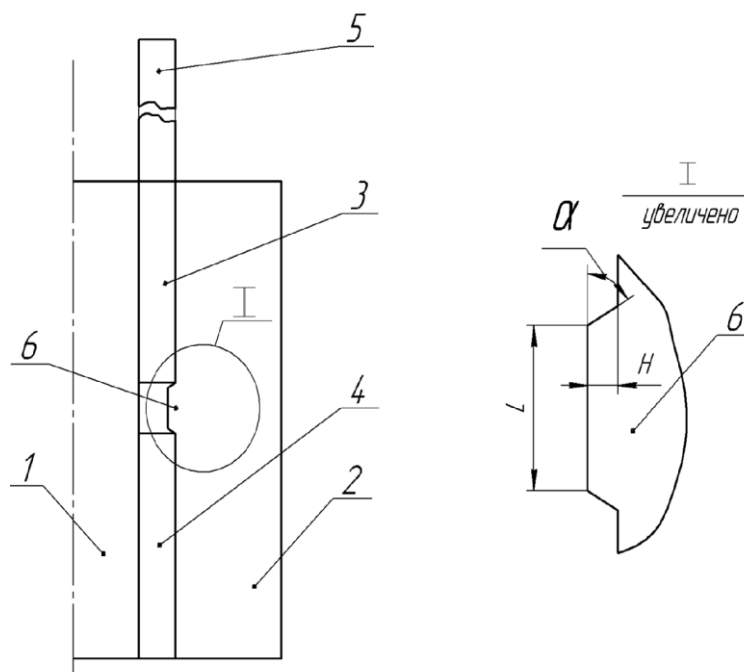


Рисунок 3.2 – Диаграмма упрочнения сплава Al-1100

При формоизменении полой цилиндрической (трубной) заготовки деформация принималась как осесимметричная. На поверхностях контакта трубной заготовки со штампом для выдавливания и осадки действуют касательные напряжения, определяемые по закону Кулона. Коэффициент трения принят равным 0,15. Формоизменение осуществлялось в три перехода.

Компьютерная модель штампа для прессования трубной заготовки приведена на рисунке 3.3. Так как процесс прессования осесимметричный, то рассмотрена только правая часть штампа.



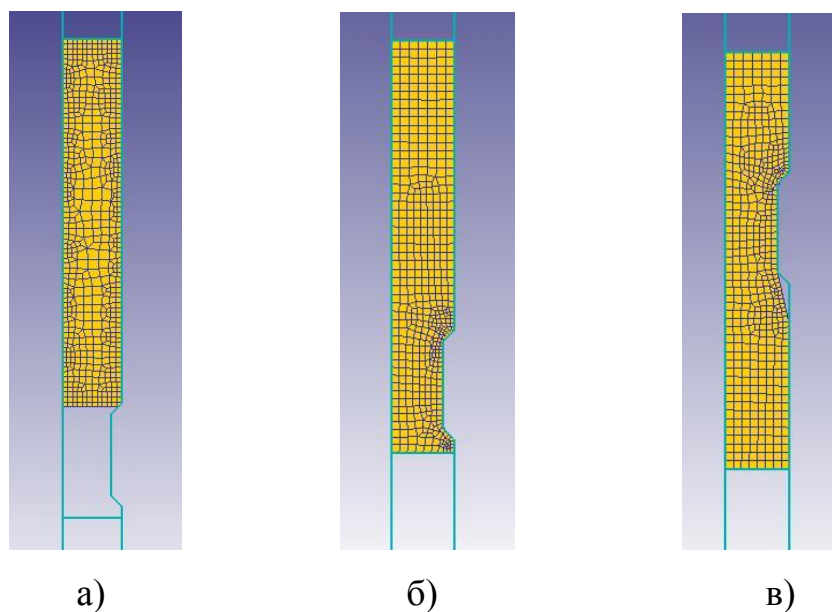
1 – оправка; 2 – контейнер; 3 – трубная заготовка;
4,5 – нижний и верхний пуансоны соответственно; 6 – выступ

Рисунок 3.3 – Компьютерная модель штампа выдавливания

Штамп состоит из контейнера 2, оправки 1, образующих полой цилиндрический канал. Внутри полости канала размещают трубную заготовку

3, нижний 4 и верхний 5 жесткие пуансоны. У наружной матрицы имеется выступ 6, имеющий трапецевидальную форму с размерами: $\alpha=30^\circ$, $H=0,75\text{мм}$, $L=5,5\text{мм}$. Выступ при выдавливании обеспечивает интенсивную пластическую деформацию металла трубной заготовки.

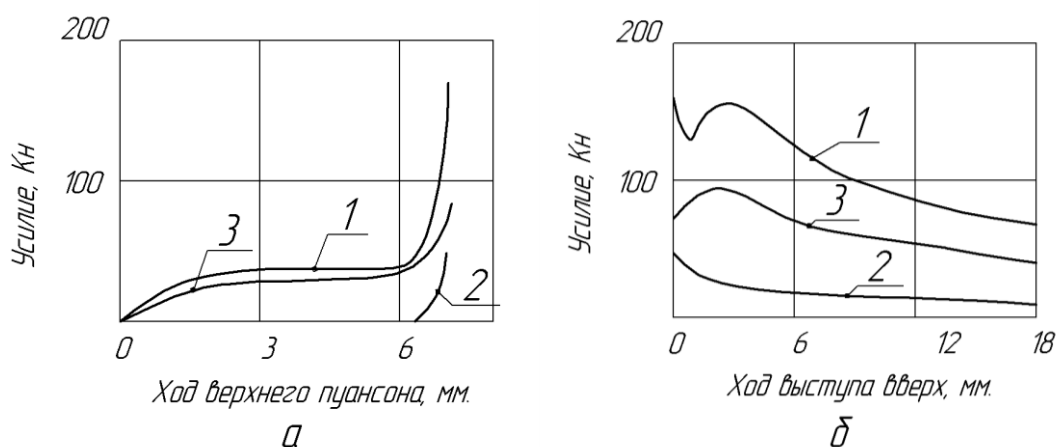
На первом этапе трубная заготовка запрессовывается за счет закрытой осадки через очко в матрицах, заполняя гравюру штампа до упора в нижний пуансон, под действием усилия, приложенного на торец верхнего пуансона, (рисунок 3.4, б). Далее положение верхнего и нижнего пуансонов фиксируется. Наружная матрица с выступом начинает перемещаться вдоль оси трубной заготовки вверх-вниз со скоростью 1 мм/сек. (рисунок 3.4, в). При этом геометрические размеры заготовки при закрытом выдавливании, остаются неизменными. Коэффициент вытяжки равен 1,29, что соответствует степени деформации трубной заготовки 22,6%.



а – исходное состояние; б – запрессовка;
в – возвратно-поступательное движение выступа

Рисунок 3.4 –Этапы деформации

Двухмерную упорядоченную сетку конечных элементов сгенерировали с использованием 500 элементов, это составляет семь конечных элементов по толщине стенки трубной заготовки, перемещение выступа на каждом шаге расчета равно 0,07мм. Для реального рассматриваемого процесса такое количество элементов обычно достаточно, чтобы исследовать течение материала и дать ему оценку.



1 – верхний пуансон; 2 – нижний пуансон; 3 – контейнер

Рисунок 3.5 – Графики изменения усилий на стадиях осадки (а) и закрытого выдавливания (б) в зависимости от перемещения инструмента

Из рисунка 3.5 (а), видно, что на стадии закрытой осадки усилия, приложенные к пуансонам и наружной матрице с выступом, возрастают в зависимости от перемещения верхнего пуансона и достигают экстремальных значений при полном заполнении гравюры штампа. Наибольшую нагрузку воспринимает верхний пуансон. Нижний пуансон нагружается только на заключительной стадии закрытой осадки. Ширина выступа L (рисунок 3.4, б) не оказывает заметного влияния на изменение усилия на верхнем пуансоне.

Усилие на нижнем пуансоне в среднем в три раза меньше, чем на верхнем пуансоне.

На стадии закрытой осадки проведено моделирование двух положений верхнего торца нижнего пуансона: торец касается выступа и торец расположен на 1 мм ниже выступа (рисунок 3.4, а). В первом положении на стадии окончательного заполнения гравюры штампа требуется усилие, на 50% больше, чем во втором положении.

Высота выступа H (рисунок 3.3) заметно влияет на силовые условия. Из таблицы 3.1 видно что, чем больше H , тем требуется большее усилие на верхнем пуансоне на стадии заполнения гравюры штампа.

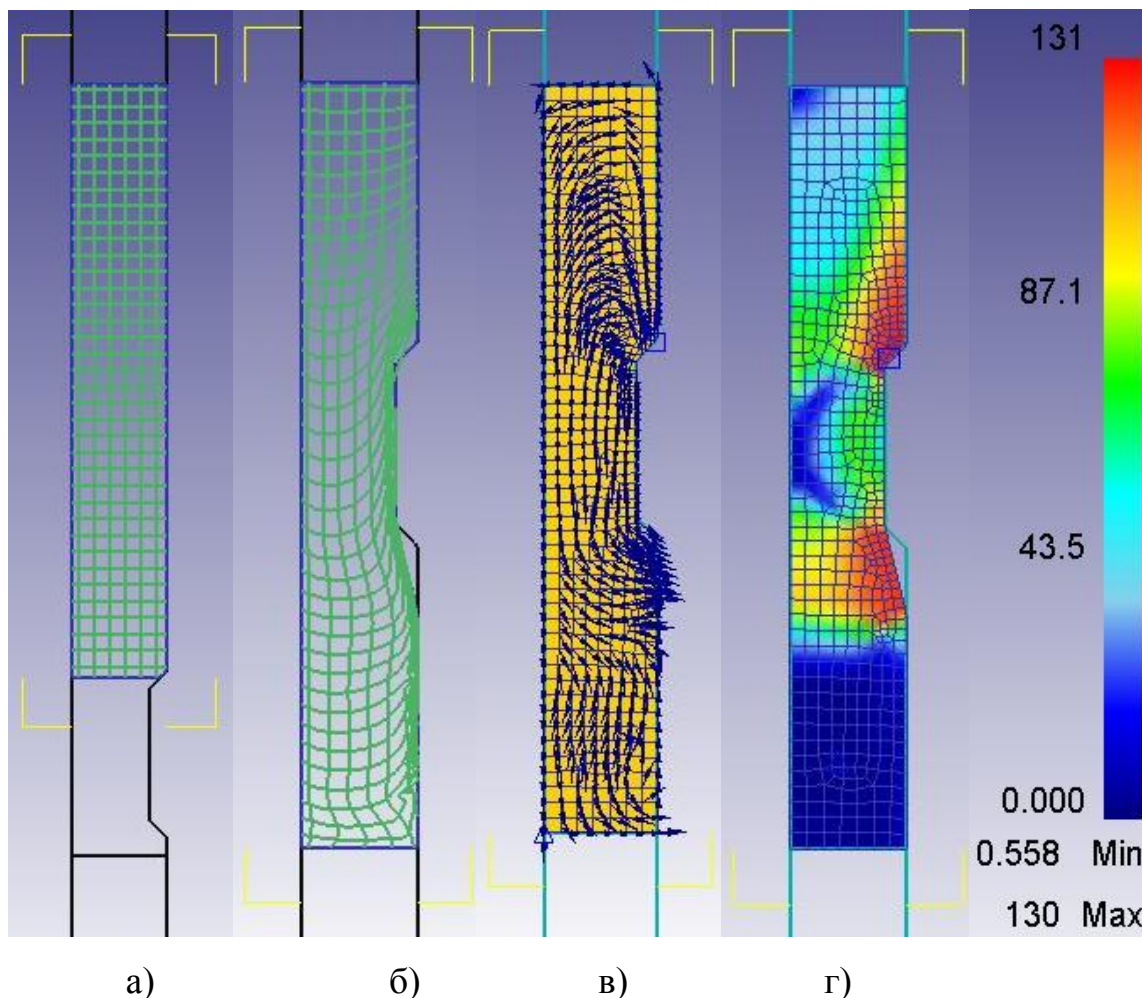
Таблица 3.1 – Результаты моделирования при ходе верхнего пуансона (мм)

Высота выступа H ,мм	0,75	1,00	1,50
Усилие на верхнем пуансоне, кН	38	45	80

После заполнения гравюры штампа металлом трубной заготовки закрытую осадку останавливают (рисунок 3.4, б). Перед началом интенсивных пластических деформаций в трубной заготовке создана схема трехосного неравномерного сжатия.

Стадия закрытого выдавливания(интенсивных пластических деформаций) при движении выступа вверх и неподвижных пуансонах начинается при тех же внешних силах, при которых завершилась стадия закрытой осадки (рисунок 3.5, б). Из графиков видно, что усилия на верхнем пуансоне и выступе вначале возрастают, достигая экстремума, а затем плавно уменьшаются в связи с уменьшением поверхности трения в верхней части матриц. На нижнем пуансоне усилие монотонно убывает. Наиболее нагруженным при движении

выступа вверх является верхний пуансон, при движении выступа вниз – нижний пуансон.



а - исходная координатная сетка; б - искажённая координатная сетка;
в - поле скоростей течения; г – распределение интенсивности напряжений

Рисунок 3.6 – Результаты моделирования закрытого выдавливания в штампе

Картина течения металла трубной заготовки при закрытом выдавливании в штампе при движении выступа вверх на 235 шаге приведена на рисунках 3.6

(а, б, в). Аналогичная картина течения металла имеет место при движении выступа вниз.

Деформированное состояние выдавливаемого металла на основной стадии процесса характеризуется по изменению координатной сетки (рисунок 3.6 а, б) по ее состоянию в начале и середине рассматриваемой стадии.

Из анализа искаженной координатной сетки видно, что:

- Все вертикальные прямые линии начальной координатной сетки изгибаются трижды: перед надвигающимся выступом, после его прохождения в области нижнего пуансона.
- Эти изгибы направлены во взаимно-противоположные стороны, что свидетельствует о немонотонности деформации.
- В области выступа вертикальные линии сближаются, а после прохождения выступа удаляются друг от друга. Это говорит об изменении толщины продольных цилиндрических слоев по всей высоте деформируемой заготовки.
- Все горизонтальные прямые линии начальной координатной сетки в трубной заготовке несимметрично изгибаются выпуклостью в направлении, противоположном движению деформирующего выступа. Это указывает на отставание слоев металла, расположенных по границам контакта инструмент-заготовка, от середины в направлении, параллельном оси выдавливания. Наибольшее отставание имеет место для периферийных слоев, примыкающих к выступу.
- Все квадратные ячейки начальной координатной сетки преобразуются в параллелограммы. Перед выступом и в области выступа квадратные ячейки вытягиваются в направлении течения металла и после прохождения выступа, вытягиваются в поперечном радиальном направлении.

- Наиболее интенсивно искажаются вертикальные и горизонтальные квадратные ячейки в области, локализованной около деформирующего выступа.
- Форма изгибов поперечных линий показывает, что все продольные (осевые) слои трубной заготовки подвергаются сдвиговой деформации, которая растет от внутренних слоев к периферийным.
- На основной стадии закрытого выдавливания подвергаются деформации весь объем трубной заготовки.
- Наиболее интенсивно деформируются периферийные слои, менее интенсивно внутренние слои трубной заготовки.
- За выступом обнаружен небольшой объем гравюры, не заполненной металлом заготовки при закрытом выдавливании. Чтобы обеспечить полное заполнение гравюры при движении выступа необходимо приложить к пуансону дополнительные усилия, создающие высокое гидростатическое давление.

На рисунке 3.6 (в) показано поле полных скоростей течения на основной стадии закрытого выдавливания. Из рисунка видно, что под действием движущегося вверх выступа частицы металла устремляются к верхнему пуансону и, встречая препятствие в виде неподвижного пуансона, поворачивают к узкому каналу, образованному выступом и оправки. Далее частицы металла стремятся заполнить освободившийся от перемещения вверх выступающий объем гравюры, резко поворачивая к контейнеру. Это вызывает турбулентное течение металла в области нижнего неподвижного пуансона, производящего процесс осадки.

Таким образом, поле скоростей течения еще раз подтверждает тот факт, что при закрытом выдавливании неравномерно деформируется весь металл трубной заготовки.

На рисунке 3.7 показано семейство линий равных напряжений σ_R , σ_θ , σ_z , τ_{Rz} в продольном сечении трубной заготовки. Из анализа приведенных графиков видно, что при закрытом выдавливании в объеме трубной заготовки преобладает схема трехосного неравномерного сжатия. Радиальные σ_R , тангенциальные σ_θ и продольные σ_z напряжения по абсолютной величине достигают максимальных значений в пределах 524-581 МПа в области верхнего пуансона, а минимальных значений в области нижнего пуансона в пределах 18,2-57,7 МПа. На нижней кромке подвижного выступа обнаружены растягивающие радиальные напряжения σ_R , равные 18,2 МПа. На свободной поверхности трубной заготовки, расположенной под выступом, имеют место растягивающие тангенциальные напряжения, равные 57,7 МПа.

Наибольший градиент касательных напряжений отмечен на кромках подвижного выступа. Как видно из графиков, касательные напряжения по толщине стенки трубной заготовки изменяются неравномерно. В периферийных слоях - отрицательные. Наибольших значений касательные напряжения достигают на верхней кромке подвижного выступа, а наименьших значений - на нижней кромке. Именно на кромках подвижного выступа наблюдается наибольший изгиб продольных и поперечных линий координатной сетки течения.

На рисунке 3.8 приведено семейство линий равных деформаций ε_R , ε_θ , ε_z , γ_{Rz} в продольном сечении трубной заготовки. Из анализа приведенных графиков видно, что при закрытом выдавливании в объеме трубной заготовки преобладает следующая схема деформаций: продольная деформация удлинения ε_z , а в поперечном сечении радиальная ε_R и тангенциальная ε_θ деформации укорочения. По абсолютной величине радиальная ε_R и продольная ε_z деформация. Для инженерного анализа рассматриваемого процесса закрытого

выдавливания трубной заготовки можно использовать схему плоско-деформированного состояния, приняв $\varepsilon_{\theta} \sim 0$. Тогда $\varepsilon_R = \varepsilon_z$.

Радиальная деформация по абсолютной величине достигает экстремальных значений в локальной области, прилегающей к верхней кромке подвижного выступа. Далее ε_R убывает к нижнему пуансону. В локальных областях, прилегающих к верхнему и нижнему пуансонам, радиальная деформация положительная.

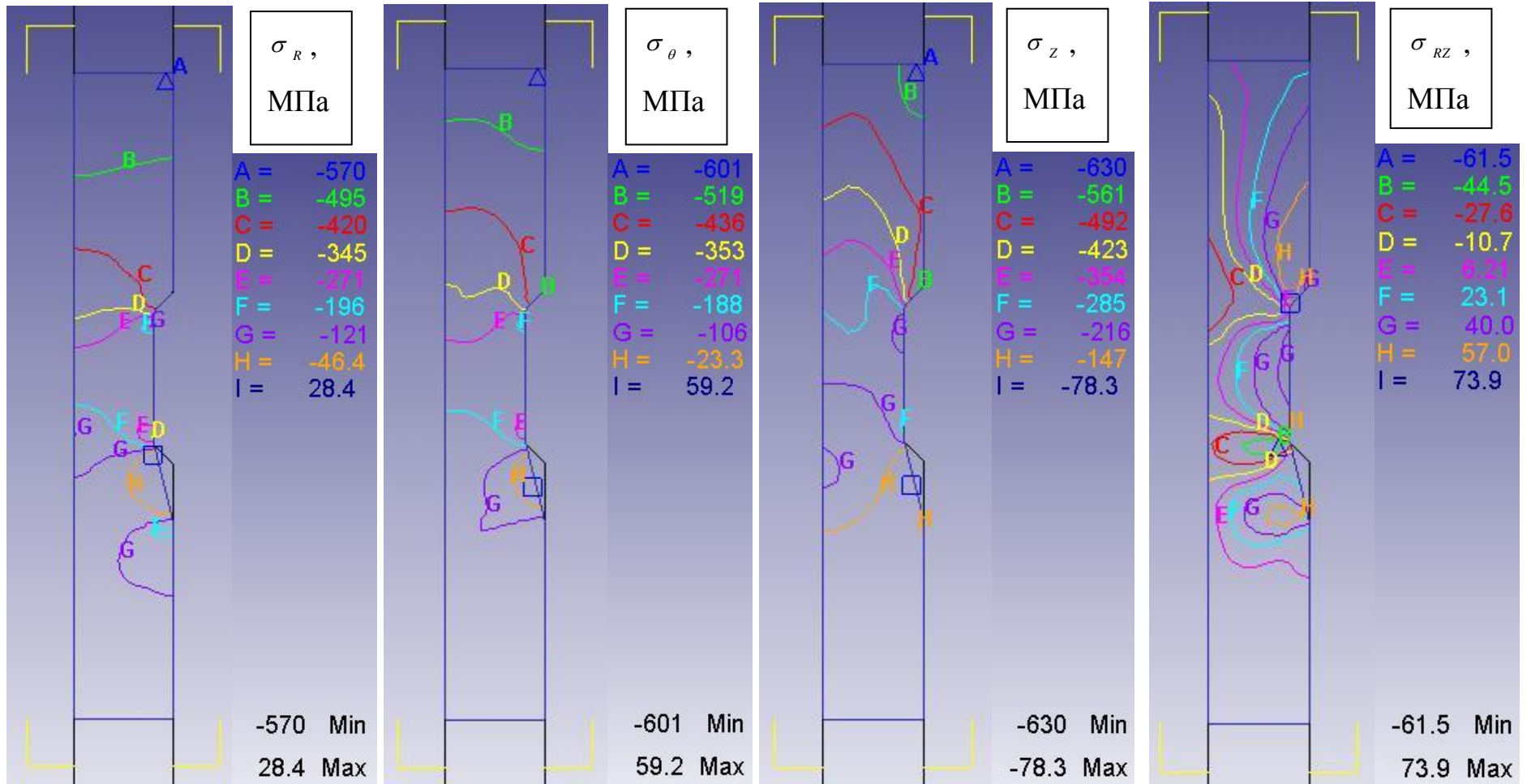


Рисунок 3.7 – Распределение напряжений

Продольная деформация ε_z достигает экстремальных значений на верхней кромке подвижного выступа и убывает в направлении к верхнему и нижнему пуансонам. В локальной области, расположенной около нижнего пуансона, продольная деформация становится деформацией упрочнения.

Тангенциальная деформация в области, прилегающей к верхнему пуансону и подвижному выступу является деформацией укорочения, а в области турбулентного течения, расположенной около нижнего пуансона, деформацией удлинения.

Измельчение зерен трубной заготовки происходит при холодной деформации за счет сдвиговых деформаций $\gamma_{R\theta}$, вызываемых касательными напряжениями τ_{Rz} . Причем величина γ_{Rz} , больше, чем у остальных деформаций ε_R , ε_θ и ε_z . Экстремальных значений сдвиговые деформации достигают на кромках подвижного выступа. Материальные частицы перед верхней кромкой поворачиваются по часовой стрелке, а при прохождении нижней кромки – против часовой стрелки.

Таким образом, в рассматриваемом способе закрытого выдавливания трубной заготовки реализуется два акта сдвиговой деформации за один цикл деформирования.

Деформации сдвига по толщине стенки изменяются неравномерно, достигая наибольших значений на периферийных слоях.

На рисунке 3.6 г дано распределение интенсивности напряжений по объему деформируемой трубной заготовки, рассматриваемой по формуле:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_R - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_R)^2 + 6\tau_{Rz}^2}, \quad (3.2)$$

где σ_R , σ_θ , σ_z -радиальные, тангенциальные и продольные напряжения;
 τ_{Rz} – касательные напряжения.

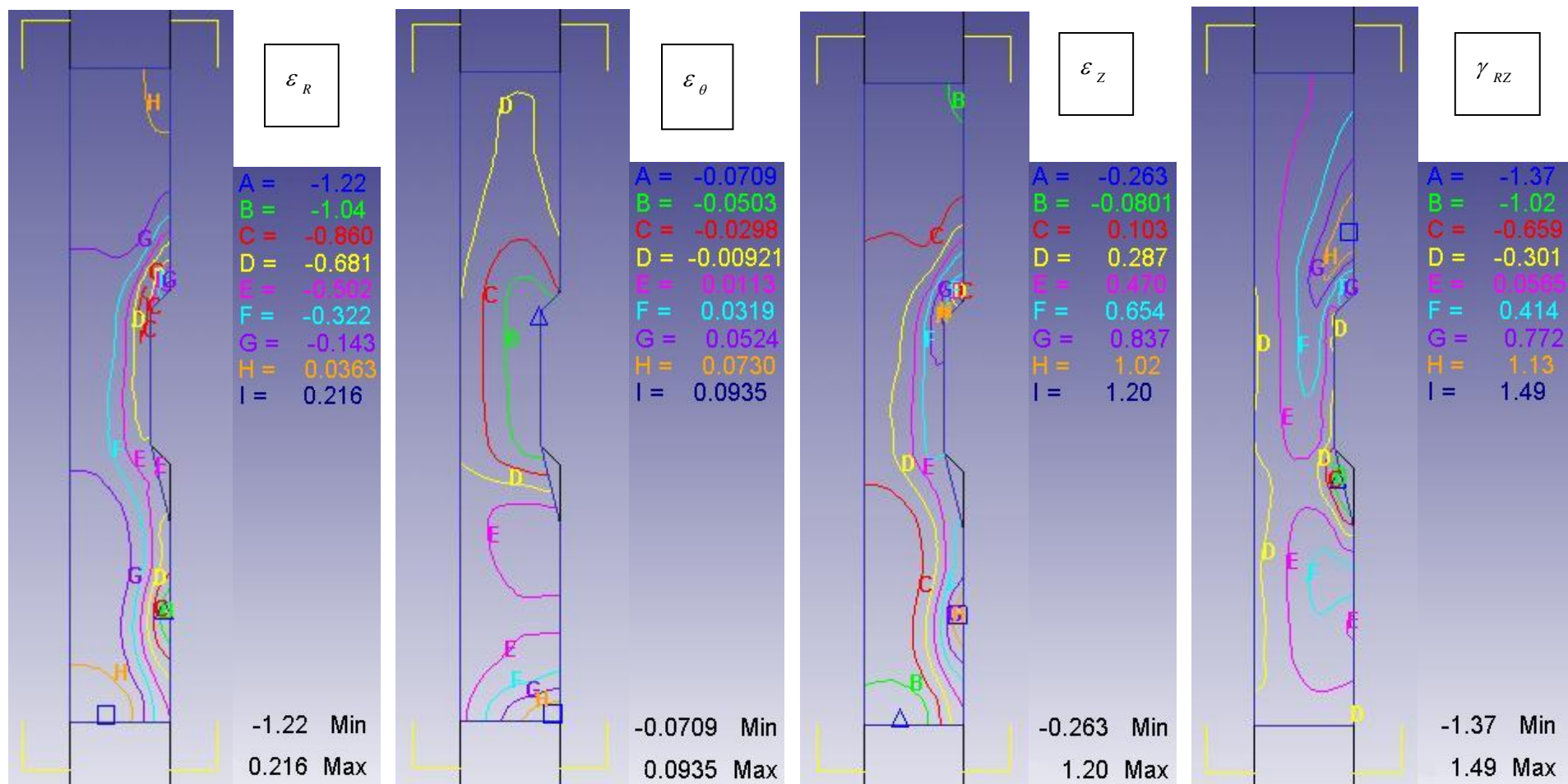


Рисунок 3.8 – Распределение деформаций

Из рисунка видно, что наибольших значений интенсивность напряжений σ_i достигает в областях, прилегающих к деформирующему выступу, а наименьших значений в области, прилегающей к нижнему пуансону, и области, расположенной в суженной части гравюры штампа. Это и есть область активной и затрудненной деформации.

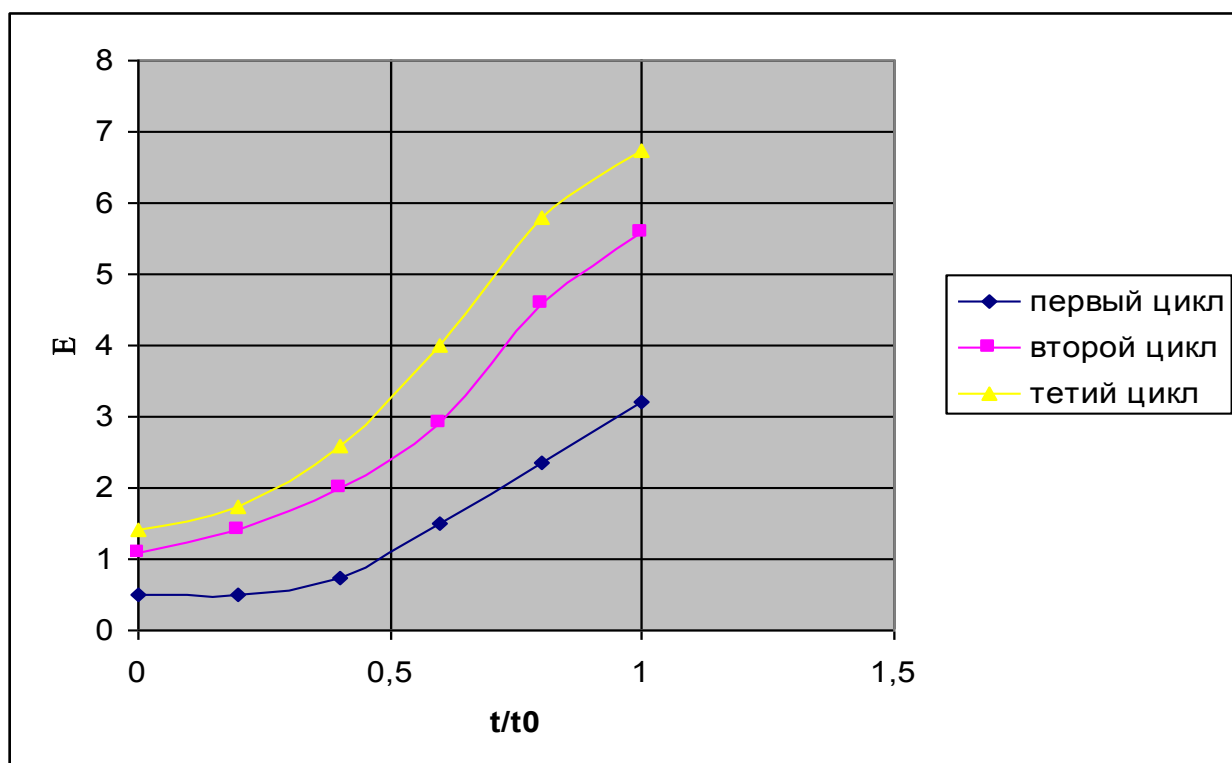
На рисунке 3.9 представлены графики изменения накопленной интенсивности деформации на участке трубной заготовки, подвергнутой интенсивным пластическим деформациям по относительной толщине стенки. Накопленную интенсивность деформаций подсчитывали по формуле:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_R - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_R)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{Rz}^2}, \quad (3.3)$$

где $\varepsilon_R, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ - радиальная, тангенциальная и продольная деформации;
 γ_{Rz} -сдвиговая деформация.

Из анализа графиков следует, что слои трубной заготовки деформируются по толщине стенки неравномерно. Наиболее деформированы периферийные слои, наименее деформированы внутренние слои. Интенсивность деформаций периферийных слоев в четыре раза больше, чем внутренних слоев. За один цикл деформирования трубной заготовки в среднем по толщине накопленная интенсивность деформаций составляет 2.

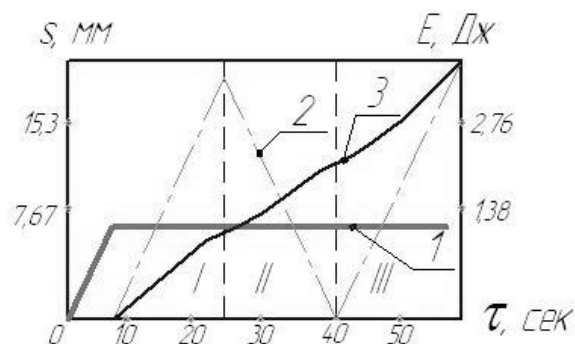
Используя компьютерное моделирование, исследовано влияние числа циклов деформации, равной накопленной интенсивности деформации по схеме «песочные» часы. Форма трубной заготовки, полученная после первого цикла деформирования, является исходной для последующего цикла, интенсивности деформаций суммируются по циклам (рисунок 3.9).



◇ - первый, □ - второй, ΔΔΔ - третий циклы деформирования

Рисунок 3.9 – Распределение накопленной интенсивности деформации по относительной толщине трубной заготовки в зависимости от цикла деформирования

На рисунке 3.10 показан ход инструмента S в зависимости от времени деформирования (кривые 1 и 2). После того, как заполнена гравюра штампа выдавливания (кривая 1) с помощью верхнего пуансона, начинается циклическое деформирование трубной заготовки путем перемещения подвижного выступа, закрепленного на матрице, вверх-вниз. Затрачиваемая энергия деформирования описывается кривой 3.



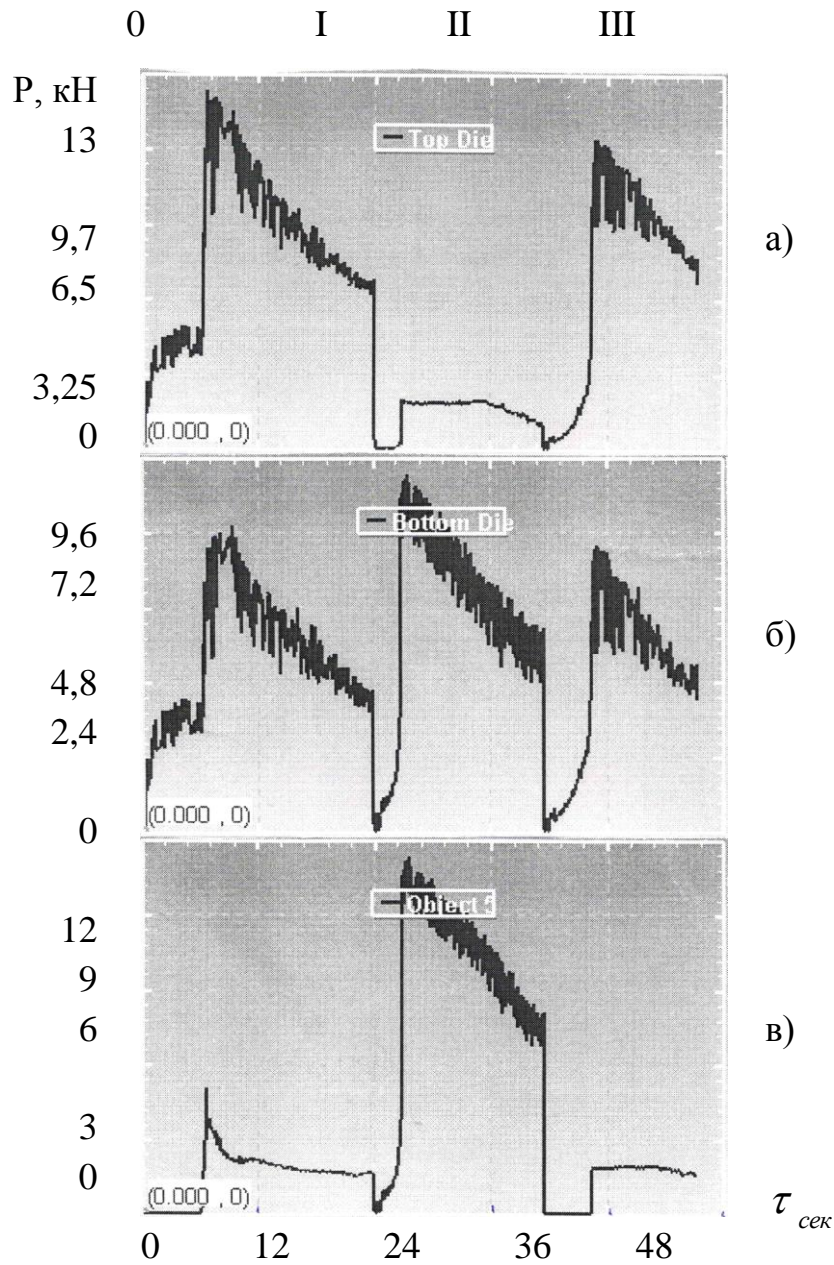
1 – ход верхнего пуансона; 2 – ход подвижного выступа;
3 – энергия деформации

Рисунок 3.10 –Зависимости хода инструмента и энергии деформирования от времени деформирования

На рисунке 3.11 представлены графики усилий на верхнем и нижнем пуансонах, а также на контейнере с выступом в зависимости от времени деформирования. На стадии 0 происходит заполнение гравюры штампа. На стадии I выступ движется вверх, стадии II - вниз, стадии III снова вверх. При движении выступа вверх наиболее нагруженным является верхний пуансон, при движении вниз - нижний. Подвижная матрица нагружается внешними силами при закрытом выдавливании на 30-40% меньше, чем пуансоны. Силовые условия позволяют подобрать материал для изготовления инструмента, обеспечивающий необходимую прочность инструмента.

Из научно-технической литературы известно, что при накопленной интенсивности деформаций $\varepsilon_i = 6-8$ деформируемый в холодном состоянии металл становится ултрамелкозернистым, то есть зерна имеют размеры от 100 нм до 1000 нм (0,1-1 мкм). Такая деформация в рассматриваемом штампе выдавливания в среднем по толщине будет достигнута за пять-шесть циклов деформирования трубной заготовки.

Как показал анализ, на схеме напряжённо-деформированного состояния величина осадки на этапековки не оказывает существенного влияния.



а – верхний пуансон, б – подвижный выступ, в – нижний пуансон

Рисунок 3.11 - Графики изменения усилий на инструменте при циклическом деформировании в зависимости от времени

3.3 Разработка технологии получения наноструктурированных изделий основанной на всесторонней ковке заготовки без изменения ее размеров большими интенсивными деформациями

Наиболее прост способковки наноструктурирования металлов, основанных на процессах осадки кубической заготовки. Для того, чтобы образец, подвергающийся большим интенсивным деформациям, сохранял первоначальную форму и размеры необходимо соблюдать их после каждого цикла. За цикл принимаются три этапа осадки по каждой оси (рисунок 3.12)

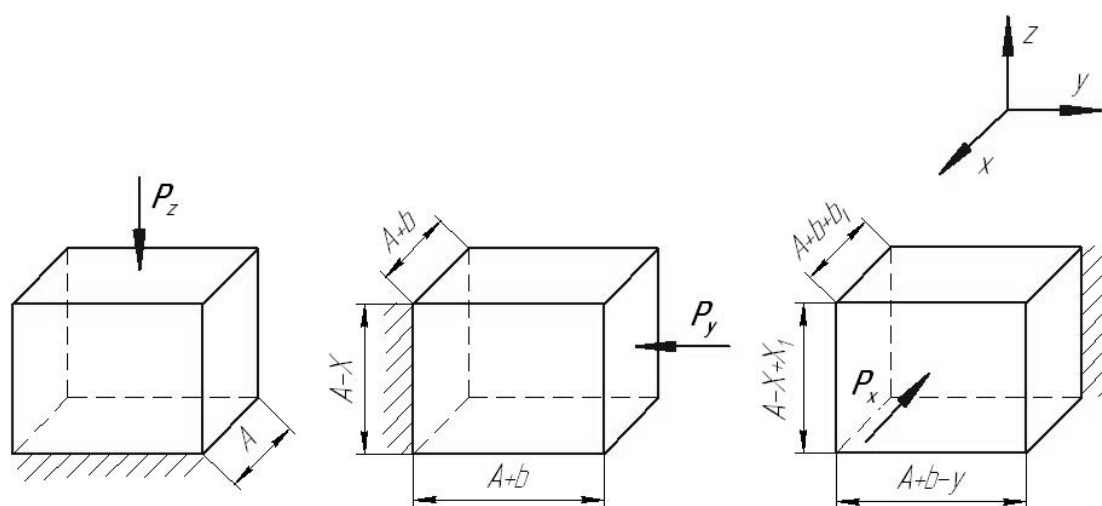


Рисунок 3.12 – Способ всесторонней ковки кубической заготовки

На рисунке 3.12 показаны положения и размеры образцов перед осадкой в каждом из трёх направлений. После первого этапа осадки при условии сохранения объёма и формы куба имеем:

$$(A - z)(A + b)^2 = V_0 = A^3, \quad (3.4)$$

где V_0 - объём куба,

A - сторона куба,

z - перемещение грани куба в направлении координаты «z»,

b - величина изменения размеров грани в направлениях «у» и «х»

После второго этапа осадки на величину «у» в направлении координаты «у» условие постоянства объёма примет вид:

$$(A + b - \bar{y})(A + b + b_1)(A - \bar{x} + x_1) = V_0, \quad (3.5)$$

где \bar{y} - перемещение грани куба в направлении координаты «у»,

b_1 - перемещение грани куба в направлении координаты «х»,

x_1 - перемещение грани куба в направлении координаты «z».

После третьего этапа осадки на величину «х» способомковки условие постоянства объёма представим в виде:

$$(A + b + b_1 - \bar{z})(A + b - \bar{y} + b_2)(A - x + x_1 + x_2) = V_0, \quad (3.6)$$

где \bar{x} - перемещение грани куба в направлении координаты «х»,

b_2 - перемещение грани куба в направлении координаты «у»,

x_2 - перемещение грани куба в направлении координаты «z».

На последнем этапе цикла размеры кубика должны восстановиться до исходных величин и выполняться условия:

$$A + b + b_1 - \bar{z} = A,$$

$$A + b - \bar{y} + b_2 = A,$$

$$A - x + x_1 + x_2 = A \quad (3.7)$$

В уравнениях (3.3), (3.6), (3.7) неизвестными являются:

$$\bar{x}; \bar{y}; \bar{z}; b; b_1; b_2; x_1; x_2 \quad (3.8)$$

Если считать перемещение \bar{z} независимой переменной, то число неизвестных – семь. Однако число уровней только шесть. Следует, видимо, считать, что на последнем этапе должно выполняться равенство $b_2 = x_2$.

Изменение размеров кубика в разных сочетаниях величин осадки представлены в таблице 3.2. Они удовлетворяют уравнениям (3.3), (3.6), (3.8).

Таблица 3.2 – Изменение размеров кубика по циклам

№ цикла	№ этапа	Величина осадки кубика, мм
1	1	3
	2	4
	3	5
2	1	3
	2	3
	3	3
3	1	6
	2	7
	3	10

3.4 Моделирование способа многопереходной всестороннейковки

Числовой расчет формоизменения заготовок в холодном состоянии интенсивными пластическими деформациями проходили для кубика с размерами: длина $a = 19$ мм; ширина $b = 19$ мм; высота $h = 19$ мм. Материал заготовки алюминий марки АД0. Для расчета в программе DEFORM-3D вместо алюминия марки АД0 использовали его аналог алюминий марки Al-1100.

Вся геометрия была построена в программе КОМПАС-3D, а затем импортирована в DEFORM-3D. Это было сделано для того, чтобы избежать ошибки, вызванной неправильным позиционированием объектов.

Материал заготовки Al-1100 взят из библиотеки материалов DEFORM. Для его описания принята модель упрочняющейся пластической среды (рисунок 3.2). Из рисунка видно, что материал интенсивно упрочняется. Предел текучести представлен в виде кусочно-линейной зависимости упрочнения материала. Этот закон упрочнения одинаков для всех материальных точек деформируемой заготовки (рисунок 3.2).

Тип объекта заготовки – пластичный. На поверхностях контакта прямоугольной заготовки с инструментом действуют силы трения, определяемые по закону Кулона. Коэффициент трения принят равным 0,4. Формоизменение осуществляют в три перехода (один полный цикл) при температуре окружающей среды 20°C . Для получения необходимой мелкозернистой кристаллической структуры было проведено шесть полных циклов.

Компьютерная модель инструмента для пластической деформации прямоугольной заготовки, основанной на способе всестороннейковки, приведена на рисунке 3.13.

Инструмент состоит из подвижной верхней плиты 1, и неподвижной нижней плиты 3.

Полный цикл состоит из 3 этапов. Заготовка помещается на нижнюю плиту.

На первом этапе осадка происходит вдоль оси Z. Верхняя плита опускается вниз и деформирует заготовку на 3 мм (рисунок 3.13, а).

На втором этапе необходимо осадить заготовку по оси X. Чтобы избежать ошибок, вызванных неправильным позиционированием объектов в DEFORM-3D, перемещение и вращение заготовки не применялось. Вместо этого на каждом этапе перемещению подвергался инструмент, а именно верхняя и нижняя плита. Верхняя плита деформирует заготовку на 4 мм (рисунок 3.13, б).

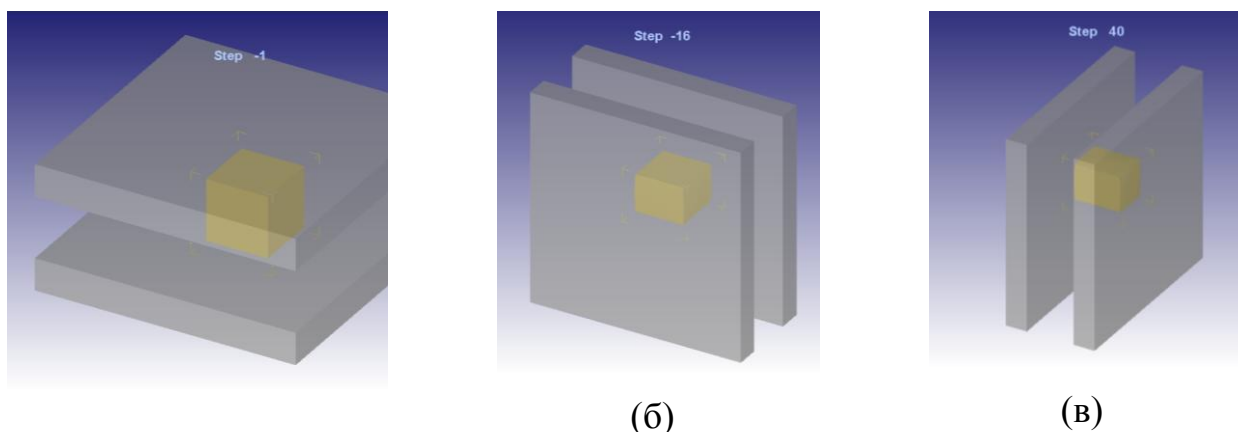
На третьем этапе происходит осаживание заготовки по оси Y. Для этого снова перемещаем верхнюю и нижнюю плиты и устанавливаем их перпендикулярно оси деформирования. Осадка происходит на 5 мм (рисунок 3.13, в).

В результате, после первого цикла мы получаем заготовку, имеющую ту же форму, что и в начале процесса, а именно кубик. Размеры ребер несколько меньше, чем до процесса осадки. Это вызвано тем, что в процессе деформирования происходит бочкообразование и часть граней имеют выгнутую форму.

Данные операции повторяются поочередно до тех пор, пока не будет достигнута необходимая величина зерна заготовки. В результате, в заготовке возникает попеременно перемещающаяся по заготовке зона локальной пластической деформации. При этом геометрические размеры прямоугольной заготовки остаются неизменными.

Трехмерную упорядоченную сетку конечных элементов сгенерировали с использованием 8000 элементов.

Скорость верхней плиты принимаем равную $v = 2$ мм/с. Перемещение заготовки на каждом шаге решения равно 0,2 мм. Таким образом, при сохранении базы через каждые 5 шагов деформация заготовки составляет 1 мм.



(а)

(б)

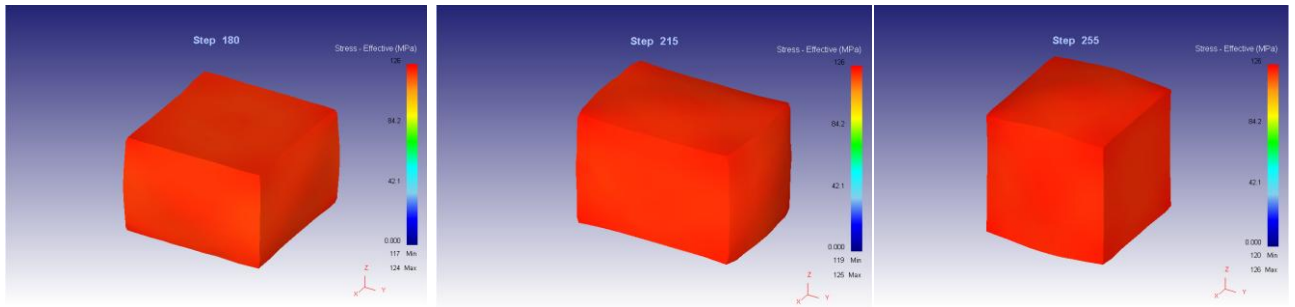
(в)

а – осадка по оси Z; б – осадка по оси X; в – осадка по оси Y

Рисунок 3.13 – Этапы деформации

Результатом моделирования в комплексе DEFORM, стало получение ряда графиков и зависимостей, таких как: интенсивность напряжения, интенсивность деформирования, направление и скорость течения металла, силовые параметры процесса и предельные параметры формообразования. Все эти графики и параметры необходимы для правильной постановки задачи, подготовки и проведения реального эксперимента на гидравлическом прессе.

На рисунке 3.14 приведены значения интенсивности напряжения на трех стадиях промежуточного четвертого цикла (всего 7), полученные в результате проведения виртуального эксперимента в комплексе DEFORM-3D.



(a)

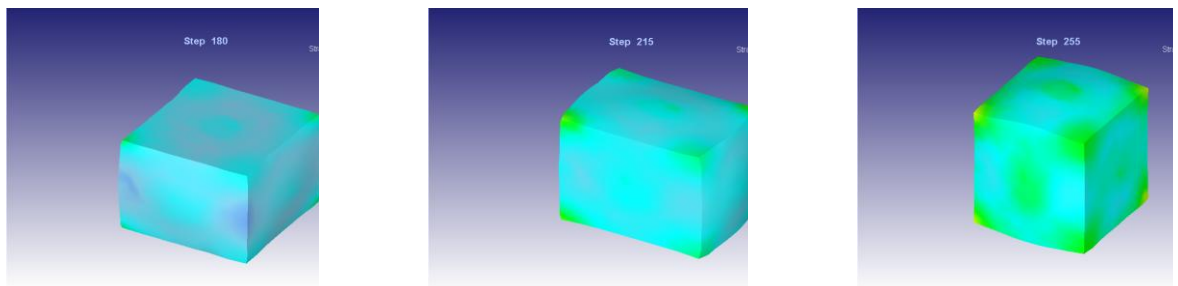
(б)

(в)

а – осадка по оси Z; б – осадка по оси X; в – осадка по оси Y

Рисунок 3.14 – Интенсивность напряжения

На рисунке 3.15 приведены значения интенсивности деформаций на трех стадиях промежуточного четвёртого цикла (всего 7), полученные в результате проведения виртуального эксперимента в комплексе DEFORM-3D.



(a)

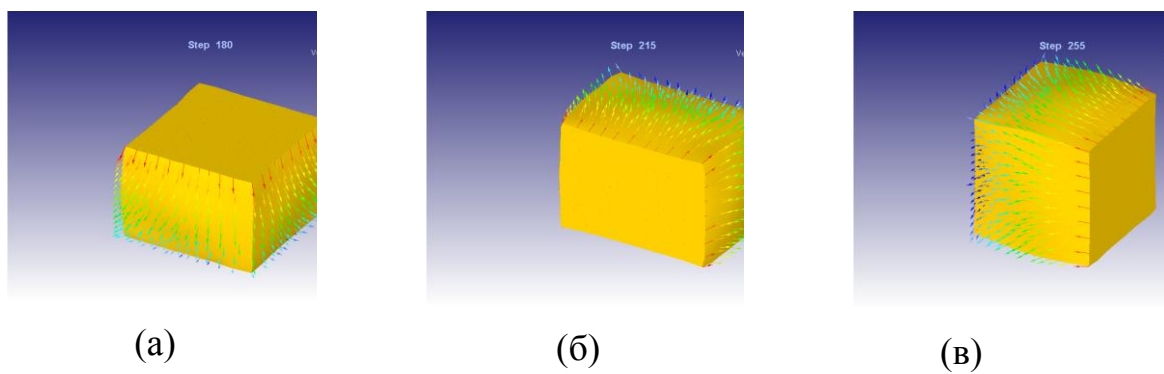
(б)

(в)

а – осадка по оси Z; б – осадка по оси X; в – осадка по оси Y

Рисунок 3.15 – Интенсивность деформаций

На рисунке 3.16 представлены данные по направлению истечения металла.

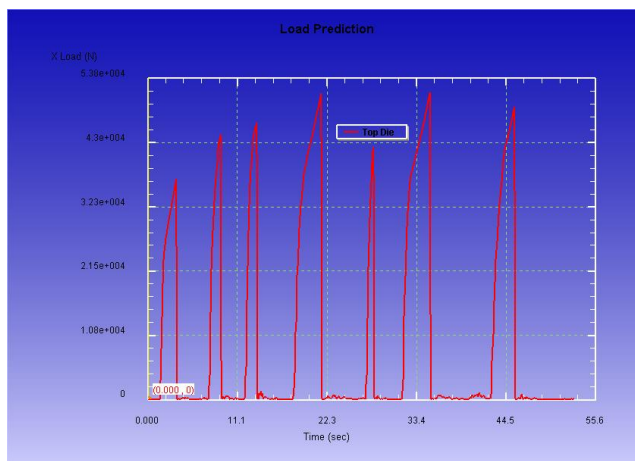


а– по оси Z; б – по оси X; в – по оси Y

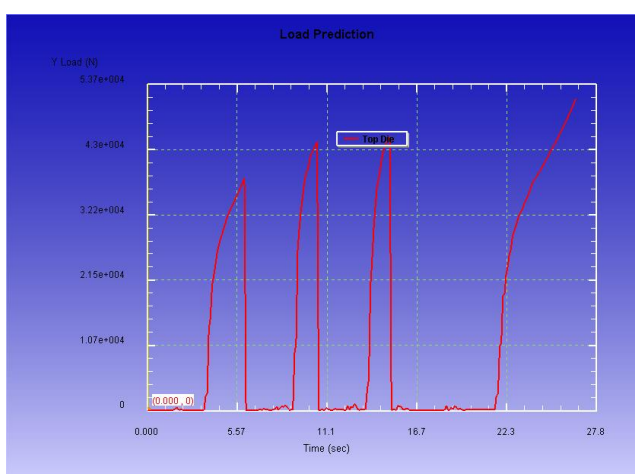
Рисунок 3.16 – Направление течения металла

Длина стрелки и ее цвет соответствует скорости течения металла в данной точке. Чем ближе к деформируемой поверхности, тем выше скорость течения металла. В данном процессе максимальная скорость течения металла составляет 2,18 мм/сек.

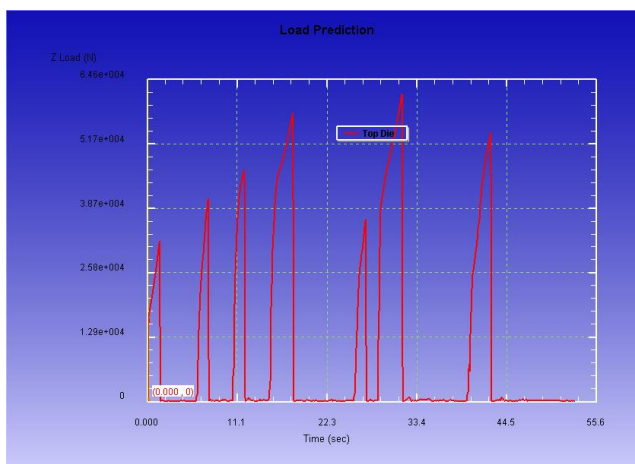
На рисунке 3.17 и рисунке 3.18 приведены графики изменения усилий на верхней и нижней плите по одной из осей в зависимости от времени процесса деформации по циклам.



(a)



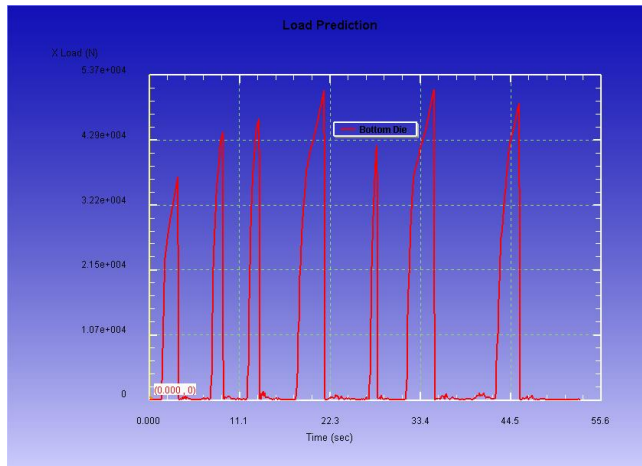
(б)



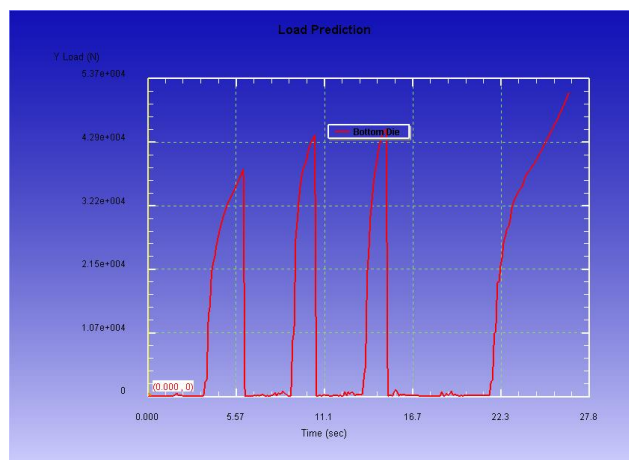
(в)

а – по оси X; б – по оси Y; в – по оси Z

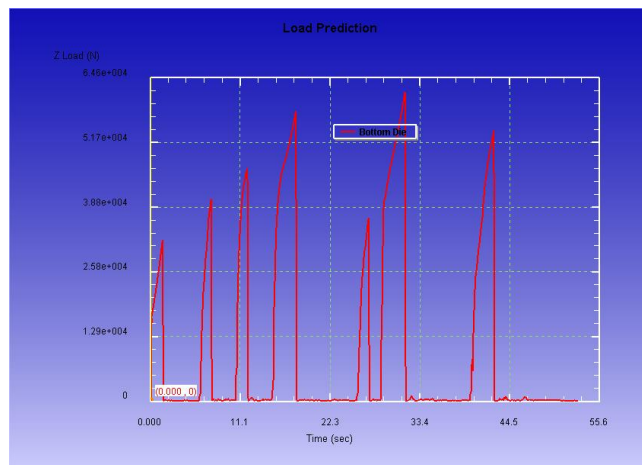
Рисунок 3.17 – Графики изменения усилий на верхней плите при осадке



(a)



(б)



(в)

а – по оси X; б – по оси Y; в – по оси Z

Рисунок 3.18 – Графики изменения усилий на нижней плите при осадке

Из графиков видно, что верхняя и нижняя плита воспринимают на себя одинаковое усилие в течение всех циклов деформирования. Наблюдается рост усилия от цикла к циклу при одинаковой площади заготовки.

Образование трещины при осадке происходит при условии, когда интенсивность накопленной деформации достигает величины критической деформации, при данной схеме напряженного состояния [7].

$$\psi = \frac{\int_0^t d\varepsilon_i}{\varepsilon_p^{kp}} = 1 \quad (3.9)$$

где ψ – критерий Колмогорова;

ε_i – накопленная интенсивность деформаций;

ε_p^{kp} – критическая степень деформации для данной схемы напряженного состояния;

σ_i – интенсивность напряжения;

σ_0 – среднее напряжение в очаге деформации;

Критическая степень деформации равна:

$$\varepsilon_p^{kp} = 2 \delta_p \exp \left[-2.16 \frac{\sigma_0}{\sigma_i} \right]. \quad (3.10)$$

Для нахождения искомым величин напряжений на последнем этапековки заготовки определялось наибольшее напряжение с учётом знака. Затем на заготовке находили точку, соответствующую данному максимальному напряжению и уже для этой точки определились напряжения по двум оставшимся осям, а также интенсивность напряжения и интенсивность деформации.

В таблице 3.3 приведены численные значения напряжений в наиболее опасных точках очага пластической деформации по шагам. На рисунке 3.19 видно, что согласно критерию Колмагорова образование микротрещин произошло на 150 шагу.

Таблица 3.3 – Значение напряжений в опасных точках очага пластической деформации по шагам

№ цикла	№ шага	Интенсивность напряжений по осям, МПа				Интенсивность напряжения, G_i Мпа	Интенсивность деформации, ϵ_i	Критическая степень деформации, ϵ
		x, σ_1	y, σ_2	z, σ_3	среднее, σ_0			
1	5	-10,9	-11,7	-64,9	-29,16666667	54,9	0,0909	1,575218201
	60	-15,4	-121	-9,37	-48,59	110	0,777	1,298206542
2	105	-17	-131	-10,9	-52,96666667	118	1,06	1,318391116
3	150	-15,9	-132	-10,4	-52,76666667	121	1,45	1,282489656
4	255	-14	-133	-6,12	-51,04	124	2,76	1,21644989
5	285	6,71	41,6	20,9	23,07	122	2,82	0,332339036
6	395	-5,39	-124	-5,13	-44,84	126	4,32	1,078464784
7	485	-25,5	-146	-18	-63,16666667	127	5,02	1,464016269

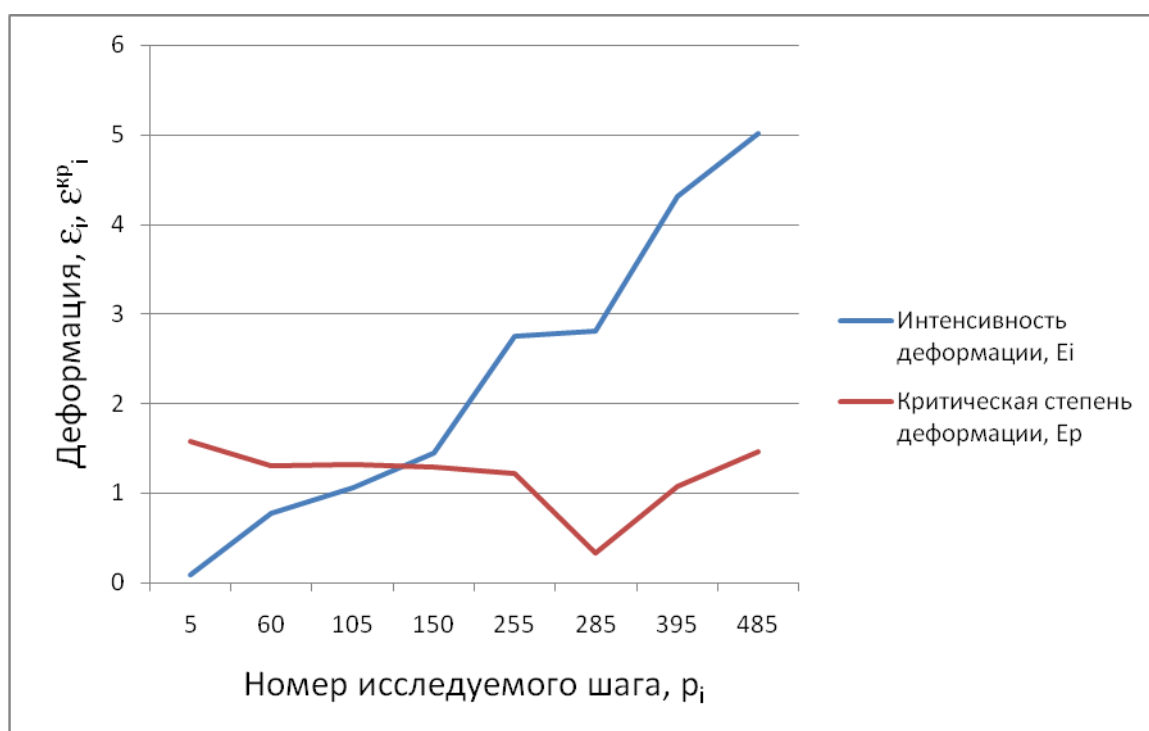


Рисунок 3.19 – Определение разрушения по критерию Колмогорова

В процессе моделирования получены значения величин напряжений в самом начале (шаг 5) и последних шагах каждого цикла, т.е. на последней третьей стадии каждого цикла (рисунок 3.19) (таблица 3.3). Анализ результатов показывает, что согласно критерию (4.6) образование микротрещины происходит в конце второго цикла (шаг 150).

Как показал анализ, на схеме напряжённо-деформированного состояния величина осадки на этапековки не оказывает существенного влияния.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Овчинников, А.Г. Физико-технологическая механика [Текст] / А.Г. Овчинников – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1980.-68с.
2. Валиев, Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией [Текст] / Р.З. Валиев, И.В. Александров – М.: Лотос, 2000. 272С.
3. Копылов, В.И. Предел измельчения зерен при равноканальной угловой деформации [Текст] / В.И. Копылов, В.Н. Чувильдеев // Металлы. 2004. №1. С.22-35
4. Raab J.I., Plastic flow at equal channel angular processing in parallel channels. Mater. Sci.Eng. A 2005 410-411. P.230.
5. Раб, Г.И. Развитие методов интенсивной пластической деформации для получения объемных ультрамелкозернистых материалов [Текст] / Г.И. Раб // Вестник УГАТУ. 2004. №3. С.67.
6. Смирнов – Аляев, Г.А. Механические основы пластической обработки металлов [Текст] / Г.А. Смирнов – Аляев – М.: Metallurgiya, 1968 – 272с.
7. Сегал, В.М. Процессы пластического структурообразования металлов [Текст] / В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов // Минск: Наука и техника, 1994.-222с.

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)

И.П. ПОПОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ
ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ
КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Электронные методические указания к
лабораторным работам

Самара

2013

УДК 662.2.8
П 58

Составитель: **Попов Игорь Петрович**

Исследование процессов больших пластических деформаций для структурообразования объемных кристаллических материалов [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания к лаб. работам / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. И.П. Попов. – Электрон. текстовые и граф. дан. (8,13 Мбайт). - Самара, 2013.

Приводятся методы структурообразования материалов способамиковки, осадки, выдавливания в условиях напряженного состояния сжатия.

Указания предназначены для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по магистерской программе «Структурирование сплавов до наноразмера 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 кузнечно-штамповочном производстве» в А семестре.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1	4
Лабораторная работа № 2	28
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	40

Лабораторная работа № 1

Разработка технологии получения наноструктурированных изделий, основанной на способах прессования и осадки полых цилиндрических заготовок без изменения их размеров большими интенсивными пластическими деформациями

Аналогом и прототипом предлагаемого способа являются способы, основанные на так называемой схеме «песочные часы» [1 – 3]. Принципиальное отличие нового способа заключается в том, что в процессе деформирования перемещение очага деформации обеспечивается движением наружных элементов устройства при неподвижном в этот момент пуансоне. На рисунке 1.1 представлена принципиальная схема устройства для реализации способа многопереходных процессов выдавливания-осадка полых цилиндрической заготовки. Устройство содержит два пуансона 1, контейнер 2, внутри которого имеется сечение в виде пояска 4 меньшего диаметра и помещена заготовка 3. Заготовка помещается внутрь, затем осаживается и создаётся внутри заготовки схема всестороннего сжатия. Процесс прессования происходит при движении контейнера вверх или вниз за счёт уменьшения площади сечения заготовки при прохождении через поясок. Выдавленная часть заготовки, упираясь в пуансон, расположенный с противоположной стороны, осаживается одновременно до исходных размеров заготовки. Процесс заканчивается в момент, когда поясок достигнет торца одного из пуансонов. Затем процесс повторяется при движении контейнера в обратную сторону. За каждый проход заготовка получает деформацию, которую можно оценить

$$e_i = 2 \ln \left| \frac{(R_k^2 - r^2)}{(R_n^2 - r^2)} \right| \quad (1.1)$$

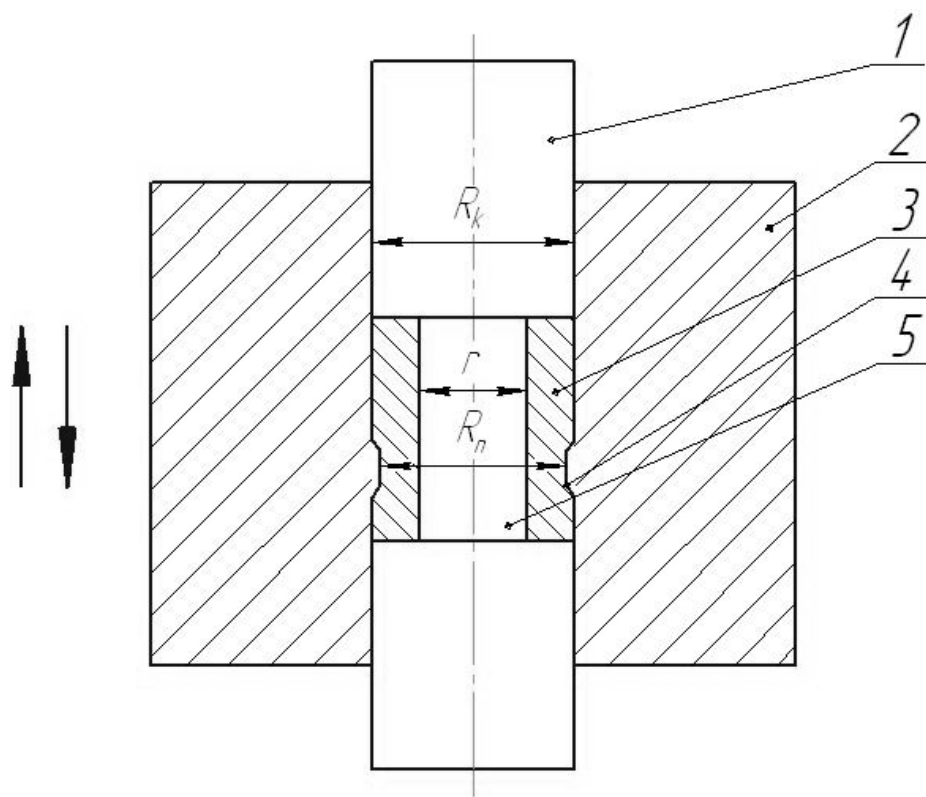
где e_i - интенсивность деформации за 1 проход,

R_k - радиус внутренней поверхности контейнера,

R_n - радиус рабочего пояса,

r - радиус оправки.

Удвоенное значение интенсивности объясняется процессами выдавливания путём уменьшения сечения образца и осадкой восстановлением исходных размеров.



1 – пуансон; 2 – контейнер; 3 – заготовка; 4 – пояс; 5 – оправка

Рисунок 1.1 – Схема способа многопереходных процессов выдавливания-осадки полей цилиндрической заготовки

Моделирование способа прессования, сдвига, осадки с большими пластическими деформациями

Проведено компьютерное моделирование методом конечных элементов процесса деформации полос полых цилиндрической заготовки в штампе по схеме рисунка 1.1 в специализированном программном комплексе DEFORM – 2D. Числовой расчет формоизменения полых заготовок в холодном состоянии большими интенсивными пластическими деформациями проводили с размерами: наружный диаметр 19,5мм, внутренний диаметр 11,5мм, толщина стенки 4мм, длина заготовки 25мм. Материал заготовки алюминий марки Al-1100.

Для описания свойств материала трубной заготовки Al-1100 при холодной деформации принята модель упрочняющейся пластической среды (рисунок 1.2). Напряжение течения σ_i представлено в виде кусочно-линейной зависимости упрочнения материала от величины деформации ε_i . Из рисунка видно, что при холодной деформации алюминий Al-1100 интенсивно упрочняется.

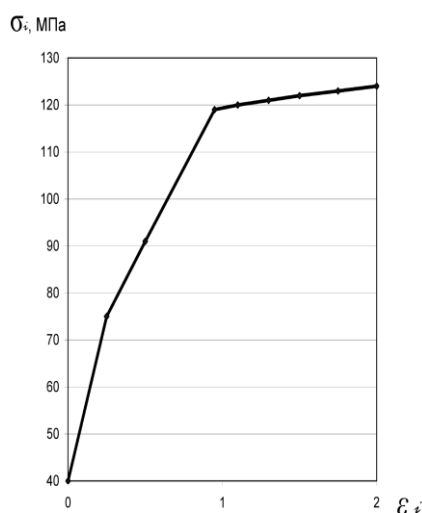
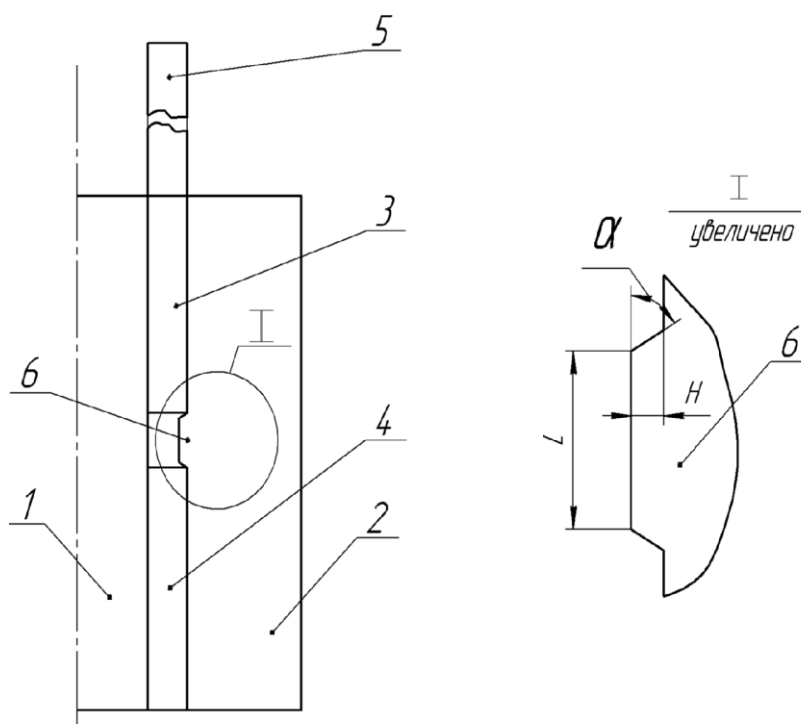


Рисунок 1.2 – Диаграмма упрочнения сплава Al-1100

При формоизменении полой цилиндрической (трубной) заготовки деформация принималась как осесимметричная. На поверхностях контакта трубной заготовки со штампом для выдавливания и осадки действуют касательные напряжения, определяемые по закону Кулона. Коэффициент трения принят равным 0,15. Формоизменение осуществлялось в три перехода.

Компьютерная модель штампа для прессования трубной заготовки приведена на рисунке 1.3. Так как процесс прессования осесимметричный, то рассмотрена только правая часть штампа.



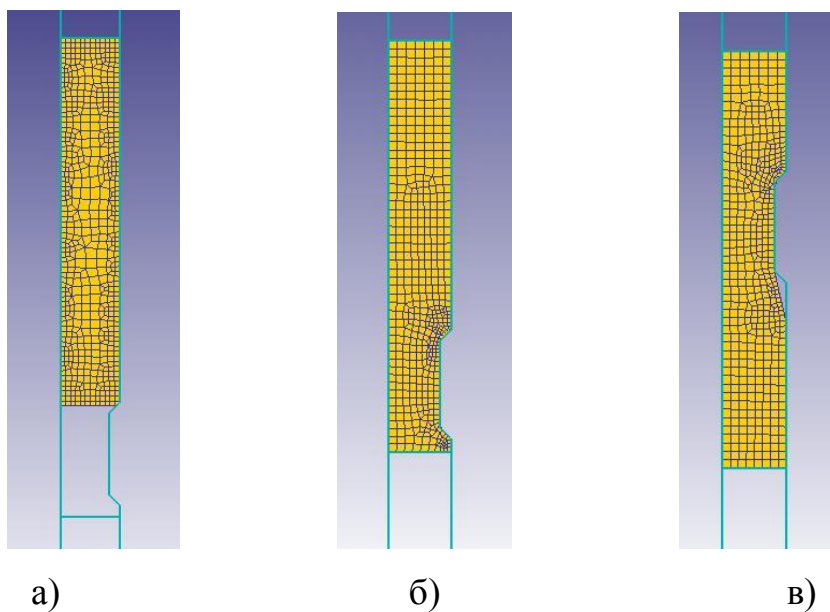
1 – оправка; 2 – контейнер; 3 – трубная заготовка;
4,5 – нижний и верхний пуансоны соответственно; 6 – выступ

Рисунок 1.3 – Компьютерная модель штампа выдавливания

Штамп состоит из контейнера 2, оправки 1, образующих полой цилиндрический канал. Внутри полости канала размещают трубную заготовку

3, нижний 4 и верхний 5 жесткие пуансоны. У наружной матрицы имеется выступ 6, имеющий трапецеидальную форму с размерами: $\alpha=30^\circ$, $H=0,75\text{мм}$, $L=5,5\text{мм}$. Выступ при выдавливании обеспечивает интенсивную пластическую деформацию металла трубной заготовки.

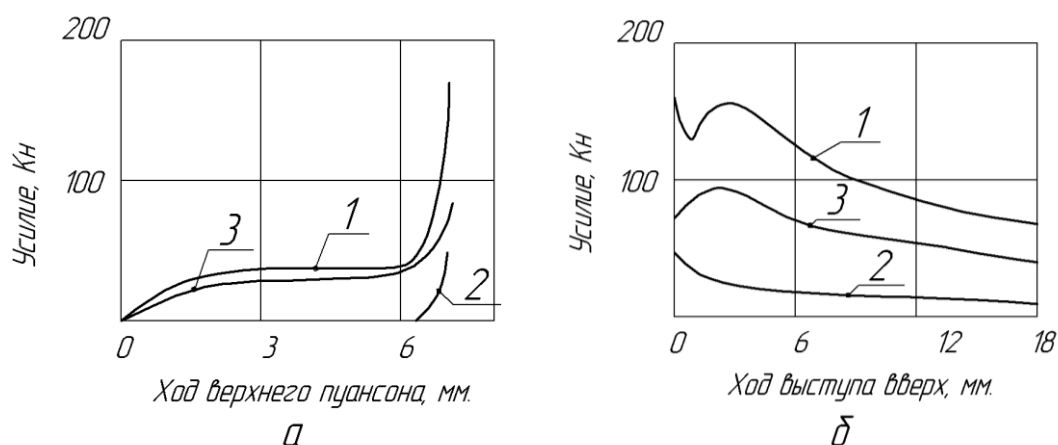
На первом этапе трубная заготовка запрессовывается за счет закрытой осадки через очко в матрицах, заполняя гравюру штампа до упора в нижний пуансон, под действием усилия, приложенного на торец верхнего пуансона, (рисунок 1.4, б). Далее положение верхнего и нижнего пуансонов фиксируется. Наружная матрица с выступом начинает перемещаться вдоль оси трубной заготовки вверх-вниз, со скоростью 1 мм/сек. (рисунок 1.4, в). При этом геометрические размеры заготовки при закрытом выдавливании, остаются неизменными. Коэффициент вытяжки равен 1,29, что соответствует степени деформации трубной заготовки 22,6%.



а – исходное состояние; б – запрессовка; в – возвратно-поступательное движение выступа

Рисунок 1.4 – Этапы деформации

Двухмерную упорядоченную сетку конечных элементов сгенерировали с использованием 500 элементов, это составляет семь конечных элементов по толщине стенки трубной заготовки, перемещение выступа на каждом шаге расчета равно 0,07мм. Для реального рассматриваемого процесса такое количество элементов обычно достаточно, чтобы исследовать течение материала и дать ему оценку.



1 – верхний пуансон; 2 – нижний пуансон; 3 – контейнер

Рисунок 1.5 – Графики изменения усилий на стадиях осадки (а) и закрытого выдавливания (б) в зависимости от перемещения инструмента

Из рисунка 1.5 (а) видно, что на стадии закрытой осадки усилия, приложенные к пуансонам и наружной матрице с выступом, возрастают в зависимости от перемещения верхнего пуансона и достигают экстремальных значений при полном заполнении гравюры штампа. Наибольшую нагрузку воспринимает верхний пуансон. Нижний пуансон нагружается только на заключительной стадии закрытой осадки. Ширина выступа L (рисунок 1.4, б) не оказывает заметного влияния на изменение усилия на верхнем пуансоне.

Усилие на нижнем пуансоне в среднем в три раза меньше, чем на верхнем пуансоне.

На стадии закрытой осадки проведено моделирование двух положений верхнего торца нижнего пуансона: торец касается выступа и торец расположен на 1 мм ниже выступа (рисунок 1.4, а). В первом положении на стадии окончательного заполнения гравюры штампа требуется усилие, на 50% больше, чем во втором положении.

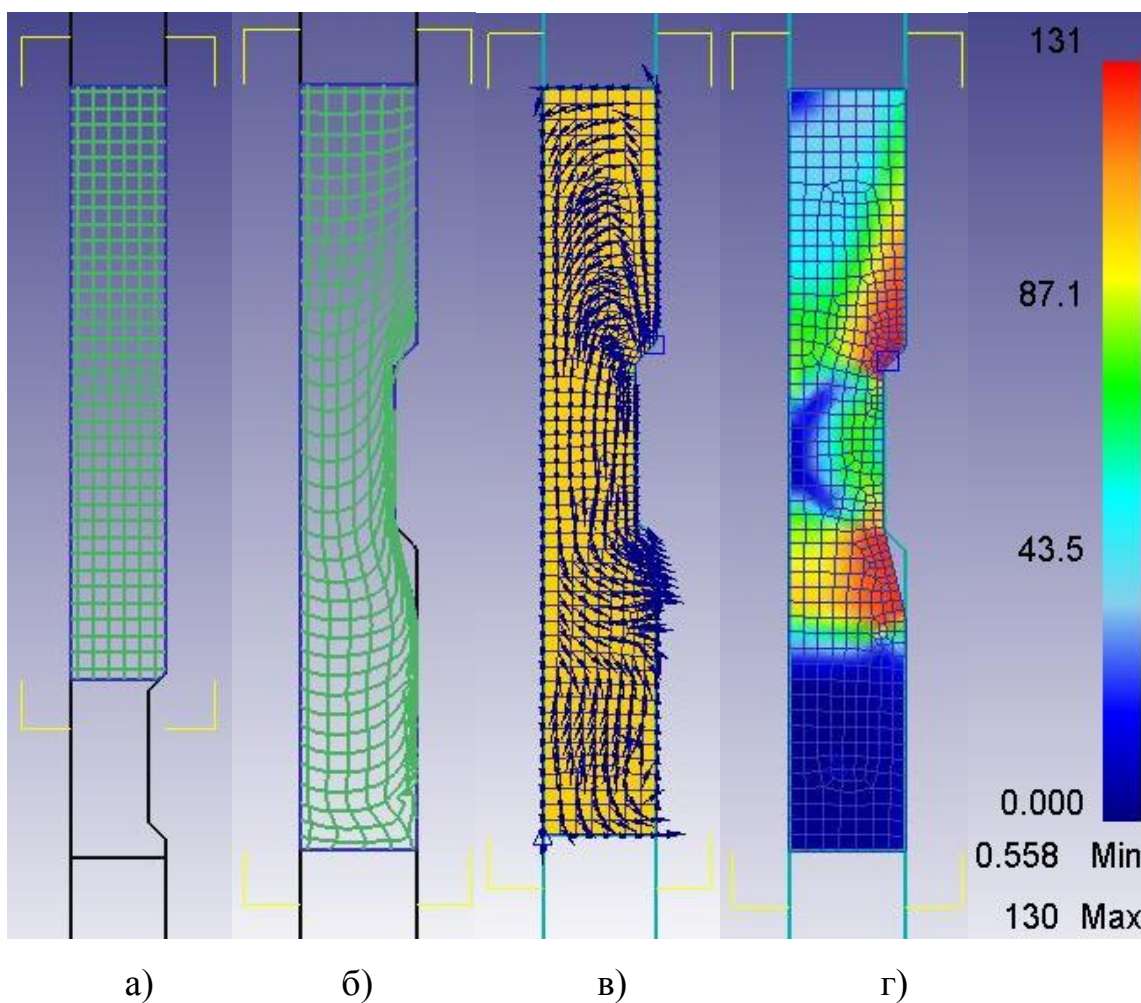
Высота выступа H (рисунок 1.3) заметно влияет на силовые условия. Из таблицы 1.1 видно что, чем больше H , тем требуется большее усилие на верхнем пуансоне на стадии заполнения гравюры штампа.

Таблица 1.1 – Результаты моделирования при ходе верхнего пуансона (мм)

Высота выступа H , мм	0,75	1,00	1,50
Усилие на верхнем пуансоне, кН	38	45	80

После заполнения гравюры штампа металлом трубной заготовки закрытую осадку останавливают (рисунок 1.4, б). Перед началом интенсивных пластических деформаций в трубной заготовке создана схема трехосного неравномерного сжатия.

Стадия закрытого выдавливания (интенсивных пластических деформаций) при движении выступа вверх и неподвижных пуансонах начинается при тех же внешних силах, при которых завершилась стадия закрытой осадки (рисунок 1.5, б). Из графиков видно, что усилия на верхнем пуансоне и выступе вначале возрастают, достигая экстремума, а затем плавно уменьшаются в связи с уменьшением поверхности трения в верхней части матриц. На нижнем пуансоне усилие монотонно убывает. Наиболее нагруженным при движении выступа вверх является верхний пуансон, при движении выступа вниз – нижний пуансон.



а - исходная координатная сетка; б - искажённая координатная сетка;
 в - поле скоростей течения; г – распределение интенсивности напряжений

Рисунок 1.6 – Результаты моделирования закрытого выдавливания в штампе

Картина течения металла трубной заготовки при закрытом выдавливании в штампе при движении выступа вверх на 235 шаге приведена на рисунке 1.6 (а, б, в). Аналогичная картина течения металла имеет место при движении выступа вниз.

Деформированное состояние выдавливаемого металла на основной стадии процесса характеризуется по изменению координатной сетки (рисунок 1.6 а, б) по ее состоянию в начале и середине рассматриваемой стадии.

Из анализа искаженной координатной сетки видно, что:

- Все вертикальные прямые линии начальной координатной сетки изгибаются трижды: перед надвигающимся выступом, после его прохождения в области нижнего пуансона.
- Эти изгибы направлены во взаимно-противоположные стороны, что свидетельствует о немонотонности деформации.
- В области выступа вертикальные линии сближаются, а после прохождения выступа удаляются друг от друга. Это говорит об изменении толщины продольных цилиндрических слоев по всей высоте деформируемой заготовки.
- Все горизонтальные прямые линии начальной координатной сетки в трубной заготовке несимметрично изгибаются выпуклостью в направлении, противоположном движению деформирующего выступа. Это указывает на отставание слоев металла, расположенных по границам контакта инструмент-заготовка, от середины в направлении, параллельном оси выдавливания. Наибольшее отставание имеет место для периферийных слоев, примыкающих к выступу.
- Все квадратные ячейки начальной координатной сетки преобразуются в параллелограммы. Перед выступом и в области выступа квадратные ячейки вытягиваются в направлении течения металла и после прохождения выступа, вытягиваются в поперечном радиальном направлении.
- Наиболее интенсивно искажаются вертикальные и горизонтальные квадратные ячейки в области, локализованной около деформирующего выступа.
- Форма изгибов поперечных линий показывает, что все продольные (осевые) слои трубной заготовки подвергаются сдвиговой деформации, которая растет от внутренних слоев к периферийным.

- На основной стадии закрытого выдавливания подвергаются деформации весь объем трубной заготовки.
- Наиболее интенсивно деформируются периферийные слои, менее интенсивно внутренние слои трубной заготовки.
- За выступом обнаружен небольшой объем гравюры, не заполненной металлом заготовки при закрытом выдавливании. Чтобы обеспечить полное заполнение гравюры при движении выступа необходимо приложить к пуансону дополнительные усилия, создающие высокое гидростатическое давление.

На рисунке 1.6 (в) показано поле полных скоростей течения на основной стадии закрытого выдавливания. Из рисунка видно, что под действием движущегося вверх выступа частицы металла устремляются к верхнему пуансону и, встречая препятствие в виде неподвижного пуансона, поворачивают к узкому каналу, образованному выступом и оправки. Далее частицы металла стремятся заполнить освободившийся от перемещения вверх выступающий объем гравюры резко поворачивая к контейнеру. Это вызывает турбулентное течение металла в области нижнего неподвижного пуансона, производящего процесс осадки.

Таким образом, поле скоростей течения еще раз подтверждает тот факт, что при закрытом выдавливании неравномерно деформируется весь металл трубной заготовки.

На рисунке 1.7 показано семейство линий равных напряжений σ_R , σ_θ , σ_z , τ_{Rz} в продольном сечении трубной заготовки. Из анализа приведенных графиков видно, что при закрытом выдавливании в объеме трубной заготовки преобладает схема трехосного неравномерного сжатия. Радиальные σ_R , тангенциальные σ_θ и продольные σ_z напряжения по абсолютной величине достигают максимальных значений в пределах 524-581 МПа в области верхнего пуансона, а минимальных значений в области нижнего пуансона в пределах

18,2-57,7 МПа. На нижней кромке подвижного выступа обнаружены растягивающие радиальные напряжения σ_R , равные 18,2 МПа. На свободной поверхности трубной заготовки, расположенной под выступом, имеют место растягивающие тангенциальные напряжения, равные 57,7 МПа.

Наибольший градиент касательных напряжений отмечен на кромках подвижного выступа. Как видно из графиков, касательные напряжения по толщине стенки трубной заготовки изменяются неравномерно. В периферийных слоях - отрицательные. Наибольших значений касательные напряжения достигают на верхней кромке подвижного выступа, а наименьших значений - на нижней кромке. Именно на кромках подвижного выступа наблюдается наибольший изгиб продольных и поперечных линий координатной сетки течения.

На рисунке 1.8 приведено семейство линий равных деформаций ε_R , ε_θ , ε_z , γ_{Rz} в продольном сечении трубной заготовки. Из анализа приведенных графиков видно, что при закрытом выдавливании в объеме трубной заготовки преобладает следующая схема деформаций: продольная деформация удлинения ε_z , а в поперечном сечении радиальная ε_R и тангенциальная ε_θ деформации укорочения. По абсолютной величине радиальная ε_R и продольная ε_z деформация. Для инженерного анализа рассматриваемого процесса закрытого выдавливания трубной заготовки можно использовать схему плоскодеформированного состояния, приняв $\varepsilon_\theta \sim 0$. Тогда $\varepsilon_R = \varepsilon_z$.

Радиальная деформация по абсолютной величине достигает экстремальных значений в локальной области, прилегающей к верхней кромке подвижного выступа. Далее ε_R убывает к нижнему пуансону. В локальных областях, прилегающих к верхнему и нижнему пуансонам, радиальная деформация положительная.

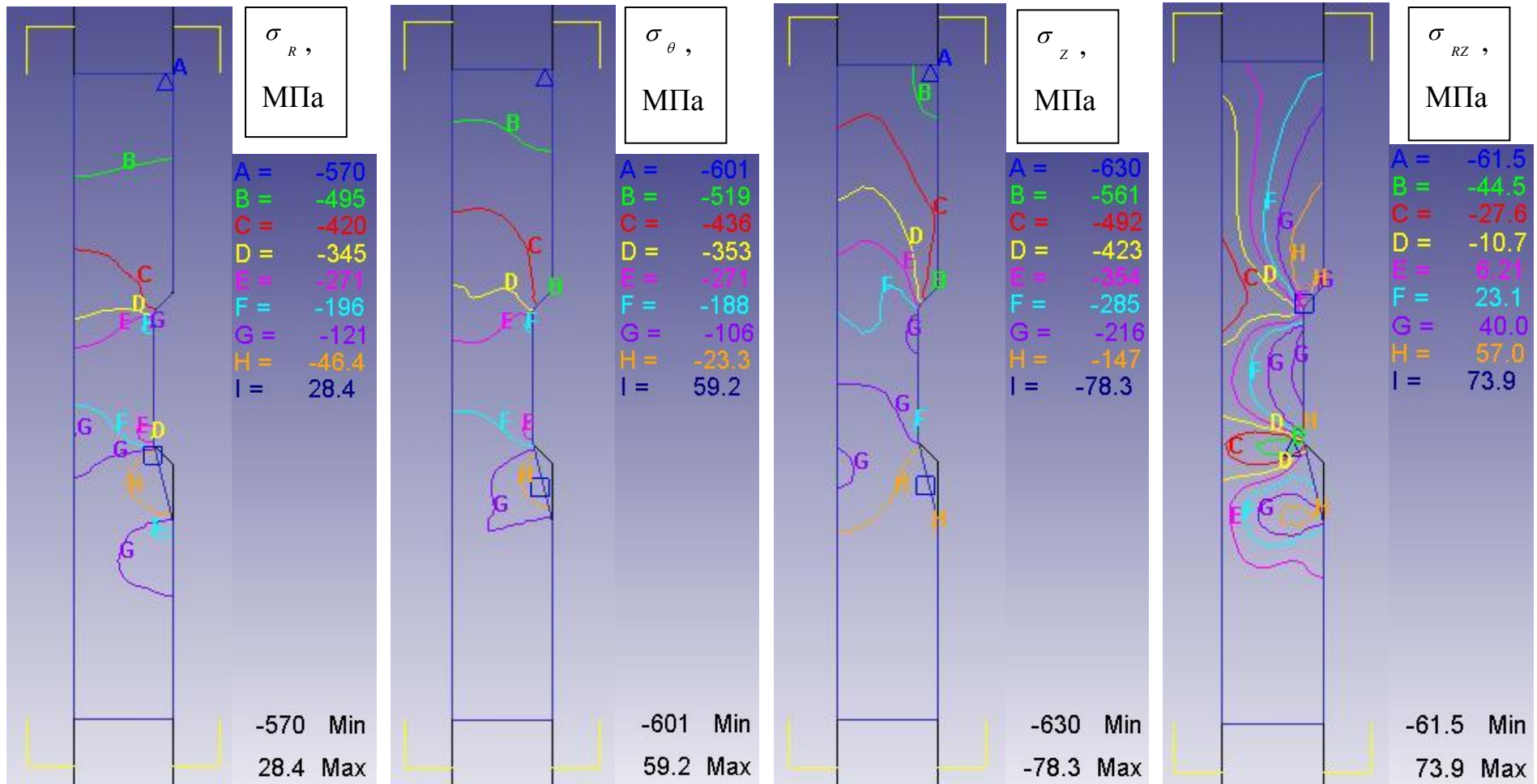


Рисунок 1.7 – Распределение напряжений

Продольная деформация ε_z достигает экстремальных значений на верхней кромке подвижного выступа и убывает в направлении к верхнему и нижнему пуансонам. В локальной области, расположенной около нижнего пуансона, продольная деформация становится деформацией упрочнения.

Тангенциальная деформация в области, прилегающей к верхнему пуансону и подвижному выступу является деформацией укорочения, а в области турбулентного течения, расположенной около нижнего пуансона, деформацией удлинения.

Измельчение зерен трубной заготовки происходит при холодной деформации за счет сдвиговых деформаций $\gamma_{R\theta}$, вызываемых касательными напряжениями τ_{Rz} . Причем величина γ_{Rz} , больше, чем у остальных деформаций ε_R , ε_θ и ε_z . Экстремальных значений сдвиговые деформации достигают на кромках подвижного выступа. Материальные частицы перед верхней кромкой поворачиваются по часовой стрелке, а при прохождении нижней кромки – против часовой стрелки.

Таким образом, в рассматриваемом способе закрытого выдавливания трубной заготовки реализуется два акта сдвиговой деформации за один цикл деформирования.

Деформации сдвига по толщине стенки изменяются неравномерно, достигая наибольших значений на периферийных слоях.

На рисунке 1.6 (г) дано распределение интенсивности напряжений по объему деформируемой трубной заготовки, рассматриваемой по формуле:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_R - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_R)^2 + 6\tau_{Rz}^2}, \quad (1.2)$$

где σ_R , σ_θ , σ_z – радиальные, тангенциальные и продольные напряжения;

τ_{Rz} – касательные напряжения.

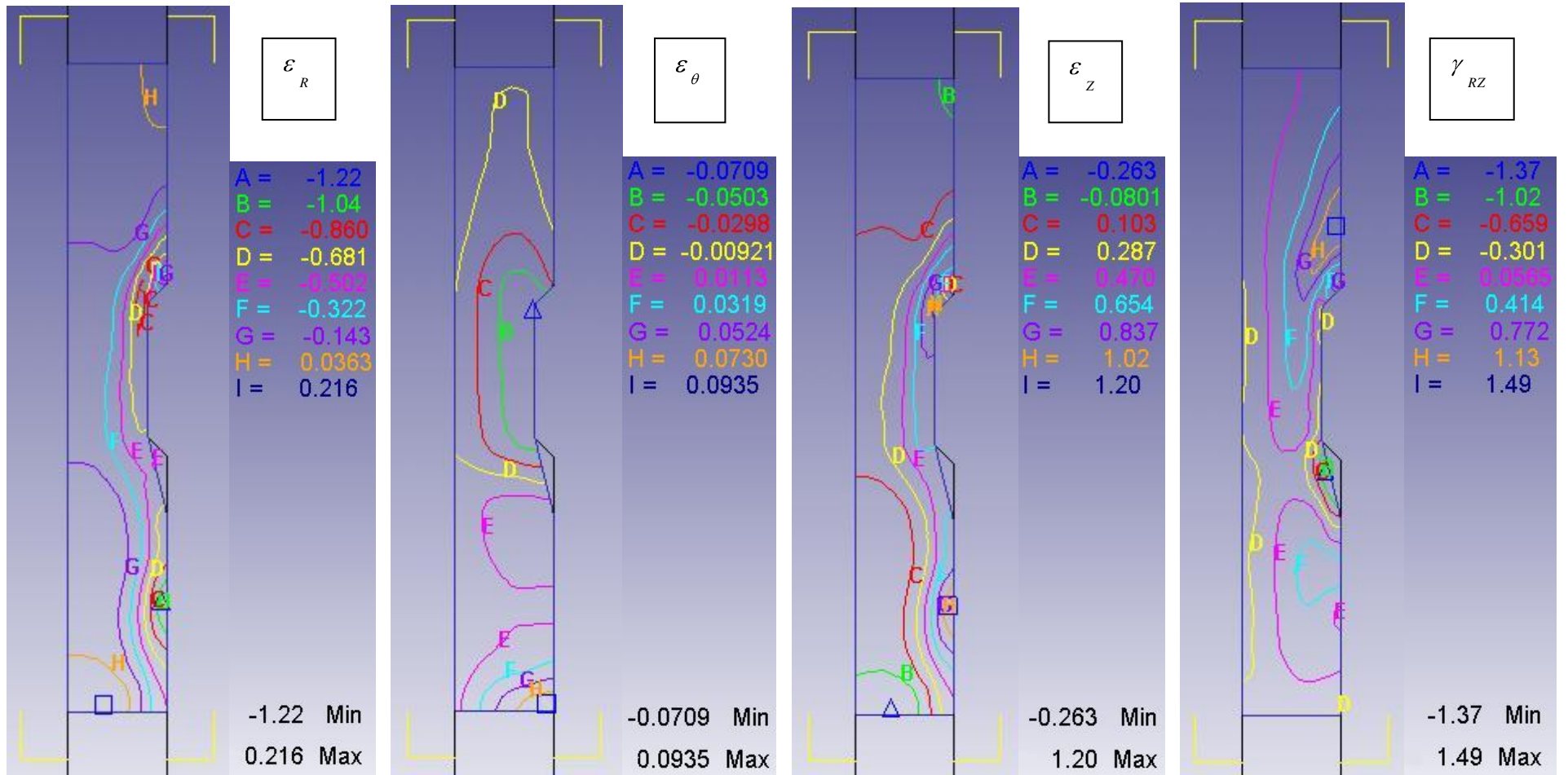


Рисунок 1.8 – Распределение деформаций

Из рисунка видно, что наибольших значений интенсивность напряжений σ_i достигает в областях, прилегающих к деформирующему выступу, а наименьших значений в области, прилегающей к нижнему пуансону, и области, расположенной в суженной части гравюры штампа. Это и есть область активной и затрудненной деформации.

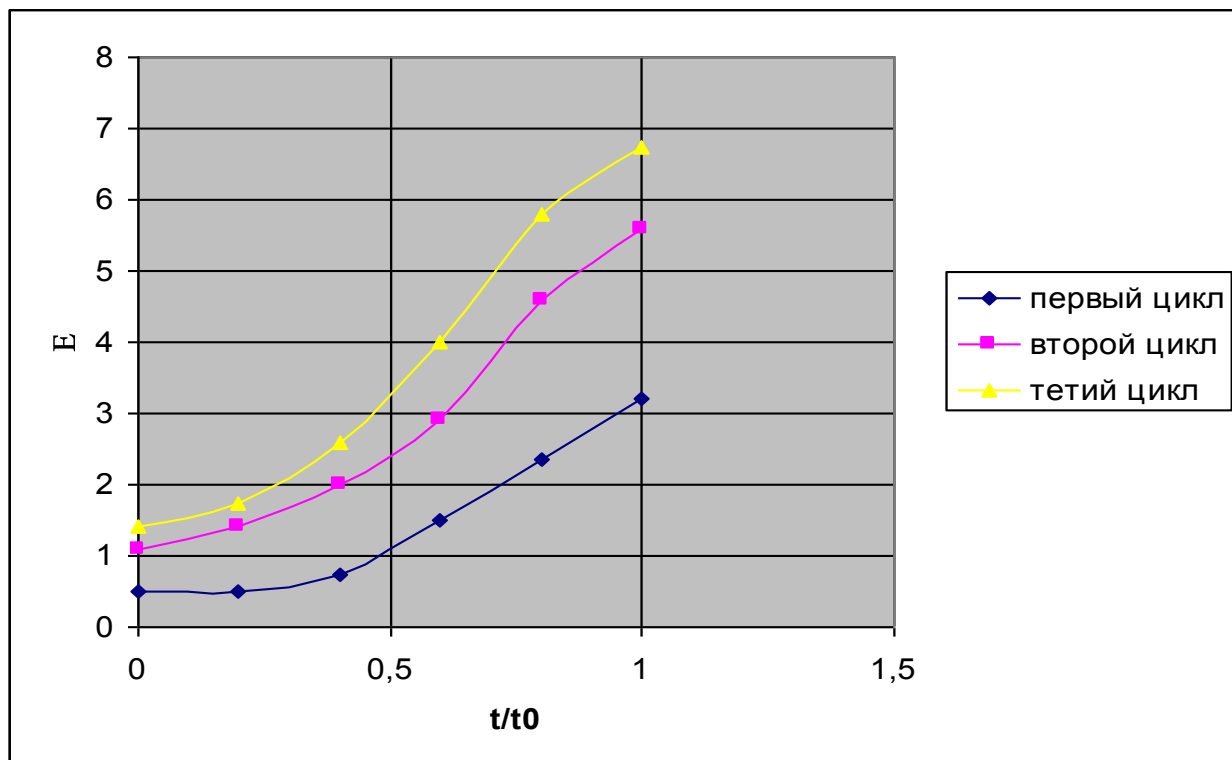
На рисунке 1.9 представлены графики изменения накопленной интенсивности деформации на участке трубной заготовки, подвергнутой интенсивным пластическим деформациям по относительной толщине стенки. Накопленную интенсивность деформаций подсчитывали по формуле:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_R - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_R)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{Rz}^2}, \quad (1.3)$$

где ε_R , ε_θ , ε_z - радиальная, тангенциальная и продольная деформации;
 γ_{Rz} -сдвиговая деформация.

Из анализа графиков следует, что слои трубной заготовки деформируются по толщине стенки неравномерно. Наиболее деформированы периферийные слои, наименее деформированы внутренние слои. Интенсивность деформаций периферийных слоев в четыре раза больше, чем внутренних слоев. За один цикл деформирования трубной заготовки в среднем по толщине накопленная интенсивность деформаций составляет 2.

Используя компьютерное моделирование, исследовано влияние числа циклов деформации, равной накопленной интенсивности деформации по схеме «песочные» часы. Форма трубной заготовки, полученная после первого цикла деформирования, является исходной для последующего цикла, интенсивности деформаций суммируются по циклам (рисунок 1.9).



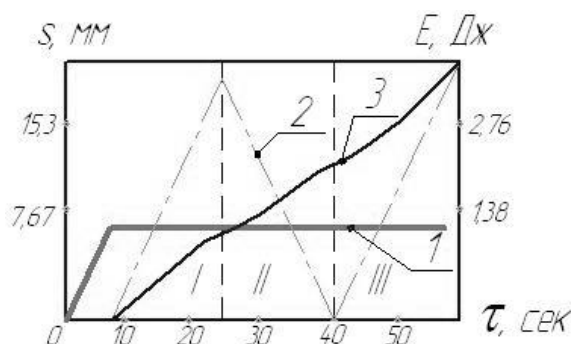
◊ - первый, □ - второй, ΔΔΔ - третий циклы деформирования

Рисунок 1.9 – Распределение накопленной интенсивности деформации по относительной толщине трубной заготовки в зависимости от цикла деформирования

На рисунке 1.10 показан ход инструмента S в зависимости от времени деформирования (кривые 1 и 2). После того, как заполнена гравюра штампа выдавливания (кривая 1) с помощью верхнего пуансона, начинается циклическое деформирование трубной заготовки путем перемещения подвижного выступа, закрепленного на матрице, вверх-вниз. Затрачиваемая энергия деформирования описывается кривой 3.

На рисунке 1.11 представлены графики усилий на верхнем и нижнем пуансонах, а также на контейнере с выступом в зависимости от времени деформирования. На стадии 0 происходит заполнение гравюры штампа. На

стадии I выступ движется вверх, стадии II - вниз, стадии III снова вверх. При движении выступа вверх наиболее нагруженным является верхний пуансон, при движении вниз - нижний. Подвижная матрица нагружается внешними силами при закрытом выдавливании на 30-40% меньше, чем пуансоны. Силовые условия позволяют подобрать материал для изготовления инструмента, обеспечивающий необходимую прочность инструмента.

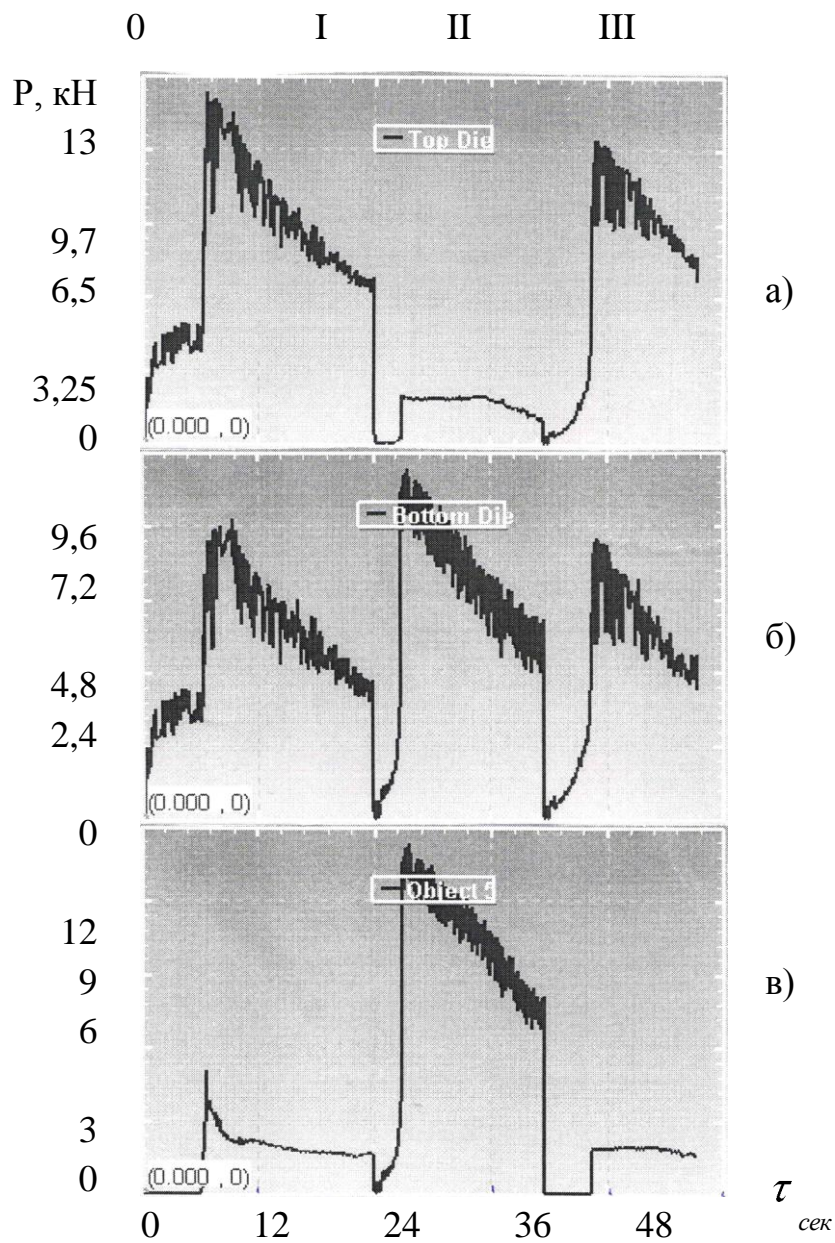


1- ход верхнего пуансона; 2- ход подвижного выступа; 3- энергия деформации

Рисунок 1.10 – Зависимости хода инструмента и энергии деформирования от времени деформирования

Из научно-технической литературы известно, что при накопленной интенсивности деформаций $\epsilon_i = 6-8$ деформируемый в холодном состоянии металл становится ультрамелкозернистым, то есть зерна имеют размеры от 100 нм до 1000 нм (0,1-1 мкм). Такая деформация в рассматриваемом штампе выдавливания в среднем по толщине будет достигнута за пять-шесть циклов деформирования трубной заготовки.

Как показал анализ, на схеме напряжённо-деформированного состояния величина осадки на этапековки не оказывает существенного влияния.



а- верхний пуансон, б- подвижный выступ, в- нижний пуансон

Рисунок 1.11 - Графики изменения усилий на инструменте при циклическом деформировании в зависимости от времени

Экспериментальные исследования

Они направлены на то, чтобы в реальных условиях убедиться в том, что разработанные способы, основанные на процессах прессования, осадки, сдвига, как показало моделирование при определенных технологических параметрах, определяют возможность достижения больших пластических деформаций. Последние как показал анализ существующих (известных) способов для больших пластических деформаций, являются одним из эффективных путей наноструктурирования кристаллических материалов.

Методика проведения исследования, оснастка, оборудование

Способ пластического деформирования для больших пластических деформаций, основанный на процессах прессования, осадки, сдвига, реализуется в устройстве, схема которого представлена на рисунке 1.12, а само устройство представлено на рисунке 1.13, в сборном и разборном виде (рисунок 1.14). Устройство содержит верхний пуансон 1, верхнюю часть контейнера 2, оправку 3, соединительный элемент 5, нижнюю часть контейнера 6, пуансон нижний 7, поясок 8, опорное верхнее кольцо 9, опорное нижнее кольцо 10. Устройство работает следующим образом.

Сначала выполняют установку заготовки в исходное положение перед многопереходным процессом прессования-сдвига-осадки. Для этого из устройства удаляют нижний пуансон 7, заготовку перемещают в верхнюю часть контейнера 2, и она опирается на рабочий поясок 8. Затем устанавливают верхний пуансон 1 с оправкой 3. Из этого положения начинается процесс прессования, оправка 3 выполняет роль иглы. Выходная отпрессованная часть заготовки с диаметром по наружной поверхности, равным диаметру пояска должна быть осажена. Для этого устанавливают нижний пуансон 7.

Осадка производится путем создания усилия от закручивания пуансонов на оправку по резьбе при снятых опорных кольцах 9, 10. Усилие скручивания определяется из условия равенства работ

$$h \cdot \sigma_{см} \cdot F = P \cdot l \cdot \theta, \quad (1.4)$$

где $\sigma_{см}$ – напряжение смятия материала исходной заготовки,

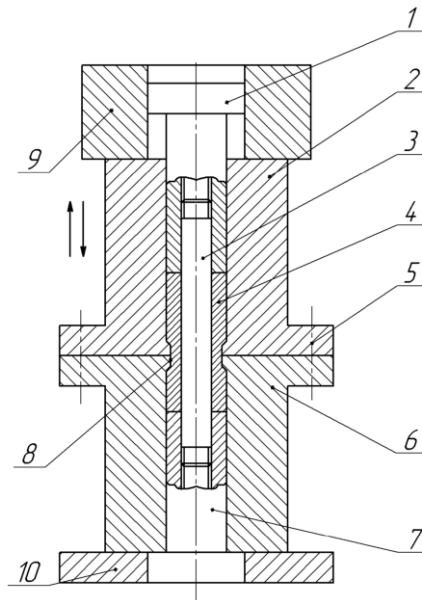
F – площадь торца заготовки,

h – величина осадки отпрессованной части заготовки,

P – усилие скручивания, приложенное к торцам пуансонов,

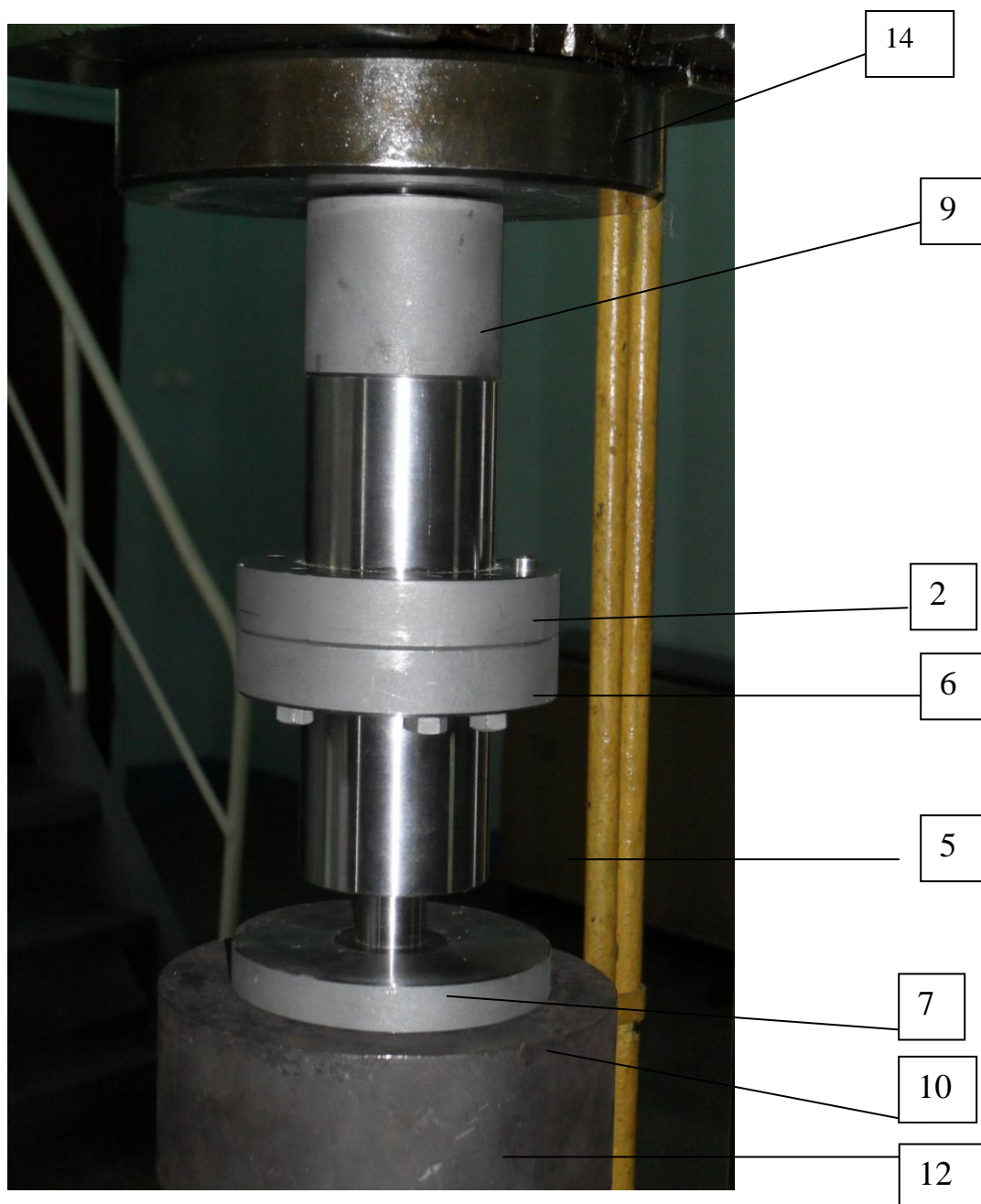
l – плечо – расстояние от оси штампа до точки приложения усилия,

θ – угол скручивания в радианах.



1 – пуансон верхний, 2 – верхняя часть контейнера, 3 – оправка, 4 – заготовка, 5 – соединительный элемент, 6 – нижняя часть контейнера, 7 – пуансон нижний, 8 – поясок, 9 – опорное кольцо верхнее, 10 – опорное кольцо нижнее

Рисунок 1.12 – Схема экспериментального устройства для способа многопереходных процессов прессования – осадка – сдвиг полый цилиндрической заготовки



2 – верхняя часть контейнера, 5 - болт, 6 – нижняя часть контейнера, 7 – пуансон нижний, 9 – опорное кольцо верхнее, 10- опорное кольцо нижнее, 11 – верхняя плита прессы, 12 – нижняя плита прессы

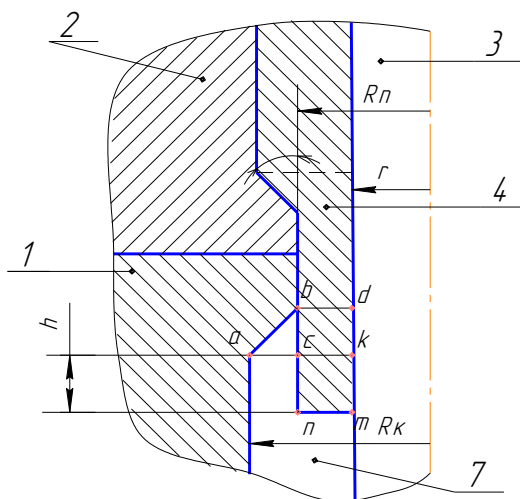
Рисунок 1.13 – Устройство для многопереходных процессов прессования – сдвига – осадки полой цилиндрической заготовки на гидравлическом прессе усилием 5600 кН



1- верхний пуансон, 2 – верхняя часть контейнера с пояском, 3 – оправка,
 6 – нижняя часть контейнера, 7 – пуансон нижний, 9 – опорное кольцо
 верхнее, 10 – заготовка

Рисунок 1.14 – Устройство для способа прессования, сдвига, осадки

Величина осадки отпрессованной части рассчитывается из условия постоянства объема (рисунок 1.15).



1 – нижняя часть контейнера, 2 – верхняя часть контейнера, 3 – оправка,
 4 – заготовка, 7 – пуансон нижний

Рисунок 1.15 – Схема начала процесса прессования, сдвига, осадки

$$V_{abc} = V_{ckmn}, \quad (1.5)$$

где V_{abc} – объем кольца треугольного сечения,
 V_{ckmn} – объем кольца прямоугольного сечения.

Из геометрии имеем:

$$V_{abc} = \frac{\pi (R_k^2 - R_n^2) (R_k - R_n)}{2 \operatorname{tg} \alpha}, \quad (1.6)$$

где α – угол наклона фаски пояса.

$$V_{ckmn} = \pi (R_n^2 - r^2) h, \quad (1.7)$$

Из уравнений (1.6), (1.7) находим с учетом (1.5):

$$h = \frac{(R_k^2 - R_n^2) (R_k - R_n)}{2 \operatorname{tg} \alpha (R_n^2 - r^2)}, \quad (1.8)$$

Полная высота отпрессованной части h_n составит:

$$h_n = h + \frac{R_k - R_n}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (1.9)$$

Величина перемещения верхнего пуансона H_n с учетом коэффициента вытяжки и постоянства объемов составит:

$$H_n = \frac{(R_n^2 - r^2) \left(h_n + \alpha + \frac{R_k - R_n}{\operatorname{tg} \alpha} \right)}{R_k^2 - R_n^2} + \frac{R_k - R_n}{2 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (1.10)$$

Угол скручивания Θ пуансона зависит от величины шага резьбы h_p и составит:

$$\Theta = \frac{2\pi}{h_p}. \quad (1.11)$$

С учетом соотношений (1.6 – 1.11) из (1.4) найдем:

$$P = \frac{F \cdot h \cdot \sigma_{cm}}{l \cdot \Theta}. \quad (1.12)$$

Таким образом, устройство находится в исходном положении в условиях всестороннего сжатия, причем пояс находится в нижнем положении. Чтобы переместить его вверх необходимо перевернуть оснастку

на 180° , а кольца 9, 10 оставить на месте. Прикладывая усилие к кольцу 9, перемещают контейнер с пояском вниз, закончив цикл. Таких циклов можно сделать 5-8 получив величину интенсивной деформации равной 4-6. Усилие каждого цикла определяется по силоизмерителю универсальной гидравлической машины.

Лабораторная работа № 2

Разработка технологии получения наноструктурированных изделий основанной на всесторонней ковке заготовки без изменения ее размеров большими интенсивными деформациями

Наиболее прост способковки наноструктурирования металлов, основанных на процессах осадки кубической заготовки. Для того, чтобы образец, подвергающийся большим интенсивным деформациям, сохранял первоначальную форму и размеры необходимо соблюдать их после каждого цикла. За цикл принимаются три этапа осадки по каждой оси (рисунок 2.1)

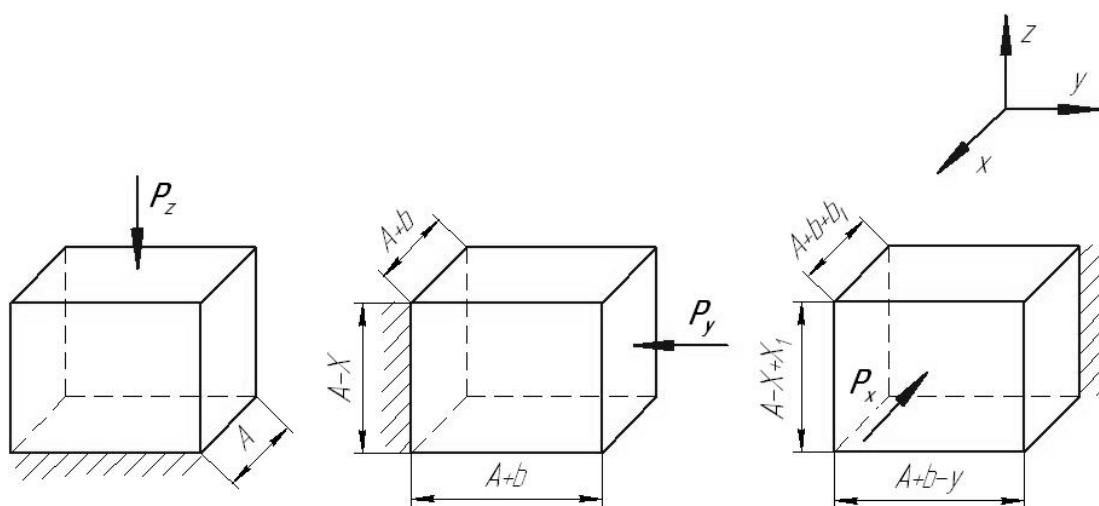


Рисунок 2.1 – Способ всестороннейковки кубической заготовки

На рисунке 2.1 показаны положения и размеры образцов перед осадкой в каждом из трёх направлений. После первого этапа осадки при условии сохранения объёма и формы куба имеем:

$$(A - z)(A + b)^2 = V_0 = A^3, \quad (2.1)$$

где V_0 - объём куба,

A - сторона куба,

z - перемещение грани куба в направлении координаты «z»,

b - величина изменения размеров грани в направлениях «у» и «х».

После второго этапа осадки на величину «у» в направлении координаты «у» условие постоянства объёма примет вид:

$$(A + b - \bar{y})(A + b + b_1)(A - \bar{x} + x_1) = V_0, \quad (2.2)$$

где \bar{y} - перемещение грани куба в направлении координаты «у»,

b_1 - перемещение грани куба в направлении координаты «х»,

x_1 - перемещение грани куба в направлении координаты «z».

После третьего этапа осадки на величину «х» способомковки условие постоянства объёма представим в виде:

$$(A + b + b_1 - \bar{z})(A + b - \bar{y} + b_2)(A - x + x_1 + x_2) = V_0, \quad (2.3)$$

где \bar{x} - перемещение грани куба в направлении координаты «х»,

b_2 - перемещение грани куба в направлении координаты «у»,

x_2 - перемещение грани куба в направлении координаты «z».

На последнем этапе цикла размеры кубика должны восстановиться до исходных величин и выполняться условия:

$$A + b + b_1 - \bar{z} = A,$$

$$A + b - \bar{y} + b_2 = A,$$

$$A - x + x_1 + x_2 = A \quad (2.4)$$

В уравнениях (2.1), (2.3), (2.4) неизвестными являются:

$$\bar{x}; \bar{y}; \bar{z}; b; b_1; b_2; x_1; x_2 \quad (2.5)$$

Если считать перемещение \bar{z} независимой переменной, то число неизвестных – семь. Однако число уровней только шесть. Следует, видимо, считать, что на последнем этапе должно выполняться равенство $b_2 = x_2$.

Изменение размеров кубика в разных сочетаниях величин осадки представлены в таблице 2.1. Они удовлетворяют уравнениям (2.1), (2.3), (2.5).

Таблица 2.1 – Изменение размеров кубика по циклам

№ цикла	№ этапа	Величина осадки кубика, мм
1	1	3
	2	4
	3	5
2	1	3
	2	3
	3	3
3	1	6
	2	7
	3	10

Моделирование способа многопереходной всестороннейковки

Числовой расчет формоизменения заготовок в холодном состоянии интенсивными пластическими деформациями проходили для кубика с размерами: длина $a = 19$ мм; ширина $b = 19$ мм; высота $h = 19$ мм. Материал заготовки алюминий марки АД0. Для расчета в программе DEFORM-3D вместо алюминия марки АД0 использовали его аналог алюминий марки Al-1100.

Вся геометрия была построена в программе КОМПАС-3D, а затем импортирована в DEFORM-3D. Это было сделано для того, чтобы избежать ошибки, вызванной неправильным позиционированием объектов.

Материал заготовки Al-1100 взят из библиотеки материалов DEFORM. Для его описания принята модель упрочняющейся пластической среды

(рисунок 2.2). Из рисунка видно, что материал интенсивно упрочняется. Предел текучести представлен в виде кусочно-линейной зависимости упрочнения материала. Этот закон упрочнения одинаков для всех материальных точек деформируемой заготовки (рисунок 2.2).

Тип объекта заготовки – пластичный. На поверхностях контакта прямоугольной заготовки с инструментом действуют силы трения, определяемые по закону Кулона. Коэффициент трения принят равным 0,4. Формоизменение осуществляют в три перехода (один полный цикл) при температуре окружающей среды 20°C . Для получения необходимой мелкозернистой кристаллической структуры было проведено шесть полных циклов.

Компьютерная модель инструмента для пластической деформации прямоугольной заготовки, основанной на способе всестороннейковки, приведена на рисунке 2.2.

Инструмент состоит из подвижной верхней плиты 1, и неподвижной нижней плиты 3.

Полный цикл состоит из 3 этапов. Заготовка помещается на нижнюю плиту.

На первом этапе осадка происходит вдоль оси Z. Верхняя плита опускается вниз и деформирует заготовку на 3 мм (рисунок 2.2, а).

На втором этапе необходимо осадить заготовку по оси X. Чтобы избежать ошибок, вызванных неправильным позиционированием объектов в DEFORM-3D, перемещение и вращение заготовки не применялось. Вместо этого на каждом этапе перемещению подвергался инструмент, а именно верхняя и нижняя плита. Верхняя плита деформирует заготовку на 4 мм (рисунок 2.2, б).

На третьем этапе происходит осаживание заготовки по оси Y. Для этого снова перемещаем верхнюю и нижнюю плиты и устанавливаем их

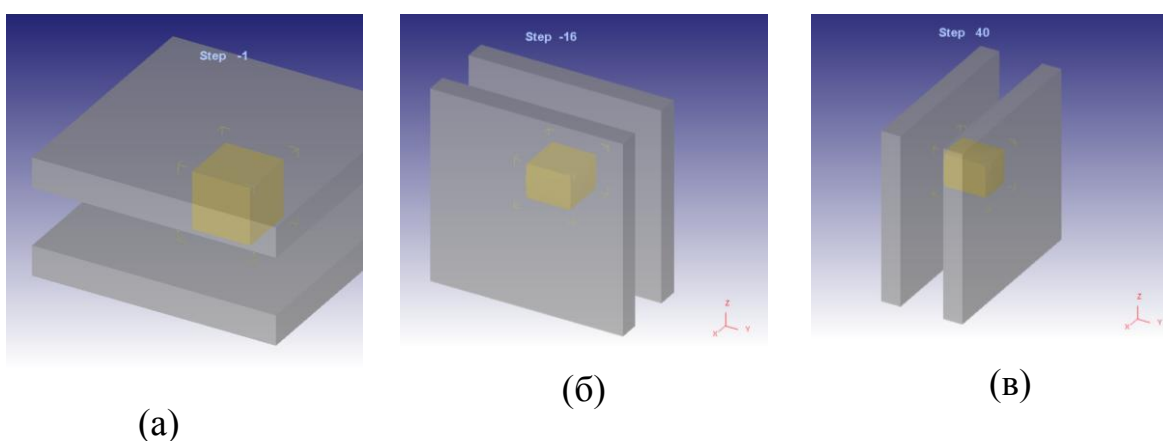
перпендикулярно оси деформирования. Осадка происходит на 5 мм (рисунок 2.2, в).

В результате, после первого цикла мы получаем заготовку, имеющую ту же форму, что и в начале процесса, а именно кубик. Размеры ребер несколько меньше, чем до процесса осадки. Это вызвано тем, что в процессе деформирования происходит бочкообразование и часть граней имеют выгнутую форму.

Данные операции повторяются поочередно до тех пор, пока не будет достигнута необходимая величина зерна заготовки. В результате, в заготовке возникает попеременно перемещающаяся по заготовке зона локальной пластической деформации. При этом геометрические размеры прямоугольной заготовки остаются неизменными.

Трехмерную упорядоченную сетку конечных элементов сгенерировали с использованием 8000 элементов.

Скорость верхней плиты принимаем равную $\dot{g} = 2$ мм/с. Перемещение заготовки на каждом шаге решения равно 0,2 мм. Таким образом, при сохранении базы через каждые 5 шагов деформация заготовки составляет 1 мм.

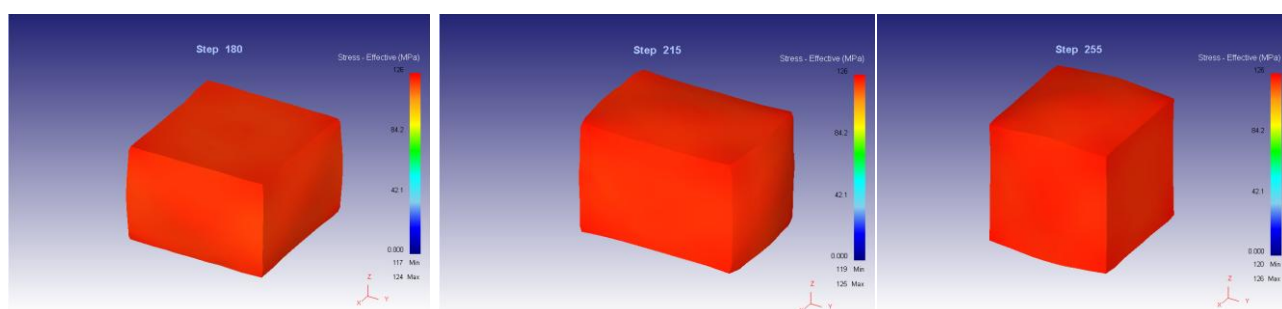


а – осадка по оси Z; б – осадка по оси X; в – осадка по оси Y

Рисунок 2.2 – Этапы деформации

Результатом моделирования в комплексе DEFORM, стало получение ряда графиков и зависимостей, таких как: интенсивность напряжения, интенсивность деформирования, направление и скорость течения металла, силовые параметры процесса и предельные параметры формообразования. Все эти графики и параметры необходимы для правильной постановки задачи, подготовки и проведения реального эксперимента на гидравлическом прессе.

На рисунке 2.3 приведены значения интенсивности напряжения на трех стадиях промежуточного четвёртого цикла (всего 7), полученные в результате проведения виртуального эксперимента в комплексе DEFORM-3D.



(а)

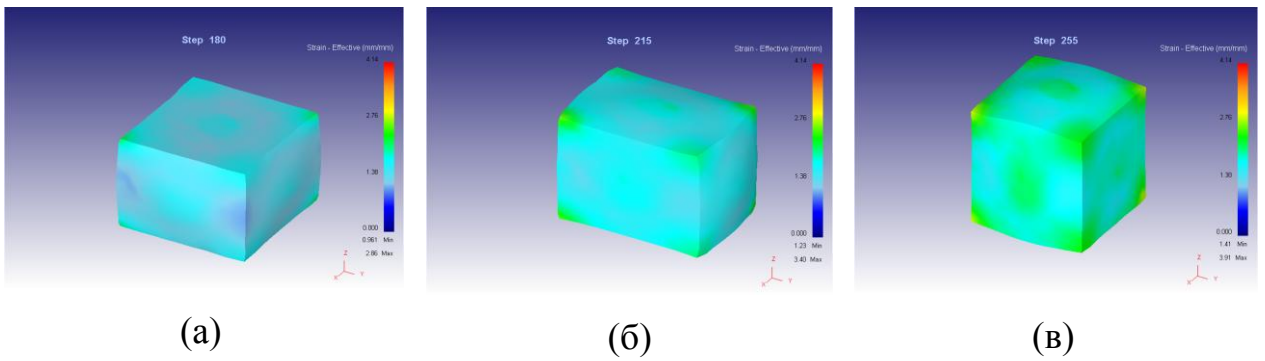
(б)

(в)

а – осадка по оси Z; б – осадка по оси X; в – осадка по оси Y

Рисунок 2.3 – Интенсивность напряжения

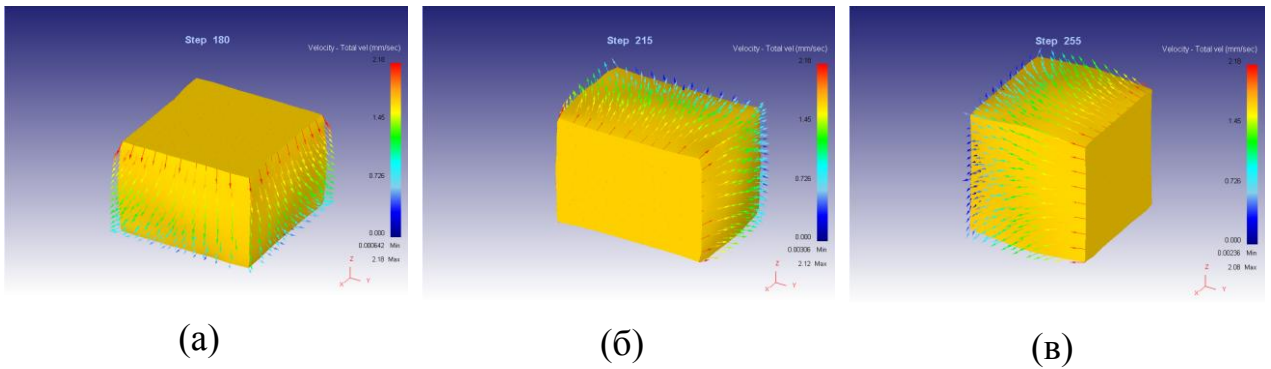
На рисунке 2.4 приведены значения интенсивности деформаций на трех стадиях промежуточного четвёртого цикла (всего 7), полученные в результате проведения виртуального эксперимента в комплексе DEFORM-3D.



а – осадка по оси Z; б – осадка по оси X; в – осадка по оси Y

Рисунок 2.4 – Интенсивность деформаций

На рисунке 2.5 представлены данные по направлению истечения металла.

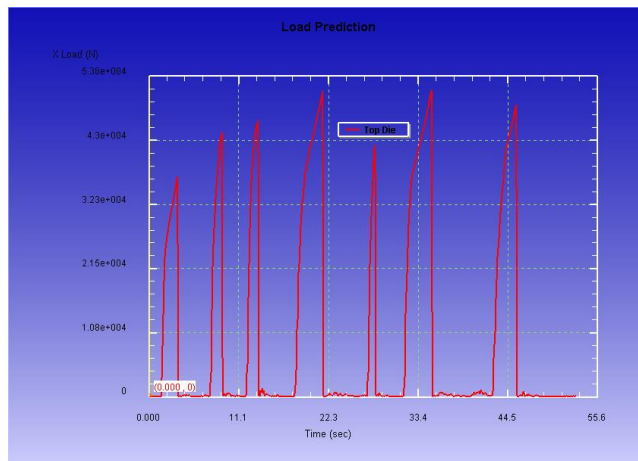


а – по оси Z; б – по оси X; в – по оси Y

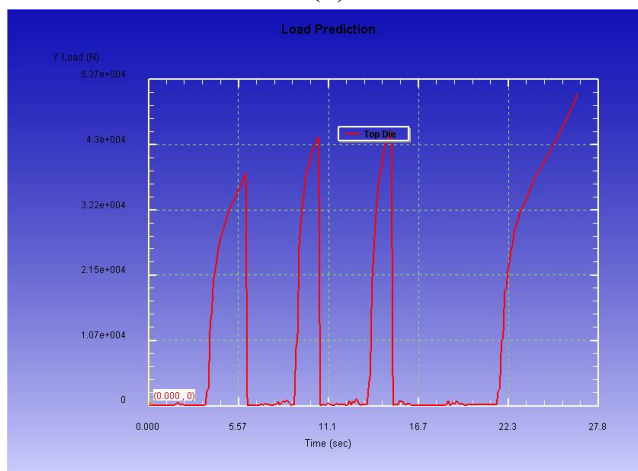
Рисунок 2.5 – Направление течения металла

Длина стрелки и ее цвет соответствует скорости течения металла в данной точке. Чем ближе к деформируемой поверхности, тем выше скорость течения металла. В данном процессе максимальная скорость течения металла составляет 2,18 мм/сек.

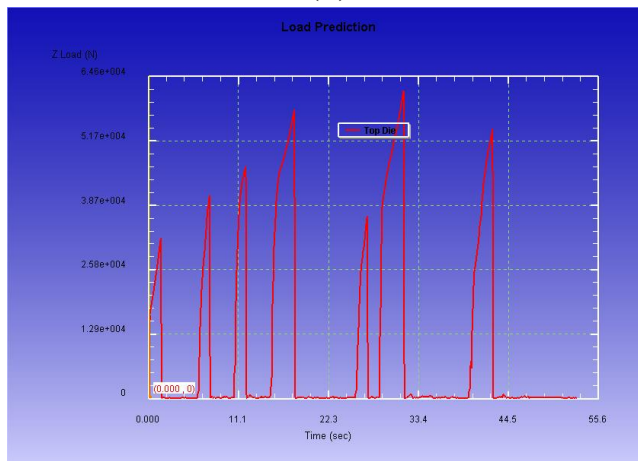
На рисунке 2.6 и рисунке 2.7 приведены графики изменения усилий на верхней и нижней плите по одной из осей в зависимости от времени процесса деформации по циклам.



(а)



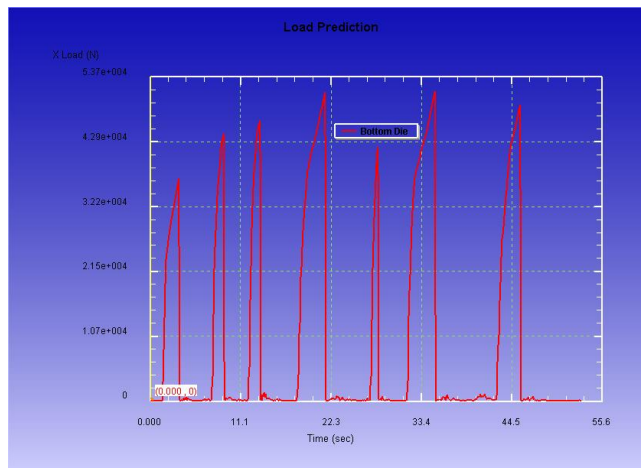
(б)



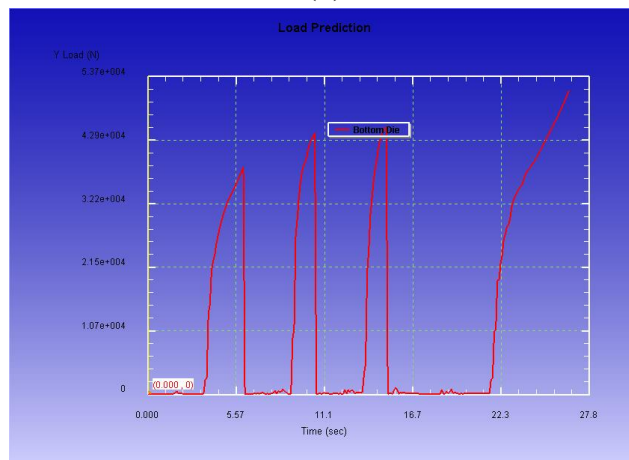
(в)

а – по оси X; б – по оси Y; в – по оси Z

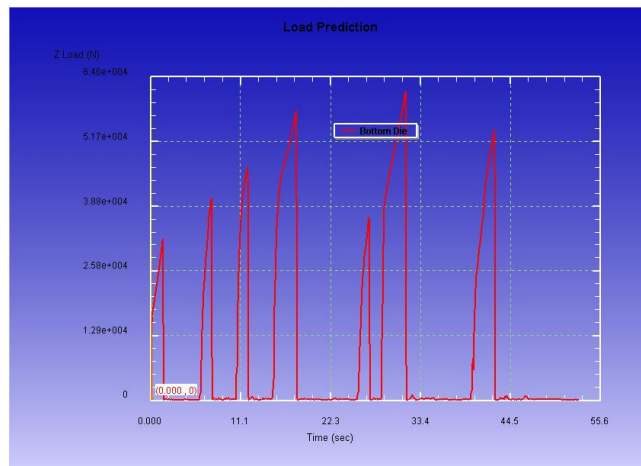
Рисунок 2.6 – Графики изменения усилий на верхней плите при осадке



(a)



(б)



(в)

а – по оси X; б – по оси Y; в – по оси Z

Рисунок 2.7 – Графики изменения усилий на нижней плите при осадке

Из графиков видно, что верхняя и нижняя плита воспринимают на себя одинаковое усилие в течение всех циклов деформирования. Наблюдается рост усилия от цикла к циклу при одинаковой площади заготовки.

Образование трещины при осадке происходит при условии, когда интенсивность накопленной деформации достигает величины критической деформации, при данной схеме напряженного состояния [1].

$$\psi = \frac{\int_0^t d\varepsilon_i}{\varepsilon_p^{KP}} = 1 \quad (2.6)$$

где ψ – критерий Колмогорова;

ε_i – накопленная интенсивность деформаций;

ε_p^{KP} – критическая степень деформации для данной схемы напряженного состояния;

σ_i – интенсивность напряжения;

σ_0 – среднее напряжение в очаге деформации;

Критическая степень деформации равна:

$$\varepsilon_p^{KP} = 2 \delta_p \exp \left[-2.16 \frac{\sigma_0}{\sigma_i} \right]. \quad (2.7)$$

Для нахождения искомым величин напряжений на последнем этапековки заготовки определялось наибольшее напряжение с учётом знака. Затем на заготовке находили точку, соответствующую данному максимальному напряжению и уже для этой точки определились напряжения по двум оставшимся осям, а также интенсивность напряжения и интенсивность деформации.

В таблице 2.2 приведены численные значения напряжений в наиболее опасных точках очага пластической деформации по шагам. На рисунке 2.8 видно, что согласно критерию Колмагорова образование микротрещин произошло на 150 шагу.

Таблица 2.2 – Значение напряжений в опасных точках очага пластической деформации по шагам

№ цикла	№ шага	Интенсивность напряжений по осям, МПа				Интенсивность напряжения, G_i Мпа	Интенсивность деформации, ϵ_i	Критическая степень деформации, ϵ
		x, σ_1	y, σ_2	z, σ_3	среднее, σ_0			
1	5	-10,9	-11,7	-64,9	-29,16666667	54,9	0,0909	1,575218201
	60	-15,4	-121	-9,37	-48,59	110	0,777	1,298206542
2	105	-17	-131	-10,9	-52,96666667	118	1,06	1,318391116
3	150	-15,9	-132	-10,4	-52,76666667	121	1,45	1,282489656
4	255	-14	-133	-6,12	-51,04	124	2,76	1,21644989
5	285	6,71	41,6	20,9	23,07	122	2,82	0,332339036
6	395	-5,39	-124	-5,13	-44,84	126	4,32	1,078464784
7	485	-25,5	-146	-18	-63,16666667	127	5,02	1,464016269

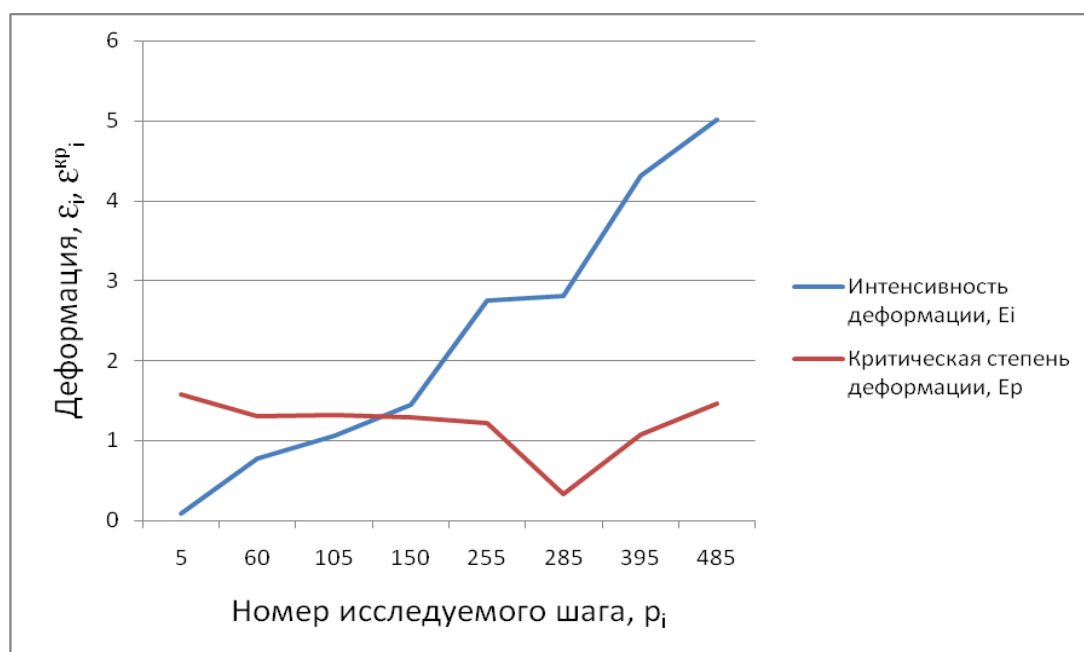


Рисунок 2.8 – Определение разрушения по критерию Колмогорова

В процессе моделирования получены значения величин напряжений в самом начале (шаг 5) и последних шагах каждого цикла, т.е. на последней

третьей стадии каждого цикла (рисунок 2.8) (таблица 2.2). Анализ результатов показывает, что согласно критерию (4.6) образование микротрещины происходит в конце второго цикла (шаг 150).

Как показал анализ, на схеме напряжённо-деформированного состояния величина осадки на этапековки не оказывает существенного влияния.

Способ многопереходной всестороннейковки разработан относительно заготовки в виде кубика, при деформации его путем приложения усилия последовательно по всем трем направлениям к двум взаимно-противоположным сторонам каждого из трех направлений (рисунок 2.2). При этом в конце тоекратного деформирования (цикла) необходимо восстановить размеры исходной заготовки, придерживаясь величин осадки, предложенных в таблице 2.2. Интенсивность деформации за один цикл составит:

$$e_{i\zeta} = \ln \left| \frac{z}{A} \right| + \ln \left| \frac{y}{A} \right| + \ln \left| \frac{x}{A} \right|, \quad (2.8)$$

где $e_{i\zeta}$ - интенсивность деформации за один цикл.

Полученные способами прессования, сдвига, осадки, всестороннейковки образцы подвергались металлографическому исследованию.

Образцы предварительно шлифовались на наждачных бумагах разной зернистости (наждачных шкурках), полировались на сукне с применением шлифовальной пасты ГИО, электрополировались в растворе, содержащем 430 мл H_3PO_4 и 60 O_2CrO_3 до получения зеркальной поверхности. Травление осуществлялось в растворе азотной и плавиковой кислот в соотношении 4:1. Структура исследовалась на металлографическом микроскопе МИМ-8М при увеличении 200 крат. Электронно-микроскопические исследования проводились на электронном микроскопе ЭВМ-1005 с использованием метода реплик при ускоряющем напряжении 75 кВ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сегал, В.М. Процессы пластического структурообразования металлов [Текст] / В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов. – Минск: Наука и техника, 1994.-232с.
2. Авторское свидетельство № 1741960, кл. В21J 5/00. Способ пластического структурообразования и устройство для его осуществления, 1992.
3. Патент RU, №2116155 С1, В2175/00, 1988.

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)

РАСЧЕТ ВЕЛИЧИН ИНТЕНСИВНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССАХ
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Электронные методические указания
к практическим занятиям

Самара 2013

Составитель: **Попов Игорь Петрович**

Расчет величин интенсивности деформации в процессах обработки металлов давлением [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания к практ. работам / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); - сост. И.П. Попов. – Электрон. текстовые и граф. дан. (0,15 Мбайт). - Самара, 2013.

Приводятся примеры расчета инновационных процессов обработки металлов давлением с большими интенсивными пластическими деформациями.

Указания предназначены для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по магистерской программе «Структурирование сплавов до нанометрового 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 кузнечно-штамповочном производстве» в А семестре.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

СОДЕРЖАНИЕ

1	Оценка штампуемости металла	4
2	Большие пластические деформации сдвига кручением	6
3	Равноканальное угловое выдавливание (РКУВ)	8

1 Оценка штампуемости металла

Для объемных кристаллических материалов оценку штампуемости целесообразно проводить по критерию Колмогорова:

$$\psi = \frac{\int_0^t d\xi_i}{\varepsilon_p^{cc}}, \quad (1.1)$$

где t – время процесса;

$\int_0^t d\xi_i$ - накопленная интенсивность деформации;

ε_p^{cc} - величина критической деформации при данной схеме напряженно-деформированного состояния.

$$\varepsilon_p^{cc} = 2\delta_p \exp\left(-2,16 \frac{\sigma_0}{\sigma_i}\right), \quad (1.2)$$

где σ_0 - среднее напряжение.

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}, \quad (1.3)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (1.4)$$

С учетом касательных напряжений:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{13}^2)}. \quad (1.5)$$

Как только критерий Колмогорова достигнет значений $\psi = 1$, образуется трещина. Анализ критерия показывает, что чем ближе схема напряженного состояния к всестороннему сжатию, тем выше величина критической деформации.

Задание: Определить величины критических деформаций для следующих схем напряженных состояний:

1. Плосконапряженное состояние растяжения: $\sigma_1 = \sigma_2 > 0$; $\sigma_3 = \tau = 0$.
2. Плосконапряженное состояние сжатия: $\sigma_1 = \sigma_2 < 0$; $\sigma_3 = \tau = 0$.
3. Плосконапряженное разноименное состояние: $\sigma_1 = -\sigma_2$; $\sigma_3 = \tau = 0$.

4. Объемное всестороннее сжатие: $\sigma_1 = \sigma_2$; $\sigma_3 = 0,5\sigma_2$; $\sigma_1 < 0$; $\sigma_2 < 0$; $\sigma_3 < 0$;

$$\tau = 0.$$

5. Объемное всестороннее растяжение: $\sigma_1 = \sigma_3$; $\sigma_2 = 0,5\sigma_3$; $\sigma_1 < 0$; $\sigma_2 < 0$;

$$\sigma_3 < 0; \tau = 0.$$

6. Объемное разноименное состояние: $\sigma_1 = -\sigma_2$; $\sigma_3 = 0,5\sigma_2$; $\sigma_1 < 0$; $\sigma_2 > 0$;

$$\tau = 0.$$

Пример: Рассмотрим случай плосконапряженного разноименного состояния: $\sigma_1 = -\sigma_2$; $\sigma_3 = \tau = 0$.

По формуле (1.3) определим среднее напряжение:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2 + 0}{3} = 0.$$

Найдем интенсивность напряжений:

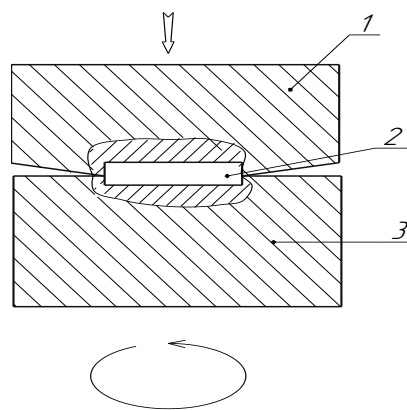
$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{4\sigma_1^2 + \sigma_1^2 + \sigma_1^2} = \frac{\sqrt{6\sigma_1^2}}{\sqrt{2}} = \sqrt{3}\sigma_1.$$

Величина критической деформации:

$$\varepsilon_p^{cc} = 2\delta_p \exp 0 = 2\delta_p.$$

2 Большие пластические деформации сдвига кручением

Интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК) – это метод ИПД, при котором образец, обычно имеющий форму диска диаметром 10-20 и толщиной 0,3-1,0 мм, подвергается деформации кручением в условиях высокого приложенного гидростатического давления. Диск помещается внутрь полости, прилагается гидростатическое давление (Р), и пластическая деформация кручением достигается за счет вращения одного из бойков (рисунок 2.1).



1 – верхняя половина штампа, 2 – заготовка, 3 – нижняя половина штампа

Рисунок 2.1 – Деформация кручением

Если в процессе ИПДК не происходит истечения материала образца из полости, толщина диска остается постоянной и величина деформации кручением составит:

$$\gamma = (r/h), \quad (2.1)$$

где γ - деформация кручением;

r - среднее расстояние от центра диска;

h - толщина образца.

Анализ формулы выявляет, что деформации образца крайне неравномерны: от нуля в центре образца до максимума на периферии.

При проведении ИПДК существенное измельчение структуры металлов и сплавов наблюдается при деформации уже в пол-оборота или один полный

оборот. Однако для получения однородной структуры с размерами зерен до 100 нм необходимо несколько оборотов.

Равномерность деформации объясняется, видимо, перемещением частиц из одного положения в другое. Рассмотренный способ применим для небольших размеров заготовки из необходимости создания очень больших усилий.

Задание: Определить количество оборотов при сдвиге кручением до момента разрушения, если деформирование происходит в условиях $\sigma_\rho = 0,3$:

$$1. \sigma_\rho = \sigma_\theta = -\sigma_s; \tau = -0,5\sigma_s; \sigma_z = -0,5\sigma_s; \left(\frac{r}{h} = 1\right).$$

$$2. \sigma_\rho = \sigma_\theta = -0,5\sigma_s; \tau = -0,5\sigma_s; \sigma_z = -\sigma_s; \left(\frac{r}{h} = 2\right).$$

$$3. \sigma_\rho = \sigma_\theta = -0,3\sigma_s; \tau = -0,2\sigma_s; \sigma_z = -\sigma_s; \left(\frac{r}{h} = 5\right).$$

$$4. \sigma_\rho = \sigma_\theta = -0,6\sigma_s; \tau = 0,8\sigma_s; \sigma_z = -0,3\sigma_s; \left(\frac{r}{h} = 3\right).$$

Пример: Определим количество оборотов при сдвиге кручением до разрушения по первому условию, при $\frac{r}{h} = 0,2$.

- Рассчитаем величину критической деформации:

$$\sigma_0 = \frac{+\sigma_\rho + \sigma_\theta + 0,5\sigma_z}{3} = \frac{-\sigma_s - \sigma_s - 0,5\sigma_s}{3} = -\frac{2,5}{3}\sigma_s = -0,83\sigma_s;$$

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\rho)^2 + 6\tau^2} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(-\sigma_s + \sigma_s)^2 + (-\sigma_s + 0,5\sigma_s)^2 + (-0,5\sigma_s + \sigma_s)^2 + 6 \cdot 0,25\sigma_s^2} = \sigma_s \end{aligned}$$

$$\varepsilon_p^{cc} = 2\delta_p \exp\left(2,16 \frac{0,83\sigma_s}{\sigma_s}\right) = 9,45\delta_p = 2,83.$$

- Рассчитаем величину накопленной деформации при сдвиге на угол π :

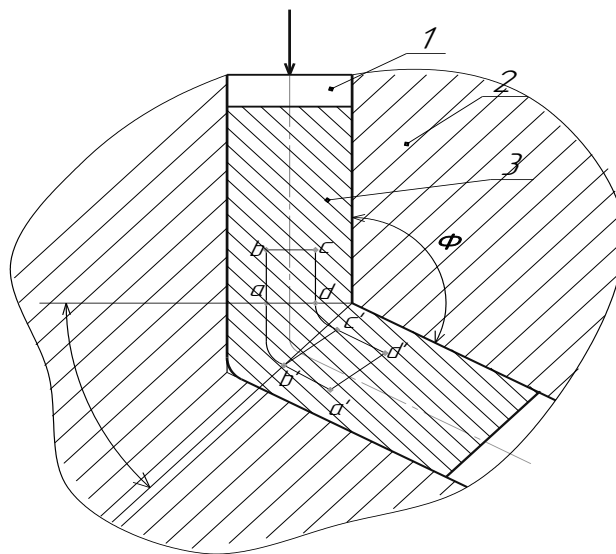
$$\int_0^{\pi} d\xi_i = \gamma \left(\frac{r}{h}\right) \pi = \pi.$$

- Число оборотов при сдвиге: $n = \frac{2,83}{\pi} \approx 1.$

3 Равноканальное угловое выдавливание (РКУВ)

РКУВ, позволяет реализовывать деформацию объемных заготовок различных металлических материалов простым сдвигом. Способ разработан В.М.Сегалом с сотрудниками в начале 80-х годов. Деформация сдвигом происходит, когда заготовка проходит через зону пересечения каналов (рисунок 3.1), так как размеры заготовки в поперечном сечении не изменяются, выдавливание может производиться многократно с целью достижения исключительно высоких степеней деформации.

В начале 90-х годов Р.З. Валиевым с соавторами метод РКУВ был развит и впервые использован как метод ИПД для получения УМЗ структур с зерном вплоть до нанометрических размеров. До настоящего времени РКУВ является наиболее применяемым методом ИПД, и несколько его модификаций получили дальнейшее развитие.



1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – заготовка

Рисунок 3.1 – Схема РКУВ

Величина эквивалентной деформации ε , реализуемой в процессе РКУВ, определяется соотношением, включающим угол сопряжения между двумя каналами Φ . При реализации одного цикла выдавливания (при допущении отсутствия трения и $\psi=0$) приращение деформации ($\Delta \varepsilon_i$) в материале, составляет:

$$\Delta \varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg} \frac{\Phi}{2}. \quad (3.1)$$

При $\Phi=90^\circ$ ее значение составляет $\sim 1,16$, и равно приращению деформации при прямом прессовании с вытяжкой с коэффициентом 3 или при деформации осадкой со степенью $\sim 70\%$. При многократном повторении циклов обработки (N) деформация суммируется, что обеспечивает в заданном исходном сечении истинную (абсолютную) деформацию:

$$\varepsilon_i = N \Delta \varepsilon_i. \quad (3.2)$$

В процессе многократно повторяющихся циклов прессования в заготовке накапливается деформация сдвигом, что в результате приводит к формированию в материале однородной УМЗ структуры.

Задание: Определить число циклов выдавливания (РКУВ), при сопряжении каналов с углом $\Phi=\pi/2$, если процесс деформирования происходит при условии $\sigma_\rho = 0,2$:

1. $\sigma_\rho = \sigma_\theta = -0,8\sigma_s$; $\sigma_z = -0,5\sigma_s$.
2. $\sigma_\rho = \sigma_\theta = \sigma_s$; $\sigma_z = -0,5\sigma_s$.
3. $\sigma_\rho = \sigma_\theta = -0,8\sigma_s$; $\sigma_z = -\sigma_s$.
4. $\sigma_\rho = \sigma_\theta = -0,9\sigma_s$; $\sigma_z = -0,9\sigma_s$.

Пример: Определить число циклов РКУВ при условии $\sigma_\rho = \sigma_\theta = -\sigma_s$; $\sigma_z = -0,5\sigma_s$.

- Определяем величину критической деформации:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta + \sigma_z}{3} = -\frac{2,5}{3}\sigma_s = -0,83\sigma_s,$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_\rho - \sigma_z)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{0,5^2 \sigma_s^2 + 0,5 \sigma_s^2} = \frac{1}{2} \sigma_s,$$

$$\varepsilon_p^{cc} = 2 \delta_p \exp \left(2,16 \frac{0,83}{0,5 \sigma_s} \right) = 14,57.$$

- Найдем число циклов при выдавливании: $N = \frac{\xi_{кр}}{\frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg} \frac{\Phi}{2}} = \frac{14,57}{\frac{2}{\sqrt{3}}} = 12,6 \rightarrow 12$.