

На правах рукописи

Паршиков Руслан Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
МЕТАЛЛА ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ И РАЗРАБОТКА  
РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2008

Работа выполнена на кафедре пластической обработки металлов Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук,  
Рыбин Юрий Иванович

Официальные оппоненты: Иванов Константин Михайлович, доктор технических наук, профессор

Кункин Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент

Ведущая организация: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»  
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «21» февраля 2008 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, химический корпус, ауд.51.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан 11 января 2008.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

С.Ю.Кондратьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

Процесс равноканального углового прессования (РКУ-прессования) является одним из способов обработки металла давлением (ОМД), где материал испытывает интенсивные пластические деформации. В отличие от традиционных способов ОМД, например, прокатка, волочение, прессование основной целью такой обработки является накопление деформации в материале без изменения его формы. За счет реализации схемы простого сдвига во всем объеме заготовки происходит равномерное измельчение структуры. Путем многократного повторения процесса это измельчение может доходить вплоть до субмикронного уровня.

Получаемая структура в зависимости от материала характеризуется повышенными, а в ряде случаев аномальными свойствами. В настоящее время идет интенсивное исследование ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов на основе алюминия, магния, меди, титана. Благодаря условиям деформирования, используемым при РКУ-прессовании, этот способ стал применяться при обработке труднодеформируемых жаропрочных никелевых сплавов, вольфрама, некоторых марок сталей.

Несмотря на все свои преимущества, процесс РКУ-прессования до сих пор не реализован в промышленных масштабах, и его исследование носит сугубо лабораторный характер. При этом каждая установка для данного способа ОМД сама по себе уникальна. Подавляющее большинство исследований в этой области направлены на изучение структуры и свойств обрабатываемого материала.

На сегодняшний день актуальной проблемой является практическая реализация технологического процесса РКУ-прессования. Результаты исследований механических аспектов этого процесса носят отрывистый, а в ряде случаев и разрозненный характер. Остаются малоизученными характер течения реального металла в канале, особенности напряженно-деформированного состояния (НДС) металла, условия контактного трения. Решение этих проблем позволит сформулировать требования к формообразующему инструменту и практической реализации технологического процесса РКУ-прессования.

**Цель работы** – установить влияние технологических параметров на характер течения и напряженно-деформированное состояние металла в процессе РКУ-прессования и разработать на этой основе рекомендации по его практической реализации.

Для достижения этой цели поставлены следующие **задачи**:

- Формализация технологической проблемы процесса бокового прессования металла в канале квадратного сечения с ориентацией на численное решение методом конечных элементов (МКЭ);

- Численный анализ влияния геометрических параметров канала на кинематику течения металла в условиях неустановившегося и установившегося процесса РКУ-прессования, характер напряженно-деформированного состояния металла, энергосиловые характеристики процесса;
- Численный анализ напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых характеристик процесса РКУ-прессования в зависимости от величины контактного трения;
- Изготовление оснастки, проведение экспериментальных исследований процесса РКУ-прессования с различными смазочными материалами и сопоставление полученных данных с результатами математического моделирования;
- Разработка рекомендаций по выбору конструкции формообразующего инструмента и геометрических параметров канала для реализации технологического процесса РКУ-прессования.

### **Научная новизна.**

1. С использованием математического моделирования проведено комплексное исследование влияния основных технологических параметров процесса РКУ-прессования на напряженно-деформированное состояние металла. Рассмотрена неустановившаяся стадия процесса РКУ-прессования. Показано, что в зависимости от геометрии канала и условий контактного трения происходит формирование переднего и заднего концов заготовки. Форма этих частей заготовки отличается от исходной, деформированное состояние не соответствует схеме простого сдвига, структура и свойства металла меняются по длине заготовки.
2. На основе построенного поля скоростей исследован характер течения металла в канале. Показано, что процесс РКУ-прессования всегда характеризуется неравномерным распределением скоростей течения металла по высоте очага деформации. В зависимости от геометрии канала в очаге деформации возможно образование зон как замедленного, так и ускоренного течения металла по сравнению с основным потоком, что является причиной возникновения неравномерности распределения деформаций сдвига по высоте заготовки. В указанном направлении происходит изменение структуры и свойств металла.
3. Дана количественная оценка влияния контактного трения на неравномерность распределения интенсивности деформаций сдвига. Показано, что в случае канала с углом пересечения  $90^0$  условия контактного трения могут стать определяющими с точки зрения возможности осуществления процесса РКУ-прессования.

### **Практическая значимость.**

1. Экспериментально получены качественные и количественные оценки влияния различных видов смазок на технологические параметры и результат процесса РКУ-прессования алюминия.

2. Сформулированы рекомендации по выбору конструкции формообразующего инструмента и геометрических параметров канала для реализации технологического процесса РКУ-прессования.
3. Получены численные оценки влияния геометрических параметров канала, позволяющие прогнозировать заполнение канала, равномерность деформаций, силовые характеристики и саму возможность осуществления процесса в заданных условиях.
4. Проведенные систематические расчеты процесса РКУ-прессования во всем реальном диапазоне варьирования геометрических параметров канала и условий трения позволяют получать фактические сведения о напряженно-деформированном состоянии обрабатываемого материала, необходимые для принятия обоснованного решения при конструкторско-технологическом проектировании, и выполняют роль справочных материалов.

### **Методы исследования.**

1. Моделирование процесса с использованием теории пластического течения и численной реализацией методом конечных элементов.
2. Экспериментальное исследование процесса с использованием сетки, нанесенной лазером, и фактически совпадающей с сеткой конечных элементов.
3. Компьютерная обработка результатов эксперимента с использованием положений метода конечных элементов.

### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Математические модели установившегося и неуставившегося процессов пластического течения при РКУ-прессовании;
2. Результаты численного исследования влияния геометрических параметров канала на кинематические и силовые характеристики процесса РКУ-прессования;
3. Результаты математического моделирования процесса РКУ-прессования в различных условиях контактного трения и экспериментального исследования влияния смазок на напряженно-деформированное состояние заготовки и силовые характеристики процесса РКУ-прессования;
4. Рекомендации по выбору конструкции формообразующего инструмента и геометрических параметров канала для РКУ-прессования.

### **Апробация работы.**

Основные результаты доложены и обсуждены на 6-ой и 7-ой международных научно-технических конференциях «Современные металлические материалы и технологии и их использование в технике» (Санкт-Петербург, 2004, 2006); международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и

технологии пластической обработки металлов» (Санкт-Петербург, 2005); представлены на VII международной научной конференции «Nove technologie I osiagnięcia w metalurgii I inżynierii materiałowej» (Częstochowa, Польша, 2006) и на 2-й международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов» (Санкт-Петербург, 2007).

### **Публикации.**

Основное содержание диссертационной работы отражено в 11 публикациях, список которых приведен в конце автореферата.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов и списка литературы, который включает 107 наименований. Работа изложена на 170 страницах, содержит 70 рисунков и 14 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследований. Отражены научная новизна и практическая значимость работы, а также перечислены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** содержится обзор литературных данных о свойствах УМЗ и наноструктурных материалов, полученных методами интенсивной пластической деформации. Особое внимание уделяется методу РКУ-прессования, используемому для получения УМЗ материалов. Данный метод был предложен В.М. Сегалом в 70-х годах прошлого столетия. При РКУ-прессовании большие пластические деформации в объеме заготовки достигаются за счет реализации схемы простого сдвига. Последняя обеспечивает возможность многократного циклического деформирования путем изменения направления действия касательных напряжений на границах деформируемого объема после очередного цикла обработки. Это позволяет достигать сколь угодно больших значений интенсивности накопленных деформаций.

За последние десять лет процесс РКУ-прессования получил дальнейшее развитие. Большое количество работ посвящено применению этого способа ОМД для получения различных материалов с УМЗ структурой и обладающих необычно повышенными механическими, электротехническими, коррозионными и др. свойствами. Тем не менее, он до сих пор не реализован в промышленных масштабах, и его исследования носят сугубо лабораторный характер. Практическая реализация РКУ-прессования сдерживается из-за недостаточной проработки вопросов, свя-

занных с механическими аспектами процесса. Имеющиеся данные носят отрывистый, а порой и разрозненный характер. По этой причине отсутствуют обоснованные рекомендации по выбору конструктивных параметров формообразующего инструмента и используемого смазочного материала.

На основе литературных данных были сформулированы **цель** и **задачи** диссертационной работы. Выделены основные технологические параметры процесса РКУ-прессования.

**Во второй главе** представлены основные этапы математического моделирования процесса РКУ-прессования. Для решения поставленной задачи принимаются следующие допущения: модель материала – упругопластическое упрочняемое тело; модель деформирования – плоская деформация. Выбор модели материала обусловлен наличием в объеме деформируемого тела очень небольшой области пластического деформирования и основной части, где имеют место только упругие деформации. Выбор модели деформирования основан на предположении о деформировании заготовки квадратного сечения с отсутствием перемещений в поперечном направлении. Считается, что процесс проходит в изотермических условиях, поэтому скорость температурной деформации принята равной нулю.

Математическая постановка задачи теории течения базируется на одном из наиболее известных дифференциальных вариационных принципов механики - начале виртуальных скоростей. Для любого кинематически возможного поля скоростей  $\delta U$  в произвольный момент времени справедливо условие равенства мощностей внутренних и внешних сил:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV = \int_S p_i \delta U_i dS, \quad (1)$$

где:  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений,  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформации,  $p_i$  – компоненты внешних сил на поверхности  $S$ .

В конечно-элементной форме разрешающая система уравнений имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_r \left( \int_{V^r} S_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV^r + \int_{V^r} \sigma_0 \delta \dot{\varepsilon}_0 dV^r \right) = \sum_r \int_{S^r} p_i \delta U_i dS^r \\ \sum_r \int_{V^r} \left( \dot{\varepsilon}_0 - \frac{\sigma_0}{k \Delta \tau} \right) dV^r = - \sum_r \int_{V^r} \frac{\sigma_0^*}{k \Delta \tau} dV^r \end{array} \right., \quad (2)$$

где:  $S_{ij} = \left( \frac{1}{2G \Delta \tau} + \frac{1}{2\mu'} \right)^{-1} \left[ \dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\sigma_0}{k \Delta \tau} \delta_{ij} + \left( \frac{S_{ij}^*}{2G \Delta \tau} + \delta_{ij} \frac{\sigma_0^*}{3k \Delta \tau} \right) \right]$ ;  $\sigma_0^*$  – среднее напряжение, достигнутое на предыдущем этапе.

Граничные условия (ГУ) на контактной поверхности для процесса РКУ-прессования формулируются в виде:

$$\begin{cases} v_i n_i = v_n^0 \\ \sigma_{ij} n_i \tau_j = \sigma_\tau \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $v_i$ ,  $\sigma_{ij}$  – компоненты вектора скоростей и тензора напряжений;  $v_n^0$  – нормальная составляющая скорости инструмента;  $n_i$  – компоненты единичного вектора, совпадающего с направлением внешней нормали к поверхности скольжения;  $\tau_j$  – компоненты единичного вектора, касательного к поверхности и направленного в сторону, противоположную направлению вектора скорости относительного скольжения металла по инструменту;  $\sigma_\tau$  – распределенные касательные силы на поверхности контакта, определяемые из закона трения. Включение условий

$$\sigma_{ij} n_i \tau_j = \begin{cases} \sigma_\tau & \text{при } \sigma_{ij} n_i n_j < 0 \\ 0 & \text{при } \sigma_{ij} n_i n_j > 0 \end{cases}$$

позволяет проконтролировать отрыв металла от инструмента; при  $\sigma_{ij} n_i n_j > 0$  меняется тип ГУ: они должны соответствовать условиям на свободной поверхности  $\sigma_{ij} n_i = 0$ . Граничные условия на этапе уточняются в итерационном процессе. При этом определяются узлы, в которых выполняется условие отрыва  $\sigma_{ij} n_i n_j > 0$ . Если точка деформируемого металла находится на контактной поверхности и на заданном временном промежутке (этапе нагружения) перемещается вдоль этой поверхности, отношение компонент перемещений  $u_x/u_y$  должно быть равно тангенсу угла наклона поверхности инструмента в данной точке.

Для рассматриваемой задачи РКУ-прессования ГУ задавались следующим образом:

- для верхнего торца заготовки – в перемещениях;
- вдоль контактной поверхности в виде:

$$\begin{cases} \frac{u_y}{u_x} = \operatorname{tg} \alpha \\ \tau = \mu \cdot \sigma_n \end{cases}, \quad (4)$$

где  $u_x$  и  $u_y$  – компоненты вектора перемещений;  $\alpha$  – угол наклона поверхности инструмента в данной точке;  $\sigma_n$  – нормальное контактное напряжение;  $\mu$  – коэффициент трения;

**В третьей главе** представлены результаты численного исследования процесса РКУ-прессования. Проведен конечно-элементный анализ влияния основных технологических параметров на кинематику течения металла в условиях неустановившегося и установившегося процесса РКУ-прессования, характер напряженно-деформированного состояния металла в канале, энергосиловые характеристики процесса.

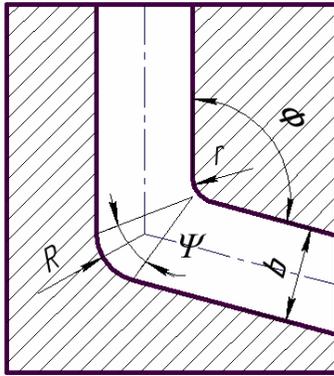


Рис.1. Геометрия канала при РКУ-прессовании.

В первой части рассмотрено влияние геометрии канала.

Основными геометрическими параметрами канала являются: угол пересечения входной и выходной частей  $\Phi$ , угол сопряжения прямолинейных участков канала  $\Psi$ , определяемый соответствующим внешним радиусом сопряжения  $R$ , внутренний радиус сопряжения  $r$  и ширина прямолинейных участков  $b$  (рис.1).

В работе угол  $\Phi$  варьировался в диапазоне:  $90^{\circ} \div 120^{\circ}$  с шагом  $15^{\circ}$ . Этот выбор обусловлен, с одной стороны, возможностью реализации процесса, с другой стороны, наибольшей эффективностью последнего. Соотношения внешнего радиуса перехода и ширины канала  $R/b$  были выбраны следующие: 1:4; 1:2; 3:4; 1:1. Значения внутреннего радиуса  $r$  и ширины канала  $b$  не изменялись.

Механические характеристики модельного материала: модуль нормальной упругости 70 000 МПа, коэффициент Пуассона 0,3, предел текучести  $\sigma_T=200$  МПа. Упрочнение материала не учитывалось. Условия трения на поверхности контакта материала со стенками канала:  $\mu=0,1$ .

Сначала рассматривался процесс заполнения металлом очага деформации (неустановившаяся стадия процесса). В вертикальной части канала происходит осадка заготовки, и идет формирование переднего конца, как показано на рис.2. Параметр  $\Delta h$  означает перемещение верхнего торца заготовки. Форма переднего конца зависит от угла пересечения  $\Phi$ . В случае прямоугольного канала она близка к исходной, с увеличением  $\Phi$  становится более сложной. На этой стадии отмечается интенсивный рост усилия прессования.

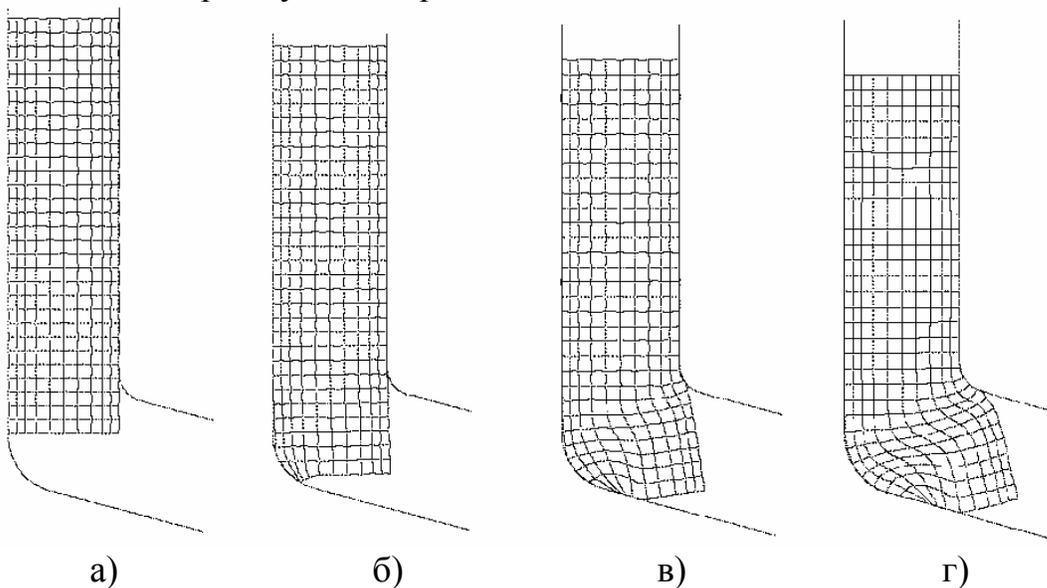


Рис.2. Положение заготовки в канале при  $\Phi=105^{\circ}$ : а)  $\Delta h=0$ мм; б)  $\Delta h=8$ мм; в)  $\Delta h=13$ мм; г)  $\Delta h=18$ мм.

По мере заполнения очага деформации распределение гидростатического давления в канале становится неравномерным.

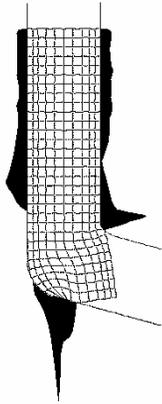


Рис.3. Распределение нормальных контактных напряжений вдоль стенок канала в момент достижения своего максимума для  $\Phi=105^\circ$ ,  $R/b=1:2$ .

металла от контактной поверхности, и образуется зазор. Его величина тем больше, чем меньше внешний радиус сопряжения.

Деформированное состояние переднего конца заготовки не соответствует простому сдвигу.

К концу данной стадии прикладываемое усилие достигает своего максимального значения.

Модель упругопластического тела предполагает наличие упругой составляющей деформации, неравномерные объемные деформации, отсутствие разрывов напряжений и, следовательно, позволяет в ходе решения задачи найти физический очаг деформации.

Для анализа установившейся стадии процесса использовалась модель, согласно которой поворотная часть канала предварительно уже была заполнена деформируемым металлом. Обоснованность такого допущения была подтверждена соответствующим сравнительным анализом полей деформаций. Учитывая тот факт, что заданным значением  $\mu=0,1$  напряжений контактного трения было не достаточно для полного заполнения канала, численный анализ проводился с противодействием. Величина противодействия составляла  $p_0=150$  МПа. Процесс деформирования прослежен за 60 этапов нагружения, на каждом из которых перемещение пуансона составляло  $\Delta h=1$  мм. При этом произошло заполнение выходной части канала металлом, и процесс вышел на установившийся (квазистационарный) режим.

По результатам расчета для всех вариантов геометрии канала получены эпюры скоростей течения металла в продольном сечении заготовки.

К концу неустойчивой стадии процесса контактные напряжения возрастают и достигают своего максимального значения (рис.3). При этом в канале появляются тяжело нагруженные места: на выходе из поворота со стороны внешней стенки и перед входом в поворот со стороны внутренней. В обоих случаях это место, где происходит изменение траектории движения контактной точки. В механике оно является концентратором напряжений. С выходом процесса на установившуюся стадию значения контактных напряжений в указанных точках уменьшаются.

На внешней стенке канала перед входом в очаг деформации наблюдается отрыв

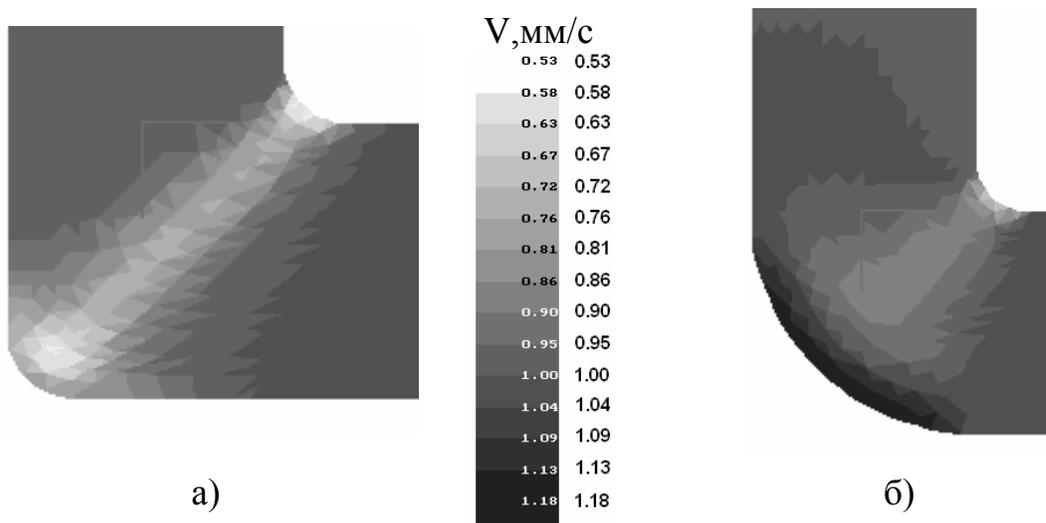


Рис.4. Распределение скорости течения металла в продольной плоскости прямоугольного канала при различных соотношениях  $R/b$ : а) 1:4; б) 1:1.

При этом характер эпюры скоростей течения определяется соотношением  $R/b$  (рис.4). В геометрическом очаге деформации для канала с наименьшим  $R/b$  характерно образование зоны замедленного течения металла (рис.4а). В условиях противодавления металл вынужден заполнять внешний угол канала. С увеличением соотношения  $R/b$  область замедленного течения исчезает. В радиальном канале (рис.4б) на внешнем радиусе сопряжения слои металла двигаются с большей скоростью по сравнению с остальными. В то же время на внутреннем радиусе скорость движения металла замедляется. Такое поведение объясняется существенной разницей в расстояниях, которые необходимо пройти соседним слоям металла. Необходимость поддержания постоянства секундного объема металла по сечению приводит к искажению первоначально равномерного поля скоростей. С уменьшением угла пересечения  $\Phi$  градиент скоростей возрастает.

Поскольку при РКУ-прессовании деформированное состояние обеспечивается преимущественно за счет больших значений сдвиговых (смешанных) компонент тензора деформации, для его оценки использовалась инвариантная характеристика – интенсивность деформаций сдвига  $\Gamma$ .

Следствием возникающей неравномерности в характере течения металла является неравномерность распределения интенсивности деформаций сдвига.

С помощью параметра неравномерности  $q$  дана количественная оценка возникающей неравномерности распределения сдвиговых деформаций в поперечном сечении заготовки:

$$q = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(\Gamma_{cp} - \Gamma_i)^2} p_i}{\Gamma_{cp} \cdot 100}, \quad (5)$$

где  $\Gamma_{cp}$  – среднее значение интенсивности сдвиговых деформаций в поперечном сечении заготовки;  $\Gamma_i$  – значение интенсивности сдвиговых деформаций в  $i$ -ой об-

ласти заготовки, которое принадлежит данному уровню деформаций;  $p_i$  – доля соответствующей области. Когда деформация заготовки равномерна, параметр неравномерности равен нулю. С увеличением  $q$  поле деформаций становится более неравномерным.

Формула (5) была предложена G. Krallics.

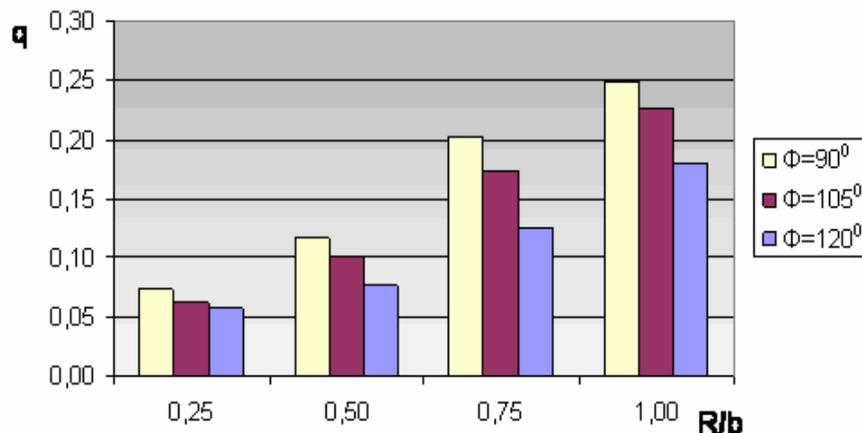


Рис.5. Значения параметра неравномерности распределения интенсивности сдвиговых деформаций по поперечному сечению заготовки в зависимости от геометрических характеристик канала.

На рис.5. в виде гистограммы представлены значения параметра неравномерности распределения интенсивности сдвиговых деформаций по поперечному сечению заготовки в зависимости от геометрических параметров канала. Чем ближе канал по форме к радиальному, тем более неравномерным становится распределение сдвиговых деформаций по поперечному сечению заготовки. При увеличении угла пересечения прямолинейных частей канала поле сдвиговых деформаций становится более равномерным.

В то же время, анализ поля скоростей показал, что в случае узкого очага деформации при РКУ-прессовании возможно образование зон замедленного течения металла. Между такой зоной и основным потоком имеется сильно локализованная область интенсивных сдвиговых деформаций. Поэтому, несмотря на минимальное значение параметра неравномерности, в случае малопластичного материала это может привести к нарушению его сплошности.

Во второй части главы рассмотрено влияние условий контактного трения на НДС металла и энергосиловые параметры процесса РКУ-прессования.

Конечно-элементный анализ был выполнен для трех вариантов каналов с углами пересечения  $\Phi=90^\circ$ ,  $105^\circ$ ,  $120^\circ$ . Поскольку параметр неравномерности имел наименьшие значения при соотношении  $R/b=1:4$ , то влияние контактного трения исследовалось только для этого случая.

Величины характеристики трения на поверхности контакта деформируемого материала с инструментом принимались следующие:  $\mu=0; 0,1; 0,2; 0,25; 0,3$ . Использовалась модель, согласно которой поворотная часть канала уже заполнена

металлом. Процесс деформирования прослежен за 35 этапов нагружения, на каждом из которых перемещение пуансона также составляло  $\Delta h = 1$  мм. При этом произошло заполнение выходной части канала металлом, и процесс вышел на установившийся (квазистационарный) режим.

По результатам расчета были построены эпюры скоростей и распределения интенсивности сдвиговых деформаций в продольном сечении заготовки.

В условиях отсутствия контактного трения металл не заполняет внешний угол канала и сравнительно легко проходит поворот. С увеличением характеристики контактного трения происходит вынужденное заполнение металлом внешнего угла канала, и образуется зона замедленного течения, отмеченная ранее. Внутри материала на границе с этой зоной по мере увеличения контактного трения возникает большая разность скоростей течения, что может привести к крайней неоднородности очага деформации. Так в прямоугольном канале значения скорости течения для различных слоев металла отличаются на порядок (рис.6а). Как следствие, величина накопленных деформаций сдвига в разных частях заготовки различается более чем в 2,5 раза (рис.6б). Такая ситуация может привести к нарушению сплошности материала. Дальнейшее увеличение значения характеристики трения (до  $\mu=0,3$ ) в случае прямоугольного канала связано с возникающими вычислительными трудностями, поэтому соответствующий расчет не проводился.

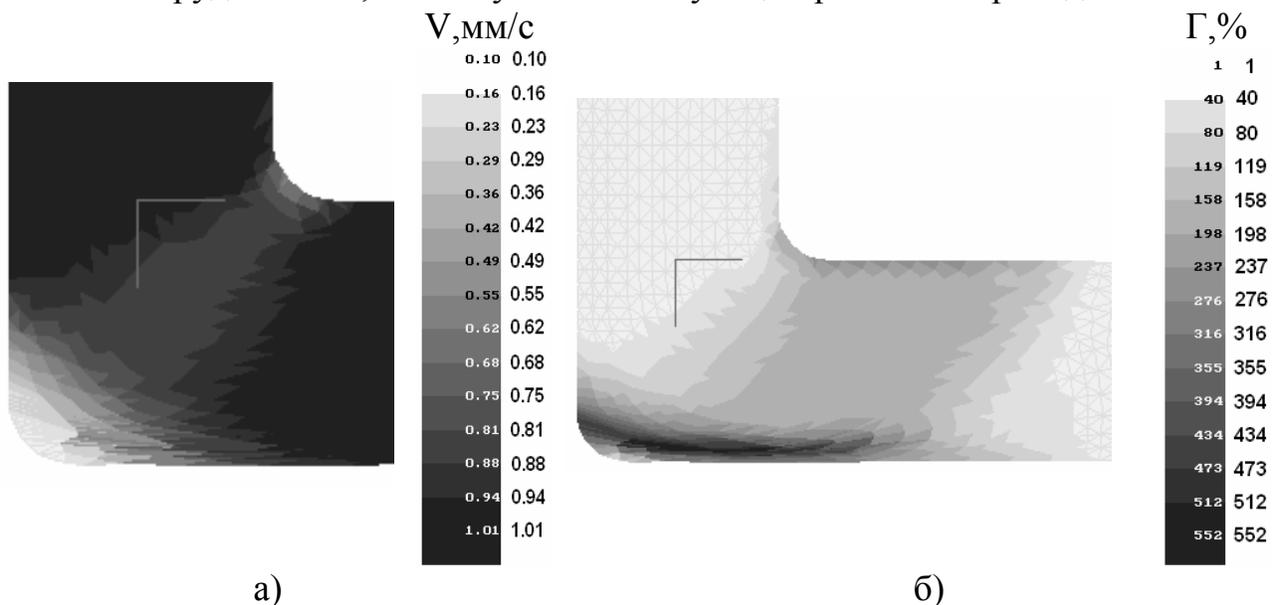


Рис.6. Распределение скорости течения металла (а) и интенсивности сдвиговых деформаций (б) в продольном сечении заготовки для  $\Phi=90^0$ ,  $R/b=1:4$ ,  $\mu=0,25$ .

Не менее неблагоприятная картина складывается и на противоположной стороне заготовки. Вдоль верхней стенки канала деформация является немонотонной: сжатие, испытываемое материалом заготовки в вертикальной части канала, сменяется растяжением в горизонтальной. С увеличением трения значения растягивающих напряжений также возрастают. Это может привести к появлению трещин на поверхности обрабатываемого материала.

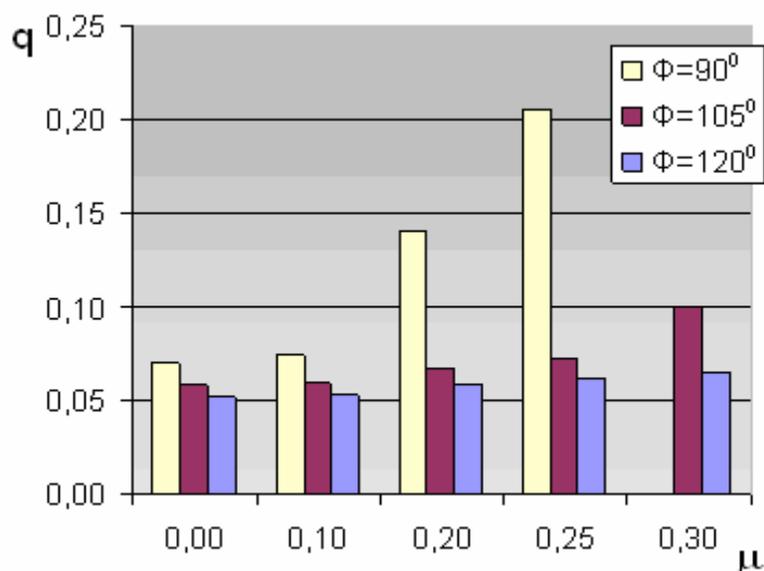


Рис.7. Значение параметра неравномерности распределения интенсивности сдвиговых деформаций по поперечному сечению заготовки в зависимости от условий трения на контактной поверхности для различной геометрии канала.

С использованием параметра неравномерности была дана количественная оценка возникающей неравномерности распределения интенсивности сдвиговых деформаций в поперечном сечении заготовки в зависимости от условий трения на контактной поверхности для различной геометрии канала (рис.7). Неравномерность распределения интенсивности деформаций с увеличением трения повышается в тем большей степени, чем меньше угол пересечения  $\Phi$ .

Увеличение контактного трения ведет к повышению гидростатического давления в канале и росту усилия прессования. Анализ распределения напряжений под пуансоном показал, что с ростом характеристики  $\mu$  общий уровень напряжений повышается в 3-3,5 раза.

Однородность структуры и свойств металла обеспечивается равномерностью распределения деформаций в объеме заготовки. Процесс РКУ-прессования всегда характеризуется неравномерным распределением деформаций. В зависимости от геометрических параметров канала и условий контактного трения величина указанной неравномерности может быть снижена. Для этого необходимо при данном угле пересечения  $\Phi$  и определенных условиях контактного трения так подбирать соотношение  $R/b$ , чтобы свести к минимуму возникновение в канале зон замедленного или ускоренного течения металла.

**В четвертой главе** представлены результаты расчетно-экспериментального анализа процесса РКУ-прессования. По данным результатов компьютерного моделирования процесса РКУ-прессования была изготовлена опытная оснастка в двух вариантах исполнения. В первом варианте оснастка состояла из двух частей и имела разъем в плоскости симметрии канала. В процессе изготовления и эксплуатации данной конструкции были выявлены следующие недостатки: повышенная

трудоемкость финишной обработки рабочей поверхности канала; трудности при извлечении непропрессованного остатка. Согласно второму варианту, конструкция состояла из большего количества частей (рис.8) и использовалась для проведения экспериментальных исследований.

При проектировании формообразующего инструмента для РКУ-прессования рекомендуется использовать разборную конструкцию, что позволит снизить трудоемкость финишной обработки рабочей поверхности канала. Для повышения надежности работы инструмента целесообразнее использовать бандаж.



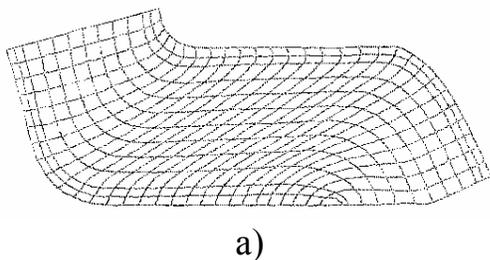
Рис.8. Оснастка для РКУ-прессования.

Геометрические параметры канала: угол пересечения  $105^{\circ}$ , ширина канала 20мм, внешний радиус сопряжения 10мм, внутренний радиус – 5мм.

В качестве деформируемого материала использовался первичный алюминий технической чистоты марки А7.

В первой части главы был проведен анализ кинематики течения материала в канале. На рис.9. показана форма переднего конца, которую приобретает первая заготовка в результате РКУ-прессования по данным численного моделирования

(рис.9а) и эксперимента (рис.9б).



а)



б)

Рис.9. Форма переднего конца заготовки: а) результат численного моделирования; б) результат эксперимента.

Далее был проведен анализ влияния контактного трения на кинематику течения металла, а также на энергосиловые характеристики исследуемого процесса. Поскольку при практической реализации РКУ-прессования заготовки последовательно помещаются в вертикальную часть канала, необходимо было оценить влияние предыдущей заготовки, которая находится в канале, на процесс деформирования последующей.

При проведении эксперимента использовались смазочные материалы на различной основе: жидкого растительного жира (смазка №1); солей высших жирных кислот (смазка №2); загущенных нефтяных масел (смазки №3,4,5); твердого животного жира (смазки №6,7). В качестве наполнителей выступали графит и стеарат цинка.

При использовании смазок №1 и №2 процесс прессования осуществить не удалось. Наблюдалось выдавливание смазки и налипание алюминия на стенки канала. Смазки №3-7 показали удовлетворительные результаты. На рис.10 представлен общий вид деформированных образцов при использовании различных смазок.

В зависимости от используемой смазки форма переднего и заднего концов у последующих образцов различна.

С увеличением контактного трения, как это происходит при использовании смазки №3 (рис.10а), третий образец вынужден выталкивать своего предшествен-



Рис.10. Форма образцов после непрерывного РКУ-прессования при использовании различных типов смазки: а) смазка №3; б) смазка №6.

ника, и формирование поверхности их контакта идет согласно направлению линий течения материала. Если трение в канале остается практически неизменным, форма последующих образцов также остается постоянной (рис.10б).

Результаты моделирования процесса непрерывного РКУ-прессования для различных условий трения представлены на рис.11.

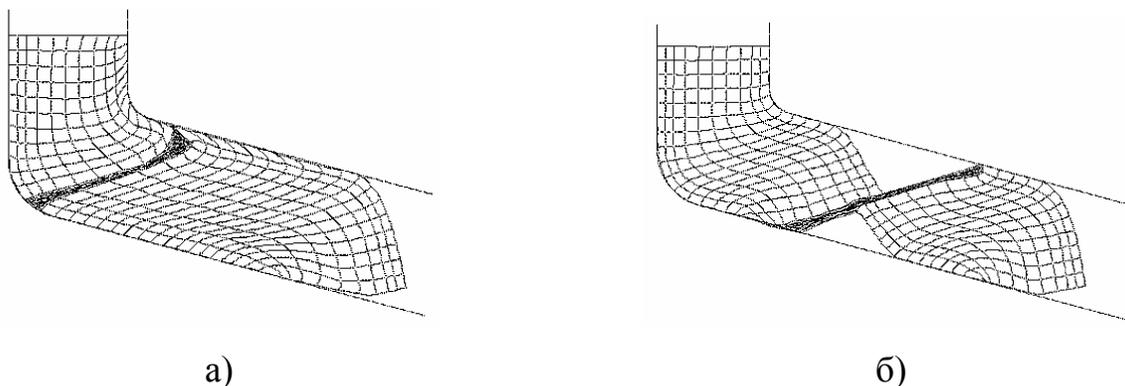


Рис.11. Положение заготовок в канале при непрерывном РКУ-прессовании при различных условиях контактного трения: а)  $\mu=0,3$ ; б)  $\mu=0,15$ .

Для решения контактной задачи между образцами задавался слой элементов (на рис.11 затемненный слой) с отличающимися от материала образцов свойствами.

Одной из основных силовых характеристик процесса РКУ-прессования является величина прикладываемого усилия. Она зависит как от свойств обрабатываемого материала, так и от возникающих в канале сил контактного трения. Разные типы смазок позволили оценить величину развиваемого усилия пресса в процессе

РКУ-прессования алюминиевых заготовок. В зависимости от используемой смазки значение прикладываемого усилия изменяется в несколько раз: от 4,6 тс (смазка №6), до 12 тс (смазка №1).

Также на величину усилия прессования оказывает влияние предыдущий образец, который находится в выходной части канала. Силы трения, обусловленные упругой деформацией материала заготовки, создают противодействие в канале, повышая тем самым усилие прессования.

Для оценки величины контактного трения при использовании различных смазочных материалов было проведено компьютерное моделирование процесса РКУ-прессования алюминия марки А7. По данным расчета построена зависимость полного усилия прессования от характеристики трения (рис.12).

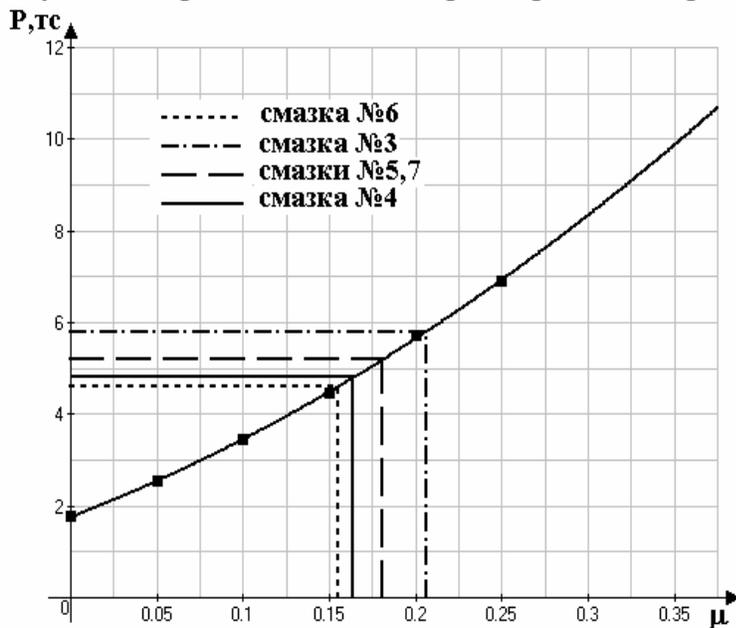


Рис.12. Зависимость полного усилия прессования от характеристики трения.

Поскольку математическое моделирование процесса РКУ-прессования основывается на модели плоского деформированного состояния, в расчете не учитывается влияние боковых стенок канала на характер течения металла. По этой причине полученное расчетное значение усилия прессования необходимо увеличить с учетом сил трения, возникающих на боковых стенках канала.

Если:

$$P = R_m + T_n, \quad (6)$$

где  $P$  – полное усилие прессования;  $R_m$  – усилие, необходимое для преодоления сопротивления деформации металла;  $T_n$  – усилие, необходимое для преодоления сил трения на стенках канала.

Тогда:

$$T_{II} = \mu \int_{(s)} \sigma_n^{в.с.} ds + \mu \int_{(s)} \sigma_n^{н.с.} ds + 2\mu \int_{(s)} \sigma_z ds, \quad (7)$$

где  $\sigma_n^{в.с.}$  – нормальные контактные напряжения, действующие вдоль верхней стенки канала;  $\sigma_n^{н.с.}$  – нормальные контактные напряжения, действующие вдоль

нижней стенки канала;  $\sigma_z$  – напряжения, перпендикулярные боковой стенке канала.

Оценка величины характеристики трения, которая достигается в канале при использовании различных смазок, проводилась с помощью построенной зависимости. Решалась обратная задача: по известному значению функции (усилие прессования) находится соответствующая ему переменная величина (характеристика трения). Найденные значения  $\mu$  были сопоставлены с соответствующим смазочным материалом. На рис.12 представлены данные для тех смазочных материалов, при использовании которых был осуществлен процесс РКУ-прессования. Значения характеристики трения, в зависимости от используемой смазки, лежат в диапазоне  $0,15 < \mu < 0,21$ .

С использованием метода сеток, был изучен характер течения металла в процессе деформирования в различных условиях контактного трения. Для обеспечения большей точности метода сетка наносилась с помощью лазерного маркера. При вычислении компонент деформаций формировалась сетка конечных элементов (рис.13), в которой использовались координаты узлов, лежащих на пересечении линий деформированной сетки.

Таким образом, расчет компонент деформаций и далее интенсивности сдвиговых деформаций выполнен по той же методике, которая принята в МКЭ (решение уравнений Коши через функции формы конечных элементов).

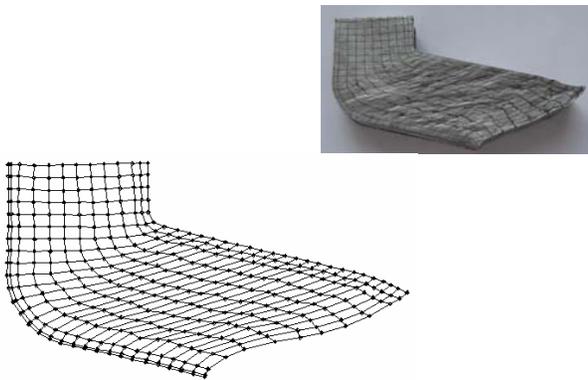


Рис.13. Вид деформированной сетки и сформированной на ее основе сетки конечных элементов.

Вычисленные в узлах сформированных конечных элементов значения компонент деформации далее усреднялись по четырем элементам, сходящимся в узле. По этим данным были построены графики распределения сдвиговых деформаций в поперечном сечении заготовки и сопоставлены с результатами расчета МКЭ процесса РКУ-прессования алюминия марки А7 при соответствующих значениях характеристики трения и геометрии канала.

Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментом (рис.14). Исключение составляет область около внутреннего радиуса. Различный характер распределения обусловлен отмеченной ранее немонотонностью деформации на внутренней стенке канала.

В ходе численного моделирования процесса вычисляется накопленная интенсивность деформаций, в то время как экспериментально методом сеток можно определить только текущее значение сдвиговой деформации.

Анализ структуры деформированных образцов показал, что измельчение зерна в поперечном сечении образца полностью согласуется с характером распреде-

ления накопленной интенсивности деформаций сдвига. По данным металлографических исследований исходная структура характеризовалась размером зерна  $\sim 150 \div 180$  мкм. После РКУ-прессования (один проход) в средней части образцов преобладают зерна с размером  $\sim 60 \div 80$  мкм. При смещении к краю в сторону внешнего радиуса размер зерен составляет  $\sim 120 \div 140$  мкм. Если двигаться в сторону внутреннего радиуса, то преобладают более мелкие зерна с размерами  $\sim 50 \div 70$  мкм.

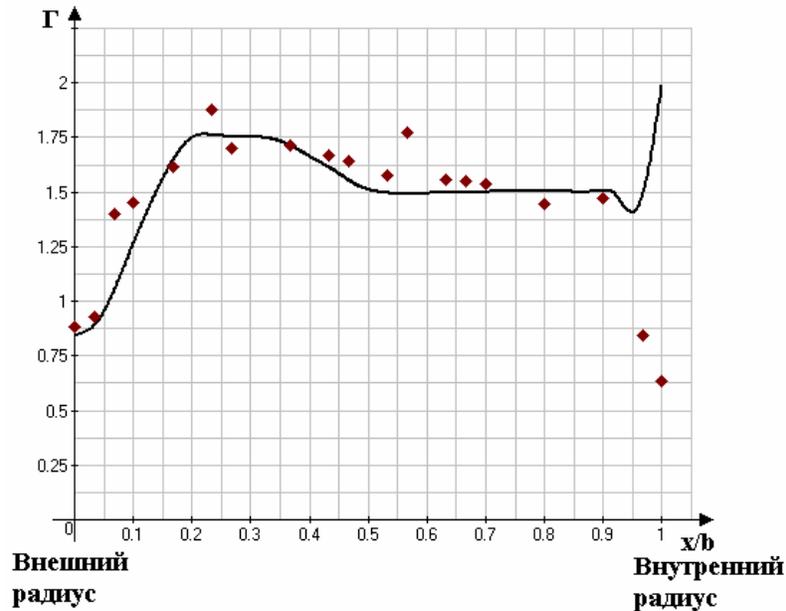


Рис.14. Распределение интенсивности сдвиговых деформаций по ширине алюминиевого образца после прессования при  $\mu=0,2$  (точками обозначены экспериментальные значения, полученные при использовании смазки №3).

Были получены кривые «истинные напряжения-деформации» испытаний алюминиевых образцов марки А7 при комнатной температуре на сжатие. Показано, что после РКУ-прессования (два прохода) кривая выходит на насыщение, и дальнейшее увеличение количества проходов не будет приводить к упрочнению данного металла.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Проведено комплексное исследование влияния основных технологических параметров процесса РКУ-прессования на напряженно-деформированное состояние металла. Установлен неравномерный характер распределения деформаций, как по высоте заготовки, так и по ее длине. Причиной возникновения неравномерности являются: геометрические параметры канала ( $R/b$ ,  $\Phi$ ) и контактное трение.

2. Рассмотрена неустановившаяся стадия процесса РКУ-прессования. Показано, что формирование переднего и заднего концов заготовки происходит в зависимости от геометрии канала и условий контактного трения. Форма этих частей заготовки отличается от исходной, деформированное состояние не соответствует схеме простого сдвига.
3. На основе построенного поля скоростей исследован характер течения металла в канале. Показано, что на распределение скорости течения металла по высоте очага деформации влияет его форма и условия контактного трения.
4. Дана количественная оценка неравномерности распределения интенсивности деформаций сдвига в зависимости от геометрических характеристик канала и условий контактного трения. Показана определяющая роль контактного трения для возможности осуществления процесса равноканального углового прессования в случае канала с углом пересечения  $90^{\circ}$ .
5. Экспериментально получены качественные и количественные оценки влияния различных видов смазок на технологические параметры и результат процесса РКУ-прессования алюминия.
6. Однородность структуры и свойств металла обеспечивается равномерностью распределения деформаций в объеме заготовки. Процесс РКУ-прессования всегда характеризуется неравномерным распределением деформаций. Величина указанной неравномерности зависит от геометрических параметров канала и условий контактного трения, что необходимо учитывать при практической реализации процесса.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Рыбин Ю.И., Паршиков Р.А. Анализ течения металла при равноканальном угловом прессовании // Материалы 6-ой международной научно-технической конференции: Современные металлические материалы и технологии и их использование в технике, Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2004, С.240-247.
2. Рыбин Ю.И., Паршиков Р.А. Анализ течения металла при равноканальном угловом прессовании // Межвузовский сборник научных трудов, Магнитогорск, 2004, С.15-24.
3. Рыбин Ю.И., Паршиков Р.А. Анализ неравномерности деформации при равноканальном угловом прессовании // Труды международной научно-технической конференции: Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов, Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2005, С.115-118.
4. Рыбин Ю.И., Паршиков Р.А. Исследование влияния геометрии канала при РКУП на однородность деформации // Межвузовский сборник научных трудов, Магнитогорск, 2005, Вып.32. С.9-15.
5. Кучкин В.В., Рыбин В.В., Паршиков Р.А., Рыбин Ю.И. Расчетно-экспериментальное исследование РКУ-прессования алюмине-магниевого сплава

ва // VII Międzynarodowa konferencja naukowa: Nove technologie I osiągnięcia w metalurgii I inżynierii materiałowej. Częstochowa, 2006 с.324-332.

6. Паршиков Р.А. Влияние контактного трения при равноканальном угловом прессовании // Материалы 7-ой международной научно-технической конференции: Современные металлические материалы и технологии и их использование в технике, Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2006, С.184-187.
7. Кучкин В.В., Рыбин В.В., Паршиков Р.А., Рыбин Ю.И. Расчетно-экспериментальное исследование РКУ-прессования // «Металлообработка». – 2006. – № 4. – С. 44-48.
- 8. Рыбин Ю.И., Паршиков Р.А. Конечно-элементный анализ процесса равноканального углового прессования // «Научно-технические ведомости СПбГТУ». – 2006. – № 4. – С. 79-83.**
- 9. Золотов А.М., Паршиков Р.А., Рыбин Ю.И. Контактное трение при равноканальном угловом прессовании // «Научно-технические ведомости СПбГПУ». – 2006. – № 6. – т.1. – С. 159-166.**
10. Золотов А.М., Паршиков Р.А. Влияние контактного трения при непрерывном равноканальном угловом прессовании // Труды 2-ой международной научно-технической конференции: Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов, Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2007, С.67-71.
- 11. Кучкин В.В., Рыбин В.В., Паршиков Р.А., Рыбин Ю.И. Неравномерность деформации при равноканальном угловом прессовании // «Вопросы материаловедения» (принята к публикации).**