

На правах рукописи



Красновейкин Владимир Алексеевич

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ
ДЕФОРМАЦИИ ЛЕГКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ПРИ
ДИНАМИЧЕСКОМ КАНАЛЬНО-УГЛОВОМ И РАЗНОКАНАЛЬНОМ
ПРЕССОВАНИИ

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», на кафедре механики деформируемого твердого тел.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Скрипняк Владимир Альбертович

Официальные оппоненты:

Вахрушев Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория механики наноструктур, заведующий лабораторией

Киселев Сергей Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория № 6 «Физика многофазных сред», ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь

Защита диссертации состоится 29 декабря 2014 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (корпус № 10).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Автореферат разослан «__» ноября 2014 г.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: http://www.tsu.ru/content/news/announcement_of_the_dissertations_in_the_tsu.php

Ученый секретарь
диссертационного совета



Христенко Юрий Федорович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время одним из актуальных направлений механики деформируемого твердого тела является численное и экспериментальное исследование закономерностей локализации ИПД (Интенсивная Пластическая Деформация - ИПД) при использовании различных схем канального прессования. Это связано в связи с потребностью повышения эффективности и производительности технологий ИПД, а также с необходимостью учета особенностей механического поведения металлов и сплавов, обработанных ИПД с целью формирования их микроструктуры и повышения прочностных и деформативных свойств.

На напряженно-деформированное состояние образца при канальном прессовании влияют выбранные скорость и температура прессования. Изменение этих параметров, а также варьирование формы канала влияет на развитие интенсивной пластической деформации и повреждений. Численное моделирование ИПД легких сплавов позволяет определить закономерности развития пластических деформаций и повреждений.

В диссертации исследуются закономерности ИПД образцов из легких сплавов (ВТ1-0 и Al 1560) при динамическом канальном прессовании. Также в работе проведены экспериментальные исследования структуры и механических свойств магниевого сплава Ма2-1 и алюминиевого сплава Al 1560 до и после обработки с помощью равноканального углового прессования. За счет формирования в материале неоднородной ультрамелкозернистой структуры одновременно повышаются и предельная деформация до разрушения, и предел прочности. Так же впервые получены данные о механических свойствах сплавов Ма2-1 и Al 1560 в ультрамелкозернистом состоянии при испытаниях в широком диапазоне скоростей деформации.

Цель работы состоит в разработке физико-математической модели и метода численного моделирования процессов интенсивной пластической деформации легких металлов и сплавов в широком диапазоне скоростей деформации, а также оценки механических свойств с целью формирования в них ультрамелкозернистой структуры.

Задачи исследования:

1. Разработать физико-математическую модель механического поведения легких сплавов при интенсивной пластической деформации, позволяющую учитывать изменения зеренной и дефектной структуры, поврежденности сплавов в зависимости от температуры и скорости деформации.

2. Разработать новый подход к измельчению зеренной структуры за счет интенсивной пластической деформации при динамическом канальном прессовании.

3. Получить расчетные данные о развитии пластической деформации и повреждений в лёгких сплавах при обработке методами интенсивной пластической деформации с помощью динамического канального прессования по схемам ДКУП и КППФ (канальное прессование через канал переменной формы).

4. Разработать методику моделирования больших пластических деформаций и развития повреждений при высоких скоростях динамического канального прессования.

5. Получить расчетные данные о параметрах процесса деформации сплавов и эволюции их структуры при различных скоростях и температурах прессования.

Методы исследования:

Для получения экспериментальных данных о пределе прочности образцов легких сплавов в состоянии поставки и после ИПД были проведены испытания на сервогидравлическом стенде Instron VHS-40/50-20. Для получения данных о микротвердости материалов применялся метод индентации алмазной пирамиды (Виккерса), реализованный на микротвердомере Duramin 5. Численное решение задач проведено с использованием суперкомпьютера «СКИФ Cyberia» ТГУ с производительностью 22,72 Tflor/s.

Положения, выносимые на защиту:

1. Физико-математическая модель механического поведения легких сплавов при интенсивной пластической деформации, позволяющая учитывать изменения зеренной и дефектной структуры, поврежденности сплавов в зависимости от температуры и скорости деформации.

2. Предложенный и реализованный численно новый подход к измельчению зеренной структуры за счет интенсивной пластической деформации при динамическом канальном прессовании.

3. Расчетные данные о развитии пластической деформации и повреждений в лёгких сплавах при обработке методами интенсивной пластической деформации с помощью динамического канального прессования по схемам ДКУП и КППФ.

4. Методика моделирования больших пластических деформаций и развития повреждений при высоких скоростях динамического канального прессования.

5. Расчетные данные о параметрах процесса деформации сплавов и эволюции их структуры при различных скоростях и температурах

прессования.

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается выбором современных методов и средств моделирования поведения материалов, сходимостью численных результатов при выбранных параметрах пространственно-временной дискретизации, согласием полученных численных результатов с экспериментальными данными.

Научная новизна диссертации состоит в разработке и реализации вычислительных моделей и алгоритмов численного описания механического поведения и напряженно-деформированного состояния лёгких сплавов при интенсивной высокоскоростной пластической деформации.

1. Разработана модель механического поведения легких сплавов в условиях интенсивной пластической деформации, позволяющая учесть влияние на сопротивление деформации и поврежденность материалов изменений структуры в зависимости от температуры и скорости деформации.

2. Получены новые экспериментальные данные об изменении механических свойств и параметров структуры в зависимости от режимов многопроходного равноканального углового прессования магниевого сплава (Mg2-1) и алюминий-магниевого сплава (Al 1560);.

3. Получены новые данные о закономерностях развития интенсивных пластических деформаций в модифицированной схеме ИПД (в Каналах Прессования Переменной Формы - КППФ), обеспечивающий развитие больших пластических деформаций материала и низкий уровень повреждений после обработки;

4. Проведен сравнительный анализ параметров напряженно-деформированного состояния материала и эволюции его зеренной структуры при обработке с помощью схем ДКУП и КППФ.

Практическая значимость.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы для проектирования режимов обработки сплавов методами ДКУП и КППФ, а также прогнозирования механических свойств легких сплавов после обработки методами ИПД.

Результаты были получены в результате выполнения в Национальном исследовательском Томском государственном университете проектов и грантов:

- проект ФЦП Министерства образования и науки РФ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы» (госконтракт №14.740.11.0037 от 1 сентября 2010 г.) «Разработка способов управления эксплуатационными свойствами ГЦК, ОЦК и ГПУ сплавов на базе установления влияния водорода на закономерности локализации

пластической деформации и разрушения при электролитическом насыщении»;

- проект ФЦП Министерства образования и науки РФ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы» (госконтракт № П1506 от 13 мая 2010 г.) «Динамическая прочность легких магниевых сплавов в широком диапазоне скоростей нагружения»;

- проект по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы» на 2009-2010 годы» (регистрационный номер на 2011 г. - 2.1.1/13521) «Изучение процессов деформации и разрушения материалов на иерархических структурных уровнях на основе нового дискретно-континуального подхода»;

- проект РФФИ № 12-02-31682 мол_а на 2012-2013 годы «Влияние структурных факторов на деформирование и разрушение металлов и сплавов при ударно-волновом нагружении»;

- проект ФЦП Министерства образования и науки РФ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы» (соглашение на предоставление гранта № 14.В37.21.0441 от 6 августа 2012 г.) «Механическое поведение легких сплавов в условиях циклического знакопеременного нагружения»;

- проект мол_а Конкурс научных проектов, выполняемых молодыми учеными (Мой первый грант) №14-01-31144 мол_а на 2014-2015 годы «Изучение деформационного поведения конструкционных ультрамелкозернистых магниевых сплавов авиационного назначения в условиях динамического растяжения»

Апробация работы.

Материалы работы докладывались Материалы работы докладывались на II Всероссийской молодежной научной конференции «Современные проблемы математики и механики» (Томск, 12 – 14 октября 2011 г.), на II Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики - 2012» (Томск, 11-13 апреля 2012 г.), на III Всероссийской молодежной научной конференции «Современные проблемы математики и механики» (Томск, 23-25 апреля 2012 г.), на IX Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск, 23-25 апреля 2012 г.), на Международной молодежной конференции «Современные методы механики» (Томск, 19–20 сентября, 2012 г.), на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», (Новосибирск, 29 ноября – 2 декабря 2012 г.), на II Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием «Высокие технологии в

современной науке и технике» (Томск, 27-29 марта 2013 г.), на восьмой всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 23-25 апреля 2013 г.), на III Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике» (Томск, 26-28 марта 2014 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации представлены в 19 печатных работах и 6 отчетах о НИР. Печатные работы опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования исследований по теме диссертации (из них: «Известия вузов. Физика» - 2, «Современные проблемы науки и образования» - 1, и 16 статей в материалах вышеперечисленных конференций. Общий объем публикаций автора – 2.96 п.л., личный вклад автора – 0.81 п.л.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников из 188 наименований. Объем диссертации составляет 117 страниц, в том числе 56 рисунков и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор по методам численного моделирования интенсивной пластической деформации металлов и сплавов. Показано, что существующие методики, основанные на сеточных методах, имеют ряд недостатков и ограничений. Также в данной главе обозреваются методики, основанные на бессеточном методе сглаженных частиц (SPH), и его модификаций. Обзор показал недостаток адекватных математических моделей для ИПД.

Во второй главе представлена общая физико-математическая постановка задачи об интенсивной пластической деформации тел при динамическом канальном прессовании, а так же результаты моделирования ИПД для двух схем динамического прессования – канально-углового и в каналах переменной формы (КППФ).

Моделирование процесса интенсивной пластической деформации в рассмотренных схемах осуществлялось с использованием метода сглаженных частиц (SPH).

Механическое поведение материала описывается в лагранжевой постановке системой уравнений, включающей уравнения сохранения массы,

импульса и энергии, нелинейное определяющее уравнение, эволюционные уравнения для параметров модели, учитывающих структуру и возникновение микроповреждений – пор и микротрещин:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla_i v_i = 0, \quad \rho \frac{dv_i}{dt} = \nabla_j \sigma_{ij}, \quad \rho \frac{dE}{dt} = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij},$$

где ρ , v_j , σ_{ij} , ε_{ij} , E - массовая плотность, компоненты вектора скорости материальных частиц, компоненты тензора напряжения, компоненты тензора скорости деформации, удельная внутренняя энергия, соответственно.

Кинематические соотношения:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i)$$

Определяющее уравнение удобно использовать в виде соотношений для давления p и девиатора тензора напряжений S_{ij} :

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + S_{ij},$$

где p – давление, S_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжения, δ_{ij} – символ Кронеккера.

Для расчета давления использовалось уравнение состояния в форме Ми-Грюнайзена:

$$p = p_x + p_T; \quad p_T = \gamma E_T,$$

где γ – коэффициент Грюнайзена, E_T – тепловая составляющая удельной внутренней энергии.

$$p_x = k_0 \theta + k_1 \theta^2 + k_2 \theta^3 + (B_0 + B_1 \theta) \rho_0 E,$$

где ρ_0 – начальная плотность, k_0 , k_1 , k_2 , B_0 , B_1 – константы материала, $\theta = 1 - \rho_0/\rho$.

$$dS_{ij} / dt = 2\mu(\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^p),$$

где μ – модуль сдвига, d/dt – производная Яуманна, $\dot{\varepsilon}_{ij}$, $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ – компоненты девиатора тензора скорости деформаций и девиатора тензора скорости неупругих деформаций, соответственно.

Влияние микроповреждений на компоненты тензора напряжений учитывалось в линейном приближении

$$p = (1 - D)[p]_c, \quad S_{ij} = (1 - D)[S_{ij}]_c,$$

где $[p]_c$ – давление, действующее в конденсированной фазе повреждаемого материала, $[S_{ij}]_c$ – девиатор тензора напряжений, действующего в конденсированной фазе, D – параметр повреждения.

Образование повреждений материала описывается в рамках подхода механики сред с повреждениями [1]. Относительный объём повреждений определяется [1] как:

$$D = \int_0^t (\dot{\varepsilon}_{eq}^p / \varepsilon_f) dt,$$

где ε_f - предельная эквивалентная пластическая деформация до макроскопического разрушения:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{f0} \left(1 + k_f \frac{p}{p_f} \right),$$

где ε_{f0} - величина пластической деформации, при которой начинается зарождение повреждений при отсутствии сжимающего давления, k_f , p_f – постоянные материала, p – давление.

Критерий локального разрушения принимался в виде: $D = 1$

Предполагалось, что до начала деформирования материал не имеет повреждений. Степень поврежденности материала определяется относительным объемом повреждений D , который определяется для дискретных моментов времени t_k .

С увеличением степени поврежденности эффективные макроскопические напряжения уменьшаются. В предельном случае, при $D=1$ материал считается локально разрушенным и компоненты тензора эффективных макроскопических напряжений приближаются к нулю.

Построение поверхности текучести f осуществляется с использованием функции $\sigma_s = \sigma_s(dg, T, \dot{\varepsilon}_{eq}^p, \varepsilon_{eq}^p)$:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p, \quad f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0, \quad d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}},$$

где

$$g = \alpha_1 J_1 + J_2^{1/2} - \sigma_s, \quad J_1, J_2 - \text{первый и второй инвариант тензора напряжений,}$$

α_1 - коэффициент, σ_s - предел текучести, g – пластический потенциал, λ - определяемый в процессе деформации множитель, равный нулю в упругой области, T - температура, $\sigma_{eq} = [(3/2) S_{ij} S_{ij}]^{1/2}$.

В частном случае, при малых α_1 :

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{3 S_{ij}}{2 \sigma_{eq}} \dot{\varepsilon}_{eq}^p, \quad \dot{\varepsilon}_{eq}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p}.$$

Для описания у ВТ1-0 зависимости напряжения течения от среднего размера субзерна, скорости деформации, степени пластической деформации, температуры применялась модель [2]:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + C_5(\varepsilon_{eq}^p)^{n_1} + C_6 d_g^{-1/2} + C_2 \exp\{-C_3 T + C_4 T \ln(\dot{\varepsilon}_{eq} / \dot{\varepsilon}_{eq0})\}$$

где d_g – средний размер зерна; σ_{s0} , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , C_6 – постоянные материала,

$$\dot{\varepsilon}_{eq0} = 1,0 \text{ с}^{-1}, \quad \varepsilon_{eq}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \right) \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p{}^{1/2} dt.$$

Использованы следующие значения параметров модели для альфа титана: σ_{s0} и C_6 – параметр и коэффициент из закона Холла-Петча, $C_2 = 1,1$ ГПа, $C_3 = 2,4 \cdot 10^{-3}$, $C_4 = 1,7 \cdot 10^{-4}$, $C_5 = 300$ МПа, $n = 0,5$.

Значения параметров модели для сплава Ма2-1: $C_2 = 1,173$ ГПа, $C_3 = 4,239 \cdot 10^{-3}$, $C_4 = 8,764 \cdot 10^{-5}$, $C_5 = 361$ МПа, $n = 0,962$.

Для описания у Al 1560 зависимости напряжения течения от среднего размера субзерна, скорости деформации, степени пластической деформации, температуры применялась модель:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + C_6 d_g^{-1/2} + C_2 (\varepsilon_{eq}^p)^n \exp\{-C_3 T + C_4 T \ln(\dot{\varepsilon}_{eq} / \dot{\varepsilon}_{eq0})\}$$

Значения параметров модели для сплава Al 1560: $C_2 = 960$ МПа, $C_3 = 1,85 \cdot 10^{-3}$, $C_4 = 8 \cdot 10^{-5}$, $n = 0,26$.

Изменение средних размеров субзерен d_g от величины кумулятивной пластической деформации, учитывалось согласно Г. Севилано [3]:

$$\frac{d}{d\varepsilon_{eq}^p} d_g = \frac{\delta_r}{\delta_s} (d_g^2 - d_g \delta_s)$$

где d_g – средний размер зерна, $\delta_r(\dot{\varepsilon}_{eq}^p, T)$ – текущий средний размер субзерен в процессе интенсивной пластической деформации, $\delta_s(T)$ – предельный равновесный размер дислокационной ячеистой субструктуры или субзеренной структуры.

В рамках модели термоактивационного процесса формирования равновесной структуры субзерен для вычисления $\delta_r(\dot{\varepsilon}_{eq}^p, T)$ и $\delta_s(T)$ использованы эволюционные соотношения [4] А. Молинари:

$$\frac{\delta_r}{\delta_{r0}} = [1 - (k_r \frac{T}{T_{r0}} \log(\frac{\dot{\varepsilon}_{r0}}{\dot{\varepsilon}_{eq}^p}))^{m_r}]^{n_r}, \quad \frac{\delta_s}{\delta_{s0}} = [1 - (k_s \frac{T}{T_{s0}} \log(\frac{\dot{\varepsilon}_{s0}}{\dot{\varepsilon}_{eq}^p}))^{m_s}]^{n_s}$$

где k_r , k_s , m_r , n_r , n_s , – параметры материала, отражающие закономерности процесса измельчения зеренной структуры.

Изменение температуры при пластическом течении определялось [1] в приближении:

$$T = T_0 + \frac{0,9}{C_p} \int_0^t \left| \sigma_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p \right| dt$$

Поставленные в работе задачи моделирования решались с помощью метода SPH.

В методе SPH, основные шаги, используемые в каждом цикла расчета в AUTODYN-2D & 3D, показаны на рисунке 1. Цикл расчета аналогичен циклу для лагранжеевых сеточных методов, кроме этапов, где используется ядерная аппроксимация.



Рисунок 1 – Вычислительный цикл метода SPH

Ядерные аппроксимации используются для вычисления сил из пространственных производных напряжений и скорости, необходимых для нахождения скорости деформации. Кроме того, метод SPH требует сортировки частиц по крайней мере один раз за цикл, для того чтобы найти текущие соседние частицы [5].

Расчеты проводились на персональном компьютере и на суперкомпьютере «SKIF - CYBERIA» Томского государственного университета.

Представлены результаты тестирования методики и программы для расчета распространения ИПД при динамическом канально-угловом и разноканальном прессовании с помощью КППФ.

Задача о динамическом равноканальном угловом прессовании титана. Рассматривается задача о деформации блока с размерами 4x4x10 мм из альфа титана при его движении по пересекающимся под прямым углом каналам матрицы одинакового сечения 4x4 мм со скоростями до 100 м/с.

Моделируется движение блока с постоянной скоростью, зависящей от скорости перемещения верхней торцевой грани под действием поршня. Скорость образца поддерживается постоянной во время всего процесса прессования. На контактных поверхностях между блоком и внутренними поверхностями каналов матрицы реализованы условия идеального скольжения.

Распределение кумулятивной пластической деформации в титановом образце после прохождения через зону сопряжения каналов неоднородно, см. рисунок 2 а. Это обусловлено процессами релаксации сдвиговых напряжений при развитии локализованных на макрокопическом уровне пластических сдвигов в зоне сопряжения каналов.

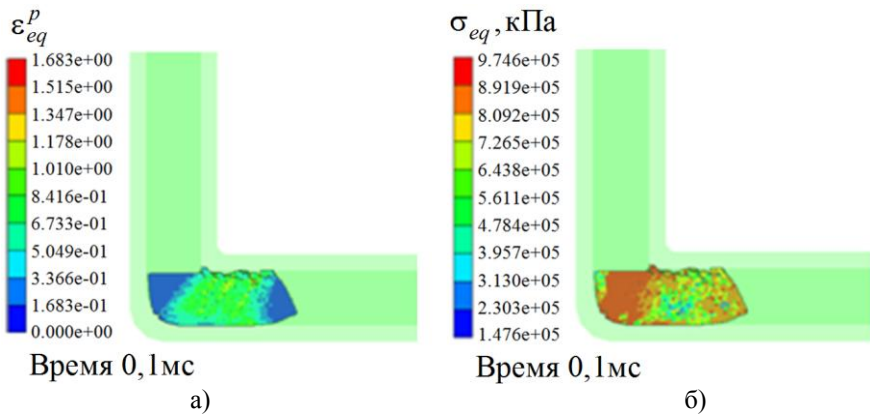


Рисунок 2 – Эквивалентная пластическая деформация (а) и интенсивность напряжений (б) в сечении прессуемых объемов сплава

В областях образца, прошедших через область сопряжения каналов, сдвиговые напряжения снизились до уровня предела текучести и скорость пластических деформаций уменьшается, см. рисунок 2 б. Видно незначительное повышение напряжения в левой части образца в момент, когда образец полностью завершил прохождение через область сопряжения каналов. Это связано с действием давления от поршня, идущего из вертикальной части канала пресс-формы.

Результаты моделирования релаксационных процессов при высокоскоростном прохождении блока через область сопряжения каналов объясняют особенности развития пластической деформации в образце. Наибольшая степень пластической деформации достигается в средней части блока, в то время как передняя и концевая части практически испытывают существенно меньшие пластические деформации. В результате измельчение зеренной структуры материала в деформированном блоке происходит преимущественно в средней части образца.

Задача о динамическом прессовании титана через канал с сечением переменной формы (КППФ).

Для получения более равномерного развития в объеме блока пластических деформаций и, связанных с ней структурных превращений, могут быть использованы схемы прессования с противодавлением, а также прессование через канал переменной формы, см. рисунок 3 а, б, в.

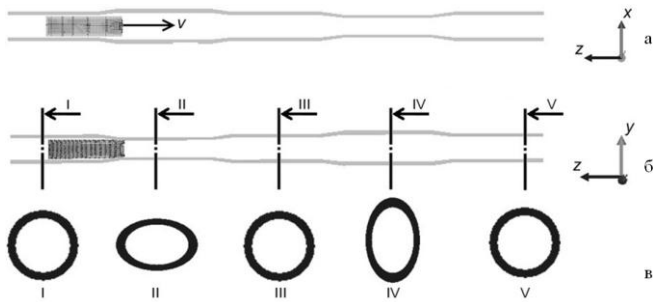


Рисунок 3 – Схема прессования через канал переменной формы

Моделирование КППФ со скоростью до 100 м/с через каналы эллиптического сечения с изменяющейся ориентацией осей вдоль канала показало, что в отличие от улучшенной схемы ДКУП с противодавлением, деформация образца происходит во всем объеме. Применение указанной схемы КППФ позволяет избежать необходимости проектирования, создания и настройки сложной системы противодавления. В указанной схеме за счет более равномерного в объеме развития пластических деформаций измельчение зеренной структуры происходит более однородно в объеме тела. Характер развития пластических деформаций и интенсивности напряжений в сечении тела показан на рисунках 4 и 5.

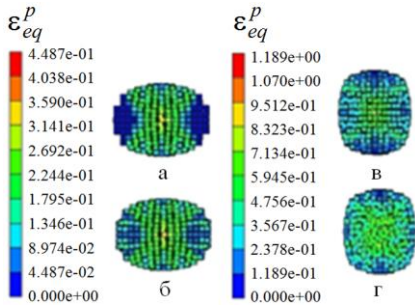


Рисунок 4 – Поля интенсивности пластических деформаций

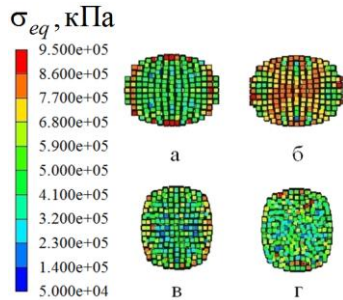


Рисунок 5 – Поля интенсивности напряжений

С 1 по 3 проходы можно локальным сечением тела, проходящим через эллиптическую область канала прессования выделить две крестообразно пересекающиеся макроскопические полосы сдвига в образце, в которых материал деформировался наиболее интенсивно. В остальном объеме материала развиваются существенно меньшие пластические деформации.

Далее, по мере продвижения образца по каналу пресс-формы, распределение пластической деформации по образцу меняется, и становится более однородным, см. рисунок 4 г (4 проход). Максимальные пластические деформации достигаются в центральной части образца, а наименьшие - в зоне, прилегающей к поверхности.

По мере прохождения образца по каналу пресс-формы при последнем 4 проходе напряжения распределяются практически равномерно, см. рисунок 5. С прохождением образца по каналу по схеме КППФ картина полей интенсивности напряжений меняется. В середине поперечного сечения во всем объеме образца при 1-2 проходах развивается зона, в которой интенсивность напряжений минимальна. По-видимому, это связано с недостаточным обжатием образца при прохождении переходных зон между секциями пресс-формы.

Для сплава Al 1560 характер распределения полей интенсивности напряжений и пластических деформаций аналогичен полученным у ВТ1-0. *Задача о влиянии скорости и температуры прессования на локализацию деформации в Al 1560 при использовании различных схем прессования.*

Использовались следующие параметры геометрии канала пресс-формы КППФ, см. таблице 1:

Таблица 1 – Параметры профилей каналов пресс-формы:

№ п/п	Диаметр цилиндрической части, мм	Длина большой полуоси эллипса, мм	Длина малой полуоси эллипса, мм	Длина переходной части, мм
1	10	6,25	4	20
2	10	10	2,5	20
3	10	25	1	20

Выбранные параметры профилей каналов пресс-формы обеспечивают деформацию образца в 20, 50 и 80 % вдоль малой полуоси эллипса соответственно.

Размеры цилиндрического образца: длина – 40 мм, диаметр – 10 мм. В настоящей работе использовались следующие режимы прессования, см. таблицу 2:

Таблица 2 - Режимы прессования

№ п/п	Скорость прессования, м/с	Температура прессования, К
1	100	300
2	200	300
3	300	300
		473
4	400	300
5	500	300
		473

В модели прессование производилось при скоростях 100, 200, 300, 400, 500 м/с соответственно, при температуре 300 К для 1 пресс-формы № 1.

На рисунке 6 видно, что с ростом скорости прохождения образца через канал пресс-формы меняется и характер полей интенсивности пластических деформаций. Если при скоростях 100-300 м/с пластическая деформация наиболее интенсивно проходит лишь в двух ограниченных зонах, и выглядит в виде двух полос, пересекающихся под углом, то с увеличением скорости до 400-500 м/с образец деформируется более равномерно. При этом вместо двух взаимопересекающихся локализованных полос деформации в образце можно выделить 3 зоны с различной степенью деформации порядка 67, 30, 20 и 90, 41, 25 % соответственно. При этом

картина полей напряжений практически не меняется, и наиболее нагруженными во всем выбранном скоростном интервале остаются верхние слои материала образца, и наименее – внутренняя часть образца.

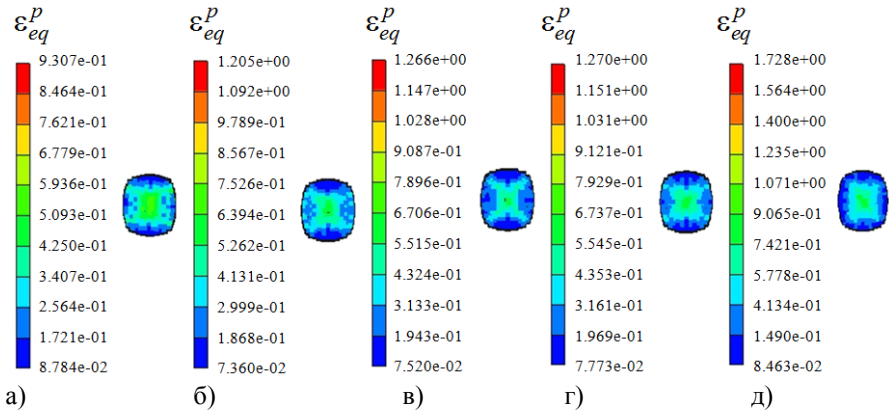


Рисунок 6 - Поля пластической деформации при скоростях 100 м/с (а), 200 м/с (б), 300 м/с (в), 400 м/с (г), 500 м/с (д)

При этом картина полей напряжений практически не меняется, и наиболее нагруженными во всем выбранном скоростном интервале остаются верхние слои материала образца, и наименее – внутренняя часть образца. В процессе ИПД образец разогревается до температур порядка 433–473 К. При этом с ростом скорости интенсивность нагрева возрастает, а равномерность уменьшается. Так, при скорости 300 м/с наибольший рост температуры произошел в полосах локализации пластической деформации, при этом разогрев остального объема материала образца значительно меньший. Следует отметить, что при всех выбранных скоростях материал образца наиболее интенсивно нагревается во внутренних областях (до 450 К), в то время как внешние слои материала нагреваются не столь значительно (до 340–350 К). Были построены эпюры пластической деформации материала образца вдоль осей X и Y для 1, 2, 3 и 4-ого проходов. На рисунки 7, 8 представлены данные для 1 и 4 прохода.

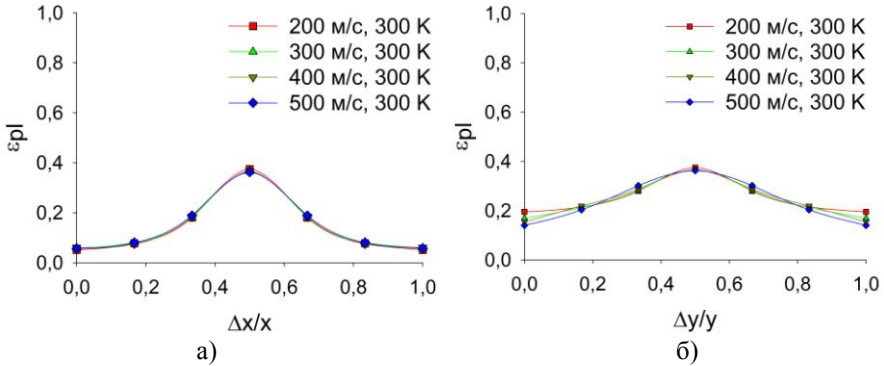


Рисунок 7 – Эпюры пластической деформации вдоль осей X (а) и Y (б) после ИПД образца по схеме КППФ, 1 проход

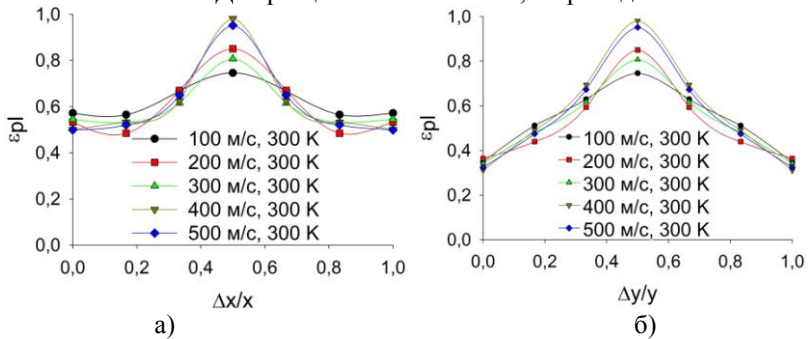


Рисунок 8 – Эпюры пластической деформации вдоль осей X (а) и Y (б) после ИПД образца по схеме КППФ, 4 проход

Видно, что по мере продвижения образца по каналу пресс-формы уровни накопленной пластической деформации для разных скоростных режимов деформирования все больше и больше отличаются друг от друга. При этом наибольшие пластические деформации наблюдаются во внутренней части образца (от 40 до 100 %), в то время как внешние слои претерпели меньшие пластические деформации (до 40 %).

Были построены эпюры скоростей пластической деформации материала образца вдоль осей X и Y для скоростей 200, 300, 400, 500 м/с. На рисунках 9, 10 представлены данные для скоростей прессования 200 и 500 м/с соответственно.

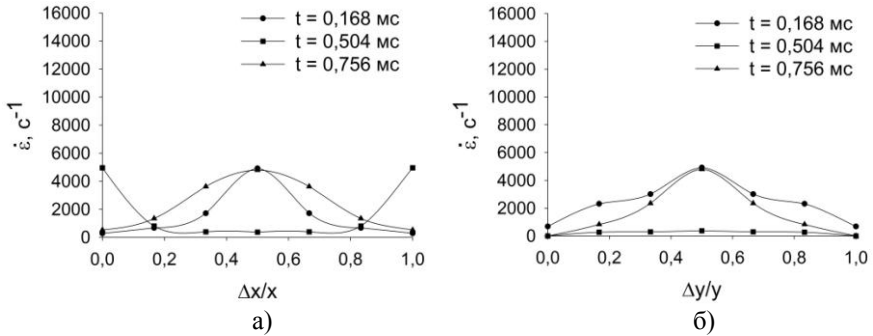


Рисунок 9 – Эпюры скоростей пластической деформации вдоль осей X (а) и Y (б) после ИПД образца по схеме КППФ со скоростью 200 м/с

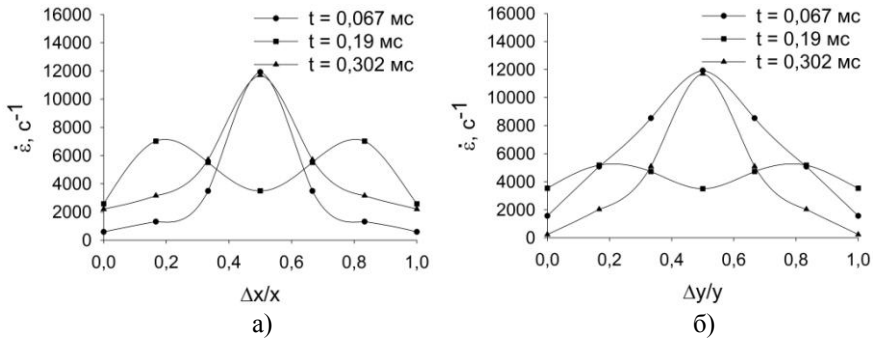


Рисунок 10 – Эпюры скоростей пластической деформации вдоль осей X (а) и Y (б) после ИПД образца по схеме КППФ со скоростью 500 м/с

Видно, что по мере продвижения образца по каналам пресс-формы наибольшие скорости деформации реализуются в центре поперечных сечений образца, в то время как внешние слои материала деформируются с существенно меньшими скоростями. При этом до скорости прохождения 300 м/с в образце реализуются сравнимые уровни скорости деформации 2000-4000 с^{-1} , в то время как при 400 и 500 м/с наблюдается значительный рост скорости деформации до 8000-10000 с^{-1} , а в центре образца вплоть до 12000-14000 с^{-1} .

Вышеприведенные результаты были получены при условии поддержки постоянства движения образца по каналам пресс-формы, за счет подпора его задней концевой части. Но в реальности поддержание скорости образца может оказаться трудновыполнимой задачей, что потребовало

проведения расчетов, где образец двигался бы по инерции. Результаты расчетов приведены ниже в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты моделирования прессования КППФ сплава Al 1560

№ п/п	Скорость прессования, м/с	Температура прессования, К	Вариант пресс-формы	Результат
1	100	300	1	Образец целый, отскок
2	200	300	1	Разрыв образца
		473	1	Образец разрушен
3	300	300	1	Разрыв образца
		473	1	Разрыв образца
		473	2	Образец разрушен
		473	3	Образец расплюснен

Видно, что прохождение образца по каналам пресс-формы только лишь за счет его инерции при выбранной геометрии и режимах не представляется возможным в виду сложного неоднородного НДС материала образца, особенности которого приводят либо к преждевременному отскоку, либо разрушению образца.

В третьей главе представлены структура и механические свойства образцов из легких конструкционных сплавов после равноканального углового прессования, проведены измерения микротвердости образцов до и после прессования, а так же испытания на растяжение и сжатие.

Структура и механические свойства Ma2-1 до и после РКУП. В состоянии поставки исследуемый магниевый сплав Ma2-1 обладает распределением размеров зерен от 2 до 55 мкм в объеме образца (средний размер зерна 18 мкм), которое было сформировано в процессе проката. После равноканального углового прессования (РКУП) при выбранных режимах формируется более однородная УМЗ структура во всем объеме образца. Средний размер зерна 7 мкм. Вместе с тем, в сплаве после РКУП отмечены отдельные зерна с размерами ~ 15-30 мкм, которые не претерпели измельчения.

Как показывают результаты измерений, произошло изменение величины микротвердости практически в два раза. Стоит отметить, что в носовой части образцов изменение микротвердости наиболее велико, в отличие от хвостовой части. И микротвердость в центральной части образца

однородна, так же как и в поперечном направлении, см. рисунок 11.

Согласно рисунку 12, четырех проходное угловое прессование сплава Ма2-1 сопровождается одновременным увеличением статического предела текучести в нормальных условиях до $\sim 35\%$, временного сопротивления до $\sim 20\%$, а предельной степени деформации до разрушения до 30% .

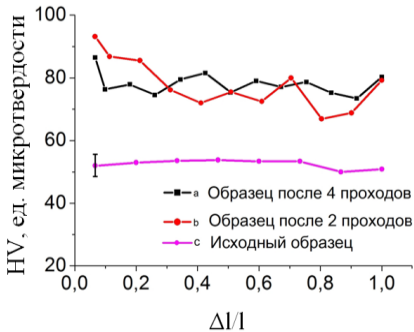


Рисунок 11 – Значение микротвердости образцов от относительной координаты в продольном направлении

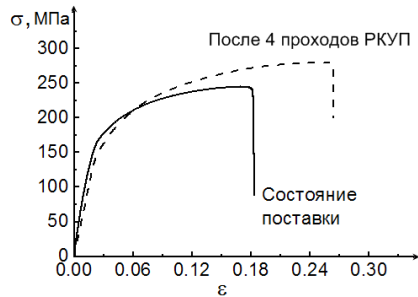


Рисунок 12 – Диаграммы напряжение – деформация сплава Ма2-1 при квазистатическом растяжении

Структура и механические свойства Al 1560 до и после РКУП.

Исследования зеренной структуры образцов показали, что в состоянии поставки исследуемый алюминиевый сплав Al 1560 обладает распределением размеров зерен от 2 до 35 мкм. После 4 проходов РКУП при подобранных оптимальных режимах в объеме блока формируется более однородная УМЗ структура. Средний размер зерна 2,2 мкм. Вместе с тем, в сплаве после РКУП отмечены отдельные зерна с размерами $\sim 15-20$ мкм, которые не претерпели измельчения.

Полученные данные, свидетельствуют о том, что в результате РКУП происходит увеличение микротвердости во всем объеме блоков, см. рисунок 13. После 4 проходов увеличение микротвердости составляет в среднем 40% , а максимальная величина микротвердости достигает ~ 1550 МПа. В головной части образцов микротвердость несколько ниже (на 10 и 4 % для 2 и 4 проходов соответственно) по сравнению со средней величиной. Отклонение микротвердости от средних значений в центральной части образца вдоль оси, не превышает 10 %. Эти данные подтверждают, что ИПД обеспечивает повышение прочностных характеристик сплава Al 1560 в объеме блоков.

Относительное различие микротвердости после двух и четырех проходов не превышает 15 %. Максимальное упрочнение сплава Al 1560 относительно исходного крупнокристаллического состояния достигается после четырех проходов РКУП.

Таким образом, двух проходов ортогонального РКУП с выбранными параметрами прессования достаточно для формирования мелкозернистой структуры сплава Al 1560, обеспечивающей повышение прочностных характеристик.

Четырех проходное угловое прессование сплава Al 1560 при 250 °С приводит к увеличению предельной степени деформации в 1,5 раза с одновременным увеличением напряжений течения и величины временного сопротивления на 20 %, см. рисунок 14.

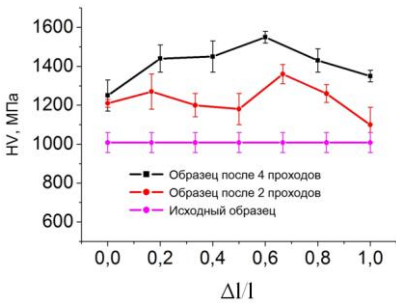


Рисунок 13 – Значение микротвердости образцов от относительной координаты в продольном направлении

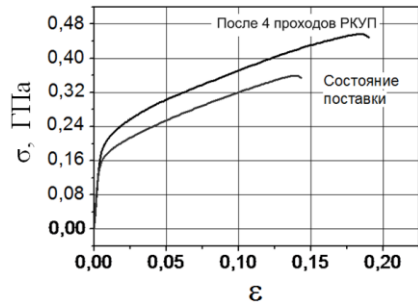


Рисунок 14 – Диаграммы напряжение – деформация сплава Al 1560 при квазистатическом растяжении

Вместе с тем, обнаружено, что в результате РКУП, сплав Al 1560 приобретает выраженную асимметрию прочностных характеристик (значений условного предела текучести и временного сопротивления разрушению) при растяжении и сжатии. Отметим, что асимметрия прочностных характеристик не является характерным для данного сплава в крупнокристаллическом состоянии.

Повышение условного предела текучести и временного сопротивления разрушению при сжатии Al 1560 в результате 4 проходов РКУП составило ~ 10 %.

Многoproходное ортогональное РКУ-прессование сплава Al 1560 позволяет после 4 проходов формировать в объеме блоков структуру со средним размером зерна 2,2 мкм и одномодальным распределением зерен по

размерам в диапазоне от 1,5 до 4,5 мкм.

Формирование мелкозернистой структуры сплава Al 1560, обеспечивающей повышение микротвердости, условного предела текучести, временного сопротивления разрушению, достигается после 2 проходов ортогонального РКУП при температуре 200 °С.

Следует отметить, что после 2 проходов ортогонального РКУП имеется относительно широкое распределение размеров зерен в объеме.

В результате РКУП, сплав Al 1560 приобретает существенную асимметрию значений прочностных характеристик (условного предела текучести и временного сопротивления разрушению) при растяжении и сжатии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессы деформации и разрушения легких сплавов, обработанными методами интенсивной пластической деформации, исследованы в широком диапазоне скоростей деформации с применением экспериментальных методик и численного моделирования. На основании результатов исследований, проведенных на алюминиевых, магниевых и титановых сплавах, получены следующие основные результаты и выводы:

1. Разработана физико-математическая модель, позволяющая описывать закономерности пластической деформации и поврежденности (ГЦК ГПУ) легких сплавов при интенсивной пластической деформации, в расширенном диапазоне скоростей деформации и температуры, с учетом изменения размеров зерен и накопления повреждений структуры.

2. Впервые исследованы закономерности деформационного упрочнения и повреждения легких сплавов при динамическом прессовании по новой схеме прессования, использующей канал эллиптического сечения с переменной ориентацией осей. Показано, что новая схема прессования, с применением каналов эллиптического сечения обеспечивает интенсивную пластическую деформацию тела и может быть применена для производства мелкозернистых и ультрамелкозернистых легких сплавов.

3. Исследованы закономерности пластической деформации и повреждений в объеме прессуемого тела при канальном прессовании в диапазоне скоростей деформации от 200 до 15000 с-1 и диапазоне температуры от 300 К до 473 К, использовании различных схем углового и осевого прессования. Определены рациональные формы и параметры каналов в пресс-формах, а также режимы прессования, обеспечивающие получение однородной пластической деформации в объеме прессуемого тела.

4. Получены новые данные о влиянии распределения зерен по размерам на механические характеристики легких сплавов Al 1560 и Ma2-1, после канального прессования по схемам ортогонального равноканального углового прессования в условиях квазистатического и динамического нагружения. Показано, что четырех проходное угловое прессование сплава Al 1560 при 250 °С приводит к увеличению предельной степени деформации в 1,5 раза с одновременным увеличением напряжения течения и величины временного сопротивления на 20 %. Показано, что четырех проходное угловое прессование сплава Ma2-1 сопровождается одновременным увеличением статического предела текучести в нормальных условиях до ~ 35 %, временного сопротивления до ~20 %, а предельной степени деформации до разрушения до 30 %.

5. Разработана методика моделирования больших пластических деформаций и развития повреждений при высоких скоростях динамического канального прессования легких сплавов в широком диапазоне скоростей с использованием метода сглаженных частиц (SPH). Применение методики позволило описывать закономерности развития интенсивной пластической деформации.

Список трудов по теме диссертационного исследования:

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. **Красновейкин В.А.**, Скрипняк В.А., Козулин А.А. Численное моделирование процессов интенсивной пластической деформации тел при динамическом канальном прессовании // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 9-3. – С. 67-71. – 0,3 / 0,1 п.л.

2. Козулин А.А., **Красновейкин В.А.**, Скрипняк В.В., Хандаев Б.В., Ли Ю.В. Механические свойства алюминий магниевых сплавов после интенсивной пластической деформации [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 888-895. – 0,35 / 0,07 п.л.

3. Козулин А.А., Скрипняк В.А., **Красновейкин В.А.**, Скрипняк В.В. Каравацкий А.К. Исследование физико-механических свойств ультрамелкозернистых магниевых сплавов после интенсивной пластической деформации // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57, № 9. – С. 98-104. – 0,44 / 0,09 п.л.

Публикации в других научных изданиях:

4. **Красновейкин В.А.**, Козулин А.А., Скрипняк В.А. Постановка задачи и моделирование процесса интенсивной пластической деформации сплавов с учетом структуры и повреждений материала // Труды Томского государственного университета. Т 282. – Серия физико-математическая. Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики: материалы II Всероссийской Молодёжной научной конференции, посвященной 50-летию физико-технического факультета Томского государственного университета. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. – С. 35-38. – 0,18 / 0,06 п.л.

5. **Красновейкин В.А.**, Сухоярский М.А., Козулин А.А. Компьютерное моделирование закономерностей интенсивной пластической деформации титанового сплава при динамическом канальном прессовании // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – Ч. 4. – С. 188-191. – 0,19 / 0,06 п.л.

6. **Красновейкин В.А.**, Скрипняк В.В., Сухоярский М.А. Численное исследование деформационного поведения титана при динамическом канальном прессовании // Современные методы механики: материалы Международной конференции (19-20 сентября 2012 г.). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. – С. 54-56. – 0,12 / 0,04 п.л.

7. **Красновейкин В.А.**, Козулин А.А., Скрипняк Н.В., Скрипняк В.А. Моделирование процесса интенсивной пластической деформации сплавов // Доклады IX Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии». – Новосибирск: Параллель 2012. – С. 149-152. – 0,16 / 0,04 п.л.

8. **Красновейкин В.А.**, Скрипняк В.В., Сухоярский М.А. Моделирование деформационного поведения сплавов при интенсивной пластической деформации // Материалы международной молодежной конференции «Современные проблемы прикладной математики и информатики» в рамках фестиваля науки. Томск, 19–21 сентября, 2012 г. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. – С. 78-80. – 0,13 / 0,04 п.л.

9. **Красновейкин В.А.**, Козулин А.А., Скрипняк В.А. Учет структуры и микрповреждений сплавов при моделировании интенсивной пластической деформации // Материалы докладов III Всероссийской молодежной научной конференции «Современные проблемы математики и механики». – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. – С. 145-148. – 0,15 / 0,05 п.л.

10. **Красновейкин В.А.**, Козулин А.А., Скрипняк Н.В., Скрипняк В.А. Моделирование деформационного поведения сплавов при канальном прессовании // Материалы 50-й юбилейной международной научной

студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс». – Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2012. – С. 50. – 0,08 / 0,02 п.л.

11. **Красновейкин В.А.**, Колузин А.А., Скрипняк Н.В., Скрипняк В.А. Численное исследование процессов интенсивной пластической деформации сплавов при динамических нагрузках // 52-я Международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности»: сборник тезисов докладов (4-8 июня 2012 года, г.Уфа, Россия). – Уфа: РИЦ БашГУ, 2012. – С. 169. – 0,08 / 0,02 п.л.

12. **Красновейкин В.А.**, Козулин А.А., Скрипняк Н.В. Постановка задачи о моделировании интенсивной пластической деформации в легких сплавах при канальном прессовании // Научные труды XXXVIII международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения»: в 3 т. – М.: МАТИ, 2012. – Т. 1. – С. 168-169. – 0,07 / 0,02 п.л.

13. Скрипняк Н.В., Скрипняк В.А., Скрипняк Е.Г., Жармухамбетова А.М., Козулин А.А., Кульков С.С., **Красновейкин В.А.** Механическое поведение ультрамелкозернистых легких сплавов при динамическом нагружении // XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь, 18-22 апреля 2013 г.: тезисы докладов. – Пермь – Екатеринбург, 2013. – С. 312. – 0,07 / 0,01 п.л.

14. Козулин А.А., Скрипняк В.А., Скрипняк Е.Г., **Красновейкин В.А.** Влияние структуры легких сплавов на малоцикловую прочность // Международная конференция XV Харитоновские тематические научные чтения. 18-22 марта 2013 г.: сборник тезисов докладов. – Саров: ФГУП «РФЯЙ-ВНИИЭФ», 2013. – С. 234-235. – 0,08 / 0,02 п.л.

15. **Красновейкин В.А.**, Козулин А.А., Скрипняк В.А. Компьютерное моделирование деформационного поведения образцов титанового сплава при динамическом канальном прессовании // Сборник научных трудов II Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием «Высокие технологии в современной науке и технике». 27-29 марта 2013 г.: в 2 т. – Томск, 2013. – Т. 2. – С. 384-386. – 0,13 / 0,04 п.л.

16. **Красновейкин В.А.**, Козулин А.А., Скрипняк В.А. Компьютерное моделирование процесса деформации блоков титановых сплавов при динамическом канальном прессовании // Материалы XVIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013), 22-31 мая 2013 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2013. – С. 385-386. – 0,11 / 0,04 п.л.

17. Козулин А.А., Скрипняк В.А., **Красновейкин В.А.** Моделирование деформации и разрушения легких листовых сплавов при

динамической глубокой вытяжке // Материалы XVIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013), 22-31 мая 2013 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2013. – С. 728-730. – 0,13 / 0,04 п.л.

18. **Красновейкин В.А.**, Козулин А.А., Скрипняк В.А. Моделирование интенсивной пластической деформации сплавов при динамическом канальном прессовании // Сборник тезисов докладов на II Всероссийской молодежной конференции «Успехи химической физики». Черногловка, 19–24 мая 2013 г. – М.: Издательская группа «Граница», 2013. – С. 209. – 0,09 / 0,03 п.л.

19. Гаркушин Г.В., Савиных А.С., **Красновейкин В.А.**, Канель Г.И., Разоренов С.В. Влияние структурных факторов на деформирование и разрушение металлов и сплавов при ударно-волновом нагружении // Сборник тезисов докладов на Всероссийской конференции «Взрыв в физическом эксперименте». Новосибирск, 16-20 сентября 2013 г. – Новосибирск: ИГИЛ, 2013. – С. 135-136. – 0,1 / 0,02 п.л.

Список литературы:

1. Скрипняк Е.Г., Скрипняк Н.В., Козулин А.А., Скрипняк В.А. Моделирование влияния наноструктурированного поверхностного слоя на механическое поведение алюминиевых и магниевых сплавов при динамических воздействиях // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2010. - Т. 53. - № 12-2. - С. 235-242.
2. Красновейкин В.А., Скрипняк В.А., Козулин А.А. Численное моделирование процессов интенсивной пластической деформации тел при динамическом канальном прессовании // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2012. - Т. 55. - №9-3. - С. 67-71.
3. Jon Alkorta, Marleen Rombouts, Joke De Messemaeker, Ludo Froyen, Javier Gil Sevillano On the impossibility of multi-pass equal-channel angular drawing // Scripta Materialia. - 2002. - V. 47. - Issue: 1. - P. 13-18.
4. Molinari A., Ravichandran G. Constitutive modeling of high-strain-rate deformation in metals based on the evolution of an effective microstructural length // Mechanics of materials. - 2005. - V. 37. - Issue: 7. - P. 737-752.
5. SPH Method. // SPH User Manual & Tutorial. - Century Dynamics Inc., 2005. - P. 6-9.

Отпечатано с оригинал-макета в ООП ТГАСУ
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.
Заказ № 729 от «29» октября 2014 г. Тираж 100 экз.

