На правах рукописи

Пахнутова Надежда Владимировна

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ УДАРА ПО НЕДЕФОРМИРУЕМОЙ ПРЕГРАДЕ И ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Томском научном центре Сибирского отделения Российской академии наук, Акционерном обществе «Научно-производственный центр «Полюс».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Зелепугин Сергей Алексеевич

Официальные оппоненты:

Пономарев Сергей Васильевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», отдел механики деформируемого твердого тела, заведующий отделом

Ломунов Андрей Кириллович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», научно-исследовательская лаборатория проблем прочности, динамики и ресурса, главный научный сотрудник

Романова Варвара Александровна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория механики структурно-неоднородных сред, главный научный сотрудник

Защита состоится 15 декабря 2023 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета «НИ ТГУ.1.1.01», созданного на базе физико-технического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (учебный корпус № 10 ТГУ, компьютерный класс № 1).

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

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/e3e3353d-3043-4fb1-8f9d-001f604f3945

Автореферат разослан « ___ » ноября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Усанина Анна Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. С середины прошлого века быстрыми темпами развиваются отрасли, в которых твердые тела подвергаются динамическим нагрузкам, такие как аэрокосмическая, машиностроительная, наращивается производство с вводом новых агрегатов и технологий. Все это требует оптимизации физико-механических характеристик, а, следовательно, требуются новые материалы с определенными свойствами. Ученые всего мира проводят экспериментальные и численные исследования для изучения процессов, происходящих в материалах при динамических нагрузках.

Одним из часто применяемых динамических методов является метод Тейлора, который используется для определения динамического предела текучести материала и для определения параметров численной модели поведения материала при динамическом нагружении, а также для определения адекватности данной модели материала и численной методики в целом.

При изучении свойств металлов и сплавов, подвергшихся интенсивным пластическим деформациям (ИПД), было установлено, что у материала повышаются прочностные характеристики. Это дало мощный импульс для развития исследований, связанных с различными схемами интенсивного пластического нагружения металлов и сплавов. Одним из перспективных направлений ИПД является динамическое канально-угловое прессование (ДКУП), которое позволяет получать объемные ультрамелкозернистые материалы.

Степень разработанности темы исследований. С середины прошлого столетия начались активные исследования процессов динамического нагружения материалов. Множество работ написано на данную тему учеными всего мира, в том числе представителями томской научной школы Макаровым П. В., Скрипняком В. А., Люкшиным Б. А., Пономаревым С. В., Смолиным И. Ю., Смолиным А. Ю. и многими другими. Велись как экспериментальные, так и численные исследования. Дж. И. Тейлор представил в 1946 году метод, который был изначально разработан для определения предела текучести материала. Позже метод Тейлора стал базовой задачей для комплексной оценки адекватности модели материала и численной методики исследования процессов высокоскоростного деформирования материала для скоростей деформаций до 10^5 c^{-1}. Разрабатывались различные схемы нагружения для получения объемных ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов. Одним из методов является динамическое канально-угловое прессование (ДКУП), который был разработан на основе равноканального углового прессования во РФЯЦ-ВНИИТФ (г. Снежинск). При ДКУП образец деформируется при повышенных скоростях из-за воздействия пороховых газов на тыльную часть образца. Исследования по ДКУП проводились Шороховым Е. В., Зельдовичем В. И., Фроловой Н. Ю., Хомской И. В., Бродовой И. Г., Зелепугиным С. А., Шипачевым А. Н. и др. В результате процесса ДКУП происходит формирование УМЗ структуры во всем образце, что делает работы по данной теме актуальными для получения материалов с улучшенными прочностными характеристиками.

Цель работы. Определение закономерностей деформаций металлов и сплавов при высокоскоростном нагружении в условиях удара по недеформируемой преграде и динамического канально-углового прессования; оптимизация параметров модели материала Джонсона-Кука для численного моделирования процессов динамического нагружения деформируемых твердых тел.

Задачи, решаемые для достижения цели:

1. Экспериментальное исследование образцов из меди М1 с различными скоростями методом Тейлора и оценки адекватности численных расчетов.
2. Модификация модели материала Джонсона-Кука, разработка оптимизационного подхода к определению констант данной модели.
3. Численное исследование закономерностей деформирования образцов из меди М1 при ударе цилиндра по жёсткой стенке и подбор оптимальных параметров модели материала.
4. Численное исследование закономерностей деформации образцов из титана, алюминия и меди при динамическом канально-угловом прессовании по динамической схеме нагружения.

Научная новизна работы. Развиты физико-математическая модель и численная методика на основе модифицированного метода конечных элементов для моделирования динамических процессов деформирования металлов применительно к методу Тейлора и динамическому канально-угловому прессованию с использованием модели материала Джонсона-Кука.

Предложен функционал качества решения, с помощью которого разработан оптимизационный метод подбора констант модели материала Джонсона-Кука.

Экспериментально и численно исследованы процессы деформирования цилиндрических образцов из меди М1 при соударении с жесткой стенкой (метод Тейлора) при различных скоростях удара. Определены оптимальные параметры модели материала Джонсона-Кука для нескольких экспериментальных комплексов.

Численно в трехмерной постановке исследован процесс динамического канально-углового прессования по динамической схеме нагружения для образцов из титана при различных начальных условиях (действующее давление, начальная скорость, размер наклонной площадки пересечения каналов).

На основе расчетно-экспериментальных данных определены условия динамического канально-углового прессования по динамической схеме нагружения. Подобраны рациональные параметры процесса (начальная скорость, предварительный нагрев образца) ДКУП, обеспечивающие успешное прохождение образцом каналов оснастки.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты диссертационного исследования позволяют расширить научные знания о закономерностях процессов высокоскоростного деформирования материала, происходящих в металлах и сплавах, в частности при методе Тейлора и динамическом канально-угловом прессовании. Теоретическую значимость имеет модификация широко известной и часто применяемой модели материала Джонсона – Кука, введенный функционал качества решения и предложенный на его основе оптимизационный подход к определению значений констант данной модели. Важное теоретическое значение имеют полученные оценки областей деформирования и методы их определения, оценки изменения структуры образцов, мест локализации напряжений, повышенных температур и разрушений. Определенные в работе оптимальные параметры модели материала, полученные для высоких скоростей деформаций, могут быть применены для численного моделирования широкого круга задач, связанных с динамическим нагружением металлов и сплавов.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в возможных приложениях: модифицированная модель материала, а также способ подбора констант к ней могут повысить точность расчетных оценок деформирования элементов конструкций и конструкций в целом, имеющих практическую значимость,

при динамическом нагружении. Полученные рациональные параметры ДКУП для образцов из титана, алюминия и меди, могут быть применены для разработки технологических параметров процессов получения материалов с улучшенными прочностными характеристиками методами интенсивных пластических деформаций. Совокупность полученных результатов и разработанная численная методика рассматриваются в Акционерном обществе «Научно-производственный центр «Полюс» на предмет внедрения для моделирования механических испытаний.

Методология и методы исследования. Для решения задач диссертационного исследования были использованы экспериментальные методы механики деформируемого твердого тела: высокоскоростное деформирование материала методом Тейлора; метод оптической микроскопии и микроиндентирования для исследования изменений структуры и свойств материала после удара. Для численных исследований был применен метод математического моделирования, в основе которого лежит физико-математическая модель с использованием метода конечных элементов, разработанная С. А. Зелепугиным для задач высокоскоростного деформирования металлов и сплавов.

Связь работы с научными программами и темами. Диссертация выполнялась при поддержке РФФИ, проект 16-43-700774 р_а «Получение объемных ультрамелкозернистых структур в металлах и сплавах методом динамического канально-углового прессования» (2016-2018 гг.).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Комплекс экспериментальных результатов по методу Тейлора; закономерности формирования областей деформирования образцов, определенных на основе анализа распределения микротвердости и микроструктуры.
2. Функционал качества решения, модификация модели материала Джонсона-Кука путем введения ограничителя максимальной величины пластического упрочнения, метод оптимизации подбора параметров данной модели.
3. Закономерности процессов интенсивного пластического деформирования образцов из титана при динамическом канально-угловом прессовании по динамической схеме нагружения, диаграмма ДКУП при различных начальных условиях (давление, скорость).
4. Комплекс результатов численного моделирования динамического канально-углового прессования для образцов из титана ВТ1-00, алюминия А95 и меди М0 по динамической схеме нагружения, условия успешного прохождения этими образцами каналов оснастки при давлении, определенном на основе расчетно-экспериментальных данных.

Личный вклад автора. Совместно с научным руководителем определены цели и задачи диссертационного исследования. Теоретический анализ выбранного направления исследований, обзор современного состояния по теме проведен автором самостоятельно. Эксперименты на баллистическом стенде выполнены в НИИПММ ТГУ научной группой под руководством Христенко Ю. Ф., измерения микротвердости и микроструктур проведены сотрудниками НИ ОСМ ТНЦ СО РАН (Шкода О. А., Боянгин Е. Н.) с участием автора. Развитие физико-математической модели, проведение численных расчетов, обработка экспериментальных и численных результатов выполнены автором самостоятельно. Обсуждение полученных результатов, формулировка основных положений диссертации, а также подготовка публикаций проводились совместно с научным руководителем.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных экспериментальных

методов и методик исследования микротвердости и микроструктуры материалов в соответствии с требованиями ГОСТ, статистическими методами обработки данных, сертифицированным оборудованием, корректной математической постановкой решаемых задач, использованием математических моделей, позволяющих адекватно оценивать напряженно-деформируемое состояние материала тел при высокоскоростном нагружении, применением эффективных и теоретически обоснованных вычислительных алгоритмов метода конечных элементов, успешно прошедших тестирование на тестовых задачах, получением хорошего согласования результатов диссертационного исследования с экспериментальными и численными данными других авторов, представленными в научно-технической литературе.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации докладывались на 21 Всероссийских и Международных конференциях: XXXVIII , XXXIX, XLIII Международной конференции «Гагаринские чтения» (г. Москва, 2012, 2013, 2017 гг.); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Саранск, 2012 г.); Международной конференции «Ударные волны в конденсированных средах» (Украина, г. Киев, 2012 г.); Международной конференции «XV Харитоновские тематические научные чтения» (г. Саров, 2013 г.); Всероссийской научной конференции «Взрыв в физическом эксперименте» (г. Новосибирск, 2013 г.); Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Новосибирск, 2013 г.); III, X, XI Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (г. Томск, 2013, 2020, 2021 гг.); XII, XIV Международной конференции «Забабахинские научные чтения» (г. Снежинск, 2014, 2019 гг.); XI Международной конференции студентов и молодых учёных (г. Томск, 2014 г.); Sino-Russia International Conference on Dynamic Mechanical Behaviors of Materials (China, Harbin, 2015 г.); International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (г. Томск, 2015 г.); VI Всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии» (г. Томск, 2016 г.); IX, X Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (г. Томск, 2016, 2018 гг.); Всероссийской конференции с международным участием «Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва» (г. Новосибирск, 2017 г.); 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2022) (г. Томск, 2022 г.).

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 27 печатных работах, в том числе 4 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 1 статья в зарубежном научном журнале, входящем в Web of Science, 2 статьи в российском научном журнале, входящем в Web of Science), 1 статья в сборнике материалов конференций, представленных в издании, входящем в Scopus, 1 статья в прочем научном журнале, 1 статья в сборнике научных трудов, 20 публикаций в сборниках материалов международных, всероссийских (в том числе с международным участием) научных и научно-практических конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав основной части диссертационной работы, заключения, списка использованных источников и литературы из 223 наименований. Работа содержит 87 иллюстраций и 13 таблиц, всего 153 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложена актуальность темы исследования, отражены поставленные цели работы, показана научная новизна и представлены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Методы высокоскоростного деформирования материалов. Данный раздел обзорный, в нем представлена история создания и развития метода Тейлора и его применение для различных материалов. Рассмотрены несколько методов интенсивной пластической деформации и преимущества динамического канально-углового прессования.

Глава 2. Оборудование, экспериментальные и численные методы исследования. Испытания образцов из меди М1 по методу Тейлора проходили на одноступенчатой легкогазовой установке в НИИ ПММ ТГУ. После деформированные образцы были разрезаны в ТГУ на станке DK7732 (фирмы P & G Industrial, Гуйлинь, Китай, 2013 года выпуска) методом электроэрозионной резки вдоль оси симметрии. Микротвердость образцов измерялась в плоскости разреза на микротвердомере ПМТ – 3М (Производственного объединения ЛОМО, Россия) в ТНЦ СО РАН согласно ГОСТ 9450-76 вдавливанием алмазных наконечников.

Исследования микроструктуры химически протравленных образцов проводились на оптическом металлографическом микроскопе Axiovert 200M (фирмы “Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH” Германия) в ТНЦ СО РАН. Анализ размеров зерен проводили с использованием оптической микроскопии методом «секущих».

Для численного решения задач высокоскоростного деформирования металлов и сплавов применяется модель повреждаемой среды, в которой учитывается наличие пор и трещин. В главе описана физико-математическая модель [1], постановка краевой задачи с начальными и граничными условиями. Поведение материала (предел текучести) определяется с использованием модели Джонсона-Кука [2] и зависит от уровня повреждаемости среды [1]:

$$\sigma = \left(\sigma_0 + Be_{eq}^{n}\right)\left(1 + C\ln\frac{\varepsilon_{eq}}{\varepsilon_0}\right)\left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^{m}\right),$$

где T_0, T, T_m – начальная, текущая температуры и температура плавления, соответственно, e_{eq} – эквивалентная пластическая деформация, ε_0 – начальное значение эквивалентной скорости пластических деформаций (ε_0=1 c^{-1}), ε_{eq} – эквивалентная скорость пластической деформации, B, C, n, m, c, V_3, V_4 – константы модели материала.

Во второй главе также представлены соотношения для применения метода конечных элементов к задачам высокоскоростной деформации металлов.

Тестовые расчеты проводились для задачи Тейлора. Проводилось две серии расчетов взаимодействия металлических цилиндрических образцов с жесткой стенкой. Первая серия выполнялась для стальных и алюминиевых (сплав 6061-Т6) образцов диаметром 6,4 мм и высотой 31,77 мм (таблицы 1 и 2). Начальные скорости задавались от 140 до 410 м/с. Вторая серия тестовых расчетов проходила для цилиндров из стали диаметром 12,5 мм и высотой 37,5 мм при динамических пределах текучести материала 0,8 и 1,2 ГПа (таблица 3). Начальная скорость варьировалась от 200 до 600 м/с.

Таблица 1 – Сталь

№	ρ, кг/м^3	v_0, м/с	$l_к/l_0$		%
			расчет	эксп.	
1	7843	180	0,906	0,907	0,1
2	834	232	0,858	0,862	0,5

Таблица 2 – Алюминий 6061-Т6

№	ρ, кг/м^3	v_0, м/с	$l_к/l_0$		%
			расчет	эксп.	
1	2708	200	0,876	0,903	2,5
2	2687	361	0,716	0,717	0,2
3	2651	406	0,671	0,663	1,2

Таблица 3 – Сталь

№	v_0, м/с	σ, ГПа	$l_к/l_0$		%
			расчет	эксп.	
1	250	0,8	0,788	0,808	2,5
2	250	1,2	0,842	0,837	0,4
3	400	0,8	0,593	0,590	0,6
4	600	0,8	0,341	0,334	2,1

Основным критерием для определения адекватности численной модели в сравнении с экспериментальными данными [3] являлось отношение конечной длины цилиндра к начальной $l_к/l_0$. Расхождение полученных численных данных и экспериментальных не превышают 2,5%.

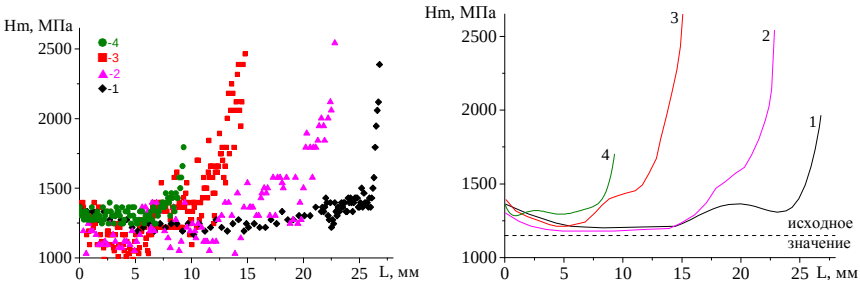
Глава 3. Экспериментальное и численное исследование закономерностей деформации медных образцов методом Тейлора. Эксперименты проводились для цилиндрических образцов из меди марки М1 длиной 34,5 мм, диаметром 7,8 мм. На рисунке 1 представлены сечения по оси симметрии деформированных образцов после удара со скоростями 162, 225, 316 и 416 м/с.

а б в г

а – 162 м/с, б – 225 м/с, в – 316 м/с, г – 416 м/с

Рисунок 1 – Сечения медных образцов после удара с различными начальными скоростями

На рисунке 2, *а* показаны результаты измерений микротвердости по оси симметрии для образцов со скоростями удара 162, 225, 316 и 416 м/с, а на рисунке 2, *б* представлены их осредненные значения, штрихпунктирной линией показано среднее значение микротвердости недеформированного образца (1150 МПа). Полученные данные показывают, что микротвердость в деформированном образце становится выше исходной по всей длине.



1 – 162 м/с, 2 – 225 м/с, 3 – 316 м/с, 4 – 416 м/с

а – значения микротвердости, б – осредненное распределение микротвердости

Рисунок 2 – Микротвердость вдоль осевой линии образцов для различных скоростей удара

На основе полученных данных по микротвердости были выделены четыре зоны деформирования, показанные на рисунке 3, размеры которых в зависимости от скорости соударения представлены в таблице 4.

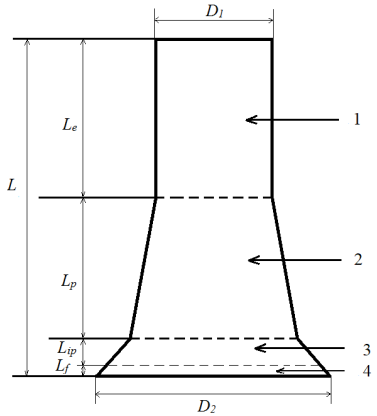


Рисунок 3 – Схема деформирования образца после соударения с жесткой стенкой

Где υ – скорость удара, L – конечная длина образца после соударения, L_e – длина зоны упругих деформаций, L_p – длина зоны пластических деформаций, L_{ip} – длина зоны интенсивных пластических деформаций, L_f – длина зоны предразрушения, D_1 –диаметр тыльного торца цилиндра, D_2 – диаметр контактной границы. В образце со скоростью удара 162 м/с отсутствует зона предразрушения материала, а в образцах со скоростью удара 225 и 316 м/с она мала. В цилиндре со скоростью удара 416 м/с зона упругих деформаций быстро перетекает в зону интенсивных пластических деформаций, предразрушения и разрушения, в нем зона пластических деформаций мала.

Таблица 4 – Геометрические размеры областей деформирования образцов

υ, m/s	L, mm	L_e, mm	L_p, mm	L_{ip}, mm	L_f, mm	D_1, mm	D_2, mm
0	34.5	0	0	0	0	7.8	7.8
162	26.1	12.34	10.63	3.13	0	7.8	12.7
225	22.5	9.78	9.51	2.28	0.93	7.8	15.8
316	16.1	5.87	6.83	2.26	1.14	7.9	21.4
416	9.3	3.5	1.38	2.41	2.01	7.9	31.28

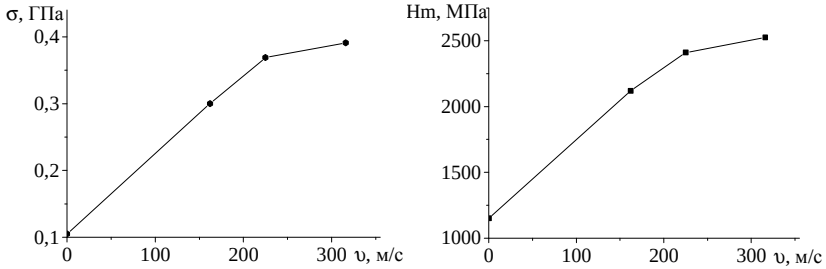
Из-за значительного разрушения образец со скоростью удара 416 м/с не рассматривается для дальнейших расчетов динамического предела текучести.

Динамический предел текучести σ определяется по классической формуле Тейлора [4]:

$$\sigma = \frac{\rho v^2 (L_0 - L_e)}{2(L_0 - L)\ln(\frac{L_0}{L_e})},$$

где ρ – плотность материала, v – скорость удара, L_0 - начальная длина, L – конечная длина после соударения, L_e – длина упругой части образца.

На рисунке 4, *а* представлена зависимость динамического предела текучести σ от скорости удара цилиндра. На графике видно, что предел текучести значительно возрастает с ростом скорости удара по сравнению со статическим значением для меди М1 равным 0,1 ГПа. Рисунок 4, *б* показывает зависимость максимальной микротвердости образцов от скорости удара. Графики на рисунке 4 качественно подобны, таким образом можно предположить их взаимосвязь.



а - динамический предел текучести, б - максимальное значение микротвердости

Рисунок 4 – Зависимости параметров от скорости удара

Для изучения деформированного состояния микроструктуры был выбран цилиндр со скоростью удара 316 м/с, потому что в образце присутствуют все четыре зоны деформирования, представленные на рисунке 3. Средний размер зерен по всей длине деформированного образца меньше, чем в исходном. С приближением к зоне удара средний размер зерна монотонно снижается. В зоне контакта структура образца становится волновой и резко отличается от вида структуры в других зонах. Это можно объяснить экстремальной пластической деформацией материала вследствие ударно-волновых и деформационных процессов. В области 4 (зона предразрушения образца) зеренная структура подразделяется на две подобласти: область предразрушения 4а и непосредственно разрушения 4б, где зеренная структура переходит в волновую.

В данном подразделе на примере задачи (теста) Тейлора рассмотрен способ подбора констант модели Джонсона-Кука [2] с использованием в качестве оптимизированного алгоритма метод градиентного спуска Нестерова [5]. Существенным недостатком этой модели является то, что рост пластической деформации приводит к неограниченному росту предела текучести, что не наблюдается в экспериментах. Экспериментальное определение параметров модели Джонсона-Кука проводилось разработчиками модели при скоростях деформаций до 10^3 $с^{-1}$, однако при высокоскоростном соударении скорости деформаций достигают значений 10^6 $с^{-1}$ и более. Использование этих констант модели для численного моделирования высокоскоростных процессов, приводит к расхождению численных и

экспериментальных результатов, в связи с чем возникает вопрос о причинах этого расхождения, которое может быть вызвано как неприменимостью модели при высоких скоростях деформаций, так и неверным определением параметров модели для высоких скоростей деформаций.

Для количественной оценки расхождения экспериментов с расчетами предлагается ввести в рассмотрение численную характеристику погрешности расчетов. Наиболее надежные измеряемые параметры цилиндра после удара - остаточная длина L и радиус W_f. Максимальный радиус цилиндра R_f является менее надежным параметром ввиду возможного разрушения цилиндра в области контакта с жесткой стенкой (рисунок 5).

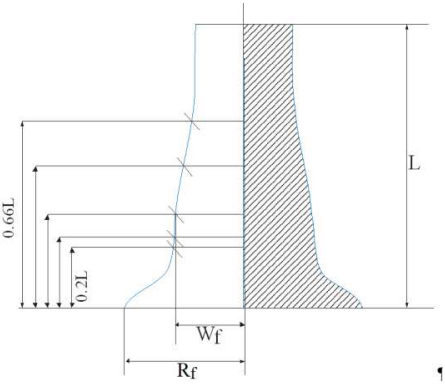


Рисунок 5 – Точки измерения параметров цилиндра после деформирования

Был введен в рассмотрение функционал качества решения Q_f в виде:

$$Q_f = \left\{ \begin{array}{c} 20 \cdot \Delta\left(\frac{L}{L_0}\right)^2 + \\ + 2\left[\Delta(W_f(0{,}2))^2 + \Delta(W_f(0{,}25))^2 + \Delta(W_f(0{,}33))^2 + \Delta(W_f(0{,}5))^2 + \Delta(W_f(0{,}66))^2\right] + \\ + \Delta(R_f)^2 \end{array} \right\},$$

где $\Delta\left(\frac{L}{L_0}\right) = \left(\frac{L}{L_0}\right)_{числ} / \left(\frac{L}{L_0}\right)_{экспер} - 1$, $\Delta(W_f) = W_{f\,числ} / W_{f\,экспер} - 1$, $\Delta(R_f) = R_{f\,числ} / R_{f\,экспер} - 1$.

Весовые коэффициенты подобраны так, чтобы наибольшее влияние на итоговое качество решения оказывала остаточная длина, а наименьший вклад дает максимальный радиус. Введение функционала качества решения Q_f позволяет численно оценивать степень отклонения расчетов от экспериментальных данных и использовать для оценки параметров модели метод максимального правдоподобия. Для оценки параметров модели Джонсона-Кука для меди М1 использовались экспериментальные данные по методу Тейлора, полученные в данной работе, а также данные других авторов (Уилкинс и Гуинан [6] и Гаст [3]). Исходные размеры тестовых цилиндров, их скорости и начальные температуры приведены в таблице 5.

Первая серия расчетов была проведена с параметрами модели Джонсона-Кука для бескислородной меди (OHFC Cu), приведенными в [7]. Полученные результаты моделирования для экспериментов 1 и 2 хорошо согласуются с результатами расчетов, представленными в [8]. Введенный функционал качества Q_f позволяет решить задачу поиска параметров модели, минимизирующих этот функционал и являющихся с некоторой точки зрения оптимальными. Чтобы минимизировать

количество шагов расчетов для поиска минимума Q_f был выбран метод градиентного спуска Нестерова [5].

Таблица 5 – Параметры экспериментов

Тест	Материал	L_0	D_0	υ_0	T_0	Источник
1	OHFC Cu	23.47	7.62	210	298	Wilkins and Guinan [6]
2	ETP Cu	30	6.0	188	718	Gust [3]
3	M1	34.5	7.8	162	298	данная работа
4	M1	34.5	7.8	167	298	данная работа
5	M1	34.5	7.8	225	298	данная работа
6	M1	34.5	7.8	316	298	данная работа

Численным моделированием было установлено, что влияние параметров m, n на результаты расчетов выражено очень слабо для рассматриваемых условий удара. Кроме того, параметр σ_0 по смыслу является статическим пределом текучести. В модели Джонсона-Кука величина упрочнения может неограниченно расти, но экспериментальные данные это опровергают. В связи с этим в модель было заложено ограничение максимальной величины пластического упрочнения в виде:

$$\sigma = \min\begin{pmatrix} \sigma_0 + B\varepsilon_{pl}^n \\ \sigma_0 \cdot B_{\max} \end{pmatrix}(1 + C\ln(\dot{\varepsilon}^*))\left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^m\right)$$

Здесь σ_0 – статический предел текучести), ε_{pl} – эквивалентная пластическая деформация, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}_{pl} / \dot{\varepsilon}_0$ - безразмерная скорость пластических деформаций, $\dot{\varepsilon}_{pl}$ - скорость пластических деформаций, $\dot{\varepsilon}_0$ – начальное значение скорости деформаций ($\dot{\varepsilon}_0$ = 1 c^{-1}), T_0, T, T_m – начальная, текущая температуры и температура плавления, соответственно, B, n, C, m – константы модели материала.

В таблице 6 приведены полученные оптимальные параметры и результаты сравнения полученных оптимальных параметров модели для разных случаев, где Q_{f0} и Q_f – качество решения до и после оптимизации параметров.

Таблица 6 – Оптимизированные параметры модели Джонсона-Кука

Серия экспериментов	B (ГПа)	C	B_{max}	Min(Q_f)	Q_{f0}	Q_{f0}/Q_f
1	0,202	0,023	3,509	0,011	0,149	13,6
2	0,205	0,023	3,503	0,046	0,292	6,4
3	0,309	0,024	3,387	0,098	0,099	1,0
4	0,286	0,022	3,623	0,143	0,143	1,0
5	0,539	0,014	2,783	0,041	0,162	3,9
6	0,486	0,018	2,881	0,088	0,311	3,5
1+2	0,204	0,023	3,493	0,028	0,221	7,8
3+4+5+6	0,565	0,020	2,558	0,063	0,179	2,8
1+2+3++4+5+6	0,265	0,024	3,330	0,177	0,193	1,1

В экспериментах 5 и 6 объем сильно деформированного материала существенный, и поэтому ограничение максимального пластического упрочения оказывает влияние на результаты. По этой причине в экспериментах 5 и 6 численная оптимизация снижает предельное упрочение до величины ~ 2,8, что коррелирует с экспериментами

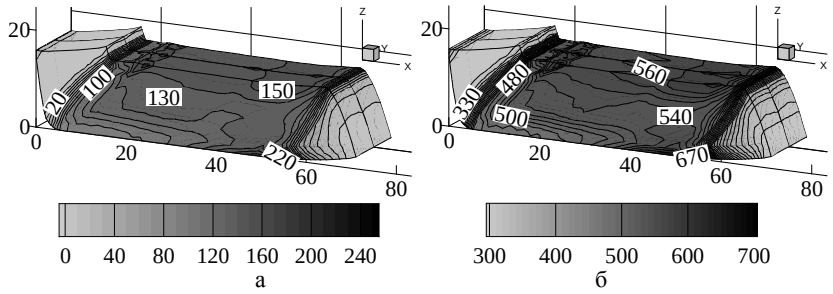
по измерению микротвердости. Попытка определения набора параметров, при которых численное моделирование оптимально описывает всю совокупность рассмотренных экспериментов, показала, что среднее качество решения улучшается на 10%.

Глава 4. Численное моделирование динамического канально-углового прессования. Численное решение задач ДКУП дает возможность получить распределения параметров процесса во времени (деформаций, температур, повреждений) в процессе интенсивного пластического деформирования, что позволяет спрогнозировать благоприятные условия протекания процесса ДКУП для получения ультрамелкозернистого материала с необходимыми свойствами материала без его разрушения.

Численно моделируется процесс динамического канально-углового прессования при динамической схеме нагружения для образцов из титана сечением 16х16 мм и длиной 65 мм. Угол пересечения каналов составляет 90° с наклонной площадкой под углом 45° в области внешнего угла.

Для параметров P = 0,55 ГПа, v_0 = 100 м/с, h = 4 мм, H = 4 мм проводится исследование динамики процесса ДКУП. Поля удельной энергии сдвиговых деформаций достаточно равномерно распределяются по образцу, достигая своих наибольших значений в приповерхностных областях образца, причем максимальные значения достигаются в передней части образца в месте его соприкосновения с нижней стенкой горизонтального канала, а минимальные (близкие к нулю) значения в передней и неподверженной деформированию хвостовой части (рисунок 7, а).

В момент взаимодействия образца с пересекающимися каналами начинается рост температуры в образце, локальный максимум температур, равный 700 К, образуется в области контакта лицевой поверхности образца и внешнего угла пересечения каналов. Напротив наклонной площадки в образце образуется переходная область, в которой температура повышается с 300 до 480 К после поворота передней части образца в горизонтальный канал, далее за счет постоянно действующей нагрузки устанавливается режим равномерного деформирования, в результате чего температура в средней части образца не превышает 550 К (рисунок 7, б). В большей части образца поля удельного объема микроповреждений распределены равномерно (рисунок 8) и в среднем не превышают 0,006 см^3/г. Максимальные значения удельного объема микроповреждений наблюдаются в верхней приповерхностной области образца за счет растяжения материала, что может привести к формированию макроповреждений (макротрещин) в этой области.



а – удельная сдвиговая деформация (кДж/кг); б – температура (К)

Рисунок 7 – Поля и изолинии в образце в момент времени 790 мкс

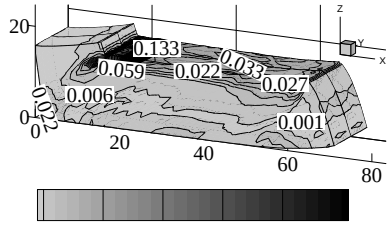


Рисунок 8 – Поля удельного объема микроповреждений (в см^3/г) в образце в момент времени 790 мкс

Изучено влияние наклонной площадки в области внешнего угла пересечения каналов на процесс ДКУП с фиксированными параметрами P = 0,5 ГПа, v_0 = 100 м/с, величина h варьируется и равна 2, 4, 6 и 8 мм. Рассматриваются два случая: образец касается лицевой поверхностью наклонной площадки ($H = h$) и образец проходит некоторое расстояние до контакта с наклонной площадкой ($H = h+8$ мм).

Более равномерное распределение дает вариант наклонной площадки h = 4, который и будет использоваться для дальнейших расчетов.

На рисунке 9 показана диаграмма процесса ДКУП при начальной скорости v_0 = 0 м/с в координатах P – H. Выделяется три основные зоны: в зоне I образец застревает, зона II соответствует успешному прохождению образца по каналам, зона III – неустойчивому прохождению и разрушению образца. Минимальное значение H ограничивается высотой наклонной площадки h = 4 мм (штриховая горизонтальная линия на рисунке 9).

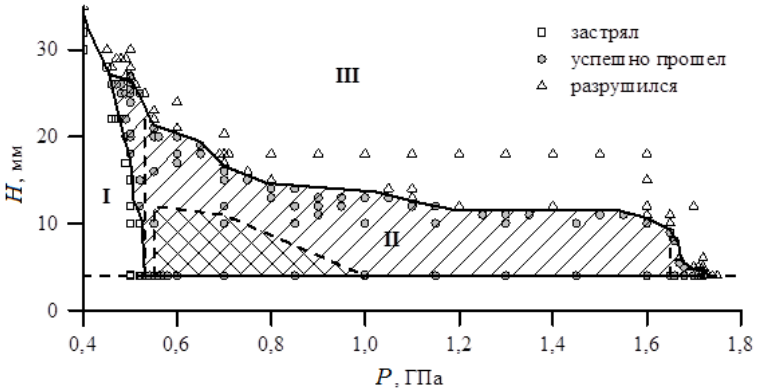


Рисунок 9 – Диаграмма процесса ДКУП титанового образца.

Исходя из необходимости сохранения формы образца, близкой к первоначальной, а также минимизации уровня поврежденности материала образца, рациональным будет выбор значений нагрузки $0{,}55 \le P < 1{,}0$ ГПа и $h \le H < 12$ мм.

Для выше представленных численных расчетов процесса ДКУП воздействие пороховых газов на образец задавалось в виде постоянного давления, действующего на тыльную часть образца. Для того, чтобы приблизить расчеты к реальным условиям эксперимента был проведен анализ научной литературы с целью определения величины действующего давления. Численное исследование процесса ДКУП в трехмерной постановке без учета трения и теплообмена с оснасткой проводилось для металлических образцов с размерами 65 × 16 × 16 мм, которые в вертикальном канале оснастки прилегали непосредственно к наклонной плоскости ($H=h$), высота которой составляет 4 мм под углом 45°. На тыльную часть действует давление P=320 МПа,

определенное на основе расчетно-экспериментальных данных [9]. Начальная скорость образца v_0 варьировалась, чтобы определить оптимальные параметры для прохождения каналов оснастки с сохранением формы близкой к первоначальной.

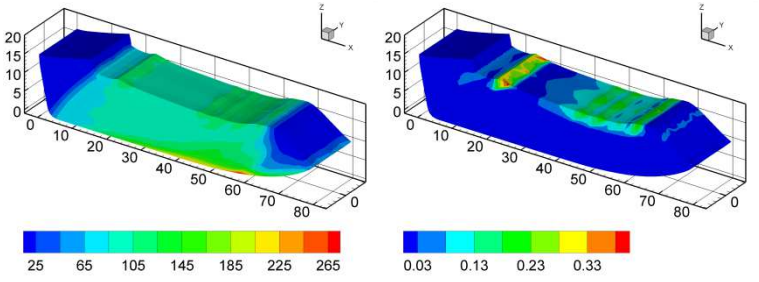
Учет предварительного нагрева образца в численных расчетах проводился с помощью выражения для предела текучести [3]:

$$\sigma_0^T = \sigma_0^{T_0}[1+h_T\ (T - 300)]$$

где $\sigma_0^{T_0}$ - предел текучести при комнатной температуре (300 К), h_T – константа.

Проводилась серия расчетов для определения оптимальных начальных условий для прохождения образцом из титана ВТ1-00 каналов оснастки (константой h_T = - 6.2 × 10^{-4} ($К^{-1}$)) [3]. Было выявлено, что образец необходимо предварительно нагреть до температуры 800 К и придать ему начальную скорость 250 м/с.

Среднее значение удельной энергии сдвиговой деформации (рисунок 10, *а*) составляет 105 – 145 кДж/кг, при этом можно предположить, что наиболее равномерно измельчение зеренной структуры может происходить в основной части образца, кроме передней, тыльной и нижней частей. На рисунке 10, *б* показаны поля удельного объема микроповреждений.



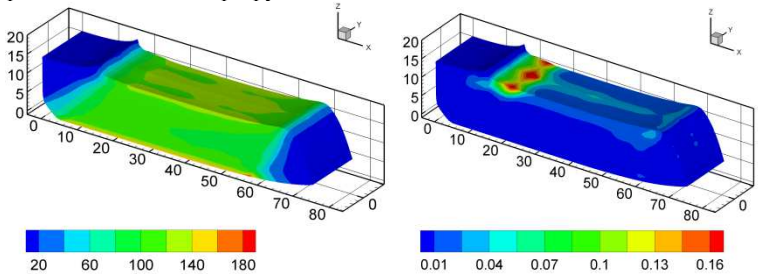
а б

Рисунок 10 – Поля удельной энергии сдвиговой деформации (а, кДж/кг) и поля удельного объема микроповреждений (б, $см^3$/кг) в момент времени 600 мкс

Наибольшие значения наблюдаются в верхней части образца, это обусловлено тем, что материал образца испытывает растягивающие нагрузки при переходе из вертикального в горизонтальный канал. До 200 мкс удельный объем микроповреждений составляет 0,13 – 0,18 $см^3$/кг в передней части образца. Наибольшие растягивающие нагрузки в верхней части образца возникают ко времени процесса 480 – 500 мкс, при этом максимальный объем микроповреждений составляет 0,33 $см^3$/кг.

Серия численных расчетов процесса ДКУП для алюминия А95 при Р=320МПа показала, что образец не нуждается в предварительном разгоне и нагреве (комнатная температура 300К). В правой части образца уровень удельной энергии сдвиговых деформаций (рисунок 11, а) меньше, чем в левой, это вызвано тем, что образец предварительно не разгонялся и скорость деформаций в начале процесса была мала. Среднее значение удельной энергии сдвиговых деформаций по всему объему равно 120 кДж/кг, а максимальное составляет 180 кДж/кг. Среднее значение удельного объема микроповреждений (рисунок 11, б) составляет 0,015 $см^3$/кг, а максимальное значение равное 0,16 $см^3$/кг наблюдается в верхней тыльной части образца. Уровень

удельного объема микроповреждений мал и недостаточен для появления макротрещин и локального разрушения.

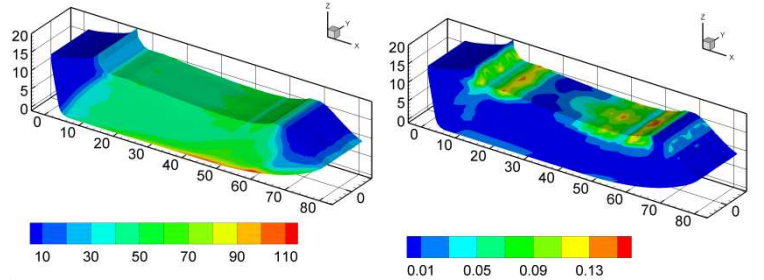


а б

Рисунок 11 – Поля удельной энергии сдвиговой деформации (а) и поля удельного объема микроповреждений (б) в момент времени 453 мкс, кДж/кг

Численные расчеты процесса ДКУП для медного образца марки М0 при постоянном давлении 320 МПа показали, что образец не нуждается в предварительном нагреве и его начальная температура составляет 300 К, а рациональная начальная скорость движения образца равна 170 м/с.

Поля удельной энергии сдвиговых деформаций (рисунок 12, а) распределены равномерно по всему образцу кроме передней, тыльной и нижней части. Максимальное значение наблюдается в нижней части и имеет значение 110 кДж/кг, а среднее значение удельной энергии сдвиговой деформации составляет 50 кДж/кг. Средняя величина удельного объема микроповреждений (рисунок 12, б) составляет 0,09 $см^3$/кг, а максимальные значения удельного объема микроповреждений наблюдаются в верхней части образца и составляют 0,16 $см^3$/кг.



а б

Рисунок 12 – Поля удельной энергии сдвиговых деформаций (а) и поля удельного объема микроповреждений (б) в момент времени 750 мкс, кДж/кг

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных работ получены следующие результаты и сформулированы выводы:

1. Представлены результаты экспериментов по методу Тейлора для медных цилиндрических образцов при скорости удара от 162 до 416 м/с. Выявлено четыре области деформирования и представлены их размеры для исследованных скоростей удара. Динамический предел текучести рассчитан по классической формуле Тейлора, который возрастает с увеличением начальной скорости. Выявлена качественная

корреляция максимальных усредненных значений микротвердости и динамического предела текучести.

2. Выполнена модификация физико-математической модели. Для оптимизации процесса подбора констант модели Джонсона-Кука предложен функционал качества решения Q_f. Проведены численные расчеты задачи Тейлора для цилиндрических образцов из меди. Полученные результаты численного моделирования с оптимизированными параметрами модели Джонсона-Кука хорошо согласуются с экспериментальными данными.

3. Численно исследован процесс ДКУП для образцов из титана, алюминия и меди в трехмерной постановке для динамической схемы нагружения. Проведено исследование влияния на процесс ДКУП высоты наклонной площадки в области внешнего угла пересечения каналов матрицы. Построена диаграмма процесса ДКУП образца из титана в координатах $H - P$ (H – начальное положение образца в вертикальном канале оснастки, P – давление, действующее на тыльную поверхность образца). Определены рациональные параметры процесса ДКУП для титанового образца размерами 16х16х65 мм, которые составляют по давлению 0,55-1,0 ГПа и начальному пробегу до 8 мм в вертикальном канале.

4. На основе расчетно-экспериментальных данных было получено давление, действующее на тыльную поверхность образца во время ДКУП, при котором определены рациональные начальные параметры для успешного прохождения образцов через оснастку: для титана ВТ1-00 начальная скорость составляет 250 м/с, предварительный нагрев образца до температуры 800 К; для алюминия А95 начальная скорость равна нулю, а предварительный нагрев не требуется; для образца из меди М0 начальная скорость составляет 170 м/с, предварительный нагрев не требуется. Изучена динамика процесса ДКУП для образцов, показаны поля удельной энергии сдвиговых деформаций и температур, выявлены области концентрации микроповреждений.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность и благодарность своему научному руководителю Зелепугину Сергею Алексеевичу за помощь при выполнении всех этапов диссертации, постоянное внимание и поддержку.

Цитируемая литература:

1. Зелепугин С.А. Разрушение элементов конструкций при высокоскоростном взаимодействии с ударником и группой тел: дисс. докт. физ.-мат. наук. / С. А. Зелепугин. – Томск, 2003. – 235 с.

2. Johnson G. R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures / G. R. Johnson, W. H. Cook // Proc. 7th Int. Symp. on Ballistics. The Hague. American Defense Preparedness Association. The Netherlands. – 1983. – P. 541–547.

3. Gust W.H. High impact deformation of metal cylinders at elevated temperatures // J. Appl. Phys. – 1982. – Vol. 53, no. 5. – P. 3566 - 3575.

4. Taylor G. I. The use of flat ended projectiles for determining yield stress. 1: Theoretical considerations // Proc. of the R. Soc. Lond. A. – 1948. – Vol.194. – P. 289-299.

5. Нестеров Ю.Е. Метод решения задачи выпуклого программирования со скоростью сходимости $O(1/k^2)$ // Доклады Академии наук СССР. – 1983. – Т. 269, № 3. – С. 543-547.

6. Wilkins M. L. Impact of cylinders on a rigid boundary / M. L. Wilkins, M. W. Guinan // Journal of Applied Physics. – 1973. – Vol. 44(3). – P. 1200–1206.

7. Johnson G. R. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures / G. R. Johnson, W. H. Cook // Engineering Fracture Mechanics. – 1985. – 21(1). – P. 31 – 48.

8. Banerjee B. Validation of the material point method and plasticity with Taylor impact tests // Report No. C-SAFE-CD-IR-04-004. – 2012. – P. 21.

9. Русяк И. Г. Анализ влияния различных факторов на характеристики артиллерийского выстрела / И. Г. Русяк, М. А. Ермолаев // Вестник ИжГТУ. – 2014. – № 4(64). – С. 162–165.

10. Бродова И. Г. Структура и свойства субмикрокристаллических и нанокристаллических цветных металлов и сплавов при экстремальных воздействиях / И. Г. Бродова [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2018. – 363 с.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук:

1*. Бодров А. С. Численное моделирование процессов динамического канально-углового прессования титановых образцов / А. С. Бодров, **Н. В. Олимпиева (Пахнутова)**, А. С. Зелепугин, С. А. Зелепугин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2015. – № 5 (37). – С. 56–63. – DOI: 10.17223/19988621/37/5. – 0,57 / 0,14 а.л.

Web of Science: Bodrov A. S. Numerical simulation of dynamic channel-angular pressing of titanium specimens / A. S. Bodrov, **N. V. Olimpieva (Pakhnutova)**, A. S. Zelepugin, S. A. Zelepugin // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta-Matematika i Mekhanika-Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. – 2015. – № 5 (37). – P. 56–63.

2*. Янов Д. В. Моделирование процесса динамического канально-углового прессования медных образцов с учетом экспериментальных условий нагружения / Д. В. Янов, А. С. Бодров, **Н. В. Пахнутова**, С. А. Зелепугин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2019. – № 60. – С. 141–151. – DOI: 10.17223/19988621/60/11. – 0,72 / 0,18 а.л.

Web of Science: Yanov D. V. Simulation of dynamic channel-angular pressing of copper samples with allowance for experimental data of loading / D. V. Yanov, A. S. Bodrov, **N. V. Pakhnutova**, S. A. Zelepugin // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta-Matematika i Mekhanika-Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. – 2019. – Vol. 60. – P. 141−151.

3*. **Пахнутова Н. В.** Микротвердость и динамический предел текучести медных образцов при ударе по жесткой стенке / **Н. В. Пахнутова**, Е. Н. Боянгин, О. А. Шкода, С. А. Зелепугин // Advanced Engineering Research. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 224–231. – DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-3-224-231. – 0,55 / 0,14 а.л.

4*. Zelepugin S. A. Experimental study of the microhardness and microstructure of a copper specimen using the Taylor impact test / S. A. Zelepugin, **N. V. Pakhnutova**, O. A. Shkoda, E. N. Boyangin // Metals. – 2022. – Vol. 12, is. 12. – Article number 2186. – 11 p. – URL: https://www.mdpi.com/2075-4701/12/12/2186 (access date: 20.05.2023). – DOI: 10.3390/met12122186. – 0,84 / 0,21 а.л. *(Web of Science).*

Статья в сборнике материалов конференций, представленных в издании, входящем в Scopus:

5*. Bodrov A. S. Numerical simulation of dynamic channel-angular pressing processes / A. S. Bodrov, **N. V. Olimpieva (Pakhnutova)**, A. S. Zelepugin, S. A. Zelepugin // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. Tomsk, Russian Federation, December 01–04, 2015. – Tomsk, 2016. – Article number 7414878. – 4 p. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7414878 (access date: 20.05.2023). – DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414878. – 0,44 / 0,11 а.л.

Публикации в прочих научных изданиях:

6*. Суглобова И. К. Моделирование в трехмерной постановке процессов деформирования титановых образцов методом ДКУП / И. К. Суглобова, **Н. В. Олимпиева (Пахнутова)**, А. Н. Шипачев, С. А. Зелепугин // Математика и математическое моделирование : материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Саранск, 13–14 октября 2011 г. – Саранск, 2012. – С. 341–344. – 0,18 / 0,05 а.л.

7*. Суглобова И. К. Моделирование процессов деформирования титановых образцов с применением двухпоршневой схемы динамического канально-углового прессования / И. К. Суглобова, **Н. В. Олимпиева (Пахнутова)**, А. Н. Шипачев // XXXVIII Гагаринские чтения : научные труды международной конференции. Москва, 10–14 апреля 2012 г. – Москва, 2012. – Т. 1. – С. 215–216. – 0,06 / 0,02 а.л.

8*. Зелепугин С. А. Численное моделирование пластического деформирования титановых образцов при двухпоршневом ДКУП / С. А. Зелепугин, А. С. Зелепугин, Е. В. Ильина, **Н. В. Олимпиева (Пахнутова)** // Shock waves in condensed matters : proceedings of the international conference. Kyiv, Ukraine, September 16–21, 2012. – Kyiv, 2012. – P. 302–305. – 0,23 / 0,06 а.л.

9*. Ильина Е. В. Моделирование в трехмерной постановке процессов пластического деформирования металлических образцов при динамическом канально-угловом прессовании / Е. В. Ильина, А. С. Бодров, **Н. В. Олимпиева (Пахнутова)**, С. А. Зелепугин // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны : сборник докладов международной конференции XV Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 18–22 марта 2013 г. – Саров, 2013. – С. 805–808. – 0,22 / 0,06 а.л.

10*. **Олимпиева (Пахнутова) Н. В.** Численное моделирование задачи Тейлора в трехмерной постановке / Н. В. Олимпиева (Пахнутова), И. К. Суглобова, С. А. Зелепугин // XXXIX Гагаринские чтения : материалы докладов Секции № 3 международной молодежной научной конференции «Механика и моделирование материалов и технологий». Москва, 09–13 апреля 2013 г. – Москва, 2013. – С. 59–60. – 0,06 / 0,02 а.л.

11*. Бодров А. С. Моделирование в трехмерной постановке процессов пластического деформирования при динамическом канально-угловом прессовании / А. С. Бодров, **Н. В. Олимпиева (Пахнутова)**, С. А. Зелепугин //. Взрыв в физическом эксперименте : тезисы докладов всероссийской научной конференции. Новосибирск, 16–20 сентября 2013 г. – Новосибирск, 2013. – С. 130–132. – 0,12 / 0,04 а.л.

12*. Бодров А. С. Трехмерное моделирование процессов пластического деформирования титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании / А. С. Бодров, **Н. В. Олимпиева (Пахнутова)**, С. А. Зелепугин // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всероссийской научной конференции молодых

ученых. Новосибирск, 21–24 ноября 2013 г. – Новосибирск, 2013. – Ч. 3. – С. 62–65. – 0,16 / 0,05 а.л.

13*. Бодров А. С. Численное исследование влияния формы титанового образца при динамическом канально-угловом прессовании / А. С. Бодров, **Н. В. Позднышева (Пахнутова)**, С. А. Зелепугин // Труды / Томский государственный университет. Серия физико-математическая. – Томск, 2013. – Т. 292 : Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики : материалы III Всероссийской молодежной научной конференции. – С. 72–75. – 0,22 / 0,07 а.л.

14*. Бодров А. С. Численное исследование влияния наклонной площадки в области пересечения каналов на процесс динамического канально-углового процессования / А. С. Бодров, **Н. В. Позднышева (Пахнутова)**, А. С. Зелепугин, С. А. Зелепугин // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XI Международной конференции студентов и молодых ученых. Томск, 22–25 апреля 2014 г. – Томск, 2014. – С. 552–554. – 0,11 / 0,03 а.л.

15*. **Позднышева (Пахнутова) Н. В.** Определяющие соотношения для металлов и сплавов в широком диапазоне деформаций, скоростей деформаций и температур / Н. В. Позднышева (Пахнутова), Е. В. Ильина, А. С. Зелепугин, С. А. Зелепугин // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XI Международной конференции студентов и молодых ученых. Томск, 22–25 апреля 2014 г. – Томск, 2014. – С. 657–659. – 0,17 / 0,04 а.л.

16*. Зелепугин С. А. Трехмерное моделирование пластического деформирования титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании / С. А. Зелепугин, А. С. Зелепугин, А. С. Бодров, **Н. В. Позднышева (Пахнутова)** // Забабахинские научные чтения : сборник материалов XII Международной конференции. Снежинск, 02–06 июня 2014 г. – Снежинск, 2014. – С. 290–291. – 0,04 / 0,01 а.л.

17*. **Олимпиева (Пахнутова) Н. В.** Численное моделирование задачи Тейлора с использованием модели Джонсона-Кука в трехмерной постановке / Н. В. Олимпиева (Пахнутова), А. И. Ларичева, А. С. Зелепугин, С. А. Зелепугин // Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии : материалы VI Всероссийской конференции молодых ученых. Томск, 11–13 мая 2016 г. – Томск, 2016. – С. 347–350. – 0,35 / 0,09 а.л.

18*. Зелепугин С. А. Численное моделирование задачи Тейлора с использованием модели Джонсона-Кука / С. А. Зелепугин, **Н. В. Пахнутова**, А. С. Зелепугин // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016) : сборник трудов IX Всероссийской научной конференции. Томск, 21–25 сентября 2016 г. – Томск, 2016. – С. 196–198. – 0,3 / 0,1 а.л.

19*. Зелепугин С. А. Диаграмма процесса динамического канально-углового прессования титановых образцов / С. А. Зелепугин, А. С. Бодров, **Н. В. Пахнутова** // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 11-1. – С. 28–31. – DOI: 10.17513/mjpfi.11924. – 0,21 / 0,07 а.л.

20*. Зелепугин А. С. Тестирование легкогазовой установки на задаче Тейлора на образцах из меди / А. С. Зелепугин, **Н. В. Пахнутова**, Ю. Ф. Христенко // XLIII Гагаринские чтения : материалы международной молодежной научной конференции. Москва, 05–20 апреля 2017 г. – Москва, 2017. – С. 34–35. – 0,07 / 0,02 а.л.

21*. **Пахнутова Н. В.** Численное моделирование задачи Тейлора для медных образцов с использованием модели Джонсона–Кука / Н. В. Пахнутова, А. С. Зелепугин, Ю. Ф. Христенко, С. А. Зелепугин // Современные проблемы механики

сплошных сред и физики взрыва : тезисы докладов конференции с международным участием, посвященная 60-летию Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. Новосибирск, 04–08 сентября 2017 г. – Новосибирск, 2017. – С. 202–203. – 0,06 / 0,02 а.л.

22*. Зелепугин С. А. Моделирование интенсивных пластических деформаций при динамическом канально-угловом прессовании / С. А. Зелепугин, Д. В. Янов, А. С. Бодров, **Н. В. Пахнутова** // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики : сборник трудов X Всероссийской научной конференции, посвященной 140-летию ТГУ и 50-летию НИИ ПММ ТГУ. Томск, 03–05 сентября 2018 г. – Томск, 2018. – С. 100–101. – 0,19 / 0,05 а.л.

23*. Зелепугин С. А. Численное моделирование динамического канально-углового прессования медных образцов при фиксированном давлении / С. А. Зелепугин, Д. В. Янов, А. С. Бодров, **Н. В. Пахнутова** // Забабахинские научные чтения : сборник материалов XIV Международной конференции. Снежинск, 18–22 марта 2019 г. – Снежинск, 2019. – С. 213. – 0,06 / 0,02 а.л.

24*. **Пахнутова Н. В.** Микротвердость медного образца при тесте Тейлора / Н. В. Пахнутова, А. С. Зелепугин, С. А. Зелепугин // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики-2020 : материалы X Всероссийской научной конференции с международным участием. Томск, 18–20 ноября 2020 г. – Томск, 2021. – С. 33–36. – 0,16 / 0,05 а.л.

25*. **Пахнутова Н. В.** Моделирование канально-углового прессования медных образцов / Н. В. Пахнутова, А. С. Зелепугин, С. А. Зелепугин // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики : материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием. Томск, 17–21 ноября 2021 г. – Томск, 2022. – С. 109–112. – 0,23 / 0,07 а.л.

26*. Bodrov A. S. Numerical simulation of dynamic channel-angular pressing of titanium specimens / A. S. Bodrov, **N. V. Olimpieva (Pakhnutova)**, A. S. Zelepugin, S. A. Zelepugin // Sino-Russia International Conference on Dynamic Mechanical Behaviors of Materials : abstracts of abstracts. Harbin, China, November 20–22, 2015. – Harbin, 2015. – P. 25. – 0,03 / 0,01 а.л.

27*. **Pakhnutova N. V.** Microhardness of a deformed copper sample when impacted on a rigid wall / N. V. Pakhnutova, E. N. Boyangin, O. A. Shkoda, S. A. Zelepugin // 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2022) : book of abstracts. Tomsk, Russia, October 02–08, 2022. – Tomsk, 2022. – P. 487. – 0,07 / 0,02 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательства Томского государственного университета
Заказ № 7580 от «24» октября 2023 г. Тираж 100 экз.
г. Томск, Московский тр. 8, тел. (3822) 53-15-28
publish.tsu.ru