

На правах рукописи



Шипачев Александр Николаевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОГО
ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ
В ПРОЦЕССАХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО РЕЗАНИЯ
И ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО
ПРЕССОВАНИЯ**

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск - 2011

Работа выполнена на кафедре механики деформируемого твердого тела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский государственный университет".

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, снс
Зелепугин Сергей Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, снс
Герасимов Александр Владимирович
доктор физико-математических наук, снс
Черепанов Олег Иванович

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

Защита состоится 23 декабря 2011 г. в 10³⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан 21 ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Перспективное развитие различных областей техники, связанных с динамическими условиями нагружения, в значительной степени зависит от создания и широкого применения новых материалов с комплексом заданных физико-механических свойств, разработка которых в последнее время получила мощный импульс.

Одним из активно развиваемых направлений является получение объемных наноструктурных материалов – перспективных конструкционных и функциональных материалов нового поколения. Выделяются два основных метода их получения – компактирование исходных нанопорошков и формирование наноструктур при интенсивной пластической деформации (ИПД). Исследование ультрамелкозернистых (УМЗ) металлов, полученных ИПД, показало, что они характеризуются рядом уникальных свойств – повышенной в несколько раз, по сравнению с крупнозернистыми аналогами, прочностью, сочетающейся с хорошей пластичностью, низко- и высокотемпературной сверхпластичностью, циклической и радиационной стойкостью.

Для получения УМЗ структуры методом ИПД используют процесс равноканального углового прессования (РКУП), разработанный творческим коллективом В.М. Сегала и развитый Р.З. Валиевым с сотрудниками. В ВНИИ технической физики Российского федерального ядерного центра (г. Снежинск) предложен динамический вариант этого метода (ДКУП), в котором продавливание материала через каналы осуществляется путем импульсной нагрузки за счет энергии продуктов горения пороха, сжатых газов и др. [1]. Основное преимущество этого метода по сравнению с РКУП состоит в том, что увеличивается скорость пластического деформирования, а также добавляется ударно-волновая деформация, которая увеличивает общий результат воздействия.

Несмотря на активное развитие в последние годы нескольких новых методов интенсивной деформации (всестороннейковки, прокатки с наложением и соединением листов, специального циклического деформирования и ряда других), динамическое канально-угловое прессование остается наиболее широко исследуемым методом ИПД.

С физической точки зрения к процессам интенсивного пластического деформирования также следует отнести процесс резания материалов, который сопровождается трением стружки о переднюю поверхность резца и трением задней поверхности инструмента о поверхность резания, происходящих в условиях высоких давлений и скоростей скольжения. Затрачиваемая при этом механическая энергия переходит в тепловую, которая, в свою очередь, оказывает большое влияние на закономерности деформирования срезаемого слоя, силы резания, износ и стойкость режущего инструмента.

Продукция современного машиностроения характеризуется использованием высокопрочных и труднообрабатываемых материалов, резким повышением требований к точности и качеству изделий и значительным усложнением конструктивных форм деталей машин, получаемых обработкой резанием. Поэтому процесс механической обработки требует постоянного совершенствования. В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений такого совершенствования является высокоскоростная обработка.

Таким образом, **актуальность исследований** обусловлена потребностью в прогнозировании процессов интенсивного пластического деформирования металлов при динамическом канально-угловом прессовании и высокоскоростном резании.

Цель работы

Целью диссертационной работы является изучение закономерностей интенсивного пластического деформирования и определение рациональных режимов высокоскоростного ортогонального резания металлов с учетом разрушения, температурных эффектов и теплопроводности, а также режимов динамического канально-углового прессования металлических образцов для различных схем нагружения.

Задачи, решаемые для достижения цели

1. Развитие физико-математической модели для исследования механического поведения металлических образцов при высокоскоростном ортогональном резании и при динамическом канально-угловом прессовании с учетом разрушения, температурных эффектов и теплопроводности в двух- и трехмерной постановках.
2. Численное исследование динамического взаимодействия рабочей части резца с металлическими образцами; выявление особенностей интенсивного пластического деформирования материала образца в процессе высокоскоростного ортогонального резания при варьировании скорости резания, углов наклона резца, глубины резания.
3. Численное исследование процессов динамического канально-углового прессования для различных схем нагружения, определение рациональных начальных параметров процесса (скорость, давление на образец, пуансон или поршни), при которых обеспечивается прохождение образцов по каналам и их целостность.
4. Численное исследование процесса динамического канально-углового прессования в трехмерной постановке, сравнение результатов расчетов с результатами, полученными в двумерной постановке.

Научная новизна работы

1. Создана физико-математическая модель для численного анализа механического поведения металлических образцов при высокоскоростном резании и динамическом канально-угловом

- прессовании с учетом разрушения, температурных эффектов и теплопроводности.
2. Численно исследован процесс механического поведения металлических образцов при высокоскоростном ортогональном резании с учетом разрушения, температурных эффектов и теплопроводности. Получена зависимость для определения критерия стружкоотделения по удельной энергии сдвиговых деформаций от скорости резания, предложен критерий стружкоотделения по удельному объему микроповреждений в качестве самостоятельного или дополнительного.
 3. Численно исследован процесс динамического канально-углового прессования в двумерной постановке для различных схем нагружения: инерционной, динамической, динамической с пуансоном и динамической двухпоршневой. Определены эффективные начальные параметры процесса (скорость, давление на образец, пуансон или поршни), при которых обеспечивается прохождение образцов по каналам и их целостность.
 4. Проведены численные исследования процесса динамического канально-углового прессования в трехмерной постановке и сравнение полученных результатов с результатами, полученными в двумерной постановке, обосновывающие адекватность последних.

Достоверность полученных результатов обеспечивается: физической и математической корректностью постановок задач, апробированностью выбранного метода их решения, выбором в каждом конкретном случае адекватной расчетной сетки, обеспечивающей сходимость решения, контролем в процессе численного счета выполнения законов сохранения, сравнением с экспериментальными результатами, полученными другими авторами.

Практическая и теоретическая значимость работы

Полученные теоретические результаты, расширяющие знания о физике и механике процессов высокоскоростного ортогонального резания металлов и динамического канально-углового прессования металлических образцов, необходимы для обработки экспериментальных данных и развития математических моделей для исследования закономерностей таких быстропотекающих процессов. Полученные результаты внедрены и используются в Национальном исследовательском Томском государственном университете, численная методика зарегистрирована в Объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование».

Связь работы с научными программами и темами

Диссертация выполнялась по программе Министерства образования и науки РФ в рамках АВИЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проекты 2.1.1/5993, 2.1.2/6809), Минобрнауки РФ и CRDF по Российско-американской программе «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант RUX0-016-ТО-06), Минобрнауки РФ в рамках ФЦП

«Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (проект НК - 712П, ГК № П666), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 07-08-00037, 10-08-00516, 08-08-12055), РФФИ - Администрация Томской области (проект 09-08-99059).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Физико-математическая модель, описывающая процессы интенсивного пластического деформирования, разрушения и теплопроводности применительно к высокоскоростному ортогональному резанию металлов и динамическому канально-угловому прессованию металлических образцов в двумерной и трехмерной постановках.
2. Закономерности интенсивного пластического деформирования и разрушения металлических образцов при ДКУП в зависимости от выбранной схемы нагружения: инерционной, динамической, динамической с пуансоном, динамической двухпоршневой, обосновывающие подбор рациональных параметров для указанных схем и преимущество динамической двухпоршневой схемы нагружения.
3. Комплекс результатов численного исследования механического поведения металлических образцов при высокоскоростном ортогональном резании металлов. Критерии стружкоотделения и характер их зависимости от скорости резания.

Личный вклад автора

При выполнении диссертационной работы личный вклад автора состоял в физико-математической постановке задач, разработке и численной реализации моделей поведения сред, проведении численных расчетов, анализе полученных результатов, написании статей, обосновании научных рекомендаций.

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на 22 Всероссийских и Международных конференциях и симпозиумах: Международная конференция «Ударные волны в конденсированных средах» (г. Санкт-Петербург, 2008 г.); XXIV Международная конференция «Физика экстремальных состояний вещества» (Эльбрус, 2009 г.); Международные конференции XI, XIII Харитоновские тематические научные чтения. «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» (г. Саров, 2009, 2011 гг.); V, VI Всероссийские конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем» (г. Томск, 2009, 2010 гг.); XVII Международная конференция «Физика прочности и пластичности материалов» (г. Самара, 2009 г.); V Международный симпозиум «Горение и плазмохимия» (г. Алматы, 2009 г.); IV Всероссийская конференция «Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии» (г. Томск, 2009 г.); II Международная школа-конференция «Физика и химия наноматериалов» (г. Томск, 2009 г.); Всероссийская конференция «Современная баллистика и смежные вопросы

механики», посвященная столетию со дня рождения профессора М.С. Горохова – основателя Томской школы баллистики (г. Томск, 2009 г.); Молодежная научная конференция в рамках Всероссийского Фестиваля науки (г. Томск, 2009 г.); XVI Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2010 г.); VII Международная конференция «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2010 г.); X Международная конференция «Забабахинские научные чтения» (г. Снежинск, 2010 г.); Всероссийская молодежная научная конференция Томского государственного университета «Современные проблемы математики и механики» (г. Томск, 2010 г.); 8th International Conference «New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter» (Paris, France, 2010 г.); Всероссийская молодёжная научная конференция Томского государственного университета «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред» (г. Томск, 2010 г.); Международная конференция «XXXVII Гагаринские чтения» (г. Москва, 2011 г.); Седьмая Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (г. Томск, 2011 г.); Международная конференция «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», посвященная 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко (г. Новосибирск, 2011 г.); Всероссийская Молодежная конференция «Успехи химической физики» (г. Черноголовка, 2011 г.).

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 30 печатных работах, из них 4 – статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ, 1 статья в зарубежном журнале, 20 – статьи в сборниках трудов, материалах Всероссийских и Международных конференций, 5 – тезисы докладов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех разделов и заключения. Общий объем работы 122 страницы, включая 54 рисунок, 3 таблицы, 132 библиографические ссылки в списке использованной литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, формулируется цель работы, научная новизна полученных результатов, положения, выносимые на защиту.

Раздел 1. Математические модели и численные алгоритмы расчета динамического взаимодействия деформируемых твердых тел в пространственной постановке (1.1. Физико-математическая модель процесса деформирования и разрушения тел из инертных материалов при их динамическом взаимодействии, учитывающая кинетику повреждения материалов и тепловые эффекты; 1.2. Метод конечных элементов для

численного решения задач высокоскоростного соударения; 1.3. Трехмерный расчет взаимодействия цилиндрических тел с жесткой стенкой).

В первом разделе диссертации представлена система уравнений для описания нестационарных адиабатических движений упругопластической среды с учетом разрушения и тепловых эффектов [2]. В работе используется модель повреждаемой среды, характеризующаяся наличием микрополостей (пор, трещин). В элементарном объеме среды W конденсированная фаза занимает объем W_c и характеризуется плотностью ρ_c , микрополости (пустоты) занимают объем W_f , в которых плотность материала полагается равной нулю. Средняя плотность повреждаемой среды связана с введенными параметрами соотношением $\rho = \rho_c (W_c/W)$. Степень поврежденности среды характеризуется удельным объемом микроповреждений $V_f = W_f / (W\rho)$. Система уравнений, описывающая нестационарные адиабатические (как при упругом, так и при пластическом деформировании) движения прочной сжимаемой среды с учетом зарождения и эволюции микроповреждений состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии, скорости изменения удельного объема микроповреждений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = \sigma_{ij,j}, \quad (2)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

$$\frac{dV_f}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{если } |P_c| \leq P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_f = 0) \\ -\text{sign}(P_c) K_f (|P_c| - P^*) (V_2 + V_f), & \\ \text{если } P_c < -P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_f > 0) \end{cases}, \quad (4)$$

где ρ - плотность, t - время, v - вектор скорости с компонентами v_i , $\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + S_{ij}$ - компоненты тензора напряжений, S_{ij} - компоненты деватора напряжений, $P = P_c(\rho/\rho_c)$ - среднее давление, P_c - давление в сплошной компоненте вещества, E - удельная внутренняя энергия, ε_{ij} - компоненты тензора скоростей деформаций, $P^* = P_k V_1 / (V_f + V_1)$; V_1 , V_2 , P_k , K_f - экспериментально определяемые константы.

Давление в неповрежденном веществе является функцией удельного объема и удельной внутренней энергии и во всем диапазоне условий нагружения определяется с помощью уравнения состояния типа Ми-Грюнайзена:

$$P_c = \rho_0 a^2 \mu \left[1 + \mu(1 - \gamma_0/2 + 2(b-1)) + \mu^2 \left(2(1 - \gamma_0/2)(b-1) + 3(b-1)^2 \right) \right] + \gamma_0 \rho_0 E,$$

где $\mu = V_0/(V-V_f)-1$, γ_0 - коэффициент Грюнайзена, V_0 и V - начальный и текущий удельные объемы, a и b - константы адиабаты Гюгонио. Определяющие соотношения имеют вид:

$$2G \left(\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right) = \frac{dS_{ij}^0}{dt} + \lambda S_{ij} ,$$

где dS_{ij}^0/dt - производная по Яуманну.

Параметр λ тождественно равен 0 при упругой деформации, а при наличии пластической - определяется с помощью условия текучести Мизеса:

$$S_{ij} S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma^2 .$$

В приведенных выше формулах G - модуль сдвига, σ - динамический предел текучести, которые определяются согласно соотношениям:

$$G = G_0 K_T \left(1 + \frac{cP}{(1+\mu)^{1/3}} \right) \frac{V_3}{(V_f + V_3)} ,$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_0 K_T \left(1 + \frac{cP}{(1+\mu)^{1/3}} \right) \left(1 - \frac{V_f}{V_4} \right) , & \text{если } V_f \leq V_4 \\ 0 , & \text{если } V_f > V_4 \end{cases} , \quad (5)$$

$$K_T = \begin{cases} 1 , & \text{если } T_0 \leq T \leq T_1 \\ \frac{T_m - T}{T_m - T_1} , & \text{если } T_1 < T < T_m \\ 0 , & \text{если } T \geq T_m \end{cases} .$$

Здесь T_m - температура плавления, c , V_3 , V_4 , T_1 - константы. Выбор функции $K_T(T)$ осуществлялся с целью моделировать атермический характер пластического деформирования, наблюдаемый экспериментально при скоростях деформирования 10^4 с^{-1} и выше [3].

В работе используется модель разрушения эрозионного типа для описания разрушения материала, имеющего место в области интенсивного взаимодействия и деформирования контактирующих тел, разработанная основе анализа экспериментальных данных. В таких областях, как правило, давления положительные (сжимающие) и модель разрушения «на разрыв» (4) в них не работает. В качестве критерия «сдвигового» (эрозионного) разрушения материала используется критическое значение удельной энергии сдвиговых деформаций, которое зависит от прочностных характеристик материала, условий взаимодействия и задается функцией начальной скорости удара.

При формулировке краевой задачи для приведенной системы уравнений определяются начальные и граничные условия, соответствующие физической постановке задачи.

Приведены соотношения метода конечных элементов для решения задач высокоскоростного соударения деформируемых твердых тел.

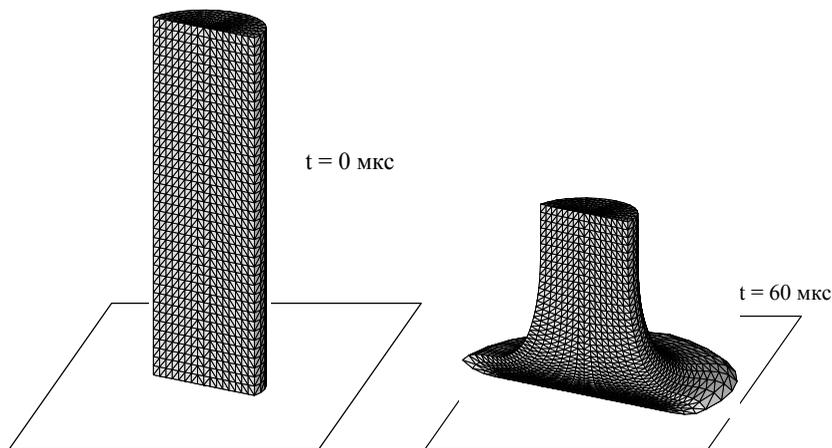


Рис. 1. Конфигурации стального цилиндрического ударника при ударе по жесткой стенке с начальной скоростью 400 м/с.

Таблица 1. Сталь.

№	v_0 , м/с	σ , ГПа	l_k/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

В качестве теста численной методики в трехмерной постановке была рассмотрена задача динамического взаимодействия цилиндрического тела с жесткой стенкой (задача Тейлора) при вариации материала тела (алюминий, сталь) и скоростей удара. На рис. 1 представлены результаты одного из расчетов - удар с начальной скоростью 400 м/с. В табл. 1 приведены полученные численные результаты для стали в сравнении с экспериментальными данными [4]. Наблюдается хорошее их согласие для отношения конечной длины цилиндра к начальной.

Раздел 2. Численное исследование процессов высокоскоростного ортогонального резания металлов (2.1. Высокоскоростное ортогональное резание металлов инструментом из сверхтвердого материала с учетом

разрушения и температурных эффектов; 2.2. Моделирование процесса теплопроводности при высокоскоростном резании металлов).

В работе в плоской постановке методом конечных элементов исследована задача о высокоскоростном ортогональном резании металлов инструментом из сверхтвердого материала. Моделирование процесса отделения стружки от заготовки осуществлялось с использованием критерия разрушения расчетных элементов заготовки вдоль линии резания, при этом использовался подход, аналогичный имитационному моделированию разрушения материала эрозионного типа. В качестве критерия разрушения - критерия отделения стружки - применялось предельное значение удельной энергии сдвиговых деформаций.

Левая и нижняя границы модели заготовки в расчетах фиксировались, моделировалась только рабочая часть инструмента и принималось, что вершина инструмента движется горизонтально. Расчеты проводились в диапазоне скоростей резания от 1 до 200 м/с. Размеры рабочей части инструмента: длина верхней грани 1.25 мм, боковой 3.5 мм, передний и задний углы варьировались в диапазоне 1 - 15°. Обрабатываемая стальная пластина (заготовка) имела толщину 5 мм; глубина резания (толщина стружки) - 1 мм. Материал рабочей части инструмента - плотная модификация нитрида бора.

В качестве критерия отделения стружки в работе принято предельное значение удельной энергии сдвиговых деформаций, которое задано функцией начальной скорости взаимодействия (рост критического значения связан с деформационным упрочнением обрабатываемого материала):

$$E_{сдв}^{кр} = a_1 + a_2 v_0 + \frac{a_3}{v_0},$$

где a_i – константы, подбираемые на основе согласования экспериментальных и численных данных, v_0 – скорость движения резца. Для исследованного диапазона начальных условий значения констант составили: $a_1 = 210$ кДж/кг, $a_2 = 2 \cdot 10^3$ м/с, $a_3 = 3 \cdot 10^5$ м³/с³.

На рис. 2 представлены поля удельной энергии сдвиговых деформаций и удельного объема микроповреждений. Результаты расчетов показывают, что градиентные изменения удельного объема микроповреждений перед резцом более выражены, чем изменения удельной энергии сдвиговых деформаций, поэтому в расчетах в качестве критерия отделения стружки можно использовать (самостоятельно или дополнительно) предельную величину удельного объема микроповреждений.

Проведенные параметрические расчеты показали, что в диапазоне скоростей резания от 1 до 200 м/с, изменения переднего угла резца от 1° до 15° и изменения глубины резания от 0.5 до 1.5 мм наблюдаются незначительные изменения максимального значения удельного объема микроповреждений в срезаемом слое образца. На основании полученных

численных результатов в качестве возможного критерия стружкоотделения для стального образца в исследованном диапазоне начальных условий резания подобрано значение удельного объема микроповреждений, равное $0.2 \text{ см}^3/\text{г}$.

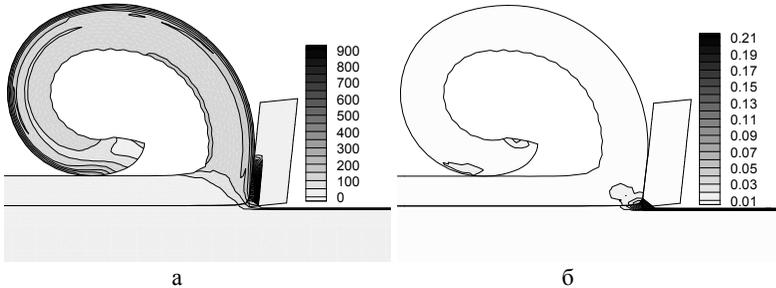


Рис. 2. Поля удельной энергии сдвиговых деформаций (в кДж/кг) (а) и удельного объема микроповреждений (в $\text{см}^3/\text{г}$) (б) в момент времени 0.9 мс при движении реза со скоростью 25 м/с.

Процессы высокоскоростного резания металлов при скоростях движения реза более 0.5 м/с характеризуются скоростями деформирования $10^4 - 10^6 \text{ с}^{-1}$ и миллисекундными длительностями процесса. При таких длительностях процесса взаимодействия тел требуется учет теплопроводности.

При моделировании процесса теплопроводности температуры узлов находились согласно [5] по формуле:

$$T_p^{n+1} = T_p^n + \frac{\sum Q_p}{m_p c_{pp}},$$

где T_p^{n+1} и T_p^n температуры узла p на n и $n+1$ шагах, $\sum Q_p$ - сумма тепловых вкладов всех элементов, содержащих узел p , m_p - масса узла p и c_{pp} - удельная теплоемкость материала.

На рис. 3 представлены результаты эксперимента [6] по измерению температуры в алюминиевом сплаве 6061-T6 при скорости резания 15 м/с. Датчики температуры 1, 2 и 3 в эксперименте располагались на расстоянии 11.5 мм от края образца, с которого начиналось резание, и на глубине 1.2, 1.0 и 0.8 мм соответственно. Кривые 1', 2' и 3' - результаты численного расчета с учетом теплопроводности.

Сравнение результатов, представленных на рис. 3, показало хорошее их качественное и количественное соответствие. Расхождения максимальных значений температур в расчете и эксперименте не превышает 3%. После того, как в эксперименте режущий инструмент проходит место расположения датчиков, последние выходят из строя, в результате чего кривые 1 - 3 демонстрируют падение до уровня шума. Численные результаты иллюстрируют плавное падение температуры.

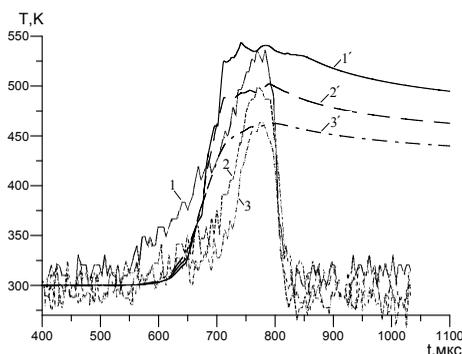


Рис. 3. Изменение температуры в заготовке из алюминиевого сплава 6061-Т6 в процессе высокоскоростного резания: скорость резания 15 м/с, глубина резания 1.5 мм, передний угол 5° , задний угол 8° . Кривые 1, 2, 3 - эксперимент, 1', 2', 3' - численный расчет.

На рис. 4 показаны поля и изолинии температуры. Расчеты показывают, что температура за счет теплообмена плавно падает при удалении от зоны контакта реза со стружкой. Максимальные значения температуры в локальных областях стружки для скорости резания 15 м/с к моменту времени 2.6 мс не превышают 1100 К, заготовки – 650 К, резца – 900 К. С увеличением толщины стружки наблюдается уменьшение радиуса ее закручивания.

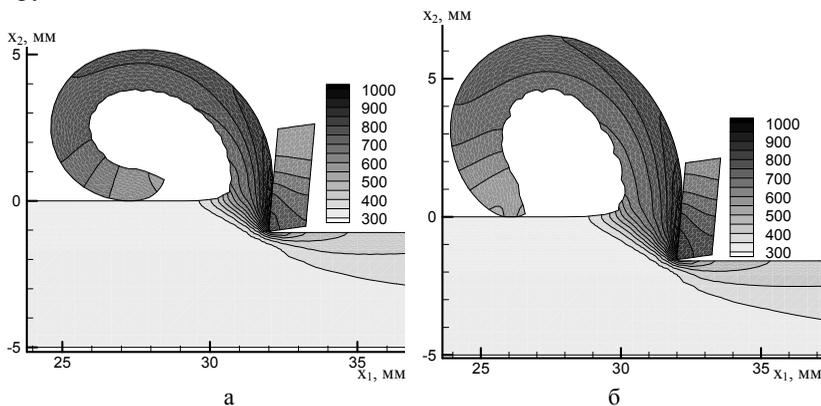


Рис. 4. Поля и изолинии температур (в К) в момент времени 1.2 мс при движении резца со скоростью 15 м/с для толщин стружки 1 мм (а), 1.5 мм (б).

Сравнение результатов численных расчетов высокоскоростного резания с учетом и без учета теплопроводности показало качественное подобие распределения температуры, но ее максимальные значения с учетом теплопроводности заметно ниже. Сравнение результатов численных

расчетов с учетом теплопроводности с результатами, полученными в экспериментах по высокоскоростному резанию, показали их хорошее качественное и количественное соответствие.

Раздел 3. Численное исследование процессов динамического канально-углового прессования металлов (3.1. Применение метода интенсивной пластической деформации для получения объемных наноструктурных материалов; 3.2. Динамическое канально-угловое прессование с применением инерционной схемы нагружения; 3.3. Динамическая схема нагружения; 3.4. Динамическая схема нагружения с пуансоном; 3.5. Двухпоршневая схема нагружения; 3.6. Численное моделирование процессов динамического канально-углового прессования в трехмерной постановке).

В данном разделе представлены результаты численного исследования процесса динамического канально-углового прессования металлических образцов с использованием различных схем нагружения: инерционной, динамической с пуансоном и двухпоршневой.

Инерционная схема нагружения характеризуется следующим. В начальный момент времени образец находится в вертикальном канале оснастки и движется с заданной начальной скоростью. В дальнейшем его движение по каналам происходит по инерции.

Процесс деформирования моделировался в плоскодеформационной постановке на примере алюминиевых, медных и титановых образцов шириной 16 мм и длиной 65 мм. Начальная скорость образцов варьируется в диапазоне 100 – 500 м/с. Угол пересечения каналов 90° , длина внешних сторон вертикального и горизонтального каналов матрицы 100 мм каждая. При пересечении каналов внутренний и внешний радиусы скругления равны 5.1 мм и 9.3 мм, соответственно. Материал матрицы – высокопрочная сталь.

На рис. 5 представлены средние скорости титанового образца и его областей. Расчеты показывают, что при $v_0=250$ м/с скорости движения исследуемых областей образца (передней, средней и тыльной) сильно различаются. После интенсивного падения при прохождении пересечения каналов средняя скорость образца через примерно 0.3 мс продолжает медленно снижаться и достигает значения 51 м/с к 1.2 мс процесса. Передняя часть образца при этом движется с более высокой скоростью (73 м/с к 1.2 мс), а тыльная часть останавливается к 1.1 мс, не доходя до пересечения каналов. Повышение начальной скорости образца до 350 м/с изменяет характер заключительной стадии процесса – средние скорости всех трех частей выравниваются примерно к 0.9 мс, и далее образец движется как единое целое с остаточной скоростью 52 м/с.

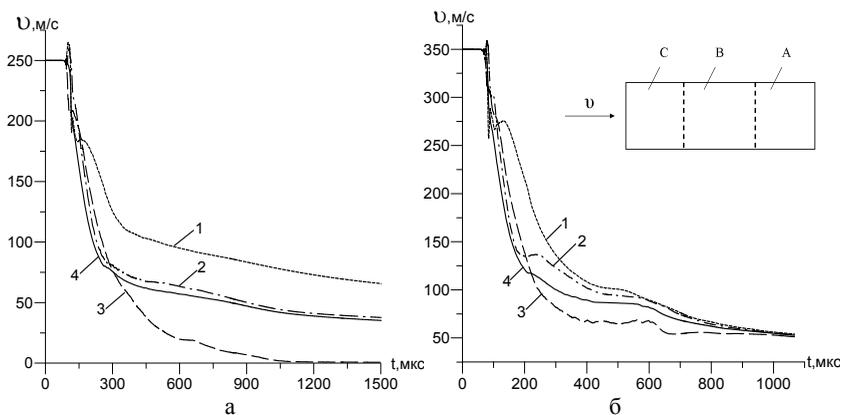


Рис. 5. Средние скорости титанового образца и исследуемых областей для начальных скоростей образца 250 м/с (а) и 350 м/с (б); 1 – область А, 2 – область В, 3 – область С, 4 – весь образец.

Из результатов расчетов следует, что титановый и алюминиевый образцы останавливаются во внутреннем канале оснастки, если их начальная скорость меньше 300 м/с, а у медного – меньше 250 м/с. Диапазон скоростей 300 - 350 м/с для титанового и алюминиевого образцов, 250 - 300 м/с для образцов из меди можно считать нижним порогом скорости, при которой обеспечивается полное прохождение образцов по каналам при ДКУП. При начальных скоростях свыше 400 м/с для алюминиевых и медных образцов в процессе прессования наблюдается образование множественных очагов с высоким уровнем удельного объема микроповреждений.

В динамической схеме нагружения, в отличие от инерционной, на тыльной поверхности образца дополнительно задается постоянная нагрузка P_0 , которая равномерно распределена по тыльной поверхности. В данной и последующих сериях расчетов на границах каналов матрицы ставится условие жесткой стенки.

Процесс ДКУП по динамической схеме нагружения моделировался на примере титановых образцов шириной 16 мм и длиной 65 мм. Начальная скорость образцов варьировалась в диапазоне 0 - 500 м/с. Задаваемое давление составило 0.1 – 0.4 ГПа. Угол пересечения каналов 90° . В области внешнего угла пересечения каналов задана площадка, составляющая с направляющими каналов угол 45° .

Расчеты показывают, что поле удельной энергии сдвиговых деформаций (рис. б) после прохождения образцом пересечения каналов распределено по образцу неравномерно. Конечная форма образцов существенно зависит от начальных условий нагружения. Определяющим параметром является начальная скорость образца. Оптимальной формой образца, с точки зрения

возможной повторной его обработки, будет форма, близкая к первоначальной. Учитывая это, рациональными параметрами при динамической схеме нагружения титанового образца будут: начальная скорость 200 - 250 м/с, давление 0.28 - 0.32 ГПа.

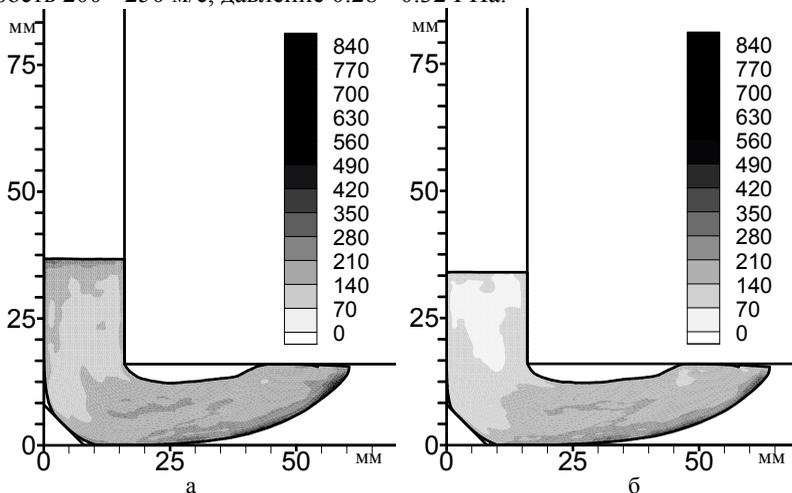


Рис. 6. Поле удельной энергии сдвиговых деформаций (в кДж/кг) для титанового образца при начальной скорости 350 м/с в момент времени 150 мкс: при давлении 0.2 ГПа (а) и 0.3 ГПа (б).

Анализ результатов расчетов ДКУП по динамической схеме с пуансоном показал, что при начальной скорости 250 м/с и давлении на пуансон 0.23 ГПа обеспечивается прохождение титановых образцов по каналам и сохранение их формы.

Рассмотрено нагружение по динамической двухпоршневой схеме - при дополнительном воздействии на образец двух разнонаправлено действующих поршней – толкающего и противодействующего. Последний предназначен, прежде всего, для сдерживания удлинения образца. Задается начальная скорость образца и постоянная нагрузка P_0 на тыльной поверхности толкающего поршня, моделирующая давление пороховых газов. В момент взаимодействия образца с противодействующим поршнем из горизонтального канала, на тыльной стороне последнего задается постоянная нагрузка P_1 . Расстояние между поршнем из горизонтального канала и областью пересечения каналов варьировалось от 0 до 70 мм.

Процесс динамического деформирования моделировался на примере титановых образцов шириной 16 мм и длиной 65 мм. Начальная скорость образцов варьировалась в диапазоне 100 – 500 м/с, давление $P_0 = 0.1 - 0.5$ ГПа, $P_1 = k P_0$, причем коэффициент k варьировался от 0.1 до 0.7.

На рис. 7 представлены поля и изолинии удельной энергии сдвиговых деформаций (слева) и температуры (справа) в образце при начальном расстоянии между поршнем из горизонтального канала и областью пересечения каналов 37 мм в момент времени 0.37 мс при начальной скорости 250 м/с, давлении на толкающий поршень 0.65 ГПа, давлении на поршень из горизонтального канала 0.39 ГПа. Удельная энергия сдвиговых деформаций распределена по образцу равномерно за исключением области контакта с поршнем из горизонтального канала. В этой области может происходить локальное оплавление образца, в то время как в остальной части образца температура не превышает 900 К.

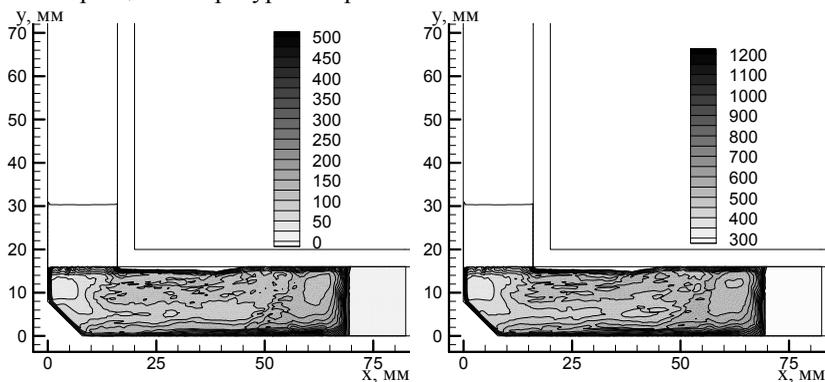


Рис. 7. Поля и изолинии удельной энергии сдвиговых деформаций (в кДж/кг) (слева) и температуры (в К) (справа) в образце.

Расчеты показали, что наибольшие значения удельного объема микрповреждений возникают при прохождении образцом области пересечения каналов в верхней его части и в области контакта образца с поршнем из горизонтального канала. В остальной части образца уровни удельного объема микрповреждений существенно ниже. С ростом начальной скорости образца наблюдается рост числа очагов с высоким уровнем микрповреждений.

В трехмерной постановке, рассмотрен процесс ДКУП по динамической схеме нагружения (рис. 8а): на тыльной поверхности образца задается постоянная нагрузка P , которая равномерно распределена по тыльной поверхности. Противоположная (лицевая) поверхность образца свободна от внешних нагрузок в течение всего процесса деформирования. На границах каналов матрицы ставится условие жесткой стенки.

Процесс динамического деформирования моделировался на примере титановых образцов длиной и шириной 16 мм, высотой 65 мм. Начальная скорость образцов варьировалась в диапазоне 100 – 500 м/с, давление $P = 0.1 - 0.5$ ГПа. Угол пересечения каналов 90° . В области внешнего угла стенок каналов матрицы задана наклонная площадка под углом 45° .

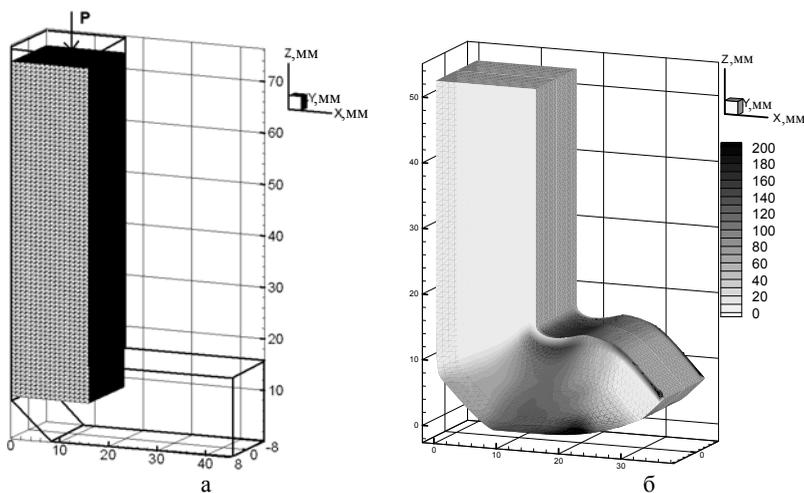


Рис. 8. Начальное расположение образца в канале матрицы для случая динамической схемы нагружения в трехмерной постановке (а); поля удельной энергии сдвиговых деформаций (в кДж/кг) в образце при начальной скорости 100 м/с, давлении на образец 0.5 ГПа, в момент времени 150 мкс(б).

Расчеты показали, что поля удельной энергии сдвиговых деформаций распределены по образцу достаточно равномерно с максимальными значениями у верхней и нижней границ горизонтального канала, а также на граничных областях верхней кромки образца (рис. 8б). Передняя область образца и область, еще не прошедшая пересечение каналов, содержат близкий к нулю уровень удельной энергии сдвиговых деформаций. Поле температур близко к полю удельной энергии сдвиговых деформаций, максимальные значения температуры в образце к моменту времени 150 мкс не превышают 900 К, в большей части образца, прошедшего область пересечения каналов, температура не превышает 550 К. Поле удельного объема микрповреждений в образце сконцентрировано в области угла пересечения каналов матрицы с максимальными значениями в области, близкой к верхней поверхности образца.

Сравнение результатов расчетов в двумерной и трехмерной постановках показало, что формы образцов после прохождения области пересечения каналов матрицы в обоих случаях близки. Уровни удельной энергии сдвиговых деформаций и температуры для трехмерного случая ниже аналогичных результатов из двумерного. Максимальные значения удельного объема микрповреждений в двумерной и трехмерной постановках соответствуют друг другу.

В **заключении** диссертации сформулированы основные результаты и выводы, полученные в работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе выполнена модификация физико-математической модели для исследования механического поведения металлических образцов с учетом разрушения, температурных эффектов и теплопроводности. Проведено численное исследование процессов интенсивного пластического деформирования титановых, медных и алюминиевых образцов при динамическом канально-угловом прессовании в двумерной и трехмерной постановках. Численно исследованы процессы высокоскоростного ортогонального резания металлов в двумерной постановке.

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Численно исследован в плоскодеформационной постановке процесс высокоскоростного ортогонального резания металлов в широком диапазоне изменения начальных значений параметров, таких как: скорость резания, передний и задний углы резца, глубина резания. Предложена зависимость от скорости резания для определения критерия стружкоотделения по максимальному значению удельной энергии сдвиговых деформаций. Определено, что в качестве дополнительного или самостоятельного критерия стружкоотделения можно использовать значение удельного объема микроповреждений. Установлено, что в диапазоне скоростей резания 1 - 200 м/с для образцов из стали Ст3 критерий стружкоотделения по удельному объему микроповреждений может быть постоянной величиной, равной $0.2 \text{ см}^3/\text{г}$. Выявлена зависимость формы образующейся в процессе резания стружки от скорости резания и глубины резания. Установлено, что величина переднего угла резца влияет на форму стружки и на размер площади контакта резца со стружкой. Показано, что учет теплопроводности позволяет получить хорошее качественное и количественное согласие результатов численных расчетов с экспериментальными данными.

2. Численно исследован процесс деформирования металлических образцов при ДКУП в двумерной и трехмерной постановках для различных схем нагружения: инерционной, динамической, динамической с пуансоном и динамической двухпоршневой. Определены эффективные значения начальной скорости образцов из титана, алюминия и меди для инерционной схемы нагружения, а для динамической – начальной скорости и действующего на образец давления. Показано преимущество динамической схемы по сравнению с инерционной, заключающееся в сокращении времени процесса ДКУП, меньшем удлинении образцов после прессования, снижении уровня поврежденности образцов после обработки. Для схем «динамическая с пуансоном» и «динамическая двухпоршневая» определены рациональные сочетания параметров начальная скорость титановых

образцов – давление, а в последнем случае и противодействие, обеспечивающие прохождение образцов по каналам и их целостность.

3. На примере образцов из титана показано, что распределение удельной энергии пластических деформаций после одного цикла ДКУП неравномерно по образцу для всех исследованных схем нагружения, кроме схемы с двумя поршнями, что свидетельствует о необходимости дополнительных циклов. Выявлены области концентрации удельного объема микроповреждений, в которых может наступить макроразрушение образца. Установлено, что использование динамической двухпоршневой схемы нагружения приводит к более равномерному распределению удельной энергии сдвиговых деформаций в образцах, а конечная форма образца после процесса ДКУП близка к первоначальной.

4. Установлено, что динамическая двухпоршневая схема ДКУП с толкающим и противодействующим поршнями является наиболее эффективной из рассмотренных с точки зрения обеспечения сохранности образцов и их формы после нагружения, а также уменьшения циклов ДКУП за счет более равномерного распределения пластических деформаций в образце.

5. Показано, что расчеты в двух и трех измерениях процессов ДКУП дают качественно подобные результаты по форме образцов, а максимальные значения удельного объема микроповреждений в двумерной и трехмерной постановках соответствуют друг другу.

Цитируемая литература:

1. Шорохов Е.В., Жгилев И.Н., Хомская И.В. и др. Высокоскоростное деформирование металлических материалов методом канально-углового прессования для получения ультрамелкозернистой структуры // Деформация и разрушение материалов.- 2009.- №2.- С. 36 - 40.
2. Зелепугин С.А. Разрушение элементов конструкций при высокоскоростном взаимодействии с ударником и группой тел // Дисс. докт. физ.-мат. наук.- Томск, 2003.- 235 с.
3. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортон В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах // М.: «Янус-К». - 1996. - 407 с.
4. Gust W.H. High impact deformation of metal cylinders at elevated temperatures // J. Appl. Phys, 1982.- Vol. 53, no. 5.- P. 3566 - 3575.
5. Johnson G.R. Dynamic analysis of a torsion test specimen including heat conduction and plastic flow // Trans. ASME. J. Eng. Mater. and Technol.- 1981.- Vol. 103, no 3.- P. 201 - 206.

6. Vernaza–Pena K.M., Mason J.J. and Li M. Experimental study of the temperature field generated during orthogonal machining of aluminum alloy // *Experimental mechanics*, 2002.- Vol. 42, no 2.- P. 221 - 229.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Шипачев А.Н.**, Зелепугин С.А. Численное моделирование процессов высокоскоростного ортогонального резания металлов // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*, 2009.- №2 (6).- С. 109 - 115.
2. Зелепугин С.А., **Шипачев А.Н.** Моделирование методом конечных элементов процессов сверхскоростного ортогонального резания металлов // *Известия высших учебных заведений. Физика*, 2009.- т.52, № 7/2.- С. 109 - 114.
3. **Шипачев А.Н.**, Ильина Е.В., Зелепугин С.А. Деформирование титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании // *Деформация и разрушение материалов*, 2010.- № 4.- С. 20 - 24.
4. **Шипачев А.Н.**, Суглобова И.К., Ильина Е.В., Зелепугин С.А. Выбор параметров нагружения титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*.- 2011.- № 2(14).- С. 111 - 116.

Статья в зарубежном журнале:

5. **Шипачев А.Н.**, Павлова А.Л., Ильина Е.В., Суглобова И.К., Зелепугин С.А. Деформирование медных и алюминиевых образцов при динамическом канально-угловом прессовании // *Горение и плазмохимия*, 2009.- № 3.- 115 - 124.

В других научных изданиях:

6. Зелепугин С.А., Никуличев В.Б., Иванова О.В., Зелепугин А.С., Шпаков С.С., **Шипачев А.Н.**, Ильина Е.В., Ушаков С.М., Суглобова И.К. Применение программного комплекса КОМП2 для решения динамических задач МДТТ // *Сб. трудов Международной конференции «Ударные волны в конденсированных средах» (SWCM-2008)*.- Moscow: High Pressure Center, 2008.- С. 184 - 188.
7. **Шипачев А.Н.**, Зелепугин С.А. Моделирование процессов высокоскоростного ортогонального резания металлов // *Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Труды междунар. конф. «ХI*

- Харитоновские тематические научные чтения».- Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009.- С. 562-564.
8. **Шипачев А.Н.**, Зелепугин С.А. Особенности деформирования медных и алюминиевых образцов при равноканальном угловом прессовании // Физика и химия высокоэнергетических систем: Сборник материалов V Всероссийской конференции молодых ученых.- Томск: ТМЛ-Пресс, 2009.- С. 235 - 237.
 9. **Shipachev A.N.**, Zelepugin S.A. Simulation of high-speed orthogonal cutting of metals using finite element method // Physics of extreme states of matter-2009 / Edited by Fortov V.E. et al.- Chernogolovka: IPCP RAS, 2009.- P. 110 - 112.
 10. **Шипачев А.Н.**, Зелепугин С.А. Моделирование динамического канально-углового прессования алюминиевых и медных образцов // Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии: Материалы IV Всероссийской конференции молодых ученых.- Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2009.- С. 266 - 270.
 11. **Шипачев А.Н.**, Суглобова И.К., Зелепугин С.А. Особенности деформирования титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании // Физика и химия наноматериалов: Сборник материалов II Международной школы-конференции молодых ученых.- Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2009.- С. 171 - 173.
 12. **Шипачев А.Н.**, Суглобова И.К., Зелепугин С.А. Формирование наноструктурных образцов из меди и титана методом динамического канально-углового прессования // Физика и химия высокоэнергетических систем: Сборник материалов VI Всероссийской конференции молодых ученых.- Томск: ТМЛ-Пресс, 2010.- С. 106 - 109.
 13. **Шипачев А.Н.**, Зелепугин С.А. Моделирование процессов динамического канально-углового прессования // Забавихинские научные чтения: сборник материалов Межд. конференции.- Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2010.- С. 228.
 14. **Шипачев А.Н.**, Суглобова И.К., Зелепугин С.А. Моделирование динамического канально-углового прессования титана // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3-х т. Т. 3.- Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2010.- С. 397 - 398.
 15. **Шипачев А.Н.**, Суглобова И.К., Зелепугин С.А. Моделирование канально-углового прессования титана по динамической схеме нагружения // Современные проблемы математики и механики: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции Томского государственного университета.- Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2010.- С. 249 - 252.

16. Суглобова И.К., **Шипачев А.Н.**, Зелепугин С.А. Моделирование канально-углового прессования по динамической схеме нагружения // Труды Томского государственного университета. – Т. 276. – Сер. физико-математическая: Молодежная научная конференция Томского государственного университета 2010 г.- Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010.- С. 60 - 62.
17. Суглобова И.К., **Шипачев А.Н.**, Зелепугин С.А. Исследование влияния параметров нагружения на особенности деформирования титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании // Научные труды международной конференции «XXXVII Гагаринские чтения».- М.: МАТИ, 2011.- Т. 1.- С. 231 - 233.
18. **Шипачев А.Н.**, Суглобова И.К., Ильина Е.В., Зелепугин С.А. Численное моделирование пластического деформирования металлических образцов при ДКУП с пуансоном // Труды VII Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики».- Томск: Изд-во Томского госуниверситета, 2011.- С. 277 - 278.
19. **Шипачев А.Н.**, Суглобова И.К., Зелепугин С.А. Моделирование процессов деформирования титановых образцов с применением динамической схемы канально-углового прессования // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Труды международной конференции «XIII Харитоновские тематические научные чтения».- Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.- С. 386 - 389.