

На правах рукописи



Билалов Дмитрий Альфредович

**МЕХАНИЗМЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ В
МЕТАЛЛАХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2018

Работа выполнена в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь.

Научный руководитель: **Наймарк Олег Борисович**, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Змитренко Николай Васильевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий сектором Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва

Дмитриев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск

Защита состоится «5» июня 2018 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент

 А. Л. Зуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования.

Локализация пластической деформации в металлах и сплавах при динамическом нагружении является процессом, зависящим от скорости и величины деформации, температуры, а также эволюции структуры материала. Механизм разрушения, связанный с формированием полос адиабатического сдвига, свойственен большинству пластичных материалов при высокоскоростном деформировании.

Интерес к данному явлению начался с работ Tresca (1879), а в дальнейшем исследования получили развитие в работах Marchand, Duffy (1988), Giovanola (1988), Bai, Dodd (1992), Nemat-Nasser (1994). Классические модельные представления о формировании полос адиабатического сдвига, берущие начало с работ Zener, Hollomon (1944), основаны на учете конкуренции двух механизмов: упрочнение, обусловленное повышением скорости деформации, и разупрочнение, вызванное повышением температуры. Интенсивная локализация пластической деформации начинается тогда, когда материал теряет способность к упрочнению, а тепловыделение в условиях адиабатичности, существенно разупрочняет материал в локальных областях. Данный механизм термопластической неустойчивости описан в работах Wright, Ravichandran, Molinari, Clifton.

Построением определяющих соотношений для описания деформационного поведения пластичных материалов при динамическом нагружении занимались многие исследователи, среди них: Johnson, Cook (1983), Zerilli, Armstrong (1987), Voyiadjis, Abed (2005), Follansbee, Kocks (1988), Preston (2003), Годунов С.К. (1975), Мержиевский Л.А. (2012).

Исследования последних десятилетий установили важную роль механизмов структурной релаксации, вклад которых может быть соизмерим с термическим разупрочнением в ходе процесса локализации деформации. Burns (1994) в своей работе, проведя численные исследования, основанные на классических представлениях об экспоненциальной зависимости вязкости материала от температуры, пришел к выводу, что «температурный всплеск» не является решающим фактором в процессе локализации пластической деформации. Появились также экспериментально-теоретические исследования (Rittel, Landau, Dolinski, Dorogoy, Osovski), в которых экспериментальным путем было показано, что полосы адиабатического сдвига могут формироваться при относительно невысоких температурах, а механизм их появления связывался с динамической рекристаллизацией, а значит – эволюцией структуры материала. Подобные результаты также отражены и в работах Наймарка О.Б., в которых локализация пластической деформации связывается со структурным переходом в ансамбле мезодефектов.

Моделирование процесса локализации пластической деформации является комплексной задачей. Это связано с тем, что данное явление представляет собой нелинейный процесс, происходящий в узких областях в течение малого времени. В связи с этим отмечается сильная зависимость решения от масштаба дискретизации сплошной среды, чему посвящены работы Merzer (1982), Belytschko (1996), Li, Liu (2001). Сложности возникают и в обосновании критерия

разрушения. В работах Zhou et. al. (1996) условия разрушения связываются с критической величиной деформации. В работе Needleman и Tvergaard (1995) был введен скалярнозначный параметр поврежденности, ассоциируемый с пористостью, микротрещинами. Batra и Lear (2004) и McVeigh (2007) предложили развитие данного скалярнозначного параметра: были учтены факторы зарождения, роста и слияния микротрещин. Medyanik (2007) в своих численных исследованиях в явном виде ввел динамическую рекристаллизацию в полосе сдвига в виде пост-локализованной поврежденности. Критерий разрушения задавался соотношением двух характерных температур: плавления и рекристаллизации. Данный критерий, в отличие от предыдущих, имел более наглядный физический смысл. Dolinski (2010) предложил энергетический критерий, применительно к моделированию формирования полос адиабатического сдвига. Rittel с соавторами (2012) предложили структурно-феноменологическую модель, отражающую физику процесса локализации пластической деформации, связанную с динамической рекристаллизацией, появление которой исследователи связывали с достижением запасенной энергии в материале некоторого характерного значения. Аналогичный подход используется и в работах Наймарка О.Б. с коллегами, которые ввели два параметра, отвечающие за эволюцию структуры материала: тензор плотности микродефектов и параметр структурного скейлинга, являющийся отношением среднего размера дефектов и расстояния между ними. Однако открытым является вопрос о влиянии температуры на структурные механизмы инициирования и развития процесса локализации деформации при динамическом нагружении.

Таким образом, вопрос о явном учете обоих механизмов разупрочнения: термического и эволюции структуры материала при моделировании локализации пластической деформации и записи соответствующих уравнений в системе определяющих соотношений с использованием внутренних переменных является актуальной задачей.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является обоснование роли структурных переходов, обусловленных коллективным поведением дефектов, в инициировании процесса локализации пластической деформации и построение математической модели, которая учитывает как структурные изменения, так и термическое разупрочнение, и способна адекватно описывать деформационное поведение металлов при динамическом нагружении.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Построение структурно-феноменологической модели динамического деформирования металлов и сплавов с использованием широкодиапазонных определяющих соотношений, учитывающих кинетику дефектов.
2. Идентификация параметров модели для ряда материалов: сплавы: АМгб, А6061, Д16, сталь 25ХНЗМФС.
3. Адаптация построенной модели к пакету прикладных программ Abaqus.
4. Проведение численных экспериментов по динамическому деформированию образцов в условиях, близких к чистому сдвигу (АМгб), и пробиванию преград (АМгб, А6061, сталь 25ХНЗМФС).

5. Количественная оценка вкладов термического и дефектного разупрочнений в общую релаксацию в процессе локализации пластической деформации.
6. Сравнение расчетов с результатами оригинальных экспериментов, проведенных в лаборатории Физических основ прочности ИМСС УрО РАН.
Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:
 1. Обобщение модели деформируемого твердого тела, описывающей связь структурных переходов, обусловленных дефектами, с релаксационными свойствами материалов, на случай динамического деформирования металлов с учетом эффектов термического разупрочнения.
 2. Впервые развиваемая модель твердых тел с дефектами была применена для расчета процесса пробивания преград в двух- и трехмерной постановках.
 3. Впервые на основе предложенной модели была получена количественная оценка и сравнение дефектного и термического вкладов в разупрочнение материала, инициирующее локализацию пластической деформации при динамическом нагружении.
 4. Была предложена и апробирована методика определения параметра характерной температуры для учета термического разупрочнения в рамках используемой модели.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость обусловлена разработкой математической модели, отражающей связь механизмов структурной релаксации с развитием пластической неустойчивости и разрушения в условиях локализованного сдвига при динамическом нагружении. Практической значимостью является разработка методики определения констант материалов (АМг6, А6061, сталь 25ХНЗМФС, Д16) применительно к динамическим условиям нагружения и адаптация построенной модели к пакету прикладных программ Abaqus для задач трехмерного моделирования, что позволит прогнозировать прочностные характеристики реальных конструкций в условиях высокоскоростного деформирования. Практическую значимость представляет предложенная методика определения параметра характерной температуры, при помощи которой можно находить константы модели для широкого класса материалов (металлы и сплавы).

Методология и методы исследования. Для построения уравнений, описывающих деформационное поведение металлов, использовались подходы теории определяющих соотношений с учетом внутренних переменных, характеризующих поведение дефектов. Вычислительные эксперименты по моделированию процессов деформирования и разрушения в условиях локализованного пластического сдвига реализованы на основе метода конечных элементов. Параметры модели определялись путем решения задачи минимизации невязки (методом поиска) между теоретической и экспериментальной диаграммами деформирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель, связывающая механизмы релаксации с ростом дефектов и позволяющая описать процессы неупругого деформирования и разрушения металлов и сплавов при динамическом нагружении.

2. Численная реализация построенной модели в виде программы (пользовательской процедуры) в конечно-элементном пакете Abaqus для проведения вычислительного эксперимента.
3. Результаты комплексного исследования поведения материалов АМгб, А6061, сталь 25ХНЗМФС при динамическом нагружении: обоснование роли кинетики дефектов, количественная оценка вкладов термического и дефектного разупрочнений в процесс локализации пластической деформации и разрушения материалов в зависимости от скорости деформирования.
4. Разработанный алгоритм проверки адекватности модели для учета эффекта термического разупрочнения на основе данных натурного эксперимента.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов численного моделирования подтверждается удовлетворительным соответствием экспериментальным данным, проведенным анализом сходимости, сопоставлением с результатами других авторов.

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих международных и российских конференциях: XVIII, XIX и XX Зимняя школа по механике сплошных сред (2013, 2015, 2017 Пермь), XXI Санкт-Петербургские чтения по проблемам прочности (2014, Санкт-Петербург), International Workshop “Failure of Heterogeneous Materials under Intensive Loading: Experiment and Multiscale Modeling” (2014 Russia, Perm), XVI Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (2015, Пермь), XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015), XXII и XXIV Всероссийская школа-конференция «Математическое моделирование в естественных науках» (2013, 2015, Пермь), Всероссийская научно-техническая интернет-конференция «Прикладная математика, механика и процессы управления» (2013, Пермь), XII Международная конференция «Забабахинские научные чтения» (2014, Снежинск), Международная конференция «XVII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» (2015, Саров), Международная конференция «Физическая мезомеханика многоуровневых систем. Моделирование, эксперимент, приложения» (2014, Томск), Международная конференция «Перспективные материалы с иерархичной структурой для новых технологий и надежных конструкций» (2015, Томск), LVIII Актуальные проблемы прочности (2017, Пермь).

Исследования проводились в рамках грантов РФФИ: 16-48-590534 p_a, 15-08-08921 A, 15-02-03225 A, 14-01-96012 p_урал_a, 14-01-00842 A, 14-01-31193 мол_a, 13-08-96025 p_урал_a, и гранта РНФ: 14-19-01173.

Личный вклад соискателя заключается в модификации модели деформируемого твердого тела с дефектами для описания процесса локализации пластической деформации в металлах и сплавах при динамическом нагружении, проведении всех расчетов, сопоставлении результатов моделирования с экспериментальными данными, предложенным алгоритмом идентификации и

верификации параметров модели, необходимых для учета термического разупрочнения.

Публикации

Основные результаты опубликованы в 28 печатных работах, включая 8 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (в том числе 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 5 – в изданиях, входящих в базу цитирования Web of Science и Scopus).

Объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Исследование представлено на 107 страницах, содержит 38 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 94 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность, научная новизна, практическая значимость, цели и задачи исследования. Изложено краткое описание глав работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приведена классификация математических моделей деформационного поведения материалов, обзор определяющих соотношений для описания динамического нагружения, а также развитие модельных представлений о формировании полос адиабатического сдвига.

Вторая глава посвящена построению математической модели, учитывающей кинетику дефектов, и ее связь с релаксационными свойствами материалов.

Широкодиапазонные определяющие соотношения¹, описывающие связь структурных переходов, обусловленных дефектами, с релаксационными свойствами материалов, были использованы для построения математической модели применительно к описанию деформационного поведения металлов и сплавов при динамическом нагружении.

Для учета эволюции структуры материала вводятся две переменные состояния: тензор-значная – плотность микросдвигов (\mathbf{p}) и масштабно-инвариантная скаляр-значная (δ):

$$\mathbf{p} = \int sW(s, \mathbf{l}, \mathbf{b})dV,$$
$$\delta = \left(\frac{R}{r_0}\right)^3,$$

где: $\mathbf{s} = \frac{s}{2}(\mathbf{l}\mathbf{b} + \mathbf{b}\mathbf{l})$ – тензор микросдвигов, s – интенсивность сдвига; \mathbf{l} – единичный вектор нормали к плоскости сдвига; \mathbf{b} – единичный вектор в направлении сдвига; R – расстояние между дефектами, r_0 – характерный размер

¹ Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6, № 4. – С. 45-72

зародышей дефектов, V – объем, $W(s, \mathbf{l}, \mathbf{b})$ – функция распределения ориентации и интенсивности сдвигов. По своему физическому смыслу \mathbf{p} является деформацией, обусловленной дефектами. Тензор \mathbf{p} не содержит шаровой части: $Sp(\mathbf{p}) = 0$, $Sp(\cdot) = (\cdot):\mathbf{E}$, \mathbf{E} – единичный тензор.

Полная деформация скорости (\mathbf{D}) состоит из трех составляющих: пластической ($\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p$), упругой ($\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^e$) и обусловленной дефектами ($\dot{\mathbf{p}}$):

$$\mathbf{D} = \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^e + \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p + \dot{\mathbf{p}}, Sp(\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p) = 0, Sp(\dot{\mathbf{p}}) = 0.$$

Определяющие уравнения записываются в форме (1)-(3), которая обеспечивает знакоопределенность диссипативной функции (4).

$$\boldsymbol{\sigma} = l_1 \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p - l_2 \dot{\mathbf{p}}, \quad (1)$$

$$-\frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}} = -l_2 \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p + l_3 \dot{\mathbf{p}}, \quad (2)$$

$$-\frac{\partial F}{\partial \delta} = l_4 \dot{\delta}, \quad (3)$$

$$T\dot{S} = \boldsymbol{\sigma}:\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p - \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}}:\dot{\mathbf{p}} - \frac{\partial F}{\partial \delta} \dot{\delta} \geq 0, \quad (4)$$

где: $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений; F – свободная энергия; l_1, l_2, l_3, l_4 , – положительные кинетические коэффициенты, в общем случае зависящие от параметров состояния и удовлетворяющие неравенству $l_1 l_3 - l_2^2 > 0$, T – температура; S – энтропия.

Соотношения (1)-(2) переписываются в виде (10)-(11) и дополняются: уравнениями движения (5) и неразрывности (6), кинематическим соотношением (7), представлением тензора напряжений в виде суммы шаровой и девиаторных частей (8), законом Гука в скоростной формулировке (9), уравнением теплопроводности (12), выражением для свободной энергии (13) и критерием разрушения (14). Уравнение (3) не было включено в математическую постановку, в рассматриваемых задачах параметр δ считался константой материала и входил в выражение для свободной энергии (13). Полная система полевых уравнений выглядит следующим образом:

$$\rho \dot{\mathbf{v}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}, \quad (5)$$

$$\dot{\rho} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (6)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla) = \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^e + \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p + \dot{\mathbf{p}}, \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_s + \boldsymbol{\sigma}_d, \boldsymbol{\sigma}_s = \frac{1}{3} Sp(\boldsymbol{\sigma}) \mathbf{E} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^R = \lambda Sp(\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^e) \mathbf{E} + 2G \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^e, \boldsymbol{\sigma}^R = \dot{\boldsymbol{\sigma}} - \dot{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{R}^T \cdot \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\sigma} \cdot \dot{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{R}^T \quad (9)$$

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p = \Gamma_1 \boldsymbol{\sigma}_d - \Gamma_2 \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}}, \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{p}} = \Gamma_2 \boldsymbol{\sigma}_d - \Gamma_3 \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}}, \quad (11)$$

$$\rho c \dot{T} = \boldsymbol{\sigma}:\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p - \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}}:\dot{\mathbf{p}}, \quad (12)$$

$$\frac{F}{F_m} = \frac{p^2}{2} - \frac{p^2}{2\delta} + c_1 p + c_2 \ln(c_3 + c_4 p + p^2) - \frac{\sigma_d \cdot \mathbf{p}}{2G}, \quad (13)$$

$$\sqrt{\mathbf{p} : \mathbf{p}} \geq p_c \text{ или } T \geq T_{\text{пл}}, \quad (14)$$

где: ρ – плотность материала; \mathbf{v} – вектор скорости; \mathbf{R} – ортогональный тензор полярного разложения градиента места $\mathbf{F} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{U}$; \mathbf{U} – правый симметричный положительно определенный тензор деформации без вращений; λ , G – упругие константы материала; $\dot{(\cdot)}$ – материальная производная; $\nabla(\cdot)$ – оператор градиента в текущей конфигурации; $p = \sqrt{\mathbf{p} : \mathbf{p}}$; $c_1, c_2, c_3, c_4, \delta, F_m$ – константы потенциала F ; c – удельная теплоемкость; $\Gamma_1 = \frac{l_3}{l_1 l_3 - l_2^2}$, $\Gamma_2 = \frac{l_2}{l_1 l_3 - l_2^2}$, $\Gamma_3 = \frac{l_1}{l_1 l_3 - l_2^2}$ – положительные кинетические коэффициенты, в общем случае зависящие от параметров состояния; p_c – критическое значение интенсивности тензора плотности микродефектов, при котором происходит разрушение; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления.

Для адекватного моделирования процессов динамического нагружения в уравнения вносится поправка в виде зависимости от температуры одного из кинетических коэффициентов (параметров модели). Данная поправка позволяет учесть термическое разупрочнение. Также она описывает эффект повышения пластичности с ростом температуры деформирования:

$$\Gamma_1 = \Gamma_1^0 \text{Exp}\left[\frac{U(T) - \gamma\sigma}{kT}\right], \quad (15)$$

$$U(T) = \frac{k}{T_c^m} T^{m+1}, \quad (16)$$

где: Γ_1^0 – начальное значение кинетического коэффициента; $U(T)$ – характерная энергия, являющаяся функцией от температуры, γ – характерный объем, k – константа Больцмана, σ – интенсивность тензора напряжений, T_c – характерная температура.

Предлагается методика определения необходимых констант для учета эффекта температурной релаксации. Параметры модели идентифицируются и верифицируются для ряда материалов: АМг6, А6061, сталь 25ХНЗМФС, Д16. Идентификация констант проводится с использованием экспериментов по одноосному нагружению путем минимизации невязки между теоретической и расчетной диаграммами деформирования при характерных скоростях деформации 10^3 с^{-1} , а также с использованием данных о деформировании материалов при различных температурах. Верификация найденных параметров проводится сопоставлением с другими экспериментами по нагружению материалов с различными скоростями деформации и температурами; сравнением результатов моделирования с известными из литературы экспериментами по деформированию и разрушению металлов на примере внедрения ударника в мишень.

Проводится выбор и обоснование численного метода для решения построенной системы уравнений. Предложенная модель реализована в виде

программы (пользовательской процедуры) в конечно-элементном пакете Abaqus для проведения численного моделирования исследуемых процессов.

Третья глава диссертационной работы посвящена моделированию локализации пластической деформации и разрушения металлов при динамическом нагружении в различных постановах.

Первые две постановки посвящены моделированию локализации пластического сдвига на примере образцов специальной формы: «П-образцы»² и «Сдвиг-сжатие»³, которые подвергались динамическому нагружению на экспериментальной установке Гопкинсона-Кольского (рисунок 1).

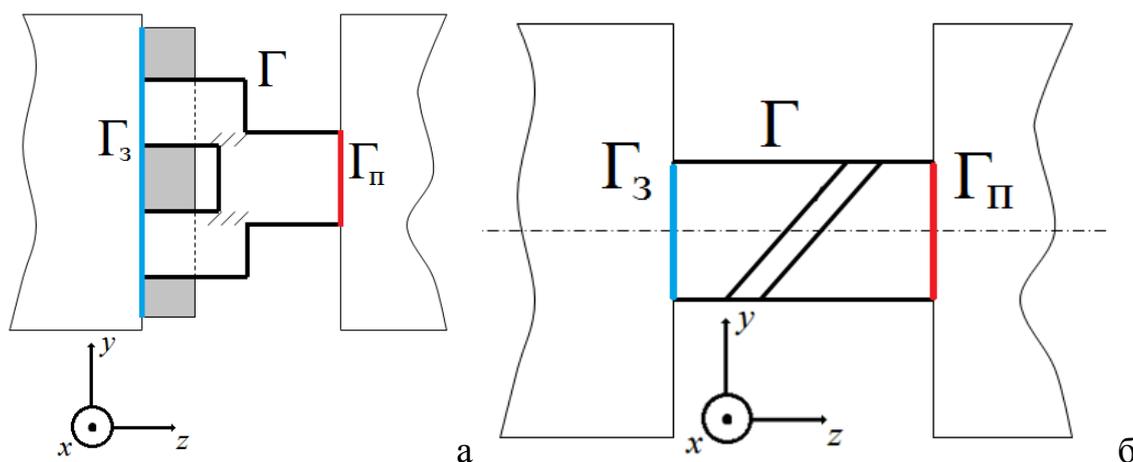


Рисунок 1 – Схема нагружения П-образца (а) и образца «Сдвиг-сжатие» (б) на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского. Γ_3 – закрепленная граница; Γ_{II} – граница, на которой задаются перемещения; Γ – свободная граница.

Проведена количественная оценка вкладов термического разупрочнения и структурной релаксации при различных скоростях деформации. Термическое разупрочнение описывалось соотношением $\sigma_B^T = \sigma_B^0 - \sigma_B^0 \cdot \text{Exp}[-(T/T_c)^n]$, которое является аппроксимацией экспериментальных данных, где σ_B^T – величина термического разупрочнения, σ_B^0 – начальный предел прочности, T_c – характерная температура, n – константа. Разупрочнение, обусловленное дефектами, учитывалось выражением $\sigma_B^p = 2G \cdot p_{23}$, где p_{23} – величина сдвиговой деформации, обусловленной дефектами. Показано, что температура начинает играть существенную роль в процессе локализации со скоростями деформации, превышающих 10^4 c^{-1} (для сплава АМгб). При меньших скоростях деформации решающую роль играют механизмы локализации, обусловленные дефектами.

Для П-образцов проведен анализ напряженно-деформированного состояния, который показал возможность решения задачи в двумерной постановке (плоскодеформированное состояние). Также была оценена необходимость учета теплопроводности при динамическом нагружении, и было показано, что ею

² Образец для испытания на сдвиг (варианты) и способ испытаний его: пат. 2482463 Российская Федерация / Наймарк О.Б., Баяндин Ю.В., Соковиков М.А., Плехов О.А., Уваров С.В., Банников М.В., Чудинов В.В. – № 2011114711/28; заявл. 14.04.2011; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 14

³ Rittel D., Lee S., Ravichandran G. A shear compression specimen for large strain testing // Experimental Mechanics. – 2002. – Vol. 42, No. 1. – P. 58-64

можно пренебречь, начиная со скоростей 2000 с^{-1} . Численно была проверена экспериментальная методика определения касательных напряжений для П-образцов. Примеры результатов моделирования изображены на рисунках 2-4.

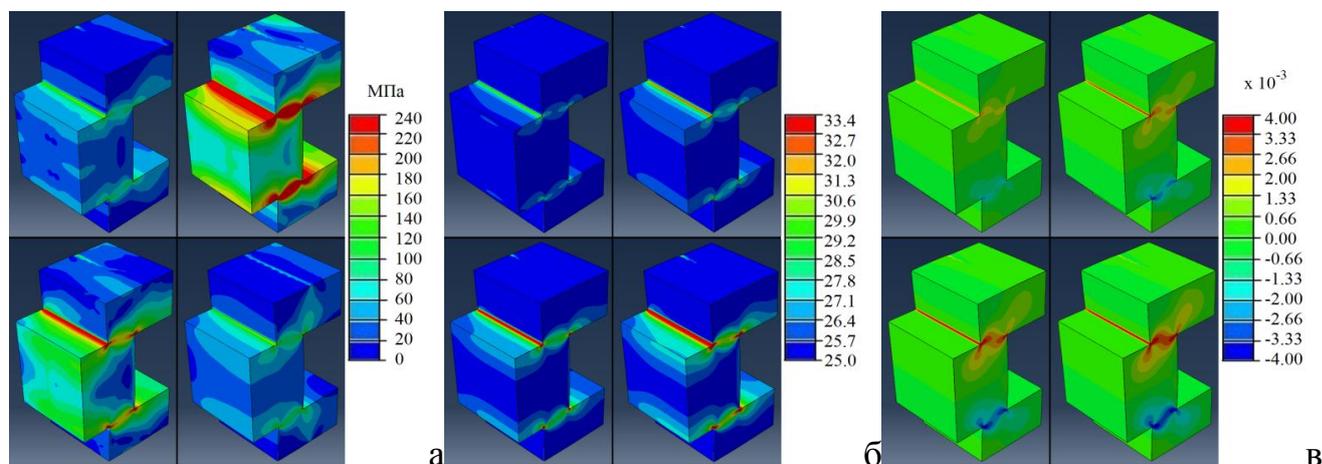


Рисунок 2 – Эволюция полей распределения интенсивности тензора напряжений (а), температуры в $^{\circ}\text{C}$ (б) и сдвиговой компоненты тензора плотности микродефектов p_{23} (в) в моменты времени (слева направо и сверху вниз): $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, $3,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, $4,7 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ при деформировании П-образца

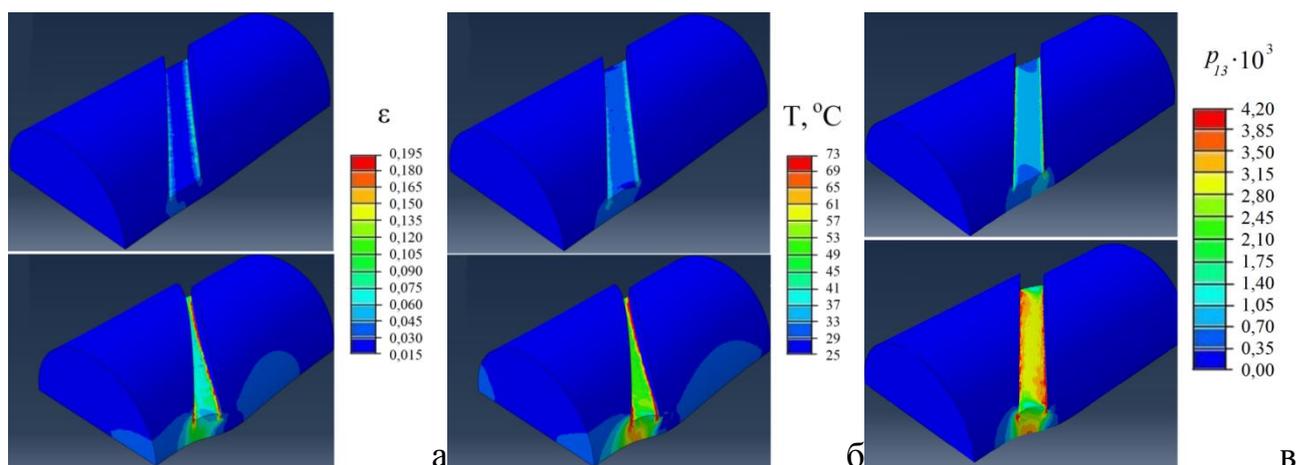


Рисунок 3 – Поля распределений интенсивности тензора деформаций (а), температуры (б) и сдвиговой компоненты тензора плотности микросдвигов (в) в $(1 \cdot 10^{-5} \text{ с})$ и конечный $(5 \cdot 10^{-5} \text{ с})$ моменты нагружения образца «Сдвиг-сжатие»

Третья постановка связана с моделированием локализации деформации и разрушения материалов на примере задачи о пробивании дискообразных преград цилиндрическим ударником. В рамках данной постановки был исследован достаточно широкий диапазон скоростей деформаций (от 2000 до 30000 с^{-1}), для которого построенная модель показала удовлетворительное соответствие экспериментальным данным. Иллюстрация расчетов представлена на рисунке 5.

Для количественной оценки адекватности модели сравнивалась температура, измеренная на тыльной поверхности преграды (вдоль диаметра в момент отрыва пробки) в эксперименте (проведенном в ИМСС УрО РАН), и ее

расчетные значения. Данные приведены в таблице 1. Моделирование проводилось в трехмерной (3D) и осесимметричной (2D) постановках. 3D-постановка является более приближенной к реальному эксперименту и позволяет учесть больше различных факторов (несимметричное положение ударника, угол удара и т.д).

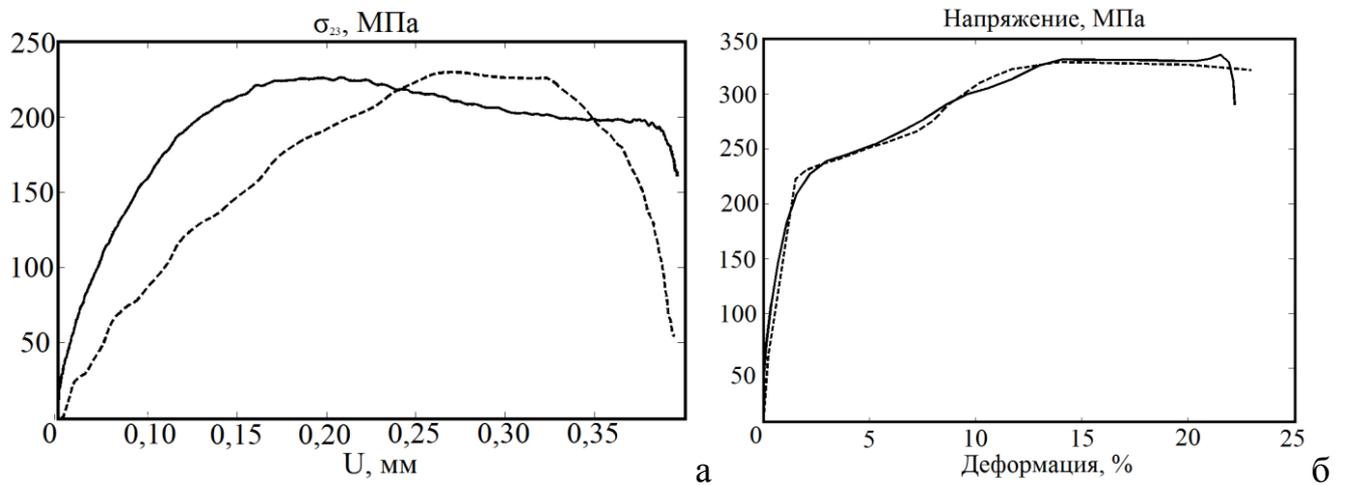


Рисунок 4 – Зависимость сдвигового напряжения от: а) перемещений на торце (для П-образца) б) сдвиговой деформации (для образца «Сдвиг-сжатие»).
Сплошная линия – эксперимент (ИМСС УрО РАН), пунктирная – расчет

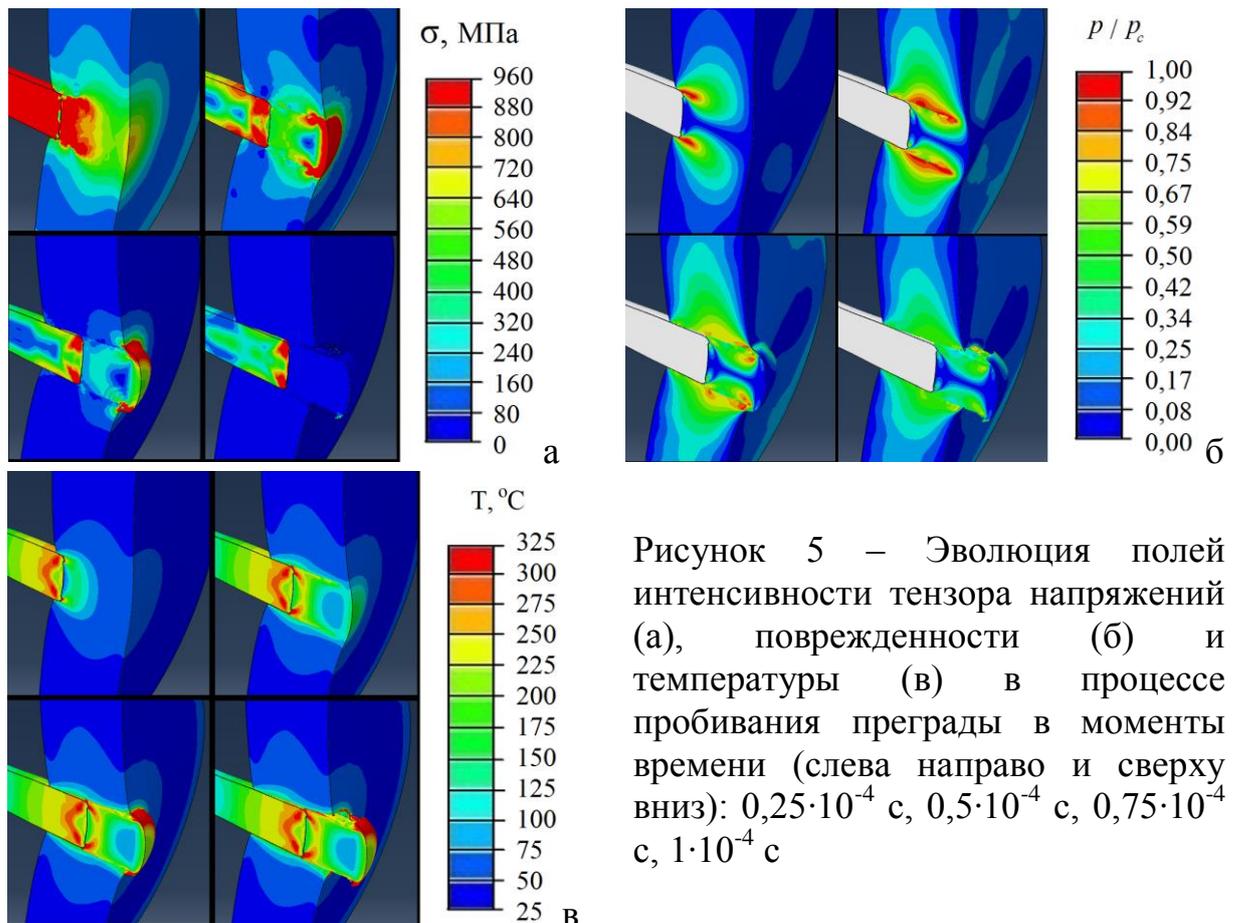


Рисунок 5 – Эволюция полей интенсивности тензора напряжений (а), поврежденности (б) и температуры (в) в процессе пробивания преграды в моменты времени (слева направо и сверху вниз): $0,25 \cdot 10^{-4}$ с, $0,5 \cdot 10^{-4}$ с, $0,75 \cdot 10^{-4}$ с, $1 \cdot 10^{-4}$ с

Однако, в 2D-постановках расчеты могут быть реализованы за порядки меньшие времена при более детальной дискретизации по пространству.

Таблица 1 – Сопоставление температур в расчете и эксперименте

№	Толщина преграды, мм	Скорость ударника, м/с	Температура в эксперименте, °С	Температура в 2D-расчете, °С	Температура в 3D-расчете, °С
1	10	390	190±21	210	230
2	10	417	260±29 (+)	230	250
3	7,5	390	260±29 (-)	340	350
4	7,5	417	340±38 (+)	350	360
5	5	391	210±24 (-)	370	380
6	5	390	380±42 (+)	370	380
7	5	417	340±38 (-)	380	420
8	5	368	300±33	330	350
9	5	208	135±15	170	190
10	5	94 (-)	49±6	60	70
11	5	172	165±19 (+)	160	170
12	5	111 (-)	53±6	70	80
13	5	161	155±18 (+)	140	150
14	5	156	165±19 (+)	140	150
15	5	161	180±20	140	150
16	5	138 (+\/-)	145±16	100	110
17	5	111 (-)	50±6	70	80
18	5	200	270±30 (?)	180	200
19	5	238	230±26 (+)	210	230
20	5	278	200±22 (-)	250	270

Одним из результатов, который следует из анализа данных в таблице 1, является вывод о том, что используемая в эксперименте инфракрасная камера (CEDIP Silver 450M) имеет недостаточную скорость съемки. Согласно документации, минимальный период съемки $2,5 \cdot 10^{-4}$ с. Расчет же показывает, что при пробивании преграды в момент отрыва пробки от мишени за характерное время $2 \cdot 10^{-5}$ с температура повышается на 100 °С. Экспериментальные данные подтверждают, что не во всех испытаниях пик тепловыделений был зарегистрирован (например, в экспериментах № 5 и 6, соответствующих одинаковой толщине преграды и скорости соударения, температура отличается на 170 °С). В таблице 1 символом «-» (напротив температуры) обозначены те ситуации, когда пик не зарегистрирован в эксперименте, соответственно «+» – зафиксированный пик. Не помеченные значения имеют дискуссионный характер, так как не понятно: является ли разница экспериментальных и расчетных температур погрешностью измерений\расчетов или связаны с временной разрешающей способностью инфракрасной камеры. Символом «?» обозначена

единственная ситуация, когда температура, измеренная в эксперименте, оказалась выше той, что получена в расчете. Причиной тому может служить либо некорректно зарегистрированная скорость соударения, либо выраженный «косой» удар, при котором существенный вклад в тепловыделение внесло трение. Также символом «-» (напротив скорости ударника) обозначены эксперименты, в которых не произошло пробивание преграды. В расчете в данных случаях пробивание также не произошло. Символ «+/-» означает, что в эксперименте мишень была пробита, но в расчете нет. В расчете преграда пробивается при скорости соударения примерно 150 м/с. В эксперименте – 138 м/с, однако это лишь единичный выстрел, по которому нельзя однозначно судить о достоверности результата. Тем не менее, погрешность в определении составляет 8%, что можно считать хорошим результатом, подтверждающим адекватность определения параметра p_c .

В случае зарегистрированных пиков тепловыделений данные моделирования хорошо согласуются с экспериментальными. Видно, что в трехмерном расчете температура получается выше. Это связано с тем, что в осесимметричной постановке присутствуют не все компоненты тензоров напряжений и неупругих деформаций, двойная свертка которых, умноженная на соответствующий коэффициент, определяет тепловыделение. Однако, 3D и 2D расчеты хорошо коррелируют между собой.

Таблица 2 – Оценка скорости деформации и вклада температурного разупрочнения при пробивании преград для сплава АМгб

№	Средняя скорость деформации, с ⁻¹	Максимальная скорость деформации, с ⁻¹	T, °C	Термическое разупрочнение, МПа	% от предела прочности
1	11500	205000	190±21	129±20	37±6
2	13900	225000	260±29	199±24	57±7
4	20000	260000	340±38	264±22	75±6
6	25000	230000	380±42	288±19	82±5
8	18500	206000	300±33	234±24	67±7
10	3100	16000	49±6	10±3	3±1
11	7200	48000	165±19	103±18	30±5
12	3900	22000	53±6	12±3	3±1
13	6600	43000	155±18	99±16	27±5
14	6300	40000	165±19	103±18	30±5
16	5300	32000	145±16	83±15	24±4
17	3900	22000	50±6	11±3	3±1
19	11700	89000	230±26	170±23	49±7

Для всех экспериментальных данных таблицы 1 (кроме тех, где не был зарегистрирован пик тепловыделений) была проведена оценка скорости деформации (максимальной и средней) и вклада температурного разупрочнения.

Результаты представлены в таблице 2. Максимальная скорость деформирования во всех случаях наблюдалась в момент соударения. Средняя скорость деформации вычислялась как среднее арифметическое скоростей деформаций, измеренных через равные интервалы по времени на протяжении всего процесса пробивания преграды. Интересным наблюдением является то, что максимальная скорость деформации квадратично зависит от скорости соударения, а у средней скорости деформирования данная зависимость ближе к линейной. Номер в таблице 2 соответствует номеру в таблице 1. В таблице 2 указано соответствующее термическое разупрочнение и его процент от предела статической прочности для сплава АМгб ($\sigma_B = 350$ МПа). Разумеется, величина σ_B зависит от скорости деформирования, но данная зависимость неизвестна.

На примере вычислительного эксперимента по одноосному нагружению был проведен теоретический анализ влияния скорости деформирования на величину термического разупрочнения. В ходе численных расчетов проводилось деформирование материала с различными скоростями деформации, при этом рассчитывалась температура в процессе нагружения, и учитывалось падение прочности с ростом температуры посредством (11)-(12). Вычислительный процесс проводился до наступления разрушения, согласно критерию (11). При этом фиксировалась максимальная T и соответствующее термическое разупрочнение. Результаты представлены на рисунке 6а. Там же для сопоставления приведены данные из таблицы 2. Показано, что для сплава АМгб существенная роль температурного разупрочнения начинается со скоростей деформации 10^4 с⁻¹. При меньших скоростях большую роль играет структурная релаксация. Для сплава А6061 построена аналогичная кривая (рисунок 6б), но экспериментов для её подтверждения на данный момент нет.

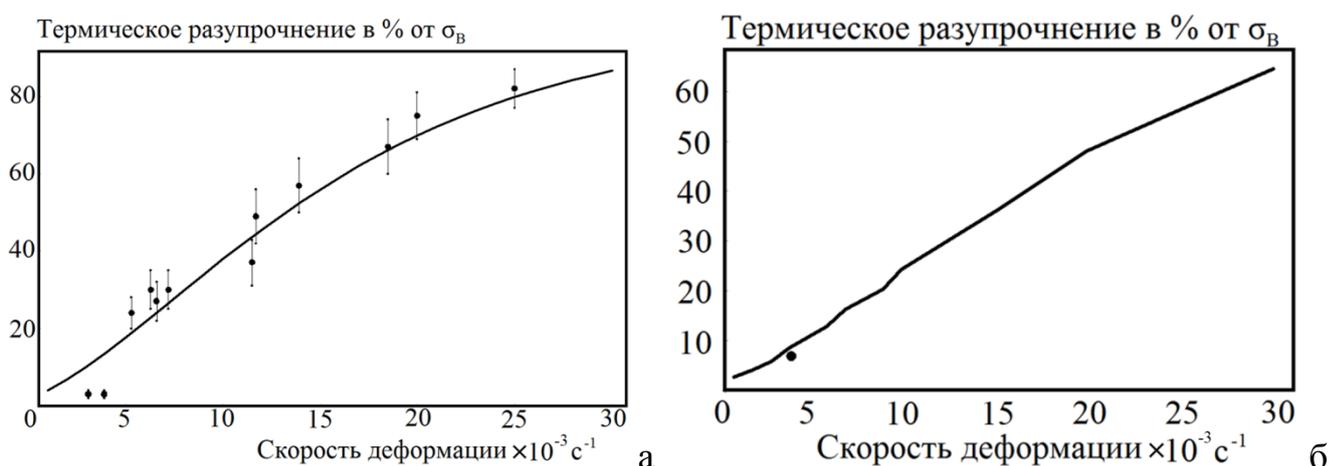


Рисунок 6 – Зависимость термического разупрочнения (в процентах от предела прочности σ_B) от скорости деформации для сплавов АМгб (а) и А6061 (б) Сплошная линия – теоретические данные, точки – эксперимент (данные ИМСС УрО РАН)

Результаты моделирования по всем трем постановкам сравнивались с экспериментами, проведенными в Лаборатории физических основ прочности

ИМСС УрО РАН, и находятся в удовлетворительном соответствии. Сравнение проводилось по форме деформируемых образцов, величинам напряжений и деформаций (там, где это возможно), а также по сопоставлению температур, измеренных в эксперименте в режиме реального времени. На рисунке 7 изображены диаметральные профили температуры (в эксперименте и расчете) на тыльной поверхности преграды в момент выноса пробки при пробивании.

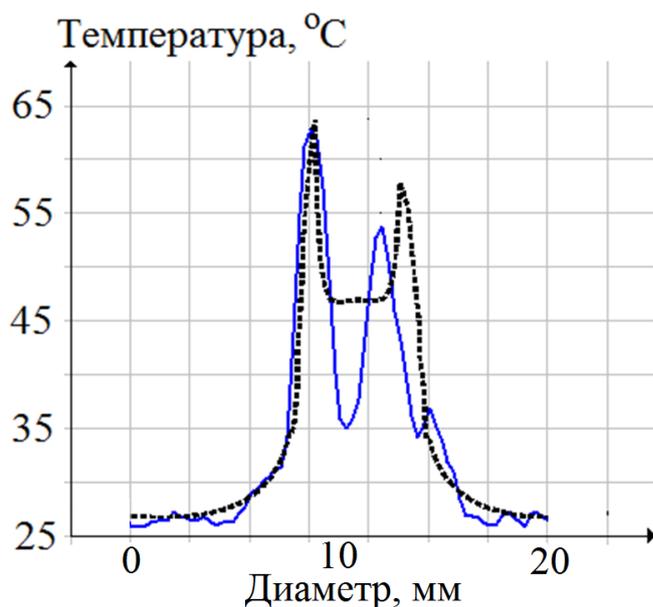


Рисунок 7 – Профиль температуры на тыльной поверхности преграды, полученный в расчете (пунктирная линия) и эксперименте (сплошная линия) для сплава А6061

Для всех постановок был проведен анализ сходимости численных расчетов. В качестве исследуемых параметров были выбраны интенсивности тензоров напряжений и деформаций. Шаг аппроксимации по пространству уменьшался с каждой итерацией, при этом сравнивались относительная разница значений выбранных параметров на текущем и предыдущем шагах по норме Чебышева. Было показано, что результаты расчетов сходятся, что является одним из критериев адекватности моделирования (рисунок 8а). Сходимость по температуре следует из сходимости интенсивности тензоров напряжений и деформаций.

Особое внимание было уделено анализу сходимости при определении размера области разрушения, который, в соответствие с критерием (11) и алгоритмом удаления разрушенных элементов, зависит от размера сетки. График представлен на рисунке 8б. Показано, что при больших шагах аппроксимации размер зоны разрушения равен размеру конечного элемента. Но, начиная с некоторого значения величины разбиения по пространству, размер полосы разрушения перестает зависеть от масштаба дискретизации сплошной среды. Очень важно в подобных задачах проводить расчеты с таким шагом, при котором размер области разрушения не зависит от разбиения области интегрирования, так как в этом случае картина разрушения моделируется наиболее адекватно. Данный результат также показывает, что в приведенном исследовании вопрос зависимости численного решения от сетки снимается.

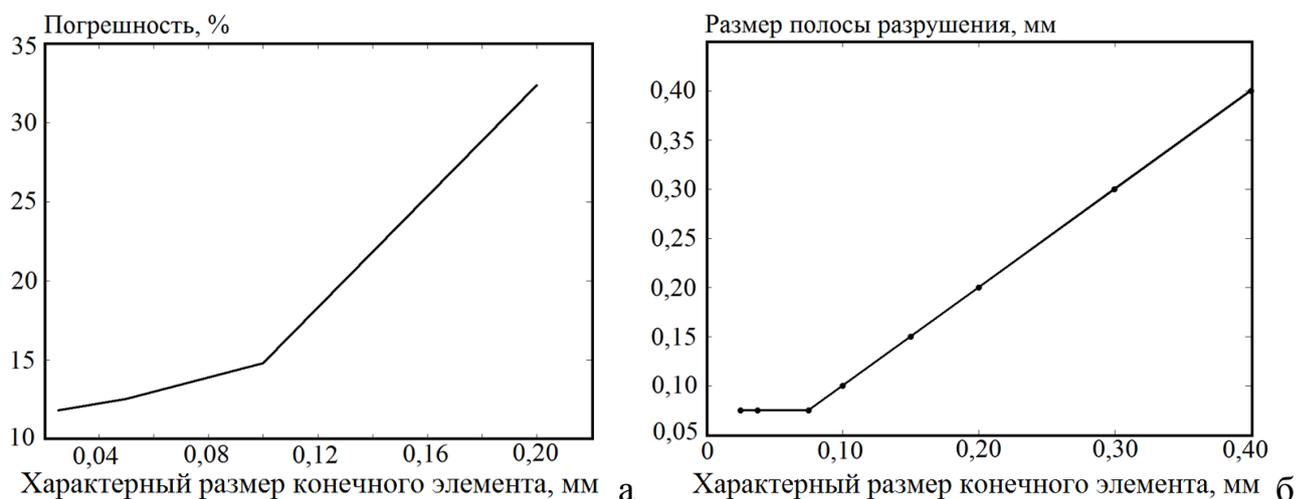


Рисунок 8 – Графики сходимости интенсивности тензора напряжений (а) и размера области разрушения (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведено изучение механизмов локализации пластической деформации и разрушения металлов при динамическом нагружении на основе структурно-феноменологической модели, описывающей связь структурных механизмов релаксации, обусловленных дефектами, с механизмами локализации пластической деформации. Основными результатами являются:

1. На основе широкодиапазонных определяющих соотношений среды с дефектами (микросдвиги) была построена математическая модель для описания деформационного поведения металлов и сплавов при динамическом нагружении (в диапазоне скоростей деформации 10^2 - 10^4 с⁻¹).
2. Предложена модификация модели, учитывающая зависимость от температуры одного из кинетических коэффициентов, что позволило учесть эффекты термического разупрочнения.
3. Предложена и апробирована методика определения констант модифицированной модели для описания температурного разупрочнения и эффекта повышения пластичности с ростом температуры деформирования.
4. Идентифицированы и верифицированы параметры модели для ряда материалов: АМг6, А6061, сталь 25ХНЗМФС, Д16.
5. Проведен анализ НДС П-образцов, в ходе которого было показано удовлетворительное соответствие экспериментальных постановок данного типа образцов плоскому деформированному состоянию.
6. Численно проверена предложенная экспериментальная методика для определения касательных напряжений при нагружении П-образцов. Численно подтверждена справедливость экспериментальной методики измерения температуры на боковой поверхности образцов в ходе нагружения.
7. Проверена гипотеза о возможности пренебрежения эффектами теплопроводности при динамическом нагружении. Показано, что при

- скоростях деформации 2000 с^{-1} и выше теплопроводностью можно пренебречь с достоверностью более 95%.
8. Построенная математическая модель была реализована в виде программы (пользовательской процедуры) в конечно-элементном пакете Abaqus для проведения вычислительного эксперимента.
 9. Проведено моделирование процесса локализации пластического сдвига на примере экспериментальных схем «П-образец» и «Сдвиг-сжатие». Количественно оценены вклады структурной релаксации и температурного разупрочнения при динамическом нагружении. Показано, что для сплава АМгб существенное влияние термического разупрочнения на локализацию пластической деформации начинается при скоростях нагружения 10^4 с^{-1} и выше. При меньших скоростях определяющую роль в процессах локализации пластической деформации играют релаксационные механизмы, обусловленные кинетикой дефектов. Данные моделирования находятся в удовлетворительном соответствии с экспериментами, проведенными в ИМСС УрО РАН.
 10. Проведено моделирование процессов локализации деформации и разрушения металлов применительно к постановкам задач пробивания дискообразных преград цилиндрическим ударником. Данные моделирования сравнивались экспериментами, проведенными в ИМСС УрО РАН, и находятся в удовлетворительном соответствии.
 11. Проведен теоретический анализ вклада термического разупрочнения в процесс локализации пластической деформации и разрушения в зависимости от скорости деформации в диапазоне 10^2 - $3 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, который показал, что для сплава АМгб существенное влияние термического разупрочнения начинается со скоростей 10^4 с^{-1} , а для А6061 – $2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. Для материала АМгб теоретический результат соответствует экспериментальным данным.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Соковиков М.А., Билалов Д.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Плехов О.А., Терехина А.И., Наймарк О.Б. Неравновесные переходы в ансамблях дефектов при динамической локализации пластической деформации // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40, Выпуск 23. – С. 82-88. (ВАК, WoS)
2. Билалов Д.А., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Терехина А.И., Наймарк О.Б. Исследование локализации пластического сдвига в алюминиевых сплавах при динамическом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, №3. – С. 319-328. (ВАК)
3. Билалов Д.А., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Терехина А.И., Наймарк О.Б. Численное моделирование и экспериментальное исследование локализации пластической деформации при динамическом нагружении образцов в условиях близких к чистому

- сдвигу // Вычислительная механика сплошных сред. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 103-112. (ВАК)
4. Froustey С., Наймарк О.Б., Пантелеев И.А., Билалов Д.А., Петрова А.Н., Ляпунова Е.А. Многомасштабные механизмы структурной релаксации и разрушения в условиях адиабатического сдвига // Физическая мезомеханика. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 33-44. (ВАК, WoS)
 5. Билалов Д.А., Соковиков М.А., Чудинов В.В. Многомасштабные механизмы локализации пластической деформации при пробивании преград // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 5. – С. 43-47. (ВАК)
 6. Dmitry Bilalov, Mikhail Sokovikov, Vasiliy Chudinov, Vladimir Oborin, Alena Terekhina, Oleg Naimark Numerical simulation and experimental investigation of strain and damage localization in metals under dynamic loading // AIP Conference Proceedings. – 2014. – Vol. 1623. – P. 67-70. (WoS, Scopus)
 7. Dmitry Bilalov, Mikhail Sokovikov, Yuri Bayandin, Vasiliy Chudinov, Vladimir Oborin and Oleg Naimark Numerical simulation and experimental investigation of strain localization in AlMg6 alloy under dynamic loading // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1683. – 020025. (WoS, Scopus)
 8. Bilalov D.A., Sokovikov M.A., Bayandin Yu.V., Chudinov V.V., Oborin V.A. and Naimark O.B. Numerical simulation of plastic strain localization and failure mode transition in metals under dynamic loading // Structural Integrity Procedia. – 2016. – Vol. 2 . – P. 1951-1958. (Scopus)