

На правах рукописи



Шваб Евгений Анатольевич

**ПРОЦЕССЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ
И РАЗРУШЕНИЯ НА РАЗНЫХ МАСШТАБНЫХ УРОВНЯХ
В МАТЕРИАЛЕ С КОМПОЗИТНЫМ
МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Балохонов Руслан Ревич

Официальные оппоненты:

Немирович-Данченко Михаил Михайлович, доктор физико-математических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кафедра геофизики, профессор

Лавриков Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория механики деформируемого твердого тела и сыпучих сред, главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится 26 декабря 2017 года в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (корпус № 10 (НИИ ПММ), аудитория 239).

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: <http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/SchwabEA26122017.html>

Автореферат разослан « ____ » ноября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Пикушак
Елизавета Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Задачи повышения надежности и долговечности изделий, снижения себестоимости их эксплуатации и увеличения ресурса работы являются основными задачами современного машиностроения. Одним из традиционных путей обеспечения стабильных характеристик изделия и повышения его работоспособности является применение технологий нанесения защитных покрытий. Конструкции с покрытиями находят широкое применение в различных отраслях промышленности, включая авиационную, автомобильную и др.

Нанесение покрытия на поверхность изделия приводит к созданию сложной многослойной системы, характеризующейся наличием криволинейных границ раздела и разными механическими свойствами слоев. Известно, что макроскопические свойства подобных систем зависят от структуры полученного многокомпонентного материала и соотношений физико-механических свойств его отдельных компонентов. Для комплексного изучения и оптимизации свойств материалов с покрытиями особую актуальность приобретает численное моделирование, поскольку высокая трудоемкость, большие временные и финансовые затраты экспериментальных методов не позволяют провести широкий спектр исследований влияния параметров структуры и различий в механических свойствах различных компонентов материала на его мезо- и макроскопические свойства. В свете вышесказанного, разработка структурно-механических моделей и изучение деформационного поведения материалов с покрытиями при внешнем механическом воздействии являются актуальными направлениями исследований в области современной механики деформируемого тела. Использование таких моделей и результатов исследований способствует эффективной разработке изделий с требуемыми эксплуатационными характеристиками, удешевляя процесс разработки изделия и повышая их качество и конкурентоспособность, что на сегодняшний день является важной задачей экономического развития Российской Федерации.

Исследования, представленные в диссертации, проводились в рамках ряда научно-исследовательских работ:

– «Мезомеханика границ раздела в материалах с покрытиями» при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МД-202.2011.8, руководитель – Р.Р. Балохонов (2011–2012 гг.);

– «Многоуровневое моделирование деформации и разрушения в материалах с композиционными покрытиями» при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00436-а, руководитель – Р.Р. Балохонов (2012–2014 гг.);

– «Физическая мезомеханика нелинейных многоуровневых иерархически организованных систем в полях внешних воздействий»,

тема 23.1 в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук, руководитель – В.Е. Панин (2013–2016 гг.);

– «Фундаментальные основы физики и механики поведения нелинейных многоуровневых иерархически организованных систем», тема 23.1 в рамках Программы фундаментальных исследований СО РАН на 2017–2019 гг., координатор – В.Е. Панин.

Степень разработанности темы. Разработка новых видов покрытий и технологий их нанесения, как и оптимизация уже существующих, основана на научных исследованиях, широко опубликованных в отечественной и зарубежной литературе. На сегодняшний день наблюдается устойчивый интерес российских и западных ученых к анализу микроструктуры, фазового состава и свойств функциональных покрытий в отдельности и материалов с покрытиями как цельной композиции. В этой области известны работы А.А. Аппена, С.С. Солнцева, В.Е. Панина, Б.С. Зенина, Г.В. Самсонова и др.

Определяющую роль в процессах деформации и разрушения материалов с неоднородной структурой, в частности, композиций «покрытие – подложка» могут играть границы раздела. Результаты анализа трудов ученых, приведенные в главе 1 данной диссертации, свидетельствуют о наличии существенного научного задела в этом направлении. В отечественной науке рассмотрение внутренних границ раздела как важной функциональной подсистемы в деформируемом твердом теле было начато трудами В.Е. Панина, С.Г. Псахье, П.В. Макарова, В.М. Фомина, С.Н. Кулькова, Л.Б. Зуева, В.Л. Попова, В.Е. Егорушкина, Ю.В. Гриняева, Дерюгина Е.Е. и др. Значительный вклад в развитие структурно-механических моделей, учитывающих внутреннее строение структурно-неоднородного материала, сделан следующими российскими учеными: Р.В. Гольдштейном, Ю.Г. Яновским, О.Б. Наймарком, А.Ф. Ревуженко, О.И. Черепановым, А.В. Герасимовым, С.А. Зелепугиным, Б.А. Люкшиным, В.А. Скрипняком, М.М. Немировичем-Данченко, П.В. Трусковым, В.Э. Вильдеманом, О.А. Плеховым, Е.В. Торской, В.А. Романовой, Р.Р. Балохоновым, И.Ю. Смолиным, А.Ю. Смолиным, С.В. Смирновым, С.В. Лавриковым, С.А. Лурье, И.Ф. Головневым, А.И. Дмитриевым, Е.В. Шилько и др. Среди работ зарубежных специалистов в области механики материалов с покрытиями автором были проанализированы статьи F.L. Chen и коллектива американских ученых, Н.М. Yin, W. Zhu и коллектива китайских ученых, N.K. Fukumasu и коллектива бразильских ученых, H. Rehman и немецких коллег, N. Nayebpashae и коллектива иранских ученых, Y. Gu и коллег из Китая и Германии, J.F. Luo и коллектива американских ученых, C. Zhang и коллектива китайских ученых, S.P. Donegan и A.D. Rollett и др.

Стоит, однако, отметить, что, несмотря на значительный интерес ученых к исследованиям механического поведения материалов с покрытиями и оценке механических характеристик таких материалов, существует значительное количество дискуссионных вопросов в этой области. Работы, в которых затрагиваются вопросы влияния структуры материала с покрытием на процессы его деформации и разрушения, носят фрагментарный характер. Требуется развитие направления численных исследований деформации и разрушения материалов с покрытиями с явным учетом сложной структуры в трехмерной постановке. Все вышеперечисленное, выявленное в результате анализа степени разработанности данного направления, определило цель и задачи диссертационного исследования.

Цель диссертационного исследования заключается в установлении закономерностей деформации и разрушения в материале с металлокерамическим покрытием при различных видах механического нагружения.

Цель работы определила необходимость решения следующих задач:

1. Провести аналитический обзор отечественных и зарубежных литературных источников и изучить накопленный опыт в области экспериментальных методов нанесения композитных покрытий и численного моделирования неоднородной деформации композиционных материалов и материалов с покрытиями.

2. Разработать структурно-механическую модель материала с композитным металлокерамическим покрытием, учитывающую пластическое течение металлической подложки с деформационным упрочнением, квазихрупкое разрушение керамических включений в композитном покрытии, а также особенности неоднородной структуры композиции в явном виде.

3. Выполнить численную реализацию структурно-механической модели и провести тестовые расчеты в постановке плоского деформированного состояния.

4. Провести расчеты деформации и разрушения материала с композитным металлокерамическим покрытием при квазистатическом одноосном растяжении и сжатии. Исследовать закономерности локализации пластического течения в металлической матрице и растрескивания керамических включений, связанные с наличием криволинейных границ раздела на различных масштабных уровнях.

5. Исследовать влияние расстояния между керамическими включениями и толщины композитного покрытия на величину концентрации напряжений в области границ раздела, на характер разрушения композитного покрытия, а также на макроскопическую реакцию образца с композитным покрытием.

6. Разработать численную методику построения трехмерных структур материалов с включениями сложной формы на основе экспериментальных данных.

7. Провести трехмерные численные расчеты и исследовать особенности локализации деформации в области границ раздела при одноосном нагружении композиции «металлическая матрица – керамическое включение». Изучить формирование остаточных напряжений при охлаждении композиции из расплава.

Научная новизна. Наиболее существенными объектами научной новизны исследования, полученными впервые, являются следующие:

1. Установлены зависимость прочности композита «алюминиевая матрица – включение карбида титана» от объемной доли включений в композитном покрытии и характера разрушения от толщины композитного покрытия.

2. Разработана и апробирована численная методика построения структур композиционных материалов с учетом криволинейной формы границ раздела между матрицей и включениями, соответствующей экспериментально наблюдаемой.

3. Выявлены закономерности формирования остаточных напряжений при охлаждении мезообъема композитного покрытия «алюминиевая матрица – включение карбида титана» из расплава до комнатной температуры, а также особенности концентрации напряжений и локализации пластического течения при последующем механическом нагружении мезообъема.

Теоретическая значимость работы. Диссертационная работа является фундаментальным исследованием с перспективами научно-практического применения. Выявленные по результатам моделирования закономерности и сделанные выводы способствуют углубленному пониманию процессов неоднородного деформирования и разрушения в композиционных материалах и позволяют расширить теоретические знания в области применения материалов с покрытиями. Результаты работы могут быть полезны специалистам в области механики материалов и инженерии поверхности.

Практическая значимость работы. Разработанные в диссертационной работе практические рекомендации относительно зависимости прочностных характеристик поверхностно упрочнённых образцов от объемной доли керамических включений и толщины композитного покрытия, выявленные закономерности механического поведения материала с композитным покрытием могут быть использованы при создании материалов с заданными свойствами. Разработанные программные модули для генерации трехмерных частиц сложной формы могут быть использованы для построения структурно-механических моделей других дисперсно-упрочнённых композиционных материалов и покрытий. Материалы диссертации,

включая результаты численного моделирования деформации материалов с композитными покрытиями, предложенную автором методику генерации трехмерных структур «матрица – включения», а также разработанные программы, могут быть использованы в учебных курсах и спецкурсах на технических факультетах высших учебных заведений при подготовке магистрантов по направлению «Прикладная механика» и аспирантов по специальностям «Механика деформируемого твердого тела» и «Физика конденсированного состояния».

Методология и методы исследования. Диссертационное исследование проведено в рамках основного научного направления Института физики прочности и материаловедения СО РАН – физической мезомеханики материалов. Для решения поставленных задач применялись методы механики деформируемого твердого тела. В качестве методов численного анализа использованы методы конечных разностей и конечных элементов. При анализе численных результатов применялись методы математической статистики.

На защиту выносятся

1. Результаты численного моделирования локализации деформации и разрушения в материале с композитным металлокерамическим покрытием на разных масштабных уровнях, включая немонотонный характер зависимости прочности от объемной доли включений в композитном покрытии, а также снижение прочности образцов с толстыми покрытиями, связанное с увеличением периода растрескивания при увеличении толщины покрытия.

2. Методика построения трехмерных структур дисперсно-упрочненных композиционных материалов и материалов с композитными покрытиями, основанная на предположении о масштабной инвариантности процесса механического дробления и природных механизмах образования сколов.

3. Выявленные при численном моделировании закономерности локализации пластической деформации и концентрации напряжений в трехмерном алюминиевом образце с включением карбида титана сложной формы при термических и механических нагрузках. Остаточные напряжения снижают концентрацию напряжений в композитном металлокерамическом покрытии при деформациях до 5 % и слабо влияют на прочность композиционного материала при больших степенях деформации.

Достоверность и обоснованность результатов исследования обеспечивается применением фундаментальных законов механики деформируемого твердого тела при формулировке задач. Для их решения используются апробированные вычислительные методы. Полученные результаты не противоречат общим представлениям

механики структурно-неоднородных сред и находятся в соответствии с экспериментами и данными других авторов.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационного исследования были апробированы на научных конференциях различного уровня, таких как XXIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2015), международная конференция «Физическая мезомеханика многоуровневых систем. Моделирование, эксперимент, приложения» (Томск, 2014), международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва, 2011, 2013), международная летняя школа-конференция «Актуальные проблемы механики» (Санкт-Петербург, 2013, 2014), 23 Всероссийская конференция по численным методам решения задач теории упругости и пластичности (Барнаул, 2013), VIII Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2013), 52 Международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности» (Уфа, 2012), Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (Томск, 2011), 21 Международный семинар по вычислительной механике материалов (Лимерик, Ирландия, 2011). Полностью работа докладывалась на научных семинарах в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН.

Публикации. По материалам работы Е.А. Швабом опубликовано 15 работ, в том числе 6 статей 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, индексируемом Web of Science, 1 статья в российском научном журнале, переводная версия которого индексируется Web of Science), 1 статья в сборнике материалов зарубежной научной конференции, индексируемом Web of Science, 8 публикаций в сборниках материалов международных научных конференций, в том числе Международной конференции по мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов и 19 Европейской конференции по механике разрушения.

Личный вклад автора состоит в разработке структурно-механической модели, включая новую методику генерации трехмерных структур «матрица – включения», и проведении расчетов. При личном участии автора были определены цель и задачи диссертационного исследования, проанализированы и интерпретированы полученные результаты.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы из 170 наименований. Работа изложена на 141 страницах, включая 68 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень разработанности темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи работы, описана методологическая база, представлены положения, выносимые на защиту, перечислены новые результаты, раскрыта их научная и практическая ценность и обоснована их достоверность, приведены сведения о личном вкладе и публикациях автора, апробации работы, ее связи с научными программами и темами, а также излагается краткое содержание работы.

В первой главе приведен литературный обзор по тематике диссертационной работы.

Вторая глава диссертации посвящена изучению закономерностей локализации деформации и разрушения материала с композитным металлокерамическим покрытием на микро-, мезо- и макроуровнях. Приведена постановка задачи, включая общую систему уравнений, структурно-механическую модель материала, а также особенности численной реализации (параграф 2.1).

Структура композита соответствует экспериментально наблюдаемой и учитывается в расчетах явно (рис. 1), что позволяет явно в качестве начальных данных ввести в расчеты масштабный фактор. Рассмотрение ведется на трех уровнях: 1) макроскопический уровень алюминиевой основы с композитным покрытием (рис. 1б); 2) мезоскопический уровень композитного покрытия (композита «TiC – Al») (рис. 1в) и 3) микроуровень отдельного включения карбида титана в алюминиевой матрице (рис. 1г). Характерные масштабы на разных уровнях связаны с иерархией структурных неоднородностей и границ раздела, вблизи которых возникают концентрации напряжений.

Динамическая краевая задача о деформировании структур, представленных на рис. 1 б-г, решается численно методом конечных разностей в постановке плоской деформации и включает законы сохранения количества движения, массы и соотношения для деформаций (1), а также определяющие уравнения (2).

$$\sigma_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i, \quad \rho/\dot{\rho} = -\varepsilon_{kk}, \quad \dot{\varepsilon}_{ij} = (\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i})/2, \quad (1)$$

$$\dot{\sigma}_{ij} = K \dot{\varepsilon}_{kk} \delta_{ij} + 2\mu (\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{kk} \delta_{ij}/3 - \dot{\varepsilon}_{ij}^P), \quad (2)$$

где u_i – вектор перемещений, σ_{ij} , ε_{ij} и ε_{ij}^P – тензора напряжений, полных и пластических деформаций, δ_{ij} – символ Кронеккера, K и μ

– модули объемного сжатия и сдвига, ρ – плотность, точка и запятая обозначают производную по времени и координате, соответственно.

Для описания неупругого поведения алюминиевой матрицы используется закон пластического течения $\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \lambda S_{ij}$, ассоциированный с условием текучести вида $\sigma_{eq} - y_0(\varepsilon_{eq}^p) = 0$, где σ_{eq} и ε_{eq}^p – интенсивности напряжений и накопленной пластической деформации, y_0 – функция изотропного упрочнения.

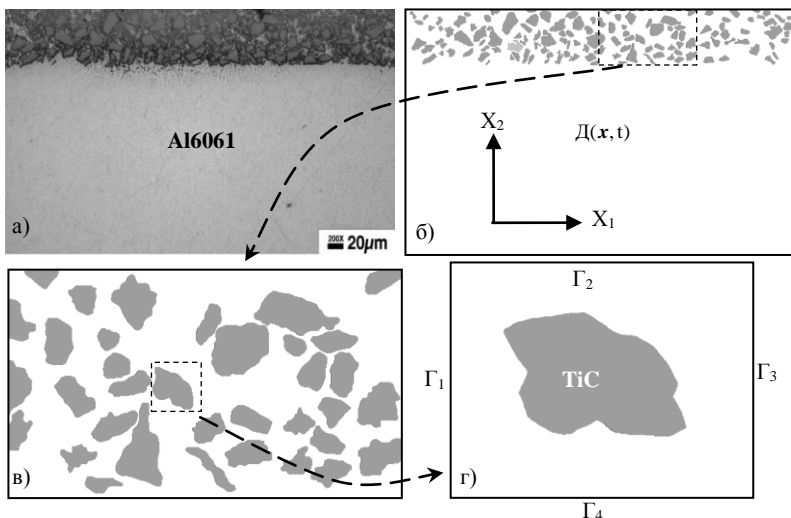


Рис 1. –Экспериментальная¹ а) и модельные б) – г) структуры материала с композитным включением на разных масштабных уровнях

Для анализа процессов растрескивания включений карбида титана используется критерий типа Губера-Мизеса, учитывающий зарождение трещин в областях объемного растяжения:

$\sigma_{eq} = C_{ten}$ при $\varepsilon_{kk} > 0$, где C_{ten} – предел прочности на растяжение.

Граничные условия на поверхностях Γ_1 и Γ_3 моделируют одноосное растяжение/сжатие мезообъема в направлении 1, а на Γ_2 и Γ_4 соответствуют условиям свободных поверхностей (рис. 1).

На микроуровне исследованы вопросы зарождения и распространения трещин вблизи микронеровностей границ раздела

¹ Kadolkar P.B., Watkins T.R., De Hosson J.Th.M., Kooi B.J. and Dahotre N.B. State of residual stress in laser-deposited ceramic composite coatings on aluminum alloys // Acta Materialia. – 2007. – 55, 4 – P. 1203–1214

«пластичная матрица – хрупкое включение» (параграф 2.2). Показано, что как при растяжении, так и при сжатии композиции, возникают локальные области объемного растяжения (красные области на рис. 2), где при последующем нарастании нагрузки зарождаются трещины. При растяжении и сжатии трещины зарождаются в различных местах и распространяются под действием растягивающих нагрузок в разных направлениях (рис. 2, расчет). Аналогичный характер растрескивания включений, вдоль направления нагружения при сжатии и перпендикулярно – при растяжении, наблюдается экспериментально (рис. 2, эксперимент).

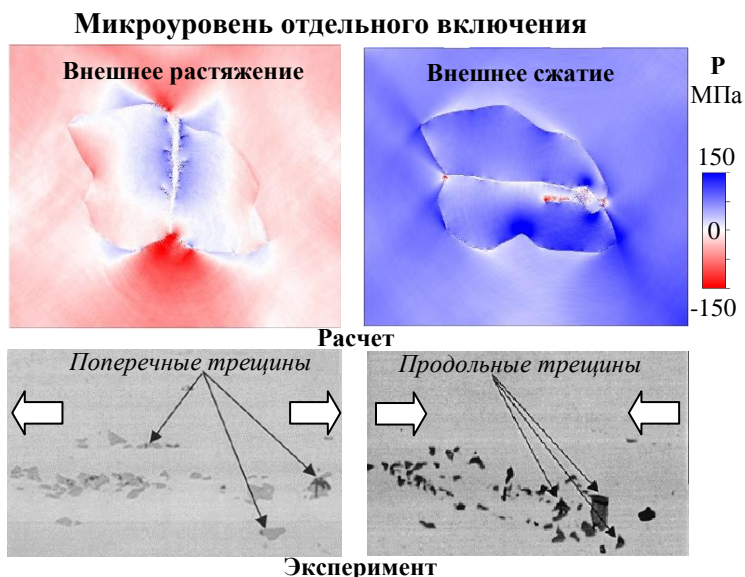


Рис. 2 – Распространение трещин в керамических включениях при растяжении и сжатии. Моделирование и эксперимент²

В параграфе 2.3 изучена сходимость численного решения при варьировании шага по пространству и времени.

Мезомасштабный уровень является уровнем дисперсно-упрочненного метало-керамического композита (рис. 3), на котором, помимо механизмов локализации деформации и разрушения, связанных с криволинейными границами раздела между включениями и матрицей, определяющее значение имеет влияние расстояния между

² Balasundaram, A., Gokhale, A.M., Graham, S., Horstemeyer, M.F. Three-dimensional particle cracking damage development in an Al-Mg-base wrought alloy // Materials Science and Engineering. – 2003. – Vol. A355. – P. 368–383.

включениями. В параграфе 2.4 показано, что при высокой объемной доле упрочняющих частиц разрушаются сразу несколько включений (резкое падение напряжения на кривой А рис. 3), а при низкой объемной доле включения разрушаются последовательно одно за другим (несколько скачков напряжений на кривых Б и В рис. 3). Установлено, что чем больше объемная доля включений, тем выше концентрация напряжений вблизи криволинейных границ раздела, и, соответственно, тем раньше разрушаются включения в покрытии.

Мезоуровень композитного покрытия

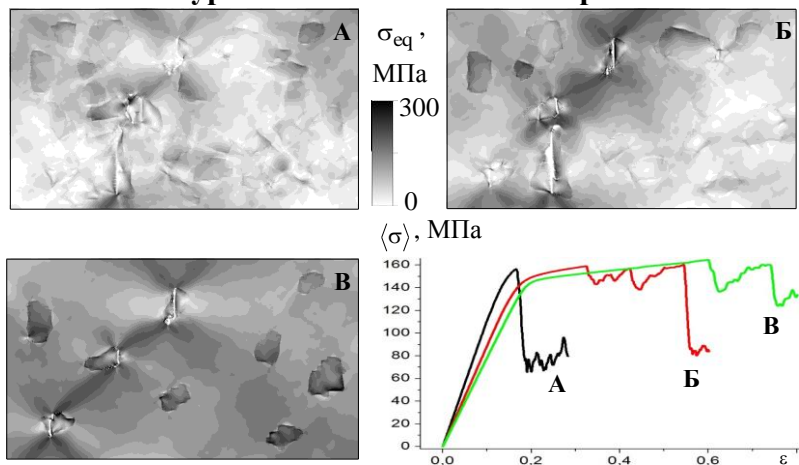


Рис. 3 – Разрушение включений TiC в структурах с различной объемной долей включений и соответствующие кривые течения при растяжении

При анализе расчетов, в которых исключены факторы формы и размера включений (рис. 4а), показано, что концентрация напряжений зависит от объемной доли включений немонотонно (рис. 4б). Максимальные значения напряжений наблюдаются при расстоянии между включениями, сопоставимым со средним размером включения (рис. 4в). При увеличении расстояния, напряжения экспоненциально уменьшаются и перестают изменяться на удалении включений друг от друга, равном порядка 3-4 диаметров включения. На расстояниях между включениями меньше диаметра включения, концентрация напряжений резко уменьшается. Показано, что данный немонотонный характер зависимости обусловлен качественным изменением характера локализации пластической деформации вокруг включений при различном расстоянии между ними.

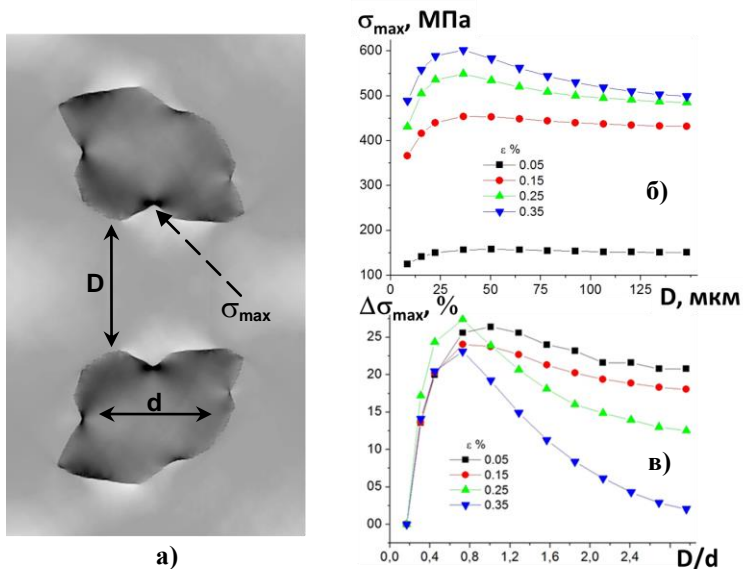
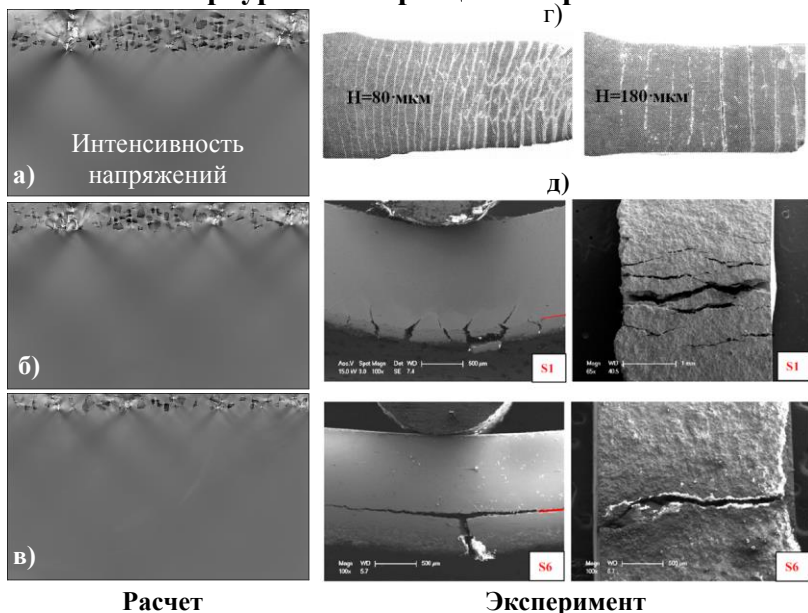


Рис. 4 – Влияние расстояния между включениями на уровень максимальной интенсивности напряжений

На макромасштабе (рис. 5), помимо эффектов кривизны границы раздела «включение – матрица» и расстояния между включениями, появляются дополнительные факторы: криволинейность границы раздела «композитное покрытие – алюминиевая основа», которая связана не со сложной формой включений, а с их неравномерным распределением вдоль данной границы, а также толщина покрытия. В параграфе 2.5. проведено моделирование растяжения структур с различной толщиной композитного покрытия, полученных из базовой структуры посредством последовательного удаления слоев включений. Показано, что с увеличением толщины покрытия, расстояние между трещинами в покрытии увеличивается (рис. 5, расчет). Аналогичный характер разрушения наблюдается экспериментально для различных материалов основы и покрытия (рис. 5). Установлено, что образование магистральных поперечных трещин в толстых керамических покрытиях может приводить к снижению макроскопической прочности поверхностно упрочненных образцов при растяжении.

Макроуровень образца с покрытием



Расчет

Эксперимент

Рис. 5 – Характер растрескивания в зависимости от толщины композитного покрытия в расчете: $H=300$ (а); 200 (б); 100 мкм (в), и в эксперименте: боридное покрытие на стальной основе³ (г); циркониевое керамическое покрытие на никелевом суперсплаве⁴ (д)

В третьей главе, для количественной оценки напряженного состояния композита, решалась трехмерная статическая задача. Разработана методика построения трехмерных структур дисперсно-упрочненных композитов (параграф 3.1). Предполагается масштабная инвариантность процесса механического дробления и используются природные механизмы образования сколов. На каменоломне отобрано несколько десятков свежесколотых камней твердых пород. Проводилась трехмерная динамическая видеосъемка поверхности камней, установленных на вращающемся ювелирном столике (рис. 6а). Для цифровой обработки результатов съемки в реальном времени, использовался программный продукт 3DSOM (рис. 6б). Используя

³ Панин С.В., Коваль А.В., Почивалов Ю.И. Особенности разрушения образцов малоуглеродистой стали с боридными слоями различной толщины при одноосном статическом растяжении // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т.5. – №4. – С. 85–95.

⁴ X.N. Li, L.H. Liang, J.J. Xie, L. Chen, Y.G. Wei Thickness-dependent fracture characteristics of ceramic coatings bonded on the alloy substrates. Surface & Coatings Technology. – 2014. – 258 – P. 1039–1047.

стандарт передачи данных «STEP», трехмерные структуры камней были импортированы в САЕ программно-расчетный комплекс ANSYS с помощью его CAD компонента – Design Modeler.

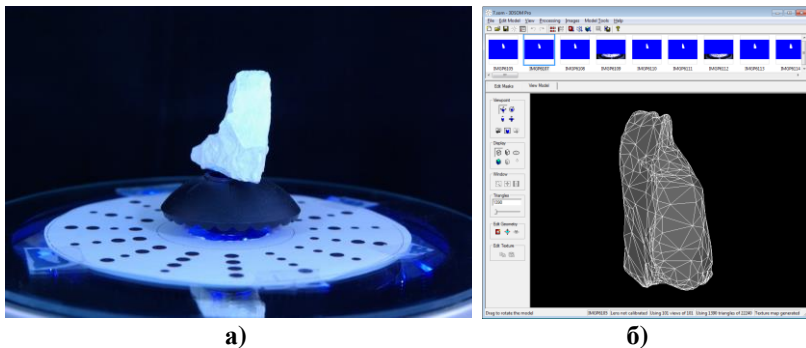


Рис. 6 – Видеофиксация поверхности свежеотколотых камней горных пород (а) и трехмерная модель камня в цифровом формате (б)

Для каждого камня созданы кубические объемы «матрица – единичное включение», и, посредством случайного разброса координат центров данных объемов, сгенерированы трехмерные структуры материала с включениями сложной формы на различных масштабных уровнях (рис. 7).

Исследованы особенности локализации пластической деформации и концентрации напряжений в композиции «алюминиевая матрица – включение карбида титана» при разных видах внешнего нагружения: объемное сжатие, вызванное охлаждением из расплава до комнатной температуры в процессе нанесения покрытия; одноосное растяжение либо сжатие; комбинированное термомеханическое воздействие.

Методом конечных элементов, с помощью пакета прикладных программ ANSYS, решались три типа трехмерных статических задач:

1) При моделировании охлаждения использовался модуль «Transient Thermal» с решателем «PRECONDITIONED CONJUGATE GRADIENT SOLVER». Одинаковая по всему объему температура уменьшалась линейно от 660°C до 24°C. Вместо ур. (2) использовались соотношения Дюамеля-Неймана: $\sigma_{ij} = (K - 2\mu/3)\delta_{ij}\epsilon_{kk} + 2\mu\epsilon_{ij} - 3K\alpha(T - T_0)\delta_{ij}$.

2) В задачах о механическом одноосном растяжении/сжатии структуры с нулевыми нормальными начальными условиями применялся модуль «Static Structural».

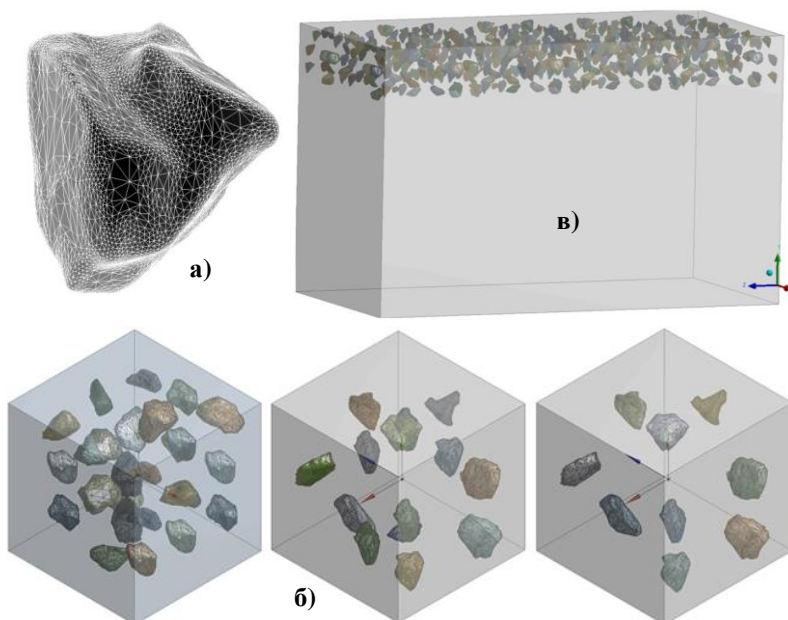


Рис. 7 – Примеры трехмерных структур с единичным включением (а), мезообъема композиционного покрытия с различной объемной долей включений 22, 10 и 8 % (б) и материала с композитным покрытием (в)

3) При комбинированном нагружении решение задачи 1) являлось начальными данными задачи 2).

На примере задач типа 2) осуществлена проверка сходимости решения, изучено влияние размера расчётной сетки и количества шагов нагружения на результаты моделирования (параграф 3.2). В параграфе 3.3 исследовано влияние отношения модулей упругости включения и матрицы на концентрацию напряжений в области границы раздела при решении упругой задачи.

В параграфе 3.4 задачи 1) и 2) решались отдельно. Для задачи 1) рассмотрено два случая: постоянный и переменный пределы текучести алюминиевой матрицы (рис. 8а). Показано, что учет зависимости предела текучести от температуры слабо влияет на конечное НДС композиции (рис. 8б и 9, состояния В и Е). Схожее для двух случаев конечное состояние достигается различной историей локализации пластического течения (рис. 9).

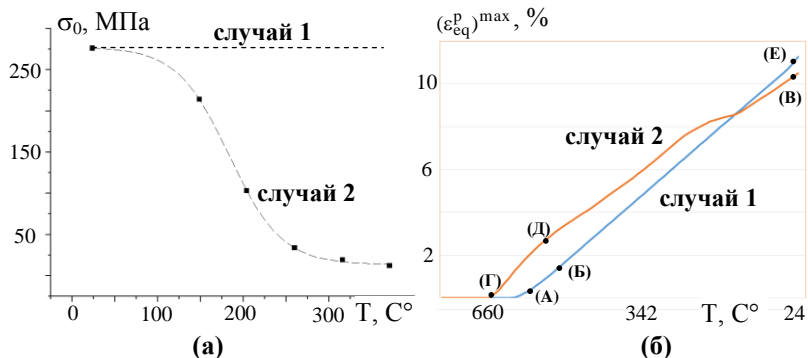


Рис. 8 – Зависимость предела текучести от температуры. Точки – эксперимент (а). Максимальная интенсивность пластических деформаций в алюминиевой матрице при охлаждении структуры «матрица-единичное включение» от 660 $^{\circ}\text{C}$ до комнатной температуры для случаев с постоянным 1 и переменным 2 пределами текучести (б)

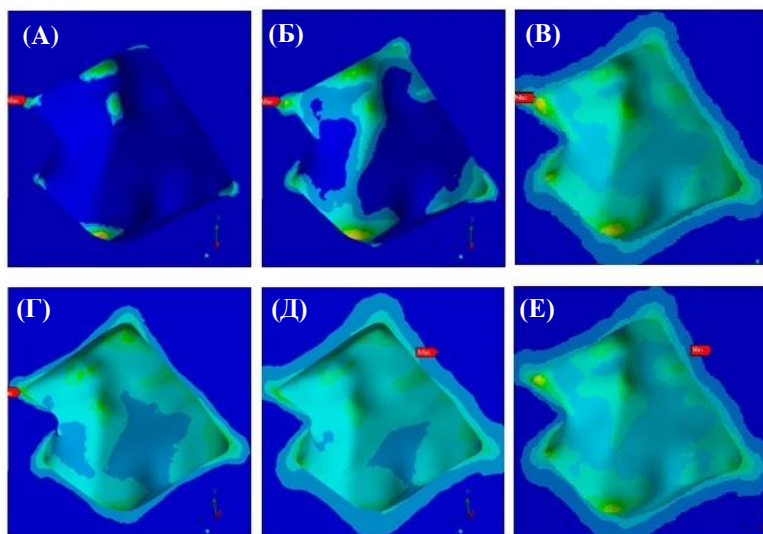


Рис. 9 – Распределения интенсивности пластических деформаций для состояний (А-Е), показанных на рис. 8 (б)

Для задачи 2) показано, что при одноосном сжатии объемная доля областей растяжения, в которых возможно зарождение трещин, больше при пластическом течении в матрице, чем в упругости (сравнить рис. 10а и б). Сравнивая всестороннее и одноосное сжатие, т.е. результаты решения задач 1) и 2), установлено, что, в отличие от

одноосного сжатия, когда отдельные области включения подвержены как отрицательным, так и положительным давлениям, при охлаждении структуры, области объемного растяжения во включении не образуются совсем, а сосредоточены исключительно в матрице (рис. 10б и в). Данный вывод, полученный по результатам численного моделирования, полностью согласуется с экспериментальными результатами⁵. При этом средний уровень давления выше при охлаждении, когда реализуется всестороннее сжатие, чем при одноосном сжатии.

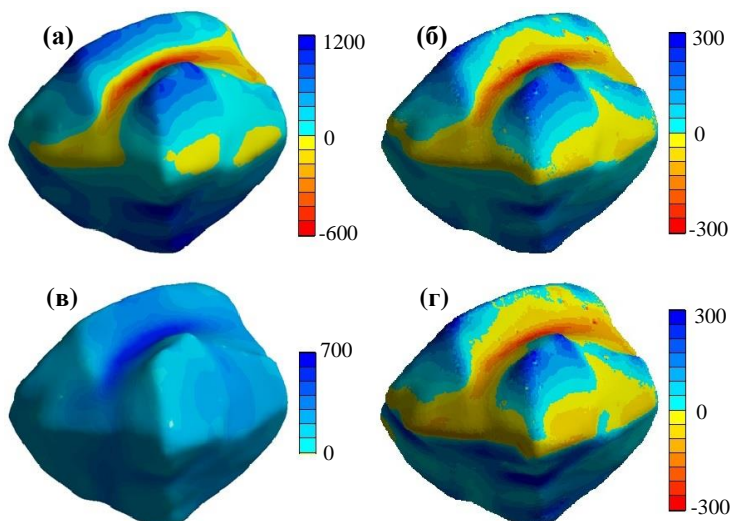


Рис. 10 – Распределения давления в упругом включении карбида титана при одноосном сжатии на 1,5% для случаев упругой (а) и пластичной матрицы (б), при охлаждении структуры «упругое включение – пластичная матрица» от 660°С до комнатной температуры (в) и при ее последующем одноосном сжатии до 1,5% (г)

В заключительном параграфе 3.5 рассмотрен вопрос о влиянии остаточных технологических напряжений, возникающий в процессе нанесения композитного покрытия, на прочность материала при последующей эксплуатации. Проведены расчеты охлаждения мезообъема композитного покрытия из расплава до комнатной температуры и последующего растяжения и сжатия. Сравнивая задачи 2) и 3), т.е. без учета и с учетом остаточных напряжений (ОН),

⁵ Kadolkar P.B., Watkins T.R., De Hosson J.Th.M., Kooi B.J. and Dahotre N.B. State of residual stress in laser-deposited ceramic composite coatings on aluminum alloys // Acta Materialia. – 2007. – 55, 4 – P. 1203–1214.

при сжатии, обнаружено, что распределения давлений отличаются слабо (рис. 10б и г). Вывод неожиданный, так как напряженное состояние после охлаждения (рис. 10в) должно влиять на результаты при последующем одноосном сжатии. Детальный анализ позволил выявить следующее (рис. 11). Сопоставляя черные графики с учетом и без учета ОН видно, что скорость уменьшения давления на начальных этапах сжатия структуры после охлаждения (с учетом ОН на рис. 11а) значительно выше, чем, если структуру сжимать из начального состояния без предварительного охлаждения (без учета ОН на рис. 11а). При дальнейшем деформировании скорости падения давления выравниваются, и зависимости максимальных напряжений от степени сжатия сходятся, демонстрируя одинаковый уровень концентрации напряжений в локальных областях объемного растяжения.

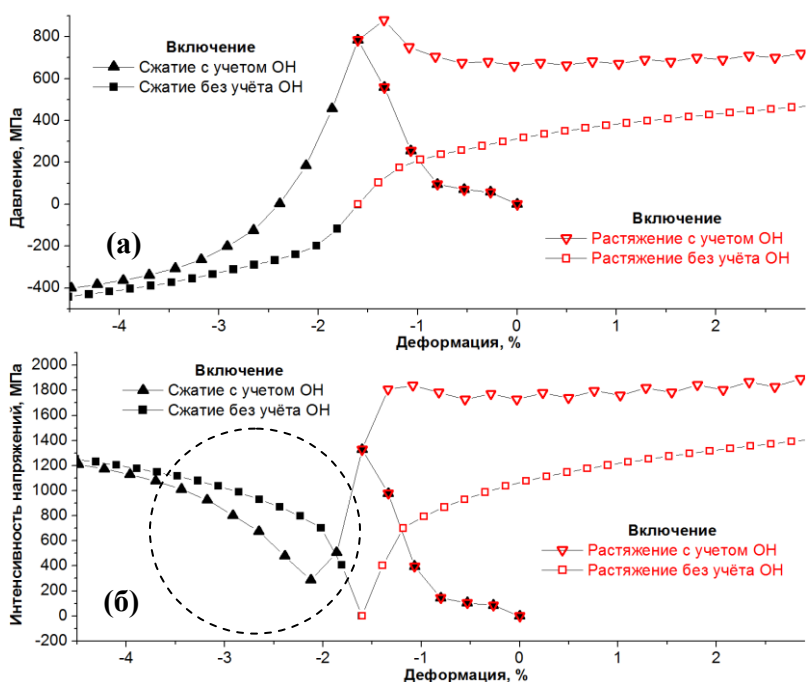


Рис. 11 – Максимальные значения давления (а) и интенсивности напряжений (б) в материале включения при охлаждении структуры от 660°C до 24°C с последующим сжатием/растяжением (с учетом ОН) и при одноосном сжатии/растяжении в нормальных условиях без предварительного охлаждения (без учета ОН)

При растяжении (красные графики на рис. 11) максимальные напряжения отличаются для случаев с учетом и без учета ОН, но являются сжимающими, и поэтому несущественны.

Таким образом, остаточные напряжения играют положительную роль на начальных этапах нагружения композитного покрытия, существенно снижая уровень опасных нагрузок в локальных областях растяжения (область, отмеченная на рис. 11б пунктирной окружностью), и не оказывают существенного влияния на напряженное состояние при больших степенях деформации. Для рассматриваемой системы эта граница составляет порядка 3-5 % сжатия. Обобщая, можно сделать вывод, что для композитных металлокерамических покрытий, в которых материал включений характеризуется высоким по сравнению с материалом матрицы пределом текучести, остаточные напряжения не оказывают существенного влияния на прочность покрытий.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

Проведено численное исследование механического поведения алюминиевого образца с композитным «TiC – Al6061» покрытием. Выявлены закономерности локализации деформации и разрушения на разных масштабах. Исследовано влияние вида нагружения, расстояния между включениями карбида титана и толщины композитного металлокерамического покрытия. Разработана численная методика построения трехмерных структур материалов с включениями сложной формы на основе экспериментальных данных. С помощью разработанной методики, созданы трехмерные структуры материала с композитным покрытием на различных масштабных уровнях. Численно исследованы особенности локализации деформации в области границ раздела при охлаждении композиции «металлическая матрица – керамическое включение» из расплава до комнатной температуры и последующем одноосном нагружении. Выявлена роль технологических остаточных напряжений.

При численном моделировании установлено следующее:

1. При внешнем одноосном сжатии композиции вблизи границ раздела возникают локальные области объемного растяжения. Опасные концентрации напряжений в данных областях вызывают развитие полос локализованного сдвига в алюминиевой матрице и растрескивание керамических включений в покрытии. Трещины при внешнем растяжении и сжатии распространяются в различных направлениях – перпендикулярно и вдоль направления нагружения, соответственно, что полностью согласуется с экспериментальными данными.

2. Концентрация напряжений немонотонно зависит от объемной доли включений в композитном покрытии. Максимальные значения интенсивности напряжений в областях концентрации наблюдаются при расстоянии между включениями, сопоставимым со средним размером включения. Немонотонный характер зависимости обусловлен качественным изменением характера локализации пластической деформации в матрице вокруг включений при различном расстоянии между ними.

3. С увеличением толщины покрытия, расстояние между трещинами в покрытии увеличивается. Образование магистральных поперечных трещин в толстых твердых покрытиях может приводить к снижению макроскопической прочности поверхностно упрочненных образцов. Выводы согласуются с экспериментом.

4. При одноосном сжатии области объемного растяжения формируются как в матрице, так и во включении, а при всестороннем сжатии – только в матрице. Объемная доля областей растяжения во включении больше и концентрация напряжений в этих областях ниже при пластическом течении в матрице, чем в случае упругой матрицы. Обобщая, в металлокерамических композитах разрушение реализуется позже и может характеризоваться множественным растрескиванием включений, а в керамических композитах происходит раньше и связано с распространением единичных трещин. Концентрация напряжений в 1.5 раза выше при всестороннем, чем при одноосном сжатии.

5. При всестороннем сжатии до 1.5 %, вызванном охлаждением композитного покрытия из расплава до комнатной температуры, локальные пластические деформации достигают 12 %. Учет зависимости предела текучести от температуры качественно меняет историю локализации пластической деформации в процессе охлаждения, однако слабо влияет на конечную картину локализации деформации после охлаждения.

6. Технологические остаточные напряжения играют положительную роль при последующем механическом нагружении материала с композитным покрытием до малых степеней деформации, и слабо влияют на прочность композитного покрытия при деформациях выше 5 %.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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:

1. Балохонов Р. Р. Численное исследование динамики деформирования и разрушения материала с покрытием / Р. Р. Балохонов, В. А. Романова, С. А. Мартынов, **Е. А. Шваб** // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 7/3. – С. 125–127. – 0,58 / 0,13 п.л.

2. Балохонов Р. Р. Моделирование деформации и разрушения материала с композитным покрытием / Р. Р. Балохонов, **Е. А. Шваб**, В. А. Ковалев, В. А. Романова, С. А. Мартынов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 7/3. – С. 128–130. – 0,35 / 0,07 п.л.

3. Балохонов Р. Р. Моделирование деформации и разрушения материала с покрытием с учетом распространения полосы Чернова-Людерса в стальной подложке / Р. Р. Балохонов, В. А. Романова, **Е. А. Шваб** // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15, № 2. – С. 109–116. – 0,92 / 0,31 п.л.

в переводной версии журнала, индексируемой Web of Science:

Balokhonov R. R. Simulation of Deformation and Fracture of Coated Material with Account for Propagation of a Lüders- Chernov Band in the Steel Substrate / R. R. Balokhonov, V. A. Romanova, S. Schmauder, S. A. Martynov, **E. A. Schwab** // Physical Mesomechanics. – 2013. – Vol. 16, is. 2. – P. 133–140. – DOI: 10.1134/S1029959913020045

4. Балохонов Р. Р. Влияние скорости деформирования на прочность композита «покрытие-подложка». Численное моделирование / Р. Р. Балохонов, В. А. Романова, **Е. А. Шваб** // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2011. – Т. 17, № 3. – С. 320–340. – 2,43 / 0,81 п.л.

5. Балохонов Р. Р. Моделирование деформации и разрушения материала с покрытием на мезоуровне / Р. Р. Балохонов, В. А. Романова, **Е. А. Шваб**, Н. И. Карпенко // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 9. – С. 21–27. – 0,81 / 0,2 п.л.

6. Balokhonov R. R. Mesoscale analysis of deformation and fracture in coated materials / R. R. Balokhonov, V. A. Romanova, S. Schmauder, **E. Schwab** // Computational Materials Science. – 2012. – Vol. 64. – P. 306–311. – DOI: 10.1016/j.commatsci.2012.04.013. – 0,69 / 0,17 п.л. (*Web of Science*)

Статья в сборнике материалов зарубежной научной конференции, индексируемом Web of Science:

7. Balokhonov R. R. Mesomechanical numerical modeling of the stress-strain localization and fracture in an aluminum alloy with a composite coating / R. R. Balokhonov, **E. A. Schwab**, V. A. Romanova, A. V. Zinoviev, S. A. Martynov // AIP Conference Proceedings. – 2014. – Vol. 1623 : International conference on physical mesomechanics of multilevel systems 2014. Tomsk, Russia, September 03–05, 2014. – P. 47–50. – DOI: 10.1063/1.4898879. – 0,46 / 0,09 п.л.

Прочие публикации:

8. **Шваб Е. А.** Особенности деформирования и разрушения материала с композитным покрытием на мезоуровне / Е. А. Шваб, Р. Р. Балохонов // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов : сборник материалов IV Международной конференции. Москва, 25–28 октября 2011 г. – Москва, 2011. – С. 505–507. – 0,35 / 0,17 п.л.

9. Балохонов Р. Р. Моделирование неоднородной деформации и разрушения материала с покрытием / Р. Р. Балохонов, В. А. Романова, **Е. А. Шваб** // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов : сборник материалов IV Международной конференции. Москва, 25–28 октября 2011 г. – Москва, 2011. – С. 872–874. – 0,46 / 0,15 п.л.

10. **Шваб Е. А.** Численное моделирование деформации и разрушения материала с композитным покрытием / Е. А. Шваб, Р. Р. Балохонов // Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов : сборник тезисов. Томск, 05–09 сентября 2011 г. – Томск, 2011. – С. 535–536. – 0,23 / 0,12 п.л.

11. Балохонов Р. Р. Моделирование деформации и разрушения материала с композитным Al-TiC покрытием / Р. Р. Балохонов, В. А. Романова, **Е. А. Шваб**, В. А. Ковалев, С. А. Мартынов // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов : сборник материалов V Международной конференции. Москва, 26–29 ноября 2013 г. – Москва, 2013. – С. 803–805. – 0,46 / 0,09 п.л.

12. **Шваб Е. А.** Моделирование деформирования материала с композитным Al-TiC покрытием / Е. А. Шваб, Р. Р. Балохонов, В. А. Ковалев // Иерархически организованные системы живой и неживой природы : материалы международной конференции. Томск, 09–13 сентября 2013 г. – Томск, 2013. – С. 494–497. – 0,58 / 0,14 п.л.

13. Балохонов Р. Р. Численный анализ механизмов деформации и разрушения материалов с покрытиями на мезоуровне [Электронный ресурс] / Р. Р. Балохонов, В. А. Романова, Р. А. Бакеев, **Е. А. Шваб** // Современные проблемы прикладной математики и механики : теория, эксперимент и практика : труды международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика Н. Н. Яненко. Новосибирск, 30 мая – 04 июня 2011 г. – Новосибирск, 2011. – 6 с. –

URL: http://conf.nsc.ru/niknik-90/reportview/41472/Balokhonov_full.pdf. – 0,69 / 0,17 п.л.

14. Balokhonov R. R. Mechanisms of deformation and fracture in coated materials. Multiscale numerical simulation / R. R. Balokhonov, V. A. Romanova, S. Schmauder, **E. A. Schwab** // Fracture mechanics for durability, reliability and safety : book of abstract of 19th European conference on fracture. Kazan, Russia, August 26–31, 2012. – Kazan, 2012. – Vol. 2. – P. 167. – 0,12 / 0,03 п.л.

15. Балохонов Р. Р. Мезомеханика границ раздела в материалах с покрытиями. Численное моделирование / Р. Р. Балохонов, В. А. Романова, **Е. А. Шваб** // Актуальные проблемы прочности : сборник тезисов докладов 52 Международной научной конференции. Уфа, 04–08 июня 2012 г. – Уфа, 2012. – С. 146. – 0,23 / 0,08 п.л.

Издание подготовлено в авторской редакции

Отпечатано на участке цифровой печати
Издательского Дома Томского государственного университета
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Заказ № 2410/15 от «24» октября 2017 г. Тираж 100 экз.