

## Отзыв

официального оппонента

о диссертационной работе Шваба Евгения Анатольевича

«Процессы локализации деформации и разрушения на разных масштабных уровнях в материале с композитным металлокерамическим покрытием»

по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела  
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Сегодня композиционные и, в частности, металлокерамические материалы постепенно вытесняют чисто металлические соединения в наиболее ответственных и высокоточных деталях. Ключевыми характеристиками таких композитов являются высокая прочность, высокая твердость, высокая износостойкость. Вариативность геометрических и физических свойств такого рода покрытий приводит к довольно широкому спектру возможных изменений механических характеристик всей композиции. Кроме того, создание и тестирование этих материалов сопряжено с технологическими трудностями: отслоением, растрескиванием. В этой связи представляется важным изложенное в работе развитие математического моделирования при анализе механизмов деформации и разрушения материалов с композитным покрытием, что делает тему исследований *актуальной*.

Работа включает в себя введение, три главы, заключение, список литературы, состоящий из 170 источников, изложена на 141 странице, содержит 68 рисунков и 4 таблицы.

*Во введении* обоснована актуальность, сформулированы новизна, цель работы, а также положения, выносимые на защиту. Обоснована достоверность результатов, отмечены научная и практическая значимость, личный вклад автора и приведены данные об апробации работы. Кратко изложено содержание диссертации по главам.

*Первая глава* посвящена обзору литературных источников за предыдущие годы исследований, посвященные свойствам материалов с покрытиями, описанию различных видов и методов нанесения покрытий, основным их характеристикам, а также способам моделирования деформации и разрушения таких материалов, равно как и приведены примеры готовых изделий с нанесёнными покрытиями. Обзор российских и зарубежных научных работ по теме диссертации имеет написан достаточно квалифицированно и имеет аналитический характер.

*Во второй главе* описана математическая постановка задачи и особенности численной реализации. Исследования проведены в двумерной постановке. Проведена проверка сходимости выбранной методики расчётов. Выделены характерные черты стадии деформирования матрицы и приведены характерные причины разрушения включения при различных видах нагружения. Корреляция полученных результатов с экспериментальными данными указывает на их обоснованность. Выведены закономерности участков концентрации пластической деформации в зависимости от

концентрации включений. Определены закономерности деформации и разрушения материала с композитным покрытием на макроуровне, в зависимости от толщины покрытия.

В третьей главе проведено исследование локализации деформации в композитных металлокерамических покрытиях в трёхмерной постановке и сделана оценка влияния остаточных напряжений на напряжённо-деформированное состояние при различных видах нагружения. На основе предположения о масштабируемости процесса дробления хрупких материалов предложена методика создания моделей трёхмерных структур. Анализ сходимости выбранного пакета программного обеспечения CAE ANSYS показывает его состоятельность. Обнаружена зависимость влияния механических свойств включения (модуля Юнга) на концентрацию напряжений во включении и в матрице. Предложен сравнительный анализ упругопластического напряжённо-деформированного состояния композиции «матрица-включение» при всестороннем и одноосном сжатии. Всестороннее сжатие (остаточные напряжения) полученные в процессе производства покрытия с учётом релаксации пластическим течением. Учёт остаточных напряжений позволил понять степень их влияния на прочность реального композитного покрытия при механическом нагружении.

В заключении приведены основные результаты и выводы по диссертационной работе.

В целом работа в значительной степени направлена на создание научно-методических основ установления закономерностей процессов упругопластического деформирования металлов с учетом структурной неоднородности при квазистатических нагружениях на основе математического моделирования и количественного анализа.

*Научная новизна* диссертационной работы заключается в следующем:

1. Выявлены закономерности локализации напряженно-деформированного состояния в области границы раздела матрица-включение.
2. Выведена немонотонная зависимость концентрация напряжений от объемной доли включений в металлокерамическом покрытии.
3. Показана нелинейная зависимость периода растрескивания покрытия при растяжении в зависимости от его толщины.
4. Показана положительная роль технологических остаточных напряжений в покрытии при механическом нагружении до малых степеней деформации, и слабое их влияние на прочность композитного покрытия при деформациях выше 5 %.

*Достоверность* полученных результатов подтверждается анализом решений тестовых задач и сравнением полученных результатов с результатами экспериментальных исследований других авторов. Так, в разделе 2 получена характерная зона растрескивания, аналогичная наблюдаемой экспериментально. На примере алюминиевой матрицы и включения из карбида титана получена адекватная физическим представлениям локализация пластической деформации и разрушения.

*Практическое значение* работы связано с получением необходимой для решения прикладных проблем информации о механизмах деформации и разрушения материала со сложной внутренней структурой.

Работа аккуратно и хорошо оформлена. Основные результаты автора опубликованы в 15 работах, в том числе 6 статей в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, (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, и 8 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций.

Оценивая диссертацию в целом, можно заключить, что она представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную в рамках актуального научного направления, содержащую новые научные результаты и имеющую практическое значение.

По содержанию и изложению работы имеются замечания:

1. При анализе характера растрескивания покрытия (с. 70-71) сделан вывод, что, цитата, «...чем толще покрытие, тем меньше расстояние между трещинами». Эта качественная оценка никак не соотносится с количественными возможностями численного метода. Хотелось бы оценить связь характерных (средних?) размеров трещин, расстояний между ними и толщин покрытия.

2. При описании вывода на стр. 113-114 написано требующее объяснений утверждение, что при сжимающих напряжениях *разрушения не происходит*.

3. На стр. 112, рис. 3.31, приведены замечательные результаты концентрации деформаций при остывании структуры. При этом никак не анализируется возможное влияние относительной близости (дальности??) границ расчетной области на морфологию изолиний.

4. В Заключение (с. 119-121) основные выводы имеют вполне конкретный количественный характер, в то время как некоторые выводы (пункты 3 и 4, например), изложены чересчур описательно.

Отмеченные замечания не ставят под сомнение общую положительную оценку работы и квалификации автора.

Считаю, что диссертация Шваба Евгения Анатольевича «Процессы локализации деформации и разрушения на разных масштабных уровнях в материале с композитным металлокерамическим покрытием» представляет собой единолично написанную научную работу, выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, совокупность результатов которой можно квалифицировать как решение задачи, имеющей существенное значение для развития механики деформируемого твердого тела.

В целом, по уровню решаемых задач, актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований, теоретической и практической значимости полученных результатов работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности 01.02.04 Механика деформируемого твердого тела, а ее автор, Шваб Евгений Анатольевич, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент

профессор кафедры геофизики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доктор физико-математических наук (25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых, 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела)

Немирович-Данченко Михаил Михайлович

07.12.2017

Подпись М.М. Немировича-Данченко заверяю  
Ученый секретарь Ученого совета ТПУ



О.А. Ананьева

Почтовый адрес: 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30

Телефон: (3822) 60-63-33

Адрес электронной почты: [nemdan@tpu.ru](mailto:nemdan@tpu.ru)

Адрес официального сайта организации: <http://www.tpu.ru>