

Отзыв
официального оппонента
на диссертационную работу Мартынова Сергея Андреевича
«Моделирование процессов деформации и разрушения материала с
криволинейной границей раздела «пластичная подложка–хрупкое покрытие»»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.02.04. – «Механика деформируемого твердого тела»

Актуальность. Работа С.А.Мартынова посвящена важной задаче – исследованию процессов деформирования и разрушения материалов с упрочняющим покрытием. Такие материалы широко применяются в различных отраслях современной промышленности, включая нефтегазоэнергетику, авиа- и автомобилестроение, сельскохозяйственное машиностроение и др.

Поверхностное упрочнение материалов призвано улучшить его прочностные характеристики: увеличить механическую прочность, износостойкость, сопротивляемость коррозии при эксплуатации в агрессивных средах, теплопрочность и т.д.

Нанесение упрочняющего покрытия означает, что в материале формируется характерная граница между основным материалом (подложкой) и материалом покрытия, которая приводит к изменению механических характеристик всей композиции.

Таким образом, исследование поведения материалов с упрочняющим покрытием является актуальной задачей современной механики деформируемого твердого тела как с теоретической (разработка математических определяющих соотношений и методов численного моделирования), так и с практической (расчет прочности различных элементов конструкций в прикладных задачах проектирования) точек зрения.

Диссертационная работа изложена на 127 страницах, включает в себя введение, пять глав, заключение, список литературы, состоящий из 116 наименований, содержит 61 рисунок и 1 таблицу.

Во введении дается обоснование актуальности исследования, описана степень разработанности темы, сформулирована цель работы и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Приведено описание методологии и используемых методов исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов и выводов, отмечен личный вклад автора и приведены данные по апробации работы. Кратко изложено содержание диссертации по главам.

В первой главе приведен обзор литературных источников, посвященных изучению свойств материалов с покрытиями. Описаны виды и методы нанесения однослойных и многослойных покрытий с помощью различных технологий – применение низкоэнергетических электронных пучков, ультразвуковая обработка, сварка взрывом, различные виды напыления, диффузионное борирование и др. Далее описаны используемые современные методы численного моделирования процессов деформирования и разрушения материалов с покрытием. Отмечено, что большинство работ посвящено анализу композиции с прямолинейной границей раздела «подложка-покрытие», в то время, как криволинейность этой границы может оказывать существенное влияние на характер деформирования, что необходимо учитывать при моделировании.

В целом, автором продемонстрировано хорошее знание литературных источников и владение современными достижениями в данной области науки.

Вторая глава посвящена математической постановке задачи и особенностям ее численной реализации. В качестве математической модели среды автором использована

система уравнений механики сплошной среды, которая дополняется определяющими соотношениями упругого и упругопластического деформирования. Рассмотрено четыре различных варианта поведения среды за пределами упругости в зависимости от условий нагружения: хрупкое разрушение, медленное деформационное упрочнение, деформационное упрочнение в зависимости от скорости нагружения, кривая с «зубом текучести» для моделирования распространения изолированных полос локализованной пластической деформации. Все кривые пластического поведения, а также параметры, используемые в критерии разрушения (критерий типа Губера), взяты автором из анализа экспериментальных данных.

На границе «подложка-покрытие» предполагается условие идеального механического контакта. Таким образом, основной интерес в процессе деформирования связан с анализом различных определяющих законов для материала подложки и покрытия вкупе с возможными геометрическими параметрами (кривизна границы раздела, толщина покрытия) и условиями нагружения (растяжение, сжатие, зависимость от скорости нагружения и др.).

Задача рассматривается в динамической постановке в предположении плоской деформации. Формулируются краевые и начальные условия. Интегрирование системы уравнений осуществляется методом конечных разностей с использованием явной схемы Уилкинса. Устойчивость разностной схемы гарантируется выполнением условия Куранта.

Третья глава посвящена численному анализу процессов деформирования и разрушения композиции «сталь - боридное покрытие» при различных способах нагружения. Установлено, что криволинейность границы раздела материала и упрочняющего покрытия является основным фактором формирования концентраторов напряжений. В процессе деформирования изначально хаотичные микроконцентраторы взаимодействуют между собой, что приводит к самоорганизации, т.е. к формированию отдельных мезомасштабных зон повышенного напряженного состояния. Характерно, что в соседних зонах происходит подавление изначальных концентраторов напряжений и снижение уровня напряженного состояния. Области повышенной интенсивности напряжений развиваются в локализованные зоны пластической деформации и, в конечном итоге, приводят к разрушению материала.

Автором выделены три характерные стадии пластического деформирования в зависимости от эволюции концентраторов напряжений. Показано, что соотношение свойств материала подложки и покрытия является одним из факторов, определяющих место будущего разрушения композиции.

Исследованы закономерности развития напряженно-деформированного состояния при растяжении и при сжатии подложки с двухслойным покрытием (при наличии промежуточного переходного слоя), а также в зависимости от скорости нагружения. Показано, что промежуточный слой не всегда оказывает положительное влияние на прочностные свойства композиции. Так, при определенных параметрах модели трещины в переходном слое при растяжении зарождаются раньше, чем в покрытии, что приводит к снижению макроскопической прочности композиции в целом. При сжатии, напротив, наличие переходного слоя оказывает положительное влияние и увеличивает прочностные свойства композиции.

Скорость нагружения также является одним из факторов, влияющих на характер разрушения материала. При высокой скорости нагружения разрушение реализуется во фронте волны сжатия, в то время как медленное нагружение сопровождается разрушением в зонах растяжения, что существенно меняет ориентацию формируемых трещин и, следовательно, характер разрушения в целом.

В четвертой главе автор исследует влияние неоднородного пластического деформирования стальной подложки на характер разрушения керамического покрытия. С помощью специального задания кривой течения с «зубом текучести» моделируется

распространение в стальной подложке локализованных полос пластической деформации (Чернова-Людерса). В математическую модель введен специальный параметр ε_0 , который отвечает за способность дислокаций замедляться на примесях, и который в целом управляет скоростью распространения полос пластической деформации.

Показано, что движущийся фронт полосы Чернова-Людерса приводит к перераспределению полей напряжений и деформаций, так что непосредственно за фронтом наблюдается локализация концентраторов напряжений в материале покрытия. При определенной скорости движения фронт полосы Чернова-Людерса инициирует растрескивание покрытия. Установлено, что скорость продвижения полосы Чернова-Людерса даже при одном и том же значении параметра ε_0 меняется в зависимости от кривизны линии раздела подложка-покрытие.

Пятая глава посвящена исследованию влияния толщины покрытия на механическое поведение композиции «стальная подложка – боридное покрытие». В результате численных экспериментов определена оптимальная толщина покрытия, которая обеспечивает максимальную сопротивляемость нагрузке. Показано, что оптимальной является толщина покрытия, в 2-2.5 раза превышающая характерную степень неоднородности границы раздела «подложка-покрытие». Проведен анализ влияния геометрических характеристик границы раздела на прочность композиции. Показано, что на величину оптимальной толщины покрытия оказывает влияние период размещения зубцов криволинейной границы раздела «покрытие-подложка».

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания и неточности**:

1. Начальные данные для численных расчетов (выражение (5), стр. 37) принимаются без учета собственных (самоуравновешенных) напряжений. Последние могут оказывать существенное влияние и качественно изменить процесс упругопластического деформирования и разрушения композиции «подложка-покрытие».
2. Кривая пластического упрочнения (рис. 2.1, график 3, стр. 35) выбрана из экспериментальных данных с учетом температурной чувствительности, интенсивность скорости пластической деформации в соответствии с выражением (16) на стр. 40 также зависит от температуры. Однако ни в начальных, ни в краевых условиях температура не фигурирует, и из работы неясно каким образом учитывается зависимость процесса деформирования от изменения температуры.
3. Не совсем ясна необходимость учета производной Яумана (выражение (10), стр. 38), поскольку деформации структуры достаточно малы, и вопросы перестройки сетки и корректировки граничных условий не рассматриваются.
4. В параграфе 1.2 соответствие между номерами рисунков и ссылок на них по тексту параграфа сдвинуто.
5. Рис. 1.2.1 на стр. 23 не содержит шкалу уровня напряжений.

Сделанные замечания не ставят под сомнение общую положительную оценку работы и квалификацию автора.

Научная новизна исследования и основные **результаты** заключаются в следующем:

- Выявлена стадийность процесса деформирования в области границы раздела покрытие-подложка, связанная с переключением различных механизмов развития пластической деформации. Показано, что местоположение максимальной

концентрации напряжений и, следовательно, будущего разрушения определяется прочностью покрытия.

- Установлены закономерности характера разрушения покрытия в зависимости от направления прикладываемой нагрузки (сжатие или растяжение), от скорости нагружения и от наличия переходного слоя между покрытием и подложкой. Показано, что наличие переходного слоя может оказывать как позитивное, так и негативное влияние на прочность композиции в целом в зависимости от условий нагружения и параметров композиции.
- Определена взаимосвязь процессов локализации пластического течения в подложке и растрескивания покрытия в процессе продвижения полосы Чернова-Людерса.
- Определено влияние толщины покрытия и кривизны границы раздела «подложка-покрытие» на прочность композиции. Обнаружено, что существует оптимальная толщина, которая составляет 2-2,5 от характерной толщины неоднородности границы раздела.

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов, сформулированных в диссертационной работе, обеспечивается корректностью математической постановки задачи, использованием апробированных методов решения, проведением ряда тестовых расчетов, исследованием сеточной сходимости, а также соответствием полученных результатов численного моделирования экспериментальным данным и численным результатам, полученным другими авторами.

Квалификационная оценка работы. Диссертация С.А.Мартынова представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную в рамках актуального научного направления – физическая мезомеханика структурно-неоднородных сред. Диссертация содержит решение задач моделирования процессов упругопластического деформирования и разрушения материалов с покрытием, которые имеют существенное значение для развития механики деформируемого твердого тела.

Диссертация С.А.Мартынова соответствует п. 3 «Мезомеханика многоуровневых сред со структурой» и п. 8 «Математические модели и численные методы анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования» паспорта специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Результаты диссертации опубликованы в 14 научных работах автора, в том числе 5 работ – в изданиях, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук. Полученные результаты многократно докладывались на международных, всероссийских и региональных научных конференциях.

Значимость работы для науки и практики заключается в развитии программного комплекса для анализа особенностей процессов деформирования материалов с покрытиями, а также в полученных результатах численного моделирования и выводах о влиянии геометрии границы раздела и толщины покрытия на прочность композиции «подложка-покрытие». Разработанный программный комплекс может быть использован для исследования упругопластического деформирования и разрушения других структурно-неоднородных сред, композиционных материалов и материалов с покрытиями. Результаты диссертационного исследования могут быть востребованы в ряде Институтов ФАНО России, занимающихся исследованием упругопластического деформирования и разрушения структурно-неоднородных материалов, металлов, сплавов и композитов, а также в ВУЗах

при разработке новых специализированных курсов лекций и обучении студентов старших курсов и аспирантов по специальности механика деформируемого твердого тела.

Диссертация С.А.Мартынова отвечает требованию внутреннего единства. Структура диссертационной работы соответствует ее содержанию. Оформление диссертации в целом соответствует действующим стандартам и требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертация является научно-квалификационной работой, которая содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора.

Автореферат правильно отражает полученные результаты и соответствует основному содержанию диссертации.

Заключение. Диссертационная работа С.А.Мартынова отвечает критериям раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник лаборатории механики деформируемого твердого тела и сыпучих сред Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН,
доктор физико-математических наук
(01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»),
старший научный сотрудник



Лавриков Сергей Владимирович

Служебный адрес:

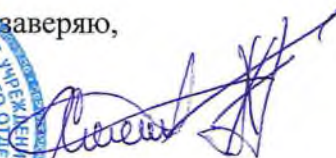
630091, г. Новосибирск, Красный пр., 54

Тел. +7 (383) 205-30-30, доб. 184,

email: admin@misd.nsc.ru, <http://www.misd.ru/>

Подпись Лаврикова Сергея Владимировича заверяю,
Ученый секретарь ИГД СО РАН,
к.т.н.

16.11.2016 г.



А.П.Хмелинин