

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель Федерального  
государственного бюджетного  
научного учреждения Уфимского  
федерального исследовательского  
центра Российской академии наук,  
доктор биологических наук,  
Мартыненко Василий Борисович

«01» ноября 2024 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Ошорова Аюра Дашеевича

**«Механизмы разрушения слоистых структур на основе аморфных-нанокристаллических-кристаллических металлических сплавов в температурном диапазоне 77 – 293 К»**

представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук

по специальности

#### **2.6.6 Нанотехнологии и наноматериалы**

##### 1. Актуальность темы диссертации и соответствие специальности

Создание слоистых композитов на основе аморфных и нанокристаллических сплавов открывает новые возможности для инженерии материалов. Такие композиты могут сочетать в себе лучшие свойства обоих типов материалов, обеспечивая высокую прочность при сохранении достаточной пластичности. Это делает их идеальными для проектирования конструктивных элементов, способных выдерживать высокие нагрузки и сложные условия эксплуатации.

Диссертационная работа Ошорова А.Д. посвящена выявлению механизма разрушения слоистых структур на основе аморфных-нанокристаллических-кристаллических металлических сплавов в температурном диапазоне 77–293 К и созданию композиционных соединений на основе нанокристаллических/аморфных сплавов, сохраняющих прочность в условиях одноосного растяжения при криогенных температурах. Автором получен ряд новых результатов, имеющих теоретическую и практическую значимость.

1. Разработана методика создания тонких слоистых композитов на основе нанокристаллического/аморфного – легкоплавких металлических сплавов, сохраняющих механическую прочность и вязкий характер разрушения в условиях одноосного растяжения при криогенных температурах.

2. Исследованы морфологические особенности разрушения тонких слоистых композиционных соединений «нанокристаллическая/аморфная пленка – легкоплавкий металлический сплав – нанокристаллическая/аморфная пленка» в условиях одноосного растяжения при температурах 77, 195, 293 К.

3. Определены закономерности деформирования и разрушения тонких слоистых композитов нанокристаллический/аморфный – легкоплавкие металлические сплавы в условиях одноосного растяжения в интервале температур 77 – 293 К.

4. Определена специфика распределения температуры в области вершины трещины, распространяющейся в тонких слоистых композиционных соединениях нанокристаллический/аморфный – легкоплавкие металлические сплавы, методом компьютерного моделирования.

5. Исследовано влияние эффекта саморазогрева в вершине магистральной трещины, распространяющейся в тонких слоистых композиционных соединениях нанокристаллический/аморфный – легкоплавкие металлические сплавы, на характер их разрушения в интервале температур 77 – 293 К.

Таким образом, полученные в диссертации результаты показывают, что изготовленные композиты на основе нанокристаллического/аморфного – легкоплавкого металлического сплава, могут сохранить вязкий характер разрушения, даже при криогенной температуре.

На основании отмеченного выше можно сделать вывод о том, что тема диссертации является, безусловно, **актуальной**, а полученные в ней результаты имеют **практическое значение**. Тематика исследования, формулировка целей и задач исследования, используемые методы решения, область приложения полученных результатов указывают, что представленная диссертационная работа **соответствует паспорту специальности 2.6.6 нанотехнологии и наноматериалы**.

## 2. Содержание работы

Работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и двух приложений.

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационного исследования, определены цель и задачи исследования. Сформулированы: научная новизна; теоретическая и практическая значимость работы; положения, выносимые на защиту; представлена информация об апробации работы на научных конференциях.

**В первой главе** представлен критический обзор литературных данных, посвященных композиционным соединениям, современным методам их получения и основным физико-механическим свойствам. Отдельно проанализирована специфика получения и механические свойства слоистых композиционных соединений. Рассмотрены способы изготовления металломатричных слоистых композитов: методом прессования; диффузионной сваркой; сваркой взрывом и жидкофазными способами. Особое внимание уделено анализу физических свойств аморфных и наноструктурных материалов с точки зрения возможности их использования при изготовлении композиционных соединений.

**Во второй главе** описаны разработанные методики создания тонких слоистых композиционных соединений на основе тонких аморфных и нанокристаллических металлических лент. Описана методика изготовления различных видов слоистых композиционных соединений: 1) композиты на основе аморфно-нанокристаллических лент и полиэфирной смолы (в том числе с добавлением углеродных нанотрубок); 2) композиты на основе нанокристаллических/аморфных лент и полиэфирной смолы; 3) композиты на основе тонких нанокристаллических/аморфных лент и легкоплавких металлических сплавов. Установлены особенности микроразрушения тонкой аморфно-нанокристаллической плёнки, находящейся на поверхности многослойного композиционного соединения. На основании экспериментальных данных рассмотрена специфика определения вязкости микроразрушения покрытия многослойных композиционных соединений в тех случаях, когда локальное нагружение пирамидкой Виккерса не позволяет создать симметричные вложенные фигуры из микротрещин, окружающих отпечаток от индентора. Предложено уточнение для формулы расчёта коэффициента вязкости микроразрушения. Разработана методика изготовления тонких образцов рассматриваемых композитов пригодных для испытания на одноосное растяжение, в том числе при криогенных температурах. Определена микротвёрдость указанных композитов, а также зависимости механического напряжения от относительной деформации.

**В третьей главе** экспериментально определены особенности разрушения тонких лент аморфных/нанокристаллических металлических сплавов, при одноосном растяжении в интервале температур 293 – 77 К. Понижение температуры сопровождается резким охрупчиванием материала и соответствующим изменением характера разрушения. При этом для образ-

цов 5БДСР среднее значение предела прочности снижается с 1130 МПа до 640 МПа. Относительная деформация при которой происходит разрушение снижается с 2,00 % до 1,50 %. Для образцов 82К3ХСР среднее значение предела прочности убывает с 1435 МПа до 1087 МПа, а относительная деформация при которой происходит разрушение снижается с 1,64 % до 1,34 %. Предложена модель разрушения слоистых композиционных соединений, предполагающая сохранение вязкого характера разрушения в температурном диапазоне 77 - 293 К в условиях одноосного растяжения. Саморазогрев материала в момент начала роста трещины может локализоваться в пограничном слое между нанокристаллической/аморфной и кристаллической фазами, а затем распространяться на всю область в вершине растущей трещины. В этом случае пограничный слой между нанокристаллической/аморфной и кристаллической фазами будет обладать относительно высокой пластичностью при криогенных температурах образца в целом и обеспечивать вязкость разрушения при превышении критических напряжений и появлении нано-и микротрещин.

**В четвертой главе** проведено компьютерное моделирование области саморазогрева в вершине медленной трещины, распространяющейся в тонких композиционных соединениях нанокристаллический/аморфный и кристаллический сплавы при низких температурах. Основные выводы предложенной физической модели хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными. В четвертой главе также проведены экспериментальные исследования, которые позволили экспериментально верифицировать предложенную в третьей главе гипотезу о влиянии эффекта саморазогрева в вершине магистральной трещины, распространяющейся в тонких слоистых композиционных соединениях «аморфный/нанокристаллический-легкоплавкий металлические сплавы», на характер их разрушения при температурах 293, 195 и 77 К. На основании экспериментальных исследований установлены морфологические особенности разрушения слоистых композиционных соединений «нанокристаллическая/аморфная плёнка – легкоплавкий металлический сплав – нанокристаллическая/аморфная плёнка» в условиях одноосного растяжения при температурах 293, 195 и 77 К. Морфологические особенности разрушения композиционных образцов при понижении температуры существенно не меняются, что хорошо объясняется теоретическим предположением о саморазогреве в вершине трещины. Для тонких слоистых композиционных соединений «нанокристаллическая/аморфная плёнка – легкоплавкий металлический сплав – нанокристаллическая/аморфная плёнка» в условиях одноосного растяжения при температурах 293, 195 и 77 К определены зависимости механического напряжения от относительной деформации. Экспериментально определено снижение среднего значения относительной деформации (при котором происходит разрушение слоистого композиционного образца) при

снижении температуры механических испытаний с 293 до 77 К для композитов на основе: аморфного металлического сплава 82КЗХСР и сплава Вуда - 10,2% (с 1,78% до 1,60%); нанокристаллического сплава 5БДСР и легкоплавкого сплава Sn63Pb37 - 7,7% (с 1,57% до 1,45%). Это существенно меньше, чем при испытаниях аморфных и нанокристаллических лент. Снижение среднего значения относительной деформации при переходе к испытанию в жидком азоте составляло для аморфных лент 18,3% (с 1,64% до 1,34%), а для нанокристаллических лент 25% (с 2,00% до 1,50%). Полученные теоретические и экспериментальные результаты имеют практическое значение для разработки новых композиционных материалов с улучшенными механическими свойствами. Вязкий характер разрушения тонких слоистых композиционных соединений нанокристаллическая/аморфная плёнка - легкоплавкий металлический сплав при криогенных температурах делает такие материалы перспективными для использования в криогенной промышленности, в Арктике/Антарктике.

**В Заключение** сформулированы основные результаты диссертации.

3. Новизна исследований и полученных результатов, научная и практическая ценность

Научная новизна работы состоит в постановке ряда нерешенных ранее задач, разработке методов численного анализа и в полученных оригинальных результатах.

1. Предложена модель формирования области саморазогрева в вершине трещины, распространяющейся в тонких слоистых структурах нанокристаллический/аморфный – легкоплавкие металлические сплавы, объясняющая вязкий характер роста трещины при криогенных температурах.

2. Впервые определены закономерности разрушения и деформирования тонких слоистых композитов нанокристаллический/аморфный – легкоплавкие металлические сплавы в условиях одноосного растяжения при криогенных температурах.

3. Установлены зависимости механического напряжения от деформации для тонких слоистых композиционных соединений нанокристаллический/аморфный – легкоплавкие металлические сплавы в интервале температур 77 – 293 К.

4. Впервые определены закономерности распределения теплового поля в вершине трещины с локальным участком саморазогрева, распространяющейся в композите аморфная/нанокристаллическая пленка – легкоплавкий сплав при криогенных температурах.

Практическая значимость работы

Разработаны композиционные соединения аморфная/нанокристаллическая пленка – легкоплавкий сплав - аморфная/нанокристаллическая пленка, сохраняющие механическую прочность в условиях одноосного растяжения и вязкий характер разрушения при криогенных

температурах, что позволяет использовать их в криогенной промышленности и в условиях Крайнего Севера.

Разработанная автором методика создания слоистых композиционных соединений аморфная/нанокристаллическая пленка – легкоплавкий металлический сплав представляет практический интерес для Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук при проведении научно-прикладных исследований.

Автором получены два Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662069 «Расплав 1.0» и № 2023660086 «Программа для моделирования механических характеристик трехслойного композиционного соединения в условиях растяжения». Программа для ЭВМ «Расплав 1.0» может быть использована на АО «ММП имени В.В. Чернышева» для прогнозирования результатов лазерной обработки. Программа для ЭВМ «Программа для моделирования механических характеристик трехслойного композиционного соединения в условиях растяжения» предназначена для моделирования прочностных свойств слоистого композиционного соединения в условиях растяжения. Программа может быть использована на АО «Композит», АО «Композит групп», АО «Композитные трубы» для прогнозирования механических свойств слоистых композиционных соединений.

#### 4. Достоверность полученных результатов исследования

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием стандартных методик испытаний, соответствием полученных результатов современным теоретическим представлениям, подтверждением теоретических представлений экспериментальными результатами, апробацией результатов на научных конференциях.

#### 5. Апробация работы

Основные результаты диссертации опубликованы в 19 работах. В том числе в 8 статьях, опубликованных в журналах из перечня, рекомендованного ВАК и/или индексируемых WoS/Scopus, в 9 тезисах и материалах докладов научных конференций. В том числе по специальности 2.6.6 «Нанотехнологии и наноматериалы» опубликовано 6 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ (из них 3 - в базах Web of Science/Scopus; 2 - Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ).

#### 6. Замечания по работе

1. В диссертационной работе предложена физическая модель саморазогрева в вершине трещины, распространяющейся в тонких слоистых композиционных соединениях нанокристаллический/аморфный – легкоплавкие металлические сплавы, объясняющая вязкий характер роста трещины при криогенных температурах. Однако, в предложенной модели

не учитывается зависимость мощности источника тепла в вершине трещины, от её скорости, что снижает точность модели.

2. В модели заданы граничные условия второго рода для поверхности образца. Поскольку образец находится в жидком азоте, то для уточнения модели лучше использовать граничные условия третьего рода.

3. В работе недостаточно внимания уделено анализу микро- и макроструктуре композиционных соединений нанокристаллический/аморфный – легкоплавкие металлические сплавы.

4. В ходе моделирования автор рассмотрел, прогрев области у вершины магистральной трещины, распространяющейся в слоистом композите. В то же время автор экспериментально исследовал рост трещин в тонких слоистых композиционных соединениях нанокристаллический/аморфный – легкоплавкие металлические сплавы и обнаружил случаи ветвления и остановки трещин. Представляется важным исследовать, не только прогрев материала в области вершины растущей магистральной трещины, но и специфику прогрева материала при ветвлении трещин и их остановки.

### **Заключение**

Сделанные замечания не носят принципиальный характер и не влияют на высокую оценку диссертационной работы А.Д. Ошорова. Диссертация логично построена, изложена понятным научным языком, структура и содержание соответствуют целям и задачам исследования. Результаты работы опубликованы в 19 печатных работах, в том числе, в журналах из перечня ВАК и высокорейтинговых международных журналах (Scopus, Q1), прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях. Автореферат диссертации, а также опубликованные работы достаточно полно отражают содержание работы. Таким образом, диссертация Ошорова Аюра Дашеевича «Механизмы разрушения слоистых структур на основе аморфных-нанокристаллических-кристаллических металлических сплавов в температурном диапазоне 77 – 293 К» представляет собой завершённую исследовательскую работу, которая полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. По объёму выполненных исследований, новизне и значимости полученных результатов, А.Д. Ошоров безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.6 – «Нанотехнологии и наноматериалы».

Диссертационная работа Ошорова Аюра Дашеевича соответствует всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней НИТУ МИСИС, предъявляемым к кан-

дидатским диссертациям, а её автор, Ошоров Аюр Дашеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.6 – Нанотехнологии и наноматериалы.

Отзыв о диссертации Ошорова А.Д. обсужден и одобрен на семинаре Института физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН (протокол № 295 от 30.10. 2024 г.)

Автор отзыва согласен на обработку персональных данных.

Отзыв подготовил:

Заведующий лабораторией компьютерного моделирования  
ИФМК УФИЦ РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор



Дмитриев Сергей Владимирович

«01» ноября 2024 г.

e-mail: dmitriev.sergey.v@gmail.com

Тел.: +7 (987) 596 14 63

Адрес ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук 450054, Республика Башкортостан, г. Уфа, Проспект Октября, д. 71

Подпись д.ф.-м.н. С.В. Дмитриева заверяю:  
Главный ученый секретарь Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, канд. экон. наук



 Р.Х. Фаттахова