

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Эмурлаевой Юлии Юрьевны «Структура и механические свойства интерметаллидных слоев, полученных при отжиге биметаллов Al - Me (Me = Ti, Zr, Nb, Ta)», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение

**Актуальность.** На протяжении последних десятилетий материалы на основе интерметаллидов, обладающие высокой твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью, находят все более широкое применение в изделиях авиакосмической техники с функцией баллистической защиты. В то же время практическое использование данных материалов ограничивается их более низкой трещиностойкостью по сравнению с большинством металлов и сплавов. Одним из подходов к решению проблемы низкой трещиностойкости интерметаллидов является разработка на их основе слоистых металл-интерметаллидных композитов (СМИК), содержащих более вязкие металлические прослойки. К настоящему времени различными коллективами отечественных и зарубежных ученых проведено значительное количество исследований, связанных с разработкой СМИК на основе алюминидов систем Al-Ti, Al-Ni, Al-Cu. При этом лишь небольшое количество работ посвящено исследованию слоистых композитов, состоящих из алюминидов таких металлов, как Zr, Nb и Ta. В частности, при рассмотрении отмеченных систем в литературе слабо освещаются вопросы формирования интерметаллидов, их свойства и структурные особенности, а также кинетика роста слоёв. В связи с этим, диссертационная работа Эмурлаевой Юлии Юрьевны, направленная на изучение фазового состава, структуры и свойств интерметаллидных слоев, полученных при отжиге сваренных взрывом биметаллов систем Al - Ti, Al - Zr, Al - Nb и Al - Ta является актуальной и представляет научный и практический интерес.

**Научная новизна работы** определяется несколькими элементами. Во-первых, диссертантом на основе анализа структуры и кинетики роста интерметаллидных слоев, а также проведения математического моделирования выявлены наиболее вероятные механизмы диффузии атомов в триалюминидах различных металлов. Во-вторых, применение в работе метода непрерывного рентгенофазового анализа с использованием синхротронного излучения позволило наиболее точно установить стадийность формирования и роста интерметаллидных слоев во время изотермической выдержки биметаллических заготовок. В-третьих, с привлечением синхротронной рентгеновской дифракции и теории функционала плотности зафиксирован градиентный характер изменения параметров ячейки фазы  $ZrAl_3$  по толщине прослойки, возникшей в процессе диффузионного отжига. Элементом научной новизны является также

выявленная в работе анизотропия трибологических свойств композита с интерметаллидным слоем TiAl<sub>3</sub>, которая объясняется формированием в нем кристаллографической текстуры.

### **Практическая значимость диссертации**

Проведенные в диссертационной работе исследования позволили обосновать технические решения, связанные с получением слоистых композитов на металлической основе. Полученные результаты могут быть использованы для выбора режимов термической обработки для синтеза СМИК и прогнозирования их структуры и свойств. Для решения задач диссертационного исследования Ю.Ю. Эмурлаева разработала и зарегистрировала четыре программы для электронно-вычислительных машин (ЭВМ), позволяющих рассчитывать параметры диффузии, а также проводить профильный анализ дифрактограмм. Результаты диссертации используются в учебном процессе НГТУ при чтении лекций и проведении лабораторных работ студентами, обучающимися по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов».

### **Достоверность результатов**

Достоверность данных, полученных при выполнении диссертационной работы, обеспечивается комплексом взаимодополняющих методов исследования, а также статистической обработкой результатов измерений. Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании, технические возможности которого соответствует современным отечественным и зарубежным материаловедческим лабораториям. Полученные автором данные не противоречат сведениям, представленным в отечественной и зарубежной литературе по теме исследования. Основные результаты работы достаточно полно отражены в 11 научных публикациях, в том числе в 4 изданиях, рекомендованных ВАК, и в 7, входящих в базы цитирования WoS, Scopus и РИНЦ.

### **Анализ содержания диссертации**

На отзыв предоставлена диссертация, изложенная на 224 страницах, состоящая из введения, семи разделов, заключения, библиографического списка из 309 наименований, шести приложений.

**Во введении** к работе представлена ее актуальность, сформулированы цель и задачи, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту, перечислены методы исследования.

**Первый раздел** диссертационной работы посвящен детальному анализу научной литературы, связанной с различными технологиями получения многослойных металл-интерметаллидных материалов на основе алюминия. Приведены известные данные о структуре, фазовом составе и процессах формирования интерметаллидных прослоек в СМИК.

Описаны общие представления о диффузионных процессах в алюминидовых соединениях и влияние их кристаллического строения на механические свойства.

**Во втором разделе** автором диссертации представлены сведения о материалах, используемых для создания биметаллических заготовок. Описаны технологические режимы получения образцов и использованное для этого оборудование. Представлены использованные в работе методы структурного анализа, дифракции синхротронного рентгеновского излучения, определения механических и трибологических свойств, а также характеристик трещиностойкости.

**В третьем разделе** диссертации описываются структура и элементный состав околошовной зоны биметаллов после сварки взрывом. В большинстве сварных соединений образуются зоны перемешивания, представляющие неоднородные смеси материалов, существенно отличающихся друг от друга по химическому составу и характеризующиеся повышенным уровнем твердости. Исследование сваренных взрывом биметаллических заготовок позволило выявить особенности их структурного состояния и оценить влияние полученной при сварке структуры на процессы роста интерметаллидов во время последующего отжига. Представлены новые данные о зеренной структуре, кристаллографической текстуре и сверхструктурах, возникающих при отжиге сваренных взрывом композитов Al - Ti, Al - Zr, Al - Nb, Al - Ta. С использованием метода синхротронной рентгеновской дифракции в режиме *in-situ* выявлены стадийность формирования и особенности роста интерметаллидных слоёв на межслойных границах композиции Al - Ti. Привлечение теории функционала плотности позволило зафиксировать градиентный характер изменения параметров ячейки фазы  $ZrAl_3$  по толщине прослойки, возникшей в процессе диффузионного отжига.

**В четвертом разделе** диссертации приведены определенные методом инструментального индентирования значения твердости, модуля упругости и показателя трещиностойкости  $K_{Ic}$  изученных алюминидов. Выявлена и описана анизотропия трибологических свойств при испытании на изнашивание интерметаллидного слоя  $TiAl_3$ . Определенные диссертантом значения твердости и модуля упругости триалюминидов титана, циркония, ниобия и тантала хорошо согласуются с теоретическими значениями, полученными при помощи расчетных методов другими авторами.

**В пятом разделе** диссертации обоснованы и описаны выбранные методы моделирования, которые были использованы в работе для анализа диффузионных процессов и кинетики роста интерметаллидных слоев. Определены значения энергии формирования точечных дефектов, а также значения потенциальных барьеров для различных типов скачков атомов, в триалюминидовых соединениях титана, циркония и ниобия. На основе полученных результатов выявлены

наиболее вероятные диффузионные процессы в данных соединениях. Установлено, что наиболее низкое значение энергии формирования вакансий в подрешетке алюминия соответствует соединению  $ZrAl_3$ , что объясняет быстрый рост данного слоя при отжиге биметалла Al - Zr. Установлено, что наиболее вероятным диффузионным процессом в данных соединениях является скачок атомов алюминия «на место ближайшего соседа». При помощи метода молекулярной динамики показано, что диффузия алюминия в триалюминиде титана может рассматриваться как эстафетное перемещение двойного дефекта от одной цепочки октаэдрических пор к другой.

**В шестом разделе** указаны возможности применения полученных в диссертационном исследовании результатов. Описан принцип реализации разработанных программ для ЭВМ, позволяющих исследовать процессы диффузионного перемещения атомов, а также автоматизировать процедуру профильного анализа при обработке результатов синхротронной рентгеновской дифракции.

**В заключении** представлены основные результаты и выводы, полученные при выполнении диссертационной работы. Даны рекомендации для дальнейшего развития темы исследования.

#### **Замечания по работе:**

1. Следовало бы указать: почему для определения трещиностойкости интерметаллидных слоев была выбрана предложенная в 1957 году методика С. Палмквиста, а не более поздняя широко известная методика А. Ниихары, адаптированная для определения значений  $K_{Ic}$  хрупких керамических материалов.
2. В диссертации на стр. 31-32 рассмотрено несколько методов получения слоистых металл-интерметаллидных композитов (СМИК). Поэтому в работе было необходимо обосновать выбор именно сварки взрывом с последующим диффузионным отжигом для получения СМИК и указать, в чем состоит возможное преимущество данного метода?
3. Для сравнения сопротивления хрупкому разрушению СМИК разных составов было бы целесообразно провести испытания на трещиностойкость и ударную вязкость слоистых образцов с ориентацией надреза по «тормозящему типу».
4. Результаты по трещиностойкости и износостойкости в разделе 4 представлены только для слоистых композитов систем Al-Ti и Al-Zr.
5. Нет объяснения большого различия в значениях твердости интерметаллидного слоя  $NbAl_3$  в системе Al - Nb, полученных в работе (5,6...7,4 ГПа), с литературными данными (21,851 ГПа) – стр. 130.

6. На стр. 131 диссертации сказано, что «Зависимости трещиностойкости интерметаллидов от температуры и продолжительности отжига не выявлено». Однако это утверждение не подтверждается экспериментальными данными.

Сделанные замечания в основном носят уточняющий характер и не снижают общей положительной оценки работы Ю.Ю. Эмурлаевой.

**Заключение.** Содержание диссертационной работы «Структура и механические свойства интерметаллидных слоев, полученных при отжиге биметаллов Al - Me (Me = Ti, Zr, Nb, Ta)» Эмурлаевой Ю. Ю. соответствует паспорту специальности: 2.6.17 – Материаловедение в части пунктов 1, 2, 5, 8. Диссертация содержит достаточное количество иллюстративного материала, написана грамотным научно-техническим языком. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Текст автореферата полностью отражает содержание диссертационной работы.

Представленная к защите диссертация соответствует требованиям пункта п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842) и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой содержится решение научной задачи, связанной с разработкой композиционных материалов с интерметаллидной составляющей и имеющей значение для развития машиностроительной отрасли. Ее автор, Эмурлаева Юлия Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение.

Официальный оппонент: доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией деформирования и разрушения, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова» Уральского отделения Российской академии наук

620049, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

Электронная почта: [gsv@imach.uran.ru](mailto:gsv@imach.uran.ru) Тел.: (343) 362-42-17

  
Гладковский Сергей Викторович

«16» октября 2023 г.

Подпись С.В. Гладковского заверяю

Ученый секретарь Федерального государственного  
машиноведения имени Э.С. Горкунова» Уральского  
кандидат физико-математических наук

*Получить в связи 20.10.2023*

*(Подпись) / Теркин А*

*Созвала урмашева 23.10.2023*

*Ю.А. Эмурлаева 10/10*