

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу «Структура и свойства слоистых композиционных материалов с интерметаллидной составляющей», представленную **Лазуренко Дарьей Викторовной** на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Интерметаллидные сплавы на основе алюминидов титана, привлекают внимание исследователей и инженеров ввиду их высокой удельной прочности, жесткости и жаропрочности. Между тем, ограниченная пластичность и низкая трещиностойкость, особенно динамическая, ограничивают широкое применение алюминидов титана. Один из возможных путей к расширению применения алюминидов титана – их использование в качестве компонента в композиционных материалах. В этом случае дефицит пластичности и трещиностойкости может быть компенсирован за счет присутствия в композиционном материале вязкой и пластичной металлической составляющей. Диссертационная работа Лазуренко Д.В. посвящена поиску технологических решений по изготовлению композиционных материалов, содержащих интерметаллидную фазу, выбору оптимальных структурных составляющих композитов, выявлению закономерностей структурно-фазовых превращений в процессе изготовления композитов, повышению эксплуатационных характеристик получаемых композитов. Учитывая повышенный интерес к интерметаллидным сплавам на основе алюминидов титана и расширению возможностей их применения, в том числе в составе композиционных материалов, тему диссертационной работы следует считать актуальной.

### **Содержание работы**

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы, включающего 418 наименований, и приложений. Работа изложена на 421 странице.

Во введении отражена актуальность исследований, приведены цель работы и решаемые в ней задачи, изложены новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, описаны методы исследований.

В первой главе диссертации анализируется литература по различным интерметаллидным сплавам, в частности, алюминидам титана. Утверждается, что для преодоления низкой низкотемпературной пластичности и

трещиностойкости интерметаллидных сплавов представляет интерес их использование в качестве армирующей компоненты в составе слоистых металл-интерметаллидных композитов. Рассмотрены различные технологические процессы получения композиционных материалов с интерметаллидной составляющей. Результаты литературного обзора легли в основу постановки цели и задач диссертационной работы.

Вторая глава посвящена исследованию микроструктуры слоистых композитов, полученных по технологии сварки взрывом, и анализу процессов, приводящих к образованию интерметаллидных соединений на границах раздела многослойных материалов, полученных данным методом. Сварка взрывом, характеризующаяся как процесс соединения заготовок в холодном состоянии, приводит к формированию локальных зон, содержащих переплавленный материал. Образование таких зон обусловлено высокоскоростным импульсным соударением свариваемых заготовок, приводящим к значительной деформации и сильному деформационному разогреву. На примере различных пар материалов показано, что интенсивная деформация при сварке взрывом приводит к формированию участков с высокой плотностью дислокаций и узких полос локализации пластического течения. Деформационный разогрев приводит к образованию закаленных структур, наноразмерных механических смесей и вихревых зон, содержащих интерметаллиды, квазикристаллы и аморфную фазу. Основное внимание в главе было уделено паре «титан-алюминий». При исследовании сварных швов, полученных при соединении до 40 поочередно расположенных разнородных металлических пластин, было обнаружено, что в условиях быстрого теплоотвода из переплавленных зон в них фиксируются упорядоченные твердые растворы алюминия в титане и титана в алюминии, аморфные участки и наноразмерные кристаллы, состав которых соответствует стабильным и метастабильным алюминидам титана. Включения такого типа в основном преобладают в верхних волнообразных сварных швах. Материал нижних прямых швов претерпевает меньше деформации и, соответственно, деформационного разогрева, что было выявлено экспериментально и подтверждено методом математического моделирования в программной среде Ansys Autodyn.

В третьей главе рассматриваются и сравниваются методы формирования в композиционных материалах интерметаллидных соединений уже не в форме отдельных включений, а в виде сплошных слоев. В качестве технологии, которая позволяет получать интерметаллидные слои в композиционных материалах на основе титана и алюминия в основном рассматривается реакционное спекание при температуре ниже температуры

плавления алюминия. Композит, полученный указанным способом, служил материалом сравнения в экспериментальных исследованиях по выявлению наиболее эффективного метода изготовления многослойных структур типа «Ti-Al<sub>3</sub>Ti». Предварительная сварка взрывом титановых и алюминиевых пластин способствует ускорению процессов формирования прослойки из триалюминида титана на их границах раздела при последующем нагреве, что обусловлено структурными особенностями материала сварных швов. Значительный вклад в ускоренный рост интерметаллидного соединения вносят вихревые зоны, метастабильные структуры в которых при термической обработке преобразуются в стабильный триалюминид титана. В сваренных взрывом заготовках, нагретых при 640°C, слой триалюминида титана вырос в 5 раз быстрее, чем в композитах, полученных реакционным спеканием в тех же условиях. Повышение температуры обработки на 200-400°C способствовало дальнейшему ускорению процессов формирования слоя состава Al<sub>3</sub>Ti и позволило сократить время изготовления композита до 10 минут.

В четвертой главе анализируется возможность улучшения качества интерметаллидной прослойки за счет повышения ее вязкости разрушения. Известно, что триалюминид титана характеризуется очень низкими значениями пластичности и трещиностойкости. По этой причине в интерметаллидных слоях, сформированных в композиционных материалах, образуются трещины еще на этапе изготовления композита. Свойства таких материалов будут ожидаемо невысокими, несмотря на присутствие в структуре композитов вязкой металлической составляющей. В работе предложено легировать интерметаллидные прослойки переходным металлом, что должно оказать положительный эффект на трещиностойкость. Однако влияние его на ход реакций, развивающихся между титаном и алюминием при изготовлении композита, изначально было не известно. В работе изучали фазовые превращения в тройных системах Ti-Al-M, где M – металл, происходящие при нагреве от комнатной температуры до 830°C. Исследования проводились *in situ* методом дифракции рентгеновского синхротронного излучения и были оформлены в виде карт интенсивностей и графиков изменения интенсивностей отдельных пиков. Полученные данные позволили выявить, какие превращения и в какой последовательности идут в отмеченных системах и, в частности, на каком этапе формируется Al<sub>3</sub>Ti с кубической решеткой, стабилизированной переходным металлом. Установлено, что кубическую модификацию Al<sub>3</sub>Ti в условиях нагрева чистых компонентов до 830°C не стабилизируют Fe, Co и Cr. Стабилизирующий эффект оказывают Zn, Cu, Au, Ag, Pd, Pt, Ni, Mn, однако эффективность их

использования различна. Наиболее целесообразно в качестве легирующего элемента использовать цинк, медь или серебро, поскольку указанные компоненты не образуют с алюминием тугоплавких двойных соединений, а полностью расходуется на стабилизацию кубической фазы.

В пятой главе представлены результаты исследований слоистых композиционных структур, содержащих слои из обогащенных титаном интерметаллидов, упрочненных скоплениями плоских частиц керамической фазы. Материалы были получены искровым плазменным спеканием титановых и алюминиевых фольг с порошками  $TiB_2$  и  $TiC$  при  $1250^\circ C$ . Температура синтеза выбиралась на основании данных *in situ* синхротронных исследований с тем, чтобы получить из чистых компонентов интерметаллидную матрицу состава  $\alpha_2(Ti_3Al)+\gamma(TiAl)$ . Микроструктурные исследования показали, что в процессе спекания формировалась интерметаллидная матрица состава  $Ti_3Al$  или  $TiAl+Ti_3Al$ , а армирующие слои состояли из плоских скоплений керамических частиц МАХ-фазы состава  $Ti_2AlC$  и диборида титана  $TiB_2$ , не взаимодействующего с матрицей. Максимальный предел прочности при сжатии, достигнутый для композитов такого типа, составил 1600 МПа, скорость ползучести на установившейся стадии при  $750^\circ C/250$  МПа составил около  $10^{-8} c^{-1}$ .

Шестая глава посвящена исследованию поверхностных интерметаллидных слоев, полученных с помощью вневакуумной электронно-лучевой наплавки на титановые заготовки. Рассмотрены слои с различной концентрацией алюминия и слои из алюминидов титана, легированные ниобием. С использованием электронно-микроскопических и дифракционных методов исследования проведен микроструктурный анализ и описаны метастабильные превращения, протекающие в материалах при наплавке. Полученные на поверхности титана интерметаллидные соединения могут выполнять функцию защитного покрытия, поскольку обладают повышенной, по сравнению с титаном, стойкостью к окислению, износостойкостью и сопротивлением ползучести.

В седьмой главе представлены результаты апробации описанного в четвертой главе подхода к увеличению трещиностойкости слоистого композита типа «титан-триалюминид титана» и информация о внедрении полученных в диссертационной работе результатов исследований на предприятиях АО «Катод», НОЗИП, «СКБ Сибэлектротерм», ПАО «Компания «Сухой» Новосибирский авиационный завод имени В.П. Чкалова» и «Сибирский научно-исследовательский институт имени С.А. Чаплыгина», а также в учебный процесс, реализуемый в НГТУ.

В заключение диссертационной работы автор излагает основные результаты и выводы.

### **Соответствие автореферата содержанию диссертации**

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и научных публикаций.

**Научная новизна** диссертационной работы определяется результатами, полученными с использованием технологий различного типа и новых технических решений при изготовлении металл-интерметаллидных и интерметаллидно-керамических композиционных материалов, содержащих алюминиды титана, а также в ходе всестороннего анализа физико-химических процессов, протекающих при изготовлении указанных композиционных материалов.

Автором выполнен подробный микроструктурный анализ композиционных материалов, полученных методами электронно-лучевой наплавки порошковых смесей на титановую основу и сварки взрывом, который позволил описать фазовые превращения в существенно неравновесных условиях.

В работе предложен и синтезирован новый слоистый композиционный материал типа «Ti-Ti(Al<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>)<sub>3</sub>» с повышенным уровнем трещиностойкости, определены легирующие элементы, эффективно стабилизирующие твердый раствор Ti(Al<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>)<sub>3</sub>, определены технологические процессы и режимы изготовления композиционного материала.

В ходе *in situ* исследований фазовых превращений, протекающих в тройных системах Ti-Al-M, где M – металл, выявлены закономерности влияния элементов различного типа на процессы, протекающие при спекании композиционных смесей, содержащих титан и алюминий.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**, сформулированных в диссертации, обеспечена применением широкого спектра современных методов исследований, статистической обработкой экспериментальных данных, обсуждением полученных результатов на различных российских и международных научных конференциях, публикацией результатов исследований в ведущих отечественных и зарубежных журналах, в том числе индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

### **Практическая значимость результатов диссертационной работы**

В работе были исследованы и научно обоснованы различные технологические подходы и решения, позволяющие эффективно изготавливать слоистые композиционные материалы типа «металл-интерметаллид». В частности, предложены решения, позволяющие повысить

трещиностойкость интерметаллидного слоя, входящего в состав композиционного материала и тем самым обеспечить повышение надежности получаемых композиционных материалов.

### **Научная значимость работы**

Автору удалось получить систематические данные о физических процессах, протекающих при взаимодействии металлических компонентов в условиях высокоскоростного соударения, значительного деформационного перегрева, ускоренного охлаждения, а также нагрева и выдержки в равновесных условиях. Полученные сведения о структурно-фазовых превращениях, происходящих в сплавах и композиционных материалах на металлической и интерметаллидной основах расширяют существующие представления о процессах взаимодействия составляющих их компонентов и создают научные основы для изготовления композиционных материалов типа «металл-интерметаллид» с помощью сварки взрывом, высокотемпературного спекания и вневакуумного электронно-лучевого наплавления.

### **Соответствие содержания работы указанной специальности**

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение) по пунктам 1, 2, 3, 6 и 10.

**Из достоинств работы** можно отметить систематичность изложения и общую добросовестность автора, проявившуюся в частности, при анализе сложных физико-химических процессов и структурно-фазовых превращений при использовании различных технологий изготовления композиционных материалов.

### **Замечания по работе**

1. Известно, что титан химически очень активен, а алюминий уже при комнатной температуре окисляется. В то же время требования по содержанию примесей внедрения для интерметаллидных  $\gamma$ -TiAl+ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al сплавов значительно выше, чем для титановых сплавов. Поэтому материал, синтезированный из тонких фольг Ti, Al и керамических порошков будет «грязнее», чем требуется для интерметаллидных  $\gamma$ -TiAl+ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al сплавов. Это означает, что пластичность композита будет близка к нулю, а комплекс механических свойств будет, скорее всего, неудовлетворительным. Из представленных результатов не видно, как может быть решена указанная проблема при синтезировании такого композиционного материала.

2. На с. 281-282, где приводятся данные по ползучести, в тексте и в подписи к рисунку отсутствует указание величины нагрузки. Кроме того, не слишком корректно сравнивать сопротивление ползучести на сжатие, полученное в диссертационной работе, и на растяжение (литературные

данные), причем разных сплавов с разной микроструктурой. Известно, что сопротивление ползучести  $\gamma$ -TiAl+ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al сплавов сильно зависит от микроструктуры и состава сплава. Возможно, правильнее было бы синтезировать матричный  $\gamma$ -TiAl+ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al сплав в тех же условиях, что и композит, и затем сравнить его сопротивление ползучести при одинаковой нагрузке с композитом.

3. В научной новизне говорится об армировании  $\gamma$ -TiAl+ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al композитов керамическими прослойками TiB<sub>2</sub> и TiC, а в положениях, выносимых на защиту – о TiB<sub>2</sub> и Ti<sub>2</sub>AlC. Поскольку при синтезе образуется Ti<sub>2</sub>AlC, то правильнее говорить об армировании Ti<sub>2</sub>AlC и TiB<sub>2</sub>. Например, при изготовлении композитов на основе Ti/TiB вводят диборид титана, который затем превращается в моноборид титана. При этом никогда не говорят об армировании TiB<sub>2</sub>, всегда об армировании TiB, здесь аналогичный случай.

4. Из п. 6 научной новизны может сложиться впечатление, что композиты на основе  $\gamma$ -TiAl+ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al синтезировали из элементных порошков, хотя спекание порошков было использовано только для выявления закономерностей фазовых превращений с повышением температуры при спекании. В новизне следовало бы указать, что композиты на основе  $\gamma$ -TiAl+ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al изготавливали спеканием тонких фольг и керамических порошков TiB<sub>2</sub> и TiC.

5. Композит типа «Ti-Al<sub>3</sub>Ti» был бы практически интересен, если бы в качестве металлических слоев использовали какой-нибудь промышленный, например, двухфазный титановый сплав. Непонятно, где можно применить слоистый композит VT1-0-Al<sub>3</sub>Ti.

6. Если читать только введение, то неясно, о какой трещиностойкости идет речь в 4-м пункте новизны и 4-м положении, выносимом на защиту – в условиях статического или динамического нагружения. Это становится понятно только по прочтении всей диссертации. Следовало бы указать, что речь идет об ударной вязкости (испытаниях на ударный изгиб) и косвенной оценке вязкости разрушения по индентированию.

7. Некоторые подписи к рисункам недостаточно информативны. В частности, не всегда указана, какая микроскопия и режимы съемки использованы, какое излучение использовано в случае рентгеновской дифракции, что затрудняет восприятие.

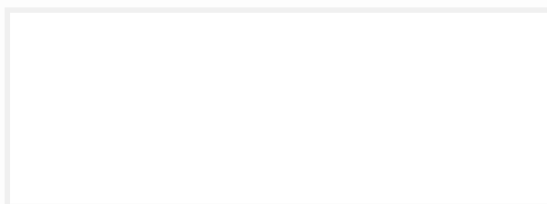
## **Заключение**

Представленная к защите диссертация Лазуренко Д.В. «Структура и свойства слоистых композиционных материалов с интерметаллидной

составляющей» является завершенной научно-исследовательской работой. Работа выполнена на высоком научном уровне и вносит существенный вклад в развитие фундаментальных представлений о формировании интерметаллидных структур и соединений в двойных и тройных системах в условиях различных внешних воздействий. На основании выполненных автором исследований изложены новые научно-обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

По разработанным научным положениям, объему выполненного исследования, новизне полученных результатов и выводов, их научному и практическому значению диссертация полностью соответствует всем требованиям пункта II. 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Лазуренко Дарья Викторовна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение).

Официальный оппонент, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией 07 «Материаловедение труднодеформируемых сплавов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук



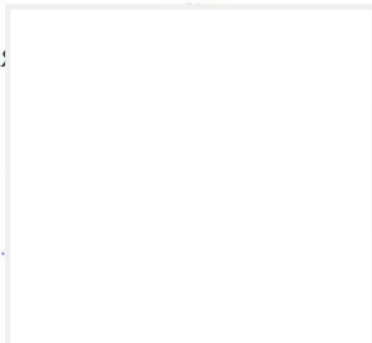
/ В.М. Имаев /

23.11.2020

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН  
450001, г. Уфа, ул. Ст. Халтурина, д. 39  
Тел.: +7-282-37-58  
E-mail: vimayev@mail.ru

Подпись Валери:

аверяю:



/ Т.П. Соседкина /  
Нач. отдела кадров

*Принято в совет.  
02.11.2020*

*Д.Д. Лазуренко Д.В.*

*С ответом Знаменская  
03.12.2020 Озаренко Р.В.*