

## ОТЗЫВ

официального оппонента Гуревича Леонида Моисеевича на диссертацию Лазуренко Дарьи Викторовны «Структура и свойства слоистых композиционных материалов с интерметаллидной составляющей», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

### Актуальность диссертационной работы

Металлические композиционные материалы со структурой слоистого типа являются объектами исследований многочисленных научных коллективов в нашей стране и за рубежом. Повышенный интерес к указанному классу материалов обусловлен уникальным сочетанием их физико-химических и механических характеристик, в особенности это касается слоистых композитов с интерметаллидным упрочнением на основе титана и алюминия. Сочетание в одном композиционном материале составляющих с значительным градиентом свойств открывает широкие перспективы их использования в энергетических и теплообменных установках, в качестве жаростойких и износостойких материалов и покрытий, энергопоглощающих узлов и т.д. Кроме того, комбинирование хрупкой интерметаллидной компоненты с вязкими металлическими слоями частично решает проблему ресурса надежности материалов, содержащих алюминиды. Тем не менее, алюминиды титана, в частности триалюминид титана, выгодно отличающийся от других интерметаллидов системы титан-алюминий повышенной жаростойкостью и минимальным удельным весом, характеризуется крайне низкими пластическими характеристиками при комнатной температуре, что существенно влияет на возможности эксплуатации содержащих его изделий. Проблема повышения надежности триалюминид титана активно обсуждалась в начале 90-х годов прошлого века, в частности, был предложен подход, основанный на легировании триалюминид титана. Однако существенного прорыва в создании научных основ легирования триалюминид титана реализовано не было. В своей диссертационной работе автор предлагает новые технические решения по легированию триалюминид титана, входящего в конструкцию многослойного металл-интерметаллидного композиционного материала, вносящие вклад в решение отмеченных выше проблем. В этой связи актуальность работы не вызывает сомнений.

Кроме того, Лазуренко Д.В. в своей работе решает проблему выбора эффективной технологии изготовления металл-интерметаллидных композитов с точки зрения минимизации временных затрат на их производство. Свои исследования автор проводит с использованием современного технологического и аналитического оборудования, что параллельно позволяет решать ряд фундаментальных задач и расширить имеющиеся представления о структурно-фазовых превращениях, происходящих в двойных и тройных системах на основе титана и алюминия.

## Научная новизна работы

Автором были проанализированы особенности протекающего при нагреве слоистых заготовок выше температуры плавления алюминия формирования интерметаллидов системы Ti-Al в многослойных структурах. Было показано, что чрезмерный нагрев приводит к снижению толщины прослоек триалюминида титана из-за формирования промежуточных барьерных фаз на границе раздела Ti-Al<sub>3</sub>Ti при их взаимодействии. Указанный эффект лег в основу технологического процесса формирования композитов с матрицами Ti<sub>3</sub>Al и Ti<sub>3</sub>Al+TiAl, упрочненных керамическими слоями, который заключался в совместном нагреве титановых и алюминиевых фольг и порошков до 1250 °С. Скорость ползучести таких композитов более чем на 2 порядка ниже по сравнению с γ-TiAl.

Методом дифракции рентгеновского синхротронного излучения были изучены последовательности фазовых превращений в композитах, содержащих титан, алюминий и переходной металл. На основе полученных данных Лазуренко Д.В. были установлены основные закономерности формирования L<sub>12</sub> модификации триалюминида титана и выбраны температурно-временные условия изготовления нового типа многослойных металл-интерметаллидных композитов со структурой типа «Ti-Ti(Al<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>)<sub>3</sub>», характеризующихся повышенным уровнем трещиностойкости.

Экспериментальные исследования по формированию интерметаллидных слоев на поверхностях титановых заготовок позволили выявить особенности структурообразования сплавов на основе алюминидов титана в метастабильных условиях.

## Научная и практическая значимость полученных результатов

Автором был проведен глубокий анализ фазовых трансформаций, развивающихся при взаимодействии титана и алюминия в условиях динамического нагружения и термического воздействия, а также получены сведения об изменении хода реакций при добавлении в систему третьего компонента. На основании полученных результатов осуществлялся выбор элементов, способных стабилизировать твердый раствор с решеткой типа L<sub>12</sub> в смесях нестехиометрического состава, и был сформирован композиционный материал нового типа с модифицированной L<sub>12</sub> структурой триалюминида титана.

Лазуренко Д.В. были изучены и проанализированы различные методы и технологические режимы изготовления композиционных материалов слоистого типа с интерметаллидной составляющей и выбраны наиболее эффективные с точки зрения формирования заданной структуры.

Использованные при выполнении диссертационной работы подходы к структурно-фазовому анализу, в частности анализу больших объемов данных, полученных методом рентгеновской дифракции, легли в основу методических рекомендаций по оценке дефектного состояния и фазового состава при нагреве и пластической деформации металлических сплавов с гексагональной и кубической кристаллической решеткой, а также композиционных материалов на их основе. Сформулированные рекомендации используются в Сибирском научно-исследовательском институте авиации имени С.А.

Чаплыгина, и в филиале ПАО «Компания «Сухой» «Новосибирский авиационный завод имени В.П. Чкалова». На основании результатов выполненных работ по сварке взрывом металлических заготовок были разработаны промежуточные вставки для соединения разнородных материалов. Результаты, полученные при исследовании интерметаллидных структур, используются в АО «Катод».

### **Обоснованность и достоверность научных результатов**

Достоверность экспериментальных результатов, научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием комплекса взаимодополняющих методов исследований, использованием современного аналитического оборудования, проведением статистического метода обработки результатов.

Основные результаты работы докладывались на Всероссийских и международных конференциях и опубликованы в 30 рецензируемых международных журналах, входящих в Scopus и Web of Science и в 13 изданиях, рекомендованных ВАК.

### **Анализ содержания диссертационной работы**

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи, приведены научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность, перечислены методы исследований, изложены положения, выносимые на защиту, даны сведения о публикациях автора и апробации основных результатов диссертационной работы, отражен личный вклад автора в проведенные исследования, описаны структура и объем работы.

В первой главе приведен анализ состояния исследований в области интерметаллидов, сплавов и композиционных материалов на их основе. Рассмотрены различные типы интерметаллидных сплавов, области их применения и перспективы использования. Показано, что формирование композиционных материалов на основе интерметаллидов, содержащих вязкую металлическую составляющую, значительно расширяет возможности внедрения данного класса материалов в промышленное производство. Особое внимание в литературном обзоре уделяется слоистым металл-интерметаллидным композиционным материалам, в частности композитам состава «титан – триалюминид титана», их структуре, свойствам и технологиям изготовления, которые базируются в основном на нагреве титан-алюминиевых пакетов при температуре ниже температуры плавления алюминия в течение нескольких десятков часов. Таким образом, поиск технических решений, повышающих эффективность процесса производства слоистых композитов, является на сегодняшний день слабо проработанным вопросом.

Также в обзоре научно-технической литературы рассмотрены такие варианты комбинаций, как «интерметаллид – керамика» и «поверхностный интерметаллидный слой – металлическая основа». Материалы такого типа могут применяться в специфических условиях внешнего нагружения и эффективно работать при повышенных температурах. Их физико-механические характеристики могут в значительной степени изменяться в

зависимости от состава, пропорций и вариантов распределения структурных составляющих, технологии изготовления, обоснованный выбор которых является определяющим фактором при формировании композиций с заданными свойствами.

На основании литературного обзора были сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, которые в полной мере отражают нерешенные в данной области проблемы.

**Во второй главе** Д.В. Лазуренко рассматривает сварку взрывом, как способ изготовления многослойных композиционных материалов. Автором исследованы различные варианты композиций, в частности «ВТ23 – ВТ14», «ВТ23 – 08пс – 45ХНМ», многослойные композиции из титановых сплавов, соединенных со сталью через промежуточные слои состава «медь – тантал» и «медь – ниобий», а также многослойные структуры из титана и алюминия. Общие закономерности структурообразования при сварке взрывом разнородных материалов различного состава заключаются в волно- и вихреобразовании на границах раздела, а также интенсивной деформации материала сварных швов. Интенсивность волнообразования и доля вихревых зон в сварном шве определяется величиной потери кинетической энергии при соударении различных слоев: волны имеют тенденцию к затуханию в направлении от верхних швов, находящихся вблизи слоя взрывчатого вещества, к нижним. В вихревых зонах, структура которых формируется в условиях быстрого охлаждения, образуются метастабильные фазы. В паре из сплавов близкого химического состава такой фазой является мартенсит. При соединении разнородных материалов состав вихрей зависит от особенностей взаимодействия основных элементов сплавов. Так, в парах «титан - сталь» и «титан - алюминий» были обнаружены неравновесные интерметаллиды, аморфные и квазикристаллические структуры, при сварке материалов, не склонных к химическому взаимодействию, формируются твердые растворы и механические смеси коллоидного типа.

**Третья глава** посвящена анализу процессов, происходящих при формировании композиций на основе титана и алюминия с интерметаллидными прослойками, а также выбору эффективных технологических режимов их изготовления. В качестве технологий производства многослойных материалов были выбраны реакционное спекание, сварка взрывом с последующей термической обработкой при температурах 630 – 640 °С и искровое плазменное спекание при 830 °С. Экспериментально показано, что для изготовления композита типа «Ti-Al<sub>3</sub>Ti» методом реакционного спекания пластин без предварительной сварки взрывом при 640 °С требуется около 100 часов, в то время как в сваренных взрывом образцах алюминий тратится на формирование триалюминида титана в течение 20 часов. Причиной ускорения процесса спекания являются особенности исходной структуры сваренных взрывом образцов, заключающиеся в формировании волнообразных межслойных границ, обеспечивающих увеличение площади взаимодействия разнородных материалов, образовании вихревых зон, содержащих твердые растворы и интерметаллиды, а также формировании повышенной плотности дислокаций в

приграничных зонах металлических слоев, активизирующих диффузионные процессы при нагреве.

При увеличении температуры реакционного спекания композиционного материала до 830 °С и 1050 °С выдержка сокращалась до 10 минут. Для предотвращения вытекания алюминия из зоны реакции автором было предложено использовать герметичные титановые контейнеры, в которые укладывались металлические заготовки. Структурные исследования показали, что выбранные режимы оказались чрезмерными, поскольку провоцируют реакцию на границах раздела триалюминид титана и титана, что приводит к формированию прослоек из обогащенных титаном двойных соединений.

Оценка механических характеристик в условиях статического растяжения выявила некоторое увеличение пластичности композиционного материала, по сравнению с триалюминидом титана, однако показатель относительного удлинения в 3,5 % по-прежнему является низким.

Для решения проблемы повышения пластичности и вязкости разрушения композиционного материала на металл-интерметаллидной основе в четвертой главе было предложено решение, основанное на легировании триалюминид титана переходными металлами. При добавлении в  $Al_3Ti$  элемента из группы Fe, Mn, Co, Cr, Ni, Zn, Cu, Au, Ag, Pd, Pt его тетрагональная решетка трансформируется в более симметричную кубическую и полученный твердый раствор состава  $Ti(Al_{1-x}M_x)_3$  проявляет большую пластичность. С целью выявления элементов, способных стабилизировать кубическую структуру при совместном нагреве титана, алюминия и переходного элемента в условиях избытка титана, автором были проведены *in situ* исследования с использованием метода дифракции рентгеновского синхротронного излучения. Наиболее эффективными с точки зрения стабилизации кубической модификации триалюминид титана оказались металлы с ГЦК и ГПУ решетками, характеризующиеся относительно низкой температурой плавления и не формирующие тугоплавких двойных соединений, обогащенных алюминием. К таким элементам относятся цинк, медь и серебро. Их эффективность обусловлена минимальным количеством побочных продуктов реакции в композите и высокой объемной долей кубической фазы.

Пятая глава диссертационной работы посвящена исследованию структуры и свойств композиционных материалов на интерметаллидной основе, армированных частицами твердой фазы. В работе автор предлагает распределять твердую фазу в виде прослоек, представляющих собой скопления частиц, и оценивает эффект от такого распределения. Режимы спекания были выбраны на основании данных синхротронных исследований по совместному нагреву титана и алюминия, которые позволили выявить, что нагрев до 1250 °С обеспечивает формирование  $\alpha_2+\gamma$ -матрицы. Однако при добавлении в композит TiC, взаимодействие в системе изменяется, и часть алюминия тратится на формирование MAX-фазы  $Ti_2AlC$ , а в интерметаллидной матрице фиксируется только  $\alpha_2$ -фаза.  $TiB_2$ , также использованный в качестве армирующего материала, с интерметаллидной матрицей не реагирует.

Обладая повышенной твердостью по сравнению с МАХ-фазой,  $TiB_2$  оказывает лучший упрочняющий эффект в условиях сжатия. При этом состав упрочняющей фазы не оказал существенного влияния на высокотемпературные характеристики композиций. В обоих случаях наблюдается понижение скорости ползучести композита на 2-3 порядка по сравнению с  $\gamma$ -сплавом.

В шестой главе автор использует технологию вневакуумной электронно-лучевой наплавки для формирования интерметаллидных слоев на поверхностях титановых заготовок. Данная технология обеспечивает формирование слоев большой толщины с защитными функциями против коррозии, износа и высокотемпературного воздействия. Автором проанализированы слои различного состава, содержание алюминия в которых варьировалось от 59,3 до 6,7 ат. %, а фазовый состав изменялся от многофазного интерметаллидного сплава, содержащего  $TiAl$ ,  $Al_2Ti$  и  $Ti_3Al$ , до однофазного  $\alpha$ - $Ti$ . Установлено, что максимальной износостойкостью характеризовался слой, содержащий единственную фазу –  $Ti_3Al$ . При этом стойкость наплавленных слоев к окислению возрастала с увеличением содержания алюминия. Однако сплавы такого состава содержат большое количество дефектов, что связано с их пониженной трещиностойкостью.

В качестве решения отмеченной проблемы предложено добавление в наплавочные смеси ниобия, который в количестве 2-8 ат. % обеспечил высокую стойкость к окислению и ползучести. Исследования с использованием электронно-микроскопических и дифракционных методов позволили выявить ряд особенностей структурообразования при вневакуумной электронно-лучевой наплавке. В зависимости от содержания алюминия и ниобия, в наплавленных слоях могут происходить те или иные метастабильные фазовые преобразования, например, подавление  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения, фиксация неравновесных  $\gamma_1$ - и  $\omega'$ -фаз. Обусловлено это высокими скоростями охлаждения вследствие отвода тепла из наплавленного слоя и ненагретую основу. Проведенные автором расчеты показали, что скорость охлаждения поверхностных слоев в подобных условиях достигает  $10^3$  °C/с.

Седьмая глава посвящена вопросам практического использования полученных автором результатов. Исследования, касающиеся сварки взрывом разнородных материалов, легли в основу изготовления промежуточных вставок для сварки и электродержателей для руднотермических печей, что отражено в двух патентах на изобретения РФ и актах внедрения, полученных от «СКБ Сибэлектротерм» и федерального казенного предприятия «Новосибирский опытный завод измерительных приборов».

Для анализа данных, полученных в ФРГ на электронном синхротроне, Лазуренко Д.В. применяла собственные программные коды. Разработанные автором алгоритмы для анализа большого объема данных, полученных дифракционными методами исследований, были переданы в Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина, в филиал ПАО «Компания «Сухой» «Новосибирский авиационный завод имени В.П. Чкалова». Проведенные автором исследования интерметаллидных структур используются в АО «Катод» при производстве электронно-оптических преобразователей.

**В заключении** диссертационной работы изложены основные выводы и результаты.

### **Вопросы и замечания по диссертационной работе**

1.1. Поставленная в диссертации цель «обоснование научно-технических решений по изготовлению слоистых композитов и установление закономерностей образования интерметаллидов Ti-Al или Ti-Al-Me». Диссертант не обосновывает какое отношение к достижению поставленной цели имеют исследования процессов и структур, получаемых при сварке взрывом композитов сплав титана-сплав-титана; сталь-сплав-титана, сталь-медь-ниобий-титан.

2. Диссертантка не объясняет необходимость сварки взрывом слоистого композита BT23-BT14-BT23-BT14-Ta(Nb)-Cu-сталь 45XHM. Слоистые композиционные материалы титан-ниобий-медь-сталь использовались обычно в качестве переходников для сварки плавлением титана со сталью для узлов с температурой эксплуатации свыше 600 °С. В таком контексте трудно объяснить необходимость использования четырех слоев титановых сплавов.

3. На стр. 131. диссертантка проводит моделирование угловой схемы сварки взрывом, но почему-то не учитывает изменение скорости соударения метаемой фальшпластины с первой пластиной пакета вдоль ее длины из-за изменения зазора между фальшпластиной и пакетом пластин. Такое возможно только при больших величинах зазора (более 20 мм), когда фальшпластина вышла на установившийся режим полета из-за резкого снижения давления продуктов детонации.

4. На стр. 163, объясняя возможность образования пор Киркендалла (Френкеля) диссертантка совершенно справедливо пишет о необходимости сравнения коэффициентов диффузии титана в алюминии и алюминия в титане, но вместо этого сравниваются коэффициенты самодиффузии титана и алюминия.

Указанные замечания не снижают общий высокий уровень диссертационной работы и ее научную и практическую ценность.

### **Соответствие содержания работы паспорту специальности**

Представленная к защите диссертационная работа соответствует пунктам 1, 2, 3, 6 и 10 паспорта научной специальности 05.16.09 Материаловедение (машиностроение):

- п.1 - теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий;

- п.2 - установление закономерностей физико-химических и физико-механических процессов, происходящих на границах раздела в гетерогенных структурах;

- п.3 - разработка научных основ выбора материалов с заданными свойствами применительно к конкретным условиям изготовления и эксплуатации изделий и конструкций;

- п.6 - разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств материалов на образцах и изделиях;

- п.10 - разработка покрытий различного назначения (упрочняющих, износостойких и других) и методов управления их качеством.

### Соответствие автореферата содержанию диссертационной работы

Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертационной работы и опубликованным статьям.

### Заключение о соответствии работы п. II.9 Положения о присуждении ученых степеней

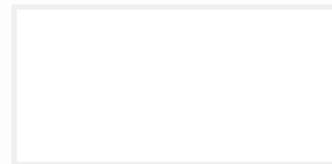
Диссертационная работа Лазуренко Д.В. «Структура и свойства слоистых композиционных материалов с интерметаллидной составляющей» по объему, актуальности исследований, достоверности и новизне результатов, их практической и научной ценности является законченной научно-квалификационной работой и полностью соответствует критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней от 24 сентября 2013 года № 842.

Работа написана грамотным языком, материал четко изложен и содержит достаточное количество иллюстративного материала. Считаю, что автор диссертации Лазуренко Дарья Викторовна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение).

Официальный оппонент:

Гуревич Леонид Моисеевич

Доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Материаловедение  
и композиционные материалы»  
ФГБОУ ВО «Волгоградский  
государственный технический  
университет» (ВолГТУ)  
400005, г. Волгоград,  
проспект им. В.И. Ленина, д. 28  
тел. (8442) -24-80-94, факс. (8442)-23-99-41  
e-mail: mv@vstu.ru



02.11.2020

Поступил в свет 10.11.2020  
Тюрин А.Г.

С отзывом ознакомлен  
11.11.2020 Лазуренко Д.В.