

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение выс-
шего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет
машиностроения и транспорта

Кафедра
Сварочное, литейное производство
и материаловедение

Направление подготовки

22.03.01 «Материаловедение и техноло-
гия материалов»

Профиль

«Материаловедение и технология но-
вых материалов»

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему

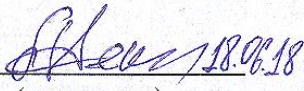
«Разработка технологии получения трехслойного титано-алюми-
ниевого композиционного материала с промежуточным перфори-
рованным слоем»

Студент

 15.06.18
(подпись, дата)

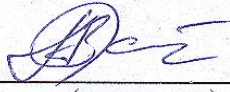
Дормидонов Андрей Алексан-
дрович

Научный руководитель
д.и.н., профессор

 18.06.18
(подпись, дата)

Мещеряков А.С.

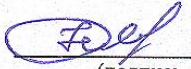
Нормоконтролёр
к.т.н., доцент

 19.06.18
(подпись, дата)

Хорин А.В.

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от 04.06.18 № 11)

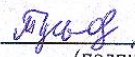
Заведующий кафедрой

 18.06.18
(подпись, дата)

Логинов О.Н.

Работа защищена с отметкой хорошо (протокол заседания ГЭК от 19.06.2018 № 3)

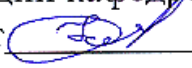
Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент

 19.06.2018
(подпись, дата)

Гуськов М.С.

ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ФАКУЛЬТЕТ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ТРАНСПОРТА
КАФЕДРА «СВАРОЧНОЕ, ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

«Утверждаю»

Заведующий кафедрой СЛП и М
к.т.н., доцент  О.Н. Логинов

« 08 » 12 2017 г.

ЗАДАНИЕ
на выпускную квалификационную работу

Студенту гр. 14МТ1 Факультета машиностроения и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Дормидонову Андрею Александровичу.

Научный руководитель работы: д.п.н., профессор Мецераков А.С.

Время выполнения ВКР: с 08.12.2017 г. по 28.06.2018 г.

Место преддипломной практики: кафедра «Контроль и испытания материалов» ПГУ.

Тема работы: Разработка технологии получения трехслойного титано-алюминиевого композиционного материала с промежуточным перфорированным слоем.

Тема утверждена приказом ректора ПГУ № 1253/О от 08 декабря 2017 г.

Техническое задание на работу (назначение устройства, условия применения, внешние воздействия, специальные требования и т.п.): выполнить исследование влияния параметров сварки взрывом на микроструктуру и свойства слоистого композиционного материала с промежуточным перфорированным слоем.

Объем и содержание основной части работы

Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, расчетов, обоснований, описаний):

- введение с обоснованием актуальности темы исследования, установления объекта и предмета, постановкой цели и задач исследования;
- теоретический анализ областей применения слоистых титано-алюминиевых композиционных материалов в производстве, способов их получения, проведение патентного поиска по улучшению свойств разнородных слоистых композиционных материалов, полученных сваркой взрывом;
- экспериментальный раздел – описание результатов исследований и выявленных зависимостей;
- заключение – выводы по теме работы и полученным результатам.

Презентация бакалаврской работы (перечень и содержание плакатов)

- тема ВКР 1л А4;
- цели и задачи выпускной работы 1л А4;
- химический состав и свойства исходных металлов 1л А4;
- диаграмма состояния «титан – алюминий» 1л А4;
- способы получения слоистых титано-алюминиевых композиционных материалов 1л А4;
- схема получения слоистого композиционного материала с промежуточным перфорированным слоем 1л А4;
- общий вид образцов для микроанализа 1л А4;
- фотографии микроструктуры образцов 1л А4;
- результаты измерения толщины интерметаллида 1л А4;
- результаты измерения микротвердости зоны соединения 1л А4;
- размеры и вид образца под испытание на разрыв 1л А4;
- сравнение прочностных и пластических свойств композиционного материала с промежуточным перфорированным слоем и исходных металлов 1л А4;
- размеры и вид образцов под испытание на ударную вязкость 1л А4;
- основные выводы 1л А4.

Рекомендуемая литература:

1. Ковтунов, А.И. Слоистые композиционные материалы [Текст]: учебное пособие / А.И. Ковтунов, С.В. Мямин, Т.В. Семистенова. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. – 75 с.

2. Лысак, В.И. Сварка взрывом [Текст]: учебное пособие / В.И. Лысак, С.В. Кузьмин. – М.: Машиностроение, 2005. – 543 с.

3. Трыков, Ю.П. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов [Текст]: учебник / Ю.П. Трыков, Л.М. Гуревич, В.Г. Шморгун. – М.: Металлургиздат, 2004. – 230 с.

Дата выдачи задания: 08.12.2017 г.

Руководитель ВКР:

д.п.н., профессор

 А.С. Мещеряков

Задание к исполнению принял студент

гр. 14МТ1

 А.А. Дормидонов

08 декабря 2017 г.

Выпускную квалификационную работу к защите допустить

Декан факультета машиностроения и транспорта

Политехнического института ПГУ

 С.Ю. Киреев

Аннотация

Выпускная квалификационная работа содержит 55 с., 24 рис., 10 табл., 75 использованных источников, 5 прил.

ТИТАН, АЛЮМИНИЙ, СЛОИСТЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ, ПЕРФОРИРОВАННЫЙ СЛОЙ, ИНТЕРМЕТАЛЛИД, СВАРКА ВЗРЫВОМ

Объект исследования – трехслойный титано-алюминиевый композиционный материал с промежуточным перфорированным слоем.

Предмет исследования – взаимосвязь между параметрами сварки взрывом и свойствами полученного композиционного материала.

Целью работы является исследование технологии получения титано-алюминиевого композиционного материала с промежуточным перфорированным слоем и изучение его структуры и механических свойств.

Методы исследования – аналитический обзор литературы, сравнительный анализ способов получения, экспериментальные исследования состава, структуры и свойств, обобщение полученных результатов, формирование итоговых выводов.

Полученные результаты – исследована технология получения слоистого композиционного материала системы «титан – алюминий» и изучены его свойства.

ПГУ.ВКР.22.03.01.14МТ107.ПЗ								
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Разработка технологии получения трехслойного титано-алюминиевого композиционного материала с промежуточным перфорированным слоем	Лит.	Лист	Листов
Разраб		Дармиданов А.А.	<i>А.А.</i>	15.08.18				
Провер		Мещеряков А.С.	<i>А.С.</i>	18.08.18			2	55
Н. Контр.		Харин А.В.	<i>А.В.</i>			Кафедра С/П и М Группа 14МТ1		
Утверд.		Лозинков О.Н.	<i>О.Н.</i>					

Содержание

Введение.....	4
1 Области применения титано-алюминиевых композиционных материалов.....	7
2 Структура и свойства исходных компонентов. Взаимодействие титана и алюминия.....	9
2.1 Структура и свойства титана.....	9
2.2 Структура и свойства алюминия.....	10
2.2.1 Атомно-эмиссионный анализ алюминиевого слоя композиционного материала.....	11
2.3 Диаграмма состояния «титан – алюминий».....	13
2.4 Свойства интерметаллидов на основе титана и алюминия.....	15
3 Способы получения титано-алюминиевых композитов.....	18
3.1 Прокатка.....	18
3.2 Диффузионная сварка.....	20
3.3 Сварка взрывом.....	22
3.4 Самопроизвольная пропитка.....	24
4 Проведение патентного поиска.....	27
5 Исследование влияния параметров сварки взрывом на структуру и свойства композита.....	33
5.1 Параметры получения слоистого композиционного материала с промежуточным перфорированным слоем.....	33
5.2 Исследование микроструктуры композиционного материала.....	35
5.3 Измерение микротвердости композиционного материала.....	40
5.4 Оценка механических свойств композиционного материала.....	41
Заключение.....	46
Список использованных источников.....	48
Приложение А.....	56
Приложение Б.....	59
Приложение В.....	61
Приложение Г.....	63
Приложение Д.....	65

Введение

В настоящее время наблюдается ускорение темпов научно-технического прогресса, и, как следствие, темпов роста промышленного производства. В связи с этим, к конструкционным материалам предъявляются все более высокие эксплуатационные требования. Многие традиционные материалы – металлы и сплавы – зачастую не соответствуют этим требованиям. Поэтому в настоящее время во многих отраслях промышленности растет спрос на относительно новый класс конструкционных материалов – композиционные материалы. По сравнению с традиционными материалами, композиты обладают существенным преимуществом – они сочетают в себе только достоинства составляющих их компонентов, при этом их недостатки в композите не проявляются. Кроме того, применение этих материалов позволяет снизить массу летательных аппаратов, автомобилей, судов, увеличить КПД двигателей, а также создать новые конструкции, обладающие высокой работоспособностью и надежностью [1, 2].

Особое внимание специалисты обращают на слоистые композиционные материалы (далее – СКМ). Их применение позволяет не только повысить надежность и долговечность деталей и оборудования, но и существенно сократить расход высоколегированных сталей, снизить энергоемкость и металлоемкость, расходы на техническое обслуживание, производство запчастей и ремонт оборудования. СКМ применяют в строительстве, машиностроении, авиастроении, приборостроении, химической и нефтехимической промышленности и ряде других отраслей промышленности. Их используют в качестве несущих конструкций, переходников, приспособлений и деталей, обладающих специальными свойствами [3].

В частности, благодаря своим уникальным физическим и механическим свойствам, широкое применение в промышленности находят композиционные материалы на основе титана. Основные его достоинства – относительно высокая прочность (по этому показателю титан не уступает большинству легированных сталей), хладостойкость, коррозионная стойкость (титан, в частности, стоек в таком

					ПГУ.ВКР.22.03.01.14МТ107.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

сильном окислителе, как азотная кислота). Кроме того, титан имеет сравнительно небольшую плотность $\rho = 4,71 \text{ г/см}^3$, за счет чего возможно уменьшение массы деталей, изготовленных из данного металла. В связи с указанными преимуществами, титановые сплавы используются в машиностроении (в частности, в автомобилестроении), ракето- и авиастроении, космической технике, судостроении, химической, криогенной и пищевой промышленности, нефтегазовой отрасли, медицине и других областях [1, 4–7]. Недостатком самого титана считается низкий модуль упругости, т.е. он непригоден для изготовления жестких конструкций.

Легированные титановые сплавы используются в качестве жаропрочных материалов [8–10]. К жаропрочным сплавам на основе титана относятся сплавы систем «титан – алюминий – хром», «титан – алюминий – марганец», «титан – алюминий – ванадий» и т.д. [11–13]. Преимущество жаропрочных титановых сплавов – незначительный удельный вес и небольшие удельные напряжения при работе деталей в центробежных условиях, к которым относятся, например, диски, лопатки и другие детали газовых турбин.

Базовой для жаропрочных титановых сплавов является система «титан – алюминий». Преимущество алюминия перед остальными легирующими элементами заключается в его распространении в природе и доступности (алюминий – третий по распространенности после кислорода и кремния элемент), меньшей, по сравнению с титаном, плотностью, дешевизной. Введение алюминия повышает удельную прочность титановых сплавов. Кроме того, алюминий и титан в нагретом состоянии склонны к образованию интерметаллидов, обладающих высокими значениями твердости, износостойкости, прочности, упругости, жаропрочности и коррозионной стойкости [14–17].

В связи с вышеизложенным, разработка технологии получения слоистых титано-алюминиевых композиционных материалов, в том числе материалов с интерметаллическим упрочнением, является одним из перспективных направлений исследований в современном материаловедении.

					ПГУ.ВКР.22.03.01.14МТ107.ПЗ	Лист
						5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Цель работы – исследование технологии получения трехслойного титано-алюминиевого композиционного материала с промежуточным перфорированным слоем.

Для достижения цели в работе решались следующие задачи:

а) проведение аналитического обзора структуры и свойств титана ВТ1-0 и алюминия АД1, выявление взаимодействия исходных компонентов и определение типа интерметаллида на границе раздела;

б) проведение теоретического обзора способов получения титано-алюминиевых композиционных материалов;

в) осуществление патентного поиска на предмет улучшения характеристик титано-алюминиевых композиционных материалов;

г) определение свойств (химический состав, микроструктура, значение механических свойств и микротвердости) слоистого композиционного материала с промежуточным перфорированным слоем, полученного при помощи сварки взрывом.

					ПГУ.ВКР.22.03.01.14МТ107.ПЗ	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 Области применения титано-алюминиевых композиционных материалов

Одним из способов увеличения физико-механических характеристик титана становится использование интерметаллидов на его основе. Слоистые композиционные материалы титан – алюминий являются одной из наиболее перспективных групп композиционных материалов. Как уже было указано, алюминий и титан при высоких температурах (свыше 450 °С) образуют химические соединения, благодаря которым композиты способны работать в условиях повышенных температур и нагрузок [18, 19].

К перспективным для применения титано-алюминиевых композитов отраслям относится автомобилестроение. Использование данных материалов, обладающих сравнительно небольшой плотностью, позволяет уменьшить массу деталей, и, как следствие, повысить мощность двигателей автомобилей [20, 21, 23]. Данные композиты применяются для изготовления несущих конструкций, ответственных нагруженных деталей двигателей – клапанов, шатунов и т.д., элементов трансмиссий (шестерни, валы), а также теплообменников, радиаторов, и других деталей.

В кораблестроении из рассматриваемых материалов делают обшивку судов, гребные валы, винты и т.д. Использование композитов позволяет значительно уменьшить общую массу судна, что способствует увеличению объема перевозимых грузов и повышению скорости плавсредства [4, 6].

Также композиции на основе титана и алюминия используются в авиастроении, т.к. они обладают высокими показателями удельной прочности, жаропрочности и коррозионной стойкости. Титановые сплавы могут длительное время работать при температурах свыше 600 °С. Данные материалы широко используются в конструкциях сверхзвуковых самолетов, также из них изготавливают лопатки компрессоров, диски турбин реактивных двигателей, воздухозаборники и корпусные детали вентиляторов и компрессоров двигателей, и многие другие штампованные детали [4, 6, 7]. Использование титановых сплавов вместо легированных сталей при

изготовлении самолетов и вертолетов дает снижение их массы до 40 %, при неизменных показателях надежности, долговечности и экономичности изделий.

Титано-алюминиевые композиты с интерметаллическим упрочнением могут использоваться для изготовления конструкций, работающих в окислительных средах и при высоких температурах – камер сгорания, нагревательных элементов печей и т.д. Жаростойкость достигается за счет наличия алюминия. Детали при этом могут работать при температурах до 800 °С [2].

Кроме того, композиционные материалы на основе титана и алюминия применяются для изготовления переходников, предназначенных для сварки конструкций из разнородных металлов, узлов и деталей космической аппаратуры, химической промышленности, криогенной техники (различные промышленные холодильные установки, в том числе, для хранения сжиженных газов) и т.д. [3]

Таким образом, в первой главе рассмотрены области применения слоистых титано-алюминиевых композиционных материалов. Основные сферы применения указанных композитов – авиастроение, космическая техника, судостроение. Титано-алюминиевые композиционные материалы с интерметаллическим упрочнением используются для изготовления деталей, работающих в условиях значительного внешнего нагружения и высоких температур.

2 Структура и свойства исходных компонентов. Взаимодействие титана и алюминия

2.1 Структура и свойства титана

Титан Ti – элемент IV группы побочной подгруппы 4-го периода Периодической таблицы Д.И. Менделеева. При комнатной температуре представляет собой металл серого цвета.

Титан имеет следующие физические свойства: температура плавления составляет 1668 ± 3 °С, а теплопроводность титана при комнатной температуре равна 22,065 Вт/(м·К), благодаря чему изделия из данного элемента могут применяться в весьма широком диапазоне рабочих температур. ТКЛР титана при температуре 20 °С составляет $8,6 \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹, теплоемкость – 0,523 кДж/(кг·К), кроме того, титан парамагнитен. Свойства титана существенно не изменяются при высоких температурах [4, 22].

При подготовке данной ВКР использовался технически чистый титан марки ВТ1-0. Механические свойства ВТ1-0 определены в работе [23] при комнатной температуре и представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Механические свойства ВТ1-0

Параметр	Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость KCU, Дж/см ²	Твердость по Виккерсу HV, МПа	Модуль упругости E, МПа	Модуль сдвига G, МПа
Значение	460,0	370,0	35,0	63,0	120,0	147	1120,0	410,0

Кроме механических характеристик, в [23] также был определен химический состав данной марки титана. Результаты химического анализа сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Химический состав ВТ1-0

Элемент	Ti	Fe	C	Si	Примеси
Содержание, %	99,4	0,2	0,1	0,1	0,2

Титан может иметь две аллотропические модификации: до температуры 882 °С металл существует в виде α -фазы с ГПУ-решеткой с параметрами $a = 0,295$ нм и $c = 0,472$ нм, а выше этой температуры (вплоть до температуры плавления) титан имеет высокотемпературную модификацию, называемую β -титан, обладающую ОЦК-решеткой с параметром $a = 0,332$ нм. Плотность α -титана составляет 4,5 г/см³, а плотность β -титана при 899 °С равна 4,3 г/см³. Элементы, повышающие температуру полиморфного превращения и расширяющие α -область, называют α -стабилизаторами, к ним относятся алюминий, азот, кислород и др., а вещества, понижающие температуру полиморфного превращения и расширяющие область существования β -фазы – β -стабилизаторы (марганец, железо, ванадий и др.) [24, 25].

2.2 Структура и свойства алюминия

Алюминий Al – химический элемент III группы Периодической таблицы Д.И. Менделеева. При комнатной температуре алюминий – это металл серебристо-белого цвета. Обладает такими свойствами, как высокая электро- и теплопроводность (теплопроводность при комнатной температуре равна 226 Вт/(м·К), что делает алюминий пригодным к применению при конструировании теплообменной аппаратуры), коррозионная стойкость, малая плотность $\rho = 2,71$ г/см³ и высокая обрабатываемость давлением в холодном состоянии. Температура плавления алюминия составляет 660 °С, ТКЛР при 20 °С имеет значение $23,5 \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹, теплоемкость равна 0,947 кДж/(кг·К). Чистый алюминий, как и титан, парамагнитен [26–28].

В работе использовался технический алюминий марки АД1. Механические свойства данной марки алюминия, определенные при комнатной температуре, представлены в таблице 2.3 [28].

					ПГУ.ВКР.22.03.01.14МТ107.ПЗ	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 2.3 – Механические свойства АД1

Параметр	Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость KCU, Дж/см ²	Твердость по Виккерсу HV, МПа	Модуль упругости E, МПа	Модуль сдвига G, МПа
Значение	145,0	40,0	35,0	89,0	90,0	70,0	710,0	270,0

Химический состав был определен методом оптико-эмиссионного спектрального анализа. Результаты измерений представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Химический состав АД1

Элемент	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Примеси
Содержание, %	98,5	0,3	0,3	0,05	0,01	0,03	0,03	0,05	0,7

Алюминий, в отличие от титана, не имеет полиморфных превращений и в твердом состоянии обладает ГЦК-решеткой с периодом $a = 0,4049$ нм [4].

2.2.1 Атомно-эмиссионный анализ алюминиевого слоя композиционного материала

Для определения химического состава алюминиевого слоя композиционного материала был проведен атомно-эмиссионный спектральный анализ. Данный метод определения наличия и распределения элементов является наиболее распространенным ввиду следующих преимуществ [29, 30]:

- а) возможность определения практически всех элементов Периодической таблицы Д.И. Менделеева;
- б) высокая чувствительность к обнаружению химических элементов (от 10^{-5} до 10^{-7} %);
- в) высокая точность анализа (погрешность составляет от 3 до 5 %);
- г) возможность использования небольшого количества исследуемого вещества;
- д) простота проведения процесса.

Недостатком метода является его относительно высокая стоимость.

Атомно-эмиссионный анализ основан на регистрации оптического спектра, излучаемого атомами и ионами материала в газообразном состоянии и последующем измерении длины волны, интенсивности и других свойств этого спектра. Сущность метода заключается в том, что образец вносят в источник возбуждения, каким-либо способом (например, термическим) создается высокая температура (несколько тысяч °С). Образуется плазма, состоящая из возбужденных атомов, ионов и электронов. Затем в ней последовательно происходят следующие процессы: испарение части образца; перевод продуктов испарения в атомарное состояние; возбуждение образовавшихся атомов (пламенем, электрической дугой и т.д.); излучение света возбужденными атомами. Полученные спектры регистрируются на фотопластинке. Сначала измеряют интенсивность линии спектра определяемого элемента и близкой к ней линии другого элемента, называемой линией сравнения, затем, по градуировочной кривой, вычерчиваемой в соответствии с измеренной интенсивностью линий эталонов, определяют количество определяемого элемента [30–33].

В данном случае качественный и количественный состав алюминиевой составляющей композиционного материала определяли с помощью оптического спектрометра ПАПУАС-4И. Данный прибор предназначен для определения химического состава металлов и сплавов и способен выявлять практически все элементы, за исключением серы, фосфора и углерода.

Слоистый композиционный материал был помещен алюминиевой стороной на предметный столик в рабочем пространстве спектрометра. Предметный столик выполнял роль одного из электродов. Между ним и вторым электродом (графитовым) при помощи дуги с током 10 мА и напряжением 18 В инициировался электрический разряд, в котором происходило испарение и возбуждение свечения атомов алюминиевой пробы. Замеры состава пробы происходили в пяти точках, результаты представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты измерений химического состава алюминиевого слоя композиционного материала

Химический элемент	Содержание в пяти точках, %					Среднее значение, %
	1	2	3	4	5	
Al	97,8	97,3	98,5	98,5	98,6	98,5
Mg	0,02	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03
Cu	0,02	0,03	0,02	<0,01	<0,01	0,01
Si	0,18	–	–	0,59	0,42	0,3
Fe	–	–	0,28	0,35	0,36	0,33
Mn	<0,01	0,02	<0,01	0,04	<0,01	0,01
Zn	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	0,01
Ni	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ti	0,05	0,1	0,01	0,043	0,041	0,049
Pb	0,25	0,25	0,42	0,25	0,28	0,29
Sn	<0,01	0,05	<0,01	0,03	0,17	0,05

Содержание некоторых элементов отклоняется от значений, указанных в литературных источниках. В таблице 2.6 приведены справочные значения химического состава АД1 [34].

Таблица 2.6 – Химический состав АД1

Элемент	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
Содержание, %	от 99,3	до 0,3	до 0,33	до 0,05	до 0,025	до 0,05	до 0,1	до 0,15

Различие в справочных данных и значениях, полученных в результате спектрального анализа, можно объяснить загрязненностью рабочего пространства применявшегося спектрометра, вызванной предыдущими измерениями химического состава проб из других материалов, и исказившей значения содержания химических элементов в алюминиевой составляющей композита.

2.3 Диаграмма состояния «титан – алюминий»

Диаграмма состояния «титан – алюминий» относится к системам с перитектическими реакциями. Первая из них протекает при 1460 °С с образованием γ -фазы, представляющей собой химическое соединение типа TiAl, содержащее 36,03 % (по массе) алюминия; вторая – при 1340 °С и содержании алюминия от 60 до 64 % с

образованием соединения $TiAl_3$. В результате третьей реакции из расплава, содержащего менее 0,15 % (по массе) титана, образуется твердый раствор титана в алюминии [35, 36]. На рисунке 2.1 показан последний, наиболее общепризнанный вариант данной диаграммы [37].

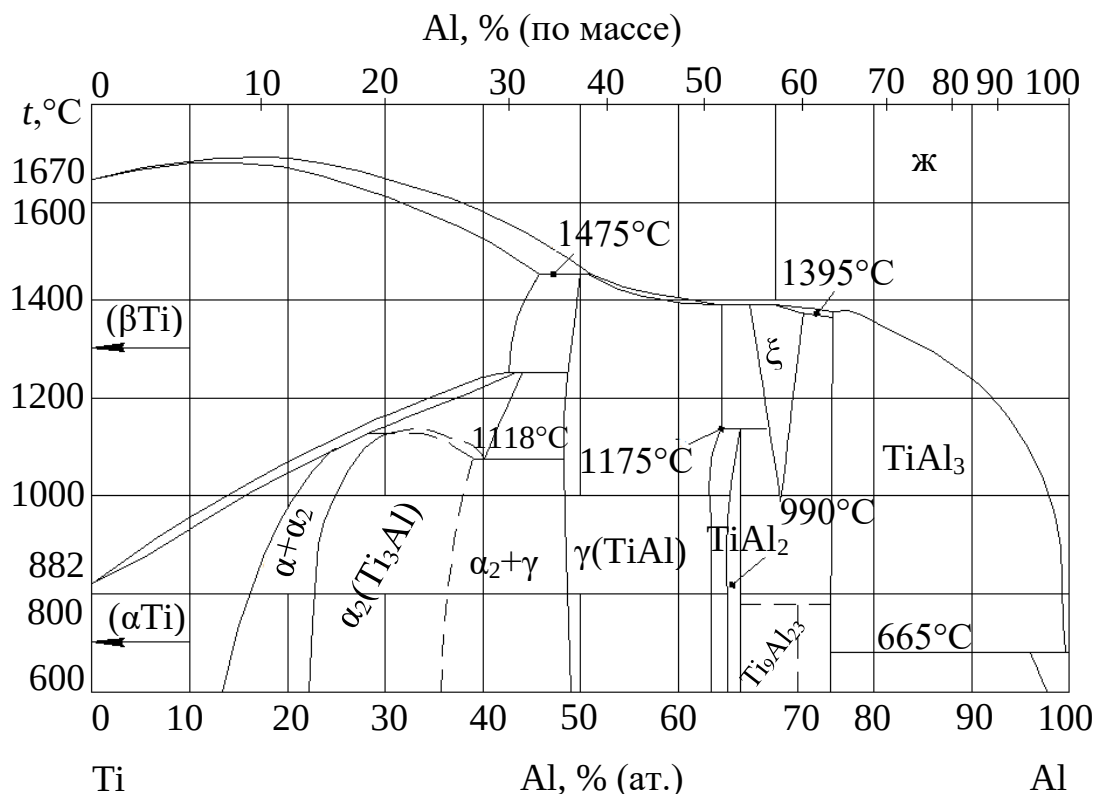


Рисунок 2.1 – Диаграмма состояния «титан – алюминий»

Алюминий в титане образует ограниченные области твердых α - и β -растворов. На диаграмме состояния видно наличие неупорядоченных α - и β -фаз и упорядоченных фаз $\alpha_2(Ti_3Al)$ и $\gamma(TiAl)$. Предельная растворимость титана в алюминии сравнительно небольшая – от 0,024 % (по массе) при температуре 250 °C до 0,26 % при 665 °C. Напротив, алюминий при этом растворяется в титане гораздо лучше: максимальная растворимость алюминия в β -титане достигается при температуре 1460 °C и составляет 34,5 % (по массе) [36, 38].

Химическое соединение Ti_3Al образуется при реакции $(\beta Ti) \rightleftharpoons Ti_3Al$ и температуре 1125 °C [38]. Образование соединения $TiAl_3$ проходит по перитектической реакции из жидкости и ζ -фазы при температуре 1395 °C. ζ -фаза представляет собой интерметаллид Ti_5Al_{11} , образующейся при взаимодействии жидкости и алюминида

TiAl при 1415 °C. При 990 °C ζ -фаза эвтектоидно распадается на TiAl₂ и TiAl₃, а при 1175 °C образуется высокотемпературная модификация соединения TiAl₂. Кроме того, указывается также на существование такой фазы, как Ti₉Al₂₃, кристаллизующейся при температуре 780 °C [39]. Однако наиболее вероятным является образование фазы TiAl₃, т.к. формирование данного типа алюминидов титана термодинамически и энергетически более выгодно: как показали расчеты, выполненные в работе [40], по сравнению с TiAl и Ti₃Al интерметаллид TiAl₃ обладает самым низким значением свободной энергии образования.

Таким образом, в системе «титан–алюминий» установлено существование следующих интерметаллических соединений [36]:

а) Ti₃Al, имеющий гексагональную структуру типа Ni₃Sn с параметрами решетки $a = 0,5793$ нм, $c = 0,4655$ нм (α -Ti);

б) TiAl с тетрагональной структурой типа AuCu с параметрами решетки $a = 0,3988$ нм, $c = 0,4076$ нм;

в) TiAl₂, обладающий объемно-центрированной тетрагональной структурой типа HfGa₂; параметры решетки: $a = 0,3976$ нм, $c = 2,4360$ нм;

г) TiAl₃ имеет объемно-центрированную тетрагональную решетку собственного типа с параметрами $a = 0,5446$ нм, $c = 0,8608$ нм;

д) Ti₉Al₂₃ с тетрагональной решеткой, имеющей параметры $a = 0,384$ нм, $c = 3,346$ нм.

2.4 Свойства интерметаллидов на основе титана и алюминия

Как указывалось ранее, при высоких температурах алюминий и титан образуют химические соединения, обладающие такими полезными свойствами, как жаропрочность, коррозионная стойкость, высокие показатели упругости и твердости. Благодаря своим характеристикам, интерметаллиды на основе титана и алюминия

являются востребованными во многих областях промышленности. Свойства данных соединений различаются в зависимости от соотношения в них титана и алюминия.

Химическое соединение TiAl имеет плотность $\rho = 3,8 \text{ г/см}^3$. Температура плавления соединения составляет $1450 \text{ }^\circ\text{C}$. Интерметаллид данного типа также характеризуется низкими пластическими свойствами (относительное удлинение достигает $0,5 \%$). В работе [41] отмечается, что повышение температуры до $700 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к увеличению пластичности материала (относительное удлинение может возрасти до 30%), что является следствием разблокирования дислокаций и осуществления деформации двойникованием [23, 43, 44]. Предел прочности TiAl находится в интервале от 350 до 580 МПа [43, 44]. Модули упругости интерметаллида – величины постоянные и составляют $E = 175 \text{ ГПа}$ и $G = 67 \text{ ГПа}$.

ТКЛР TiAl_3 находится в диапазоне от $9,75 \cdot 10^6$ до $9,9 \cdot 10^6 \text{ К}^{-1}$. Данный интерметаллид плавится при температуре $1377 \text{ }^\circ\text{C}$. TiAl_3 обладает сравнительно низкой плотностью $\rho = 3,3 \text{ г/см}^3$ и высокими показателями упругости и коррозионной стойкости. Модули упругости интерметаллида также величины постоянные и составляют 156 ГПа и 90 ГПа соответственно. Так же, как и остальные алюминиды титана, TiAl_3 обладает низкой пластичностью, что объясняется ограниченной подвижностью дислокаций при низких температурах, низкой величиной поверхностной энергии, а также малым количеством систем двойникования и скольжения. Монолитный интерметаллид TiAl_3 является весьма хрупким материалом и разрушается при коэффициенте интенсивности напряжений, равным 2 МПа , а напряжение разрушения материала при изгибе и сжатии составляет 162 МПа и 354 МПа соответственно [14]. Предел текучести интерметаллида TiAl_3 измерен в работе [45] методом вдавливания индентора и составляет 980 МПа . Микротвердость по методу Виккерса составляет от 390 до 420 HV , при нагреве материала до $500 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается снижение его твердости. При этом пластичность интерметаллида при нагреве возрастает незначительно – от $0,7 \%$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $0,8 \%$ при $900 \text{ }^\circ\text{C}$.

Кристаллическая решетка Ti_3Al близка к решетке α -титана. Отличительной чертой данного соединения является строго упорядоченное распределение атомов титана и алюминия в решетке, которое сохраняется до температуры 1090 °С [20]. Плотность данного интерметаллида равна 4,2 г/см³. Механические свойства Ti_3Al значительно зависят от микроструктуры, размера зерен, типа и количества примесей [43, 46]. Предел прочности соединения находится в диапазоне от 200 до 600 МПа. Относительное удлинение Ti_3Al мало и при комнатной температуре не превышает значений в диапазоне от 1 до 2 %. Как и у других титано-алюминиевых соединений, модули упругости Ti_3Al имеют постоянные значения: $E = 140$ ГПа, $G = 52,5$ ГПа. Для увеличения пластичности соединения Ti_3Al эффективным будет его легирование молибденом, ниобием и др., благодаря чему возможно повышение пластичности материала вследствие снижения упорядоченности его кристаллической структуры [47].

Таким образом, в данной главе были рассмотрены структура и проверены свойства исходных металлов – титана ВТ1-0 и алюминия АД1, на примере диаграммы равновесного состояния «титан – алюминий» описан процесс взаимодействия исследуемых металлов, указаны типы химических соединений, существующих в системе «титан – алюминий», и приведены их физические и механические свойства. Термодинамически наиболее вероятно образование интерметаллида $TiAl_3$, т.к. он обладает минимальной из всех титано-алюминиевых химических соединений свободной энергией Гиббса.

3 Способы получения титано-алюминиевых композитов

3.1 Прокатка

Совместная прокатка – один из самых распространенных способов изготовления металлических СКМ. Данная технология представляет собой совместную прокатку заготовок с целью получения неразъемного соединения листов по всей площади соприкосновения исходных металлов. Металлы для изготовления композиционных материалов этим способом могут быть не только одного класса (например, две марки стали), но и разных классов, таких как титан и алюминий [48].

Общая схема прокатки представлена на рисунке 3.1. Рулоны исходных металлов укладывают друг на друга и проводят через рабочие валки.

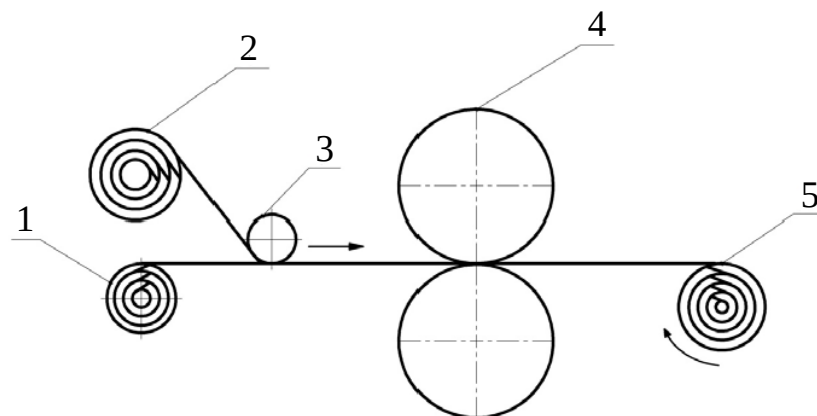


Рисунок 3.1 – Схема совместной холодной прокатки полос: 1 – размотчик полосы основного слоя; 2 – размотчик полосы плакирующего слоя; 3 – направляющий ролик; 4 – рабочие валки стана; 5 – моталка с рулоном многослойной полосы

На рисунке 3.2 показана схема получения слоистого металлического композиционного материала по технологии пакетной прокатки. Технология позволяет получить композит с малой толщиной слоев до 5 мкм [49].

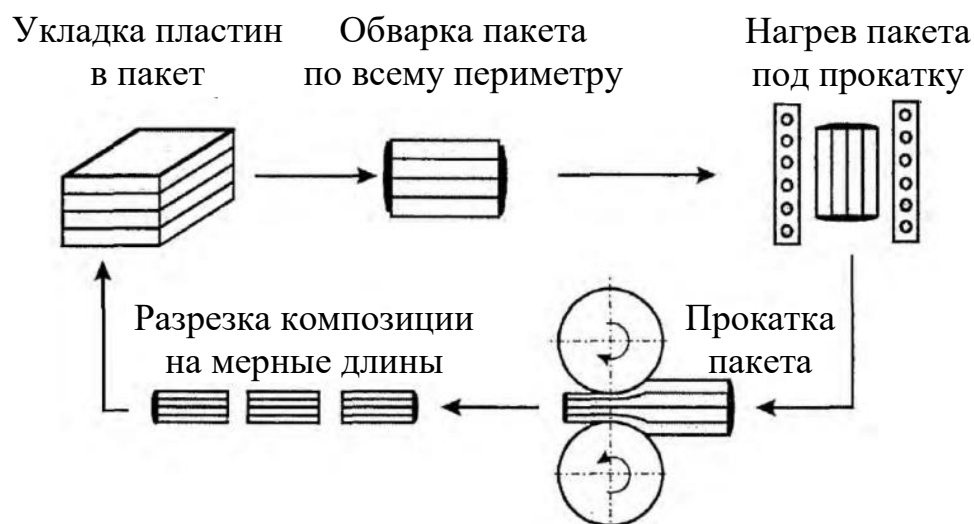


Рисунок 3.2 – Схема получения слоистых композитов при помощи пакетной прокатки

В данном технологическом процессе листовые заготовки собирают в пакет, нагревают и подвергают прокатке в горячем состоянии. Степень обжатия в валках должна быть достаточной для соединения листов по контактируемым поверхностям (несколько десятков процентов). Для предотвращения окисления поверхностей свариваемых слоев возможно осуществление сварки пакета по его периметру. Полученный в результате прокатки многослойный лист разрезается на несколько заготовок, которые затем снова собираются в пакет. Пакет обваривается, нагревается и снова подвергается прокатке. В результате многократного повторения процесса получается слоистый композиционный материал с малой толщиной листов [50].

В работе [51] установлено, что при прокатке титано-алюминиевого пакета на первом проходе оптимальной является степень деформации, составляющая от 8 до 10 % за проход. При пакетной прокатке наблюдается высокая неравномерность деформации титанового и алюминиевого слоев, причем в большей степени деформируются ленты из алюминия. Несмотря на предварительный смягчающий отжиг, в менее пластичных титановых слоях образуются локальные сужения, что в итоге приводит к нарушению сплошности этих слоев, т.к. при одинаковых степенях де-

формации уже начинается разрушение титана, в то время как алюминий еще сохраняет целостность. При этом разрывы титанового слоя носят периодический характер, связанный с накоплением деформации до критического значения.

Недостатком данного способа получения титано-алюминиевых композиционных материалов является трудность их получения при комнатной температуре вследствие разрушения титана и алюминия до образования прочного сцепления слоев. При проведении процесса при высоких температурах сложность заключается в том, что титан при температуре более 400 °С, являясь активным металлом, начинает поглощать газы и охрупчиваться. Кроме того, из-за невысокой степени деформации не более 30 %, данной технологией чаще всего получают заготовки из листов сравнительно небольшой величины, что в значительной мере ограничивает области применения данного метода [35].

3.2 Диффузионная сварка

Одним из самых распространенных твердофазных методов получения металлических слоистых композиционных материалов является диффузионная сварка. Данный процесс заключается в выдержке прижатых друг к другу листов разнородных металлов, нагретых до определенной температуры, при требуемом давлении и времени выдержки, благодаря чему обеспечивается массоперенос металлов и формируется слоистый композит. Диффузионная сварка проводится в специальных вакуумных камерах, заполненных инертным газом. Процесс осуществляется без расплавления металлов [46]. Схема сварки таким способом приведена на рисунке 3.3.

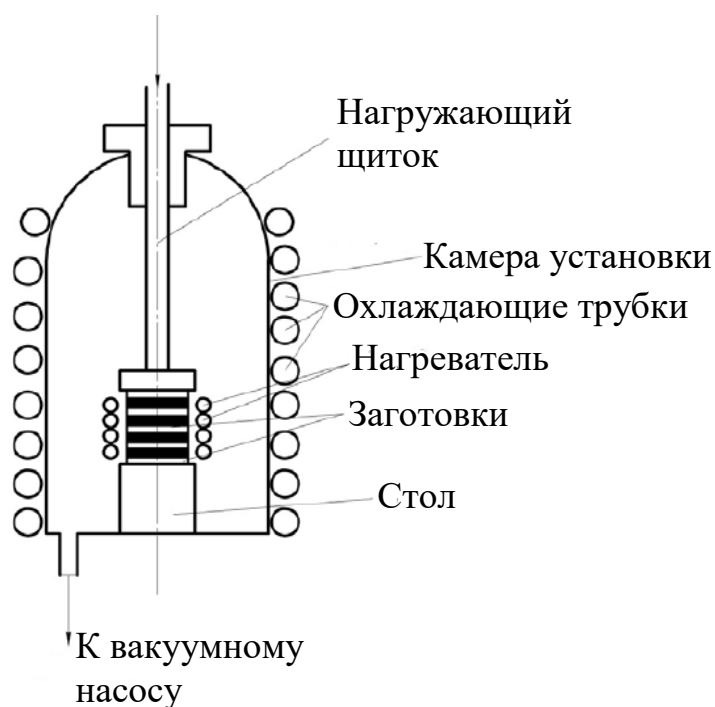


Рисунок 3.3 – Схема процесса диффузионной сварки слоистых композиционных материалов

Регулируя содержание образующегося в процессе сварки интерметаллида, можно задавать механические свойства композита. В титано-алюминиевом СКМ, получаемом по такой технологии, весь объем алюминия идет на образование алюминидного слоя. В работах [19, 50] были исследованы зависимости образования таких композитов, как $Al-TiAl_3$ и $Ti-TiAl_3$ от толщины исходных пластин. В композиционном материале первого типа авторы получили интерметаллический слой, состоящий из сферических включений $TiAl_3$ на границе раздела алюминия и интерметаллида. Второй тип СКМ состоял из тонких титановых слоев, разделенных сплошными алюминидными прослойками.

Недостатками этой технологии является ограниченный вследствие необходимости использования вакуумной камеры размер композита, сложность оборудования, и, как следствие, низкая производительность процесса [3].

3.3 Сварка взрывом

Сварка взрывом представляет собой твердофазный управляемый технологический процесс получения сварных соединений однородных и разнородных металлов. Характерными для сварки взрывом являются интенсивные пластические деформации металла в околошовной зоне, вызванные воздействием импульса высокой амплитуды и малой длительности. В некоторых случаях сварка взрывом является единственно возможным способом изготовления композиционного материала необходимого состава и геометрических размеров. При этом не требуется узкоспециализированного дорогостоящего оборудования. Сейчас существует большое количество схем процесса сварки взрывом, но все они основываются на одной схеме, изображенной на рисунке 3.4 [53].

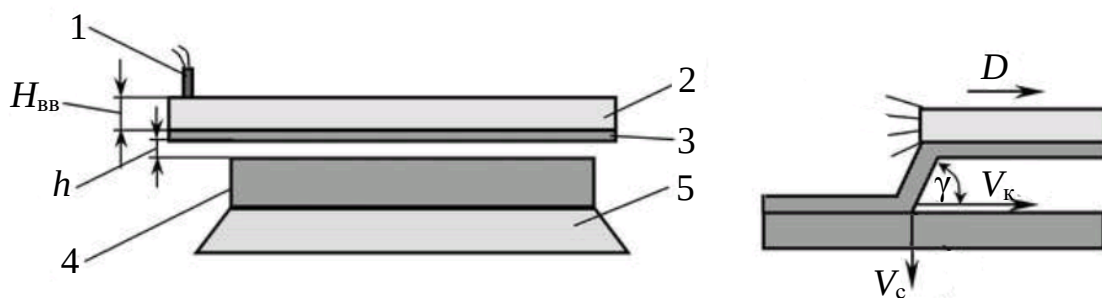


Рисунок 3.4 – Основная схема сварки взрывом: 1 – детонатор; 2 – заряд ВВ; 3 – метаемая пластина; 4 – основная пластина; 5 – опора; γ – угол соударения пластин; V_c – скорость соударения; V_k – скорость точки контакта; D – скорость детонации; H_{BB} – высота заряда; h – величина зазора между пластинами

На опоре располагают основную пластину, над которой с зазором устанавливают метаемую пластину. На нее укладывают заряд взрывчатого вещества и закрепляют детонатор. При инициировании взрывчатого вещества по заряду распространяется детонационная волна со скоростью детонации D . Под действием высокого давления отдельные участки метаемой пластины последовательно приобретают скорость около нескольких сотен метров в секунду, поворачиваются относительно своего первоначального положения и под углом γ соударяются со скоростью V_c с неподвижной пластиной. В результате косого соударения пластин при

правильно рассчитанных параметрах процесса в зоне контакта происходят частичная очистка поверхностей соединяемых поверхностей от загрязнений, их активация и образование соединения со скоростью V_k .

Основными преимуществами, которые позволяют успешно соединять листовые материалы сваркой взрывом, являются [54, 55]:

- а) быстротечность процесса и значительные усилия давления;
- б) возможность получения листовых и трубных заготовок;
- в) возможность получения крупногабаритных заготовок;
- г) возможность сваривать материалы, трудно растворимые друг в друге, из-за чего невозможно для их соединения применять сварку плавлением;
- д) отсутствие необходимости применения сложного и громоздкого оборудования.

Однако, несмотря на достоинства данного метода, он имеет и недостатки, основной из которых состоит в необходимости наличия специально обустроенного полигона вдали от жилых строений и прочих объектов инфраструктуры, или необходимости использования специальных камер (при сварке небольших деталей и взрывчатых веществ малой массы). Кроме того, трудности при реализации сварки посредством взрывного воздействия вызывают также хранение и транспортировка взрывчатых веществ [55].

Для получения титано-алюминиевых композиционных материалов сварка взрывом считается наиболее эффективным способом, т.к. при использовании данного метода из-за скоротечности сварки существенно ограничиваются диффузионные процессы на границе раздела соединяемых материалов. В работе [35] отмечается, что наилучший результат достигается при использовании чистого алюминия в качестве одного из свариваемых материалов или в качестве промежуточной прослойки. В этой же работе отмечено, что на прочность сцепления заготовок оказывают значительное влияние кинематические параметры сварки взрывом – скорость точки контакта и скорость соударения пластин.

Для системы «ВТ1-0 – АД1» в работе [56] приведены наиболее оптимальные значения скорости точки контакта и скорости соударения пластин. Было определено, что повышение указанных параметров приводит к росту амплитуды и длины волны, а также увеличению микротвердости зоны соединения.

3.4 Самопроизвольная пропитка

Самопроизвольная пропитка – технология жидкофазного формирования композиционного материала, при котором армирующий каркас заливается расплавленным матричным металлом. Технологические процессы такого рода не требуют приложения к жидкому металлу внешних сил. Главное условие самопроизвольной пропитки – смачивание жидкой фазой поверхности пропитываемого материала [50].

Основными преимуществами данной технологии является отсутствие необходимости использования специального оборудования (возможно применение простой литейной оснастки), а также возможность получения композиционных материалов сложной формы. Недостатком данного метода является возникновение пор и пустот в получаемом материале вследствие объемной усадки при кристаллизации расплава [57].

На рисунке 3.5 показан пример установки для получения СКМ методом самопроизвольной пропитки.

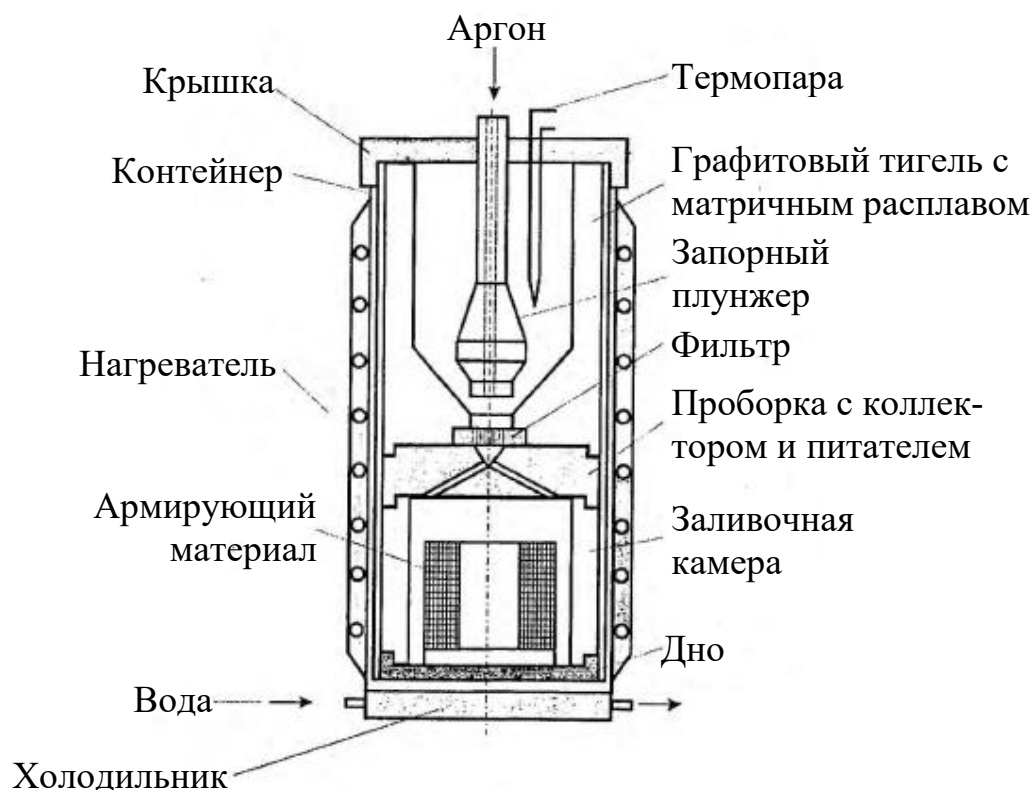


Рисунок 3.5 – Схема установки для получения композиционного материала методом самопроизвольной пропитки

В заливочную камеру, заключенную в контейнер из коррозионно-стойкой стали, устанавливается заготовка из армирующего материала. Через отверстие в запорном плунжере в тигель подается инертный газ – аргон, включается нагрев и матричный материал плавится. После достижения расплавом необходимой температуры плунжер поднимают и жидкий металл поступает в заливочную камеру, пропитывая армирующий каркас [52, 57].

В исследованиях [58] изучалось влияние температурно-временных факторов на кинетику диффузионного взаимодействия титана с расплавом алюминия в слоистых материалах «BT1-0 – АД1» и «BT1-0 – АД1 – BT1-0», получаемых данным способом. Автор выяснил, что процесс формирования структуры диффузионного слоя представляет собой зарождение в зоне контакта металлов тонкой интерметаллидной прослойки, который после определенного периода начинает активно проникать вглубь титана, растворяя его поверхностный слой с выделением в рас-

плав дисперсных интерметаллидных частиц соединения $TiAl_3$. Выделяющиеся частицы фазы $TiAl_3$ формируют диффузионный слой, который из-за постепенного увеличения своей толщины заполняет весь объем расплавленного алюминия. После его заполнения одновременно продолжается рост толщины диффузионной прослойки за счет растворения титана и происходит увеличение содержания в нем интерметаллида до полного исчезновения алюминиевой фазы. В процессе формирования диффузионного слоя при жидкофазном взаимодействии титана и алюминия можно выделить три этапа:

а) начальная стадия – малоактивный рост интерметаллидной прослойки на границе $Ti-Al$;

б) стадия роста – интенсивное увеличение толщины диффузионного слоя с постоянным для данной температуры содержанием дисперсных частиц интерметаллида $TiAl_3$;

в) стадия насыщения – увеличение объемного содержания фазы $TiAl_3$ в диффузионном слое.

Прочность сцепления слоев титана и алюминия повышается с увеличением температуры алюминиевого расплава. Максимальная сила смачивания титана алюминием наблюдалась авторами [58] при температуре расплава алюминия от плюс 700 до плюс 750 °С. При дальнейшем повышении температуры до 900 °С растекание алюминия по поверхности титана ухудшалось из-за роста оксидной пленки на поверхности титана вследствие его окисления, а также из-за того, что при данной температуре формируется алюминид титана $TiAl_3$, также препятствующий смачиванию [59].

Таким образом, в третьей главе рассмотрены методы получения слоистых титано-алюминиевых композиционных материалов. Наиболее целесообразно применение сварки взрывом. Данный способ позволяет получать заготовки с площадью соединения до 20 м² и весом до 10 т из практически любых сочетаний материалов.

4 Проведение патентного поиска

С целью выявления технических решений, направленных на улучшение свойств полученных по технологии сварки взрывом разнородных слоистых композиционных материалов, в т.ч., титано-алюминиевых, был выполнен патентный поиск. Поиск проведен по базе открытых реестров изобретений ФИПС [60]. Глубина поиска составила 23 года (1991 – 2014 г.г.). Были затронуты следующие рубрики МПК: B23K20/08, B32B15/01, B32B7/04, B23K103/18, B23K101/14, C23C26/00, C22C47/20. Найденные патентные документы указаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Анализируемые патентные документы

№ п/п	Регистрационный номер охранного документа	Страна выдачи патента	Дата публикации
1	1698017	СССР	15.12.1991
2	2311274	Российская Федерация	27.11.2007
3	2315697	Российская Федерация	20.07.2006
4	2397850	Российская Федерация	27.08.2010
5	2407640	Российская Федерация	10.02.2010
6	2463140	Российская Федерация	10.10.2012
7	2486043	Российская Федерация	27.06.2013
8	2486999	Российская Федерация	10.07.2013
9	2522505	Российская Федерация	20.07.2014
10	2526357	Российская Федерация	20.08.2014

Выявленные патенты можно классифицировать по решаемой в них цели:

а) патенты, направленные на улучшение прочности и жесткости – №№ 1698017, 2311274, 2315697, 2397850, 2407640, 2522505;

б) патенты, направленные на повышение теплозащитных свойств и жаростойкости – №№ 2486043, 2486999, 2526357;

в) патенты, направленные на повышение износостойкости – № 2463140.

Результаты патентного поиска сведены в таблицу А1 в приложении А.

В патенте № 1698017 [61] ставится задача повышения жесткости конструкции из композиционного материала. Достигается это тем, что на неподвижной пла-

стине (АД1) выполняют диагональные надрезы, по одну или обе стороны от которых наносят противосварочные слои в форме треугольников. Надрезы в дальнейшем позволяют отслаивать определенные участки неподвижной пластины. Подвижная пластина (ВТ1-0) устанавливается относительно неподвижной с зазором. После сварки взрывом несваренные участки АД1 отгибают до образования различно ориентированных ребер, что, по словам авторов изобретения, повышает жесткость конструкции из полученного слоистого композита.

Авторы патента № 2311274 [62] ставят в своем изобретении целью повышение прочности соединения слоев, и, как следствие, повышение прочностных свойств композиционного материала. Для решения поставленной задачи авторы предлагают провести перед сваркой обработку неподвижной или μεταемой пластины катодными пятнами вакуумной дуги, в результате чего окислы и другие неметаллические включения удаляются с поверхности обрабатываемой пластины. Подготовленный таким способом слой пластины будет обладать высокой механической и химической однородностью, а также высокими показателями адгезии, что будет способствовать лучшему сцеплению слоев при сварке взрывом и, как следствие, лучшей прочности всего композита в целом.

В патенте № 2315697 [63] также рассматривается возможность повышения прочности биметалла. Достигается это тем, что вначале более мягкий металл соединяется сваркой взрывом с металлической прослойкой, причем соединение выполняется по трапецеидальным пазам с образованием соединения «ласточкин хвост», а затем, также посредством сварки взрывом, происходит соединение прослойки с более твердым металлом. Как указывают авторы, прочность биметалла увеличивается за счет выполненного сваркой взрывом соединения «ласточкин хвост», кроме того, прочность можно дополнительно повысить, если осуществить механический контакт по боковой поверхности выступов сваркой плавлением.

Целью авторов патента № 2397850 [64] указывается повышение прочности и качества соединения слоев разнородных металлов. Для этого предлагается разме-

щать под неподвижным элементом демпфирующую прослойку, снижающей скорость пластической деформации соединяемых пластин за счет собственной односторонней пластической деформации, а также искусственную опору, выполненную из материала, плотность которого превышает аналогичный показатель демпфирующей прослойки. За счет данных операций возможно существенное снижение энергии ударного воздействия на соединяемые элементы, вследствие чего понижается риск оплавления менее тугоплавкого материала и образования карбидов, нитридов и других хрупких соединений, что, в свою очередь, повышает качество соединения слоев.

Авторы патента № 2407640 [65] ставят задачу повышения жесткости и прочности получаемого композита. С целью выполнения данной задачи ими предложено выполнять основной металл в виде листов, а армирующий – в виде полос или проволоки. При этом, в случае образования интерметаллида на границе соединяемых материалов, прочность и жесткость соединения, полученного по предлагаемому способу, будет выше, чем у аналогичных композиционных материалов из элементов, выполненных в виде пластин. Достигается данный эффект в заявленном изобретении за счет того, что хрупкая интерметаллическая прослойка будет иметь не сплошное, как в случае выполнения и основного, и неподвижного элементов в виде пластин, а локальное распространение в объеме композита – по границам основной пластины и армирующей проволоки или полосы. При этом, промежутки между локальными участками интерметаллидных слоев заполнятся более мягким металлом, который будет препятствовать распространению микротрещин из интерметаллида (в случае их появления) по всему материалу.

Задачей авторов патента № 2463140 [66] являлось повышение износостойкости получаемого композиционного материала титан-алюминий. Решение поставленной задачи в предлагаемом изобретении сводится к созданию нового технологического цикла получения указанного композиционного материала, включающего поэтапную сварку взрывом многослойного титано-алюминиевого пакета, отжиг

при температуре, превышающей температуру плавления алюминия, и последующее обжатие полученного пакета при повышенной температуре. За счет выполнения указанных операций создается многослойный титано-алюминиевый композиционный материал, в котором между слоями титана и алюминия формируются сплошные интерметаллические прослойки оптимальной толщины, имеющие высокие показатели износостойкости.

В патенте № 2486043 [67] предлагается способ повышения жаростойкости получаемого слоистого композиционного материала из разнородных металлов с внутренними полостями. Для этого авторами предлагается составление трехслойного пакета медь-никель-алюминий с расположением над пакетом защитной медной пластины такой же толщины, как и у медного слоя композиционного материала; сварка взрывом медной пластины с композиционным материалом; создание обработкой давлением внутренних полостей, и последующий отжиг при температуре ниже температуры плавления алюминия для создания диффузии между никелевым и алюминиевым слоями с целью формирования интерметаллида. Затем полученный композиционный материал нагревают до температуры, превышающей температуру плавления алюминия для перехода оставшегося алюминия в интерметаллид. Таким образом, на наружной поверхности изделия формируется сплошной слой алюминида никеля, обладающий повышенной жаростойкостью и теплозащитными свойствами.

В патенте № 2486999 [68] авторы предлагают способ повышения жаростойкости получаемого композита из разнородных металлов. Предлагается соединение посредством взрывного воздействия пластины из стали и никеля с последующей их горячей прокаткой для получения оптимальной толщины никелевого слоя. После указанных операций следует соединение сваркой взрывом полученного биметалла на основе стали и никеля с алюминиевой пластиной. Далее полученную заготовку подвергают термическому воздействию при температуре, меньшей, чем температура плавления алюминия, благодаря чему на границе никеля и алюминия формируется сплошной интерметаллический слой, обладающий высокими показателями

					ПГУ.ВКР.22.03.01.14МТ107.ПЗ	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

жаростойкости. Оставшийся никелевый слой служит для лучшей защиты стали от окисления при повышенных температурах.

Авторы патенты № 2522505 [69] предлагают способ получения сваркой взрывом композиционного материала из разнородных металлов с высокими значениями прочности и упругости. Для достижения поставленной цели в патенте предложено выполнение в армирующем элементе перфораций конического типа с противоположной направленностью, благодаря чему полученные отверстия армирующего компонента заполняются при сварке взрывом металлом основы, что способствует равномерному соединению элементов по всей площади соприкосновения без появления в сварных швах напряжений. Кроме того, наличие перфораций препятствует образованию сплошного хрупкого интерметаллического слоя между соединяемыми металлами, т.к. их контакт благодаря выполненным в армирующем материале коническим отверстиям не является сплошным. Указанные операции, по заявлению авторов, повышают прочностные показатели получаемого композита.

Патент № 2526357 [70] посвящен возможности улучшения жаростойкости получаемого композиционного материала из разнородных металлов. Авторами предлагается применять медные трубы в виде полостеобразующих элементов. К данным трубам затем по технологии сварки взрывом присоединяются наружные слои из пластин алюминия и никеля. После выполнения сварки полученный трехслойный композиционный материал подвергают отжигу при температуре, лежащей в интервале от плюс 30 до плюс 60 °С ниже температуры плавления алюминия. В результате указанной термической обработки между никелевой и алюминиевой составляющими композита образуется сплошной интерметаллический слой, обладающий высокими показателями жаростойкости.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что найденные технические решения содержат следующие направления улучшения свойств разнородных, в том числе, титано-алюминиевых, композитов:

а) повышение жесткости за счет придания различной ориентации предварительно нанесенным диагональным надрезам на неподвижной пластине (пат. № 1698017);

б) повышение прочности сцепления слоев посредством повышения однородности свариваемых поверхностей (пат. № 2311274);

в) повышение прочности и качества соединения вследствие смягчения ударного воздействия для предотвращения оплавления металла с более низкой температурой плавления и деформирования соединяемых металлов (пат. № 2397850);

г) повышение прочности благодаря использованию дополнительных металлических элементов при сварке (пат. № 2315697);

д) повышение износо- и жаростойкости за счет формирования сплошного интерметаллического слоя по границам соединяемых слоев (пат. №№ 2463140, 2486043, 2486999, 2526357);

д) повышение прочности за счет устранения возможности образования сплошного интерметаллического слоя при помощи выполнения метаемой и неподвижной пластины различной конфигурации и выполнения перфораций в армирующем элементе (пат. №№ 2407640, 2525205).

Таким образом, в данной главе был проведен патентный поиск по улучшению свойств разнородных, в том числе титано-алюминиевым, композиционным материалам, полученным сваркой взрывом. Были найдены патенты по улучшению таких свойств указанных композиционных материалов, как прочность, жесткость, жаростойкость, износостойкость, теплозащитные характеристики. Проведенные исследования показали высокий уровень разработок по данной тематике. Наиболее близким к исследуемой теме техническим решением является патент № 2522505.

5 Исследование влияния параметров сварки взрывом на структуру и свойства композита

5.1 Параметры получения слоистого композиционного материала с межслойным перфорированным слоем

Для проведения творческой части выпускной квалификационной работы использовалась титано-алюминиевая пластина, полученная по технологии сварки взрывом. Сварка производилась по плоскопараллельной схеме, представленной на рисунке 5.1.

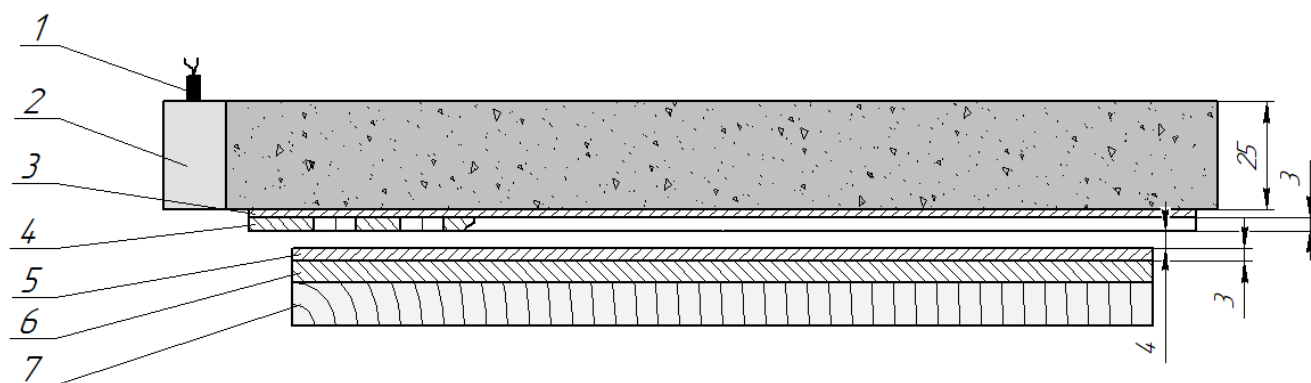


Рисунок 5.1 – Применявшаяся схема сварки взрывом: 1 – электродетонатор; 2 – заряд ВВ; 3 – фальш-пластина; 4 – перфорированная метаемая пластина (АД1); 5 – неподвижная пластина (ВТ1-0); 6 – подложка (сталь Ст3); 7 – опора (слой ДСП)

В данном случае метаемым элементом была пластина из алюминия АД1 с размерами $220 \times 120 \times 3$ мм, неподвижной – пластина из титана ВТ1-0 с размерами $200 \times 100 \times 3$ мм, величина зазора между соединяемыми пластинами составила 4 мм и обеспечивалась жеребейками из алюминия АД1 и с размерами $30,0 \times 4,0 \times 0,2$ мм. Над метаемой пластиной располагалась фальш-пластина из стали Ст3, имевшая размеры $220 \times 120 \times 2$ мм и отделенная от алюминия тремя слоями скотча. Под неподвижной пластиной для увеличения жесткости располагалась подложка из стали Ст3 с размерами $200 \times 100 \times 5$ мм, изолированная от титановой пластины одним

слоем скотча. Также под подложкой находилась опора из слоя ДСП с геометрическими размерами 200×100×10 мм. Взрывчатым веществом служила смесь аммиачной селитры и аммонита 6ЖВ с соотношением компонентов 67:33, высота ВВ составляла 25 мм.

Для сварки были выбраны следующие параметры: $V_c=280$ м/с, $V_k=1921,6$ м/с. В соответствии с более ранними исследованиями [71], было выдвинуто предположение, что на таких режимах возможно образование промежуточного интерметаллического слоя. Для предотвращения образования сплошного хрупкого интерметаллида, по всей площади алюминиевой пластины были выполнены сквозные цилиндрические перфорации диаметром 10 мм, распределенные равномерно с межосевым расстоянием, равным 20 мм. Общий вид перфорированной пластины показан на рисунке 5.2.

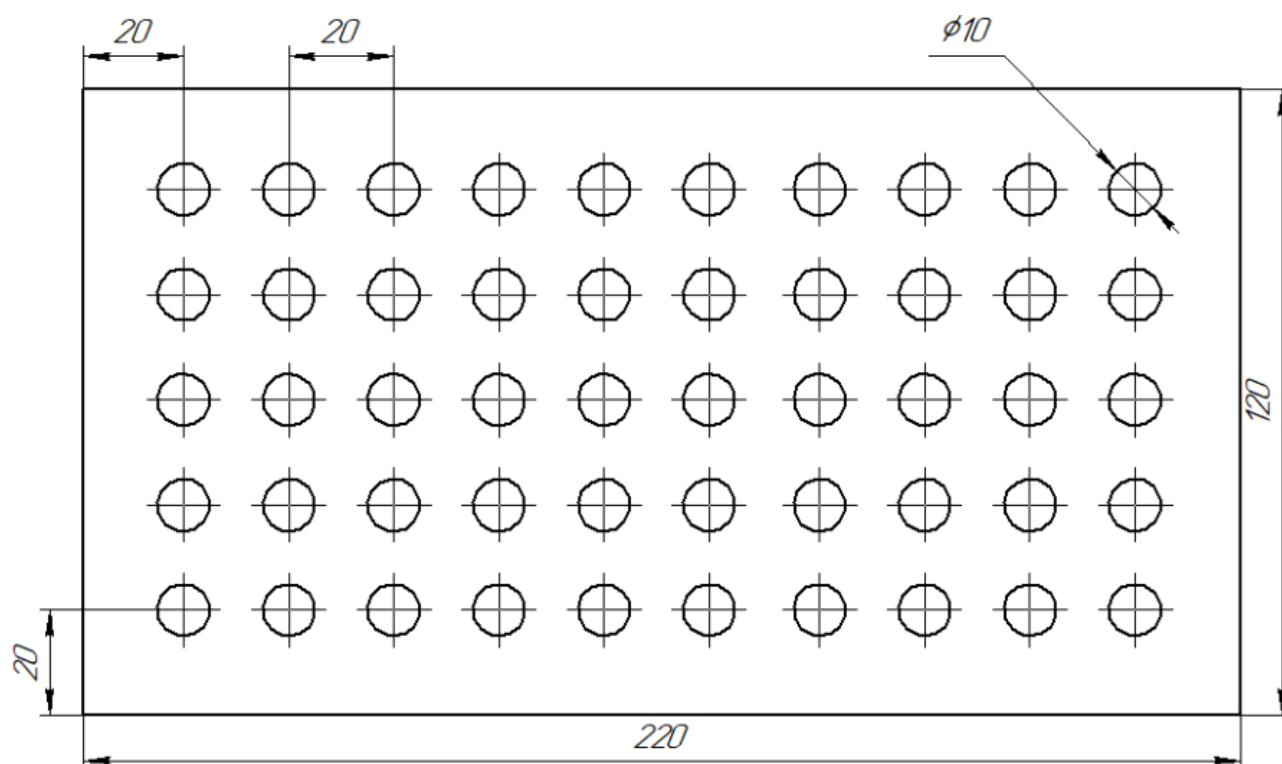


Рисунок 5.2 – Внешний вид перфорированной алюминиевой пластины

Значение перфораций заключалось в том, что благодаря им контакт титана и алюминия не являлся сплошным, площадь контакта составляла разность площади соединения металлов и суммарной площади выполненных цилиндрических каналов. Вследствие этого, удалось избежать образования в ходе сварки сплошной

хрупкой интерметаллической прослойки, являющейся причиной трещинообразования. В данном случае, распространение микротрещин в прослойке, в случае их появления, будет тормозиться на границе с перфорациями, что приводит к увеличению прочности композиционного материала при нагружении.

5.2 Исследование микроструктуры композиционного материала

Для оценки влияния параметров сварки взрывом на микроструктуру композиционного материала был проведен его металлографический анализ.

Из работы [72] известно, что сложность при приготовлении и исследовании шлифов заключается в том, что вследствие различия в твердости составляющих композита менее твердый слой сошлифовывается в большей степени, в результате чего образуется ступенька на границе перехода компонентов. В данном случае алюминиевый слой, как наименее твердый, сошлифовывался больше, чем титан и интерметаллид.

Изучение микроструктуры полученных сварных соединений алюминия с титаном проводилось на образцах, запрессованных в алюминиевую обойму. При этом зона контакта металлов находилась посередине образца.

Образцы были вырезаны из исследуемой титано-алюминиевой пластины, полученной сваркой взрывом. Поверхности образцов, предназначенных для исследования, последовательно зачищались и шлифовались напильниками с размерами зубьев 0,1 мм (для черновой обработки) и 0,05 мм (для чистовой обработки).

Помещенные в обойму образцы заливались смесью отвердителя и эпоксидной смолы в соотношении 1:3. Смесью получали перемешиванием компонентов при высокой температуре. После заливки проводилась сушка смеси в течение 24 часов при комнатной температуре. При этом образовалось монолитное соединение смеси и образцов, обеспечивающее устойчивость последних при дальнейшей полировке и установке на предметный столик металлографического микроскопа.

Далее образцы подвергали механической полировке на шлифовально-полировальном станке. При этом использовалась полировальная бумага следующей зернистости: 400, 600, 800, 500, 2000, а также полировальное сукно, смоченное пастой ГОИ. На подготовленном данным способом шлифе легко выявляются поры, трещины, неметаллические включения, и при наличии интерметаллического слоя можно с достаточной точностью измерить его толщину.

Общий вид полученных в результате вышеуказанных операций образцов представлен на рисунке 5.3. Образцы имели следующие геометрические параметры: образец №1 – 30×11×4 мм, образец №2 – 15×12×4 мм, образец №3 – 29×12×4 мм.

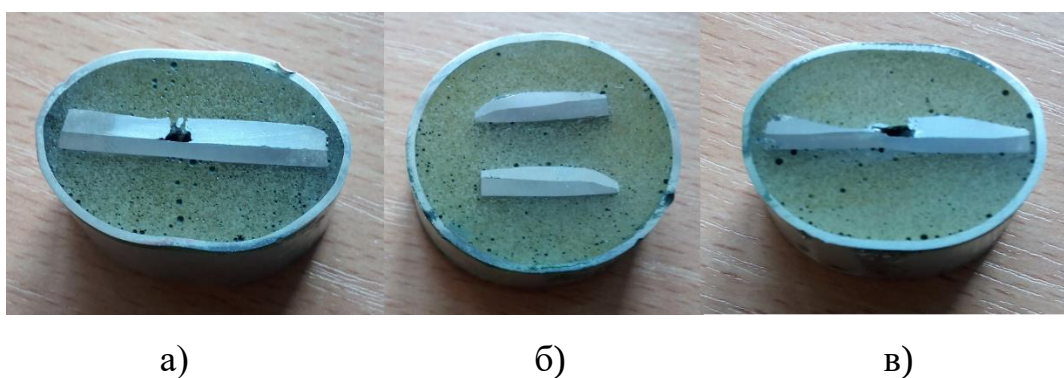


Рисунок 5.3 – Общий вид полученных титано-алюминиевых образцов: а) – образец №1; б) – образец №2; в) – образец №3

Исследование микроструктуры образцов проводилось методом микроскопического анализа с использованием металлографического микроскопа Альтами МЕТ 6С с увеличением в 100 крат. Задачами при работе с микроскопом были изучение микроструктуры образцов, определение наличия или отсутствия интерметаллидной прослойки между титаном и алюминием, а также, при наличии последней, измерение ее толщины на всех трех образцах. На рисунке 5.4 показана микроструктура образца №1.

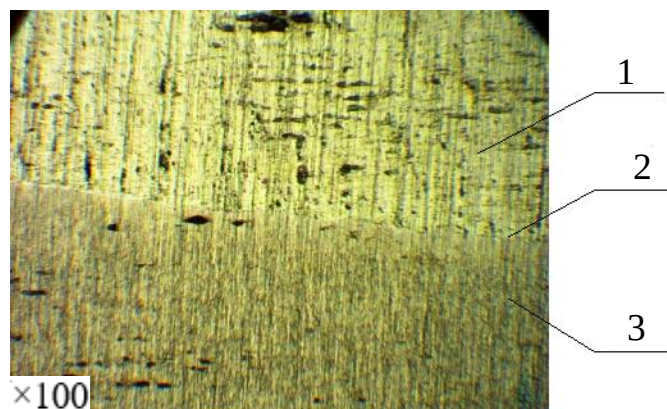


Рисунок 5.4 – Микроструктура образца №1: 1 – АД1; 2 – интерметаллид; 3 – ВТ1-0

На рисунке видны неметаллические включения (черные пятна на титановом и алюминиевом слоях), являющиеся следствием отсутствия операции травления образцов в ходе их подготовки к исследованию. Также вдоль границы раздела титана и алюминия виден слой интерметаллида. Кроме того, на поверхности образца видны многочисленные поперечные риски, появившиеся вследствие шлифовки напильником и недостаточной полировки.

Также на алюминиевом слое образца №1 были выявлены цвета побежалости, что демонстрирует рисунок 5.5. Данное явление связано с тем, что алюминий при контакте с окружающей средой покрывается тонкой окисной пленкой, предохраняющей металл от коррозии. Вследствие интерференции света на пленке наблюдаются радужные цвета.

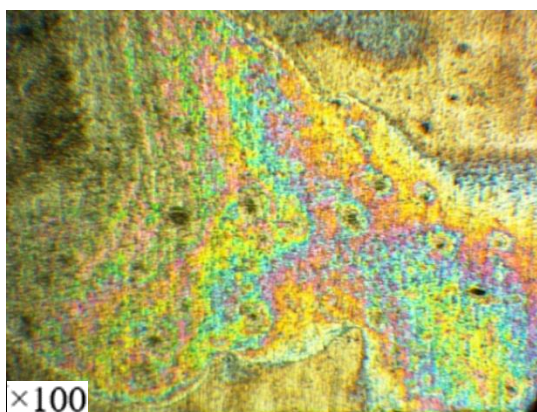


Рисунок 5.5 – Цвета побежалости на алюминиевом слое образца №1

На рисунке 5.6 показано обнаруженное в ходе дальнейшего осмотра поверхности образца №1 расслоение по границе титанового и алюминиевого слоев, которое могло быть вызвано как ударным воздействием при сварке взрывом, так и механической обработкой образца.

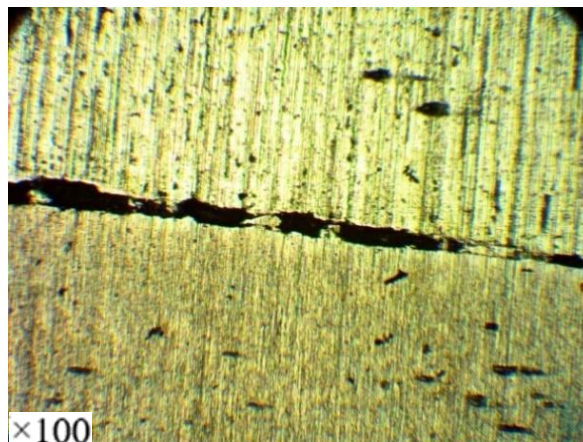


Рисунок 5.6 – Расслоение на образце №1

Кроме того, при исследовании данного образца был обнаружен слой алюминиевой жеребейки, использовавшейся при сварке взрывом для обеспечения необходимого зазора между свариваемыми металлами, и образовавшей при ударном воздействии соединение с титановым слоем у границы раздела, что показывает рисунок 5.7.

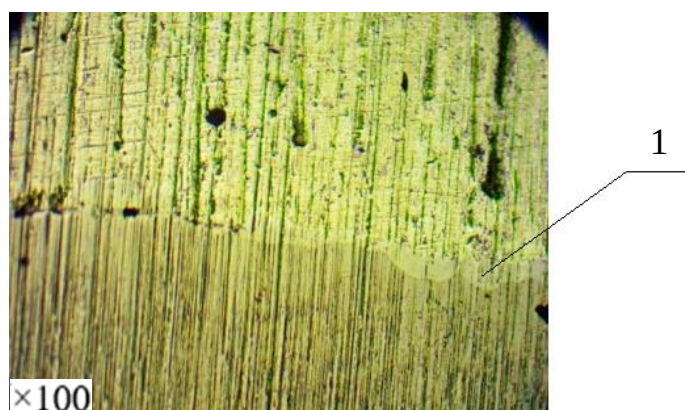


Рисунок 5.7 – Микроструктура образца №2: 1 – слой жеребейки

Микроструктура образца №2, представленная на рисунке 5.8, также, как и в случае с образцом №1, содержала неметаллические включения и поперечные риски. При этом на границе титана и титана присутствовала алюминидная прослойка.

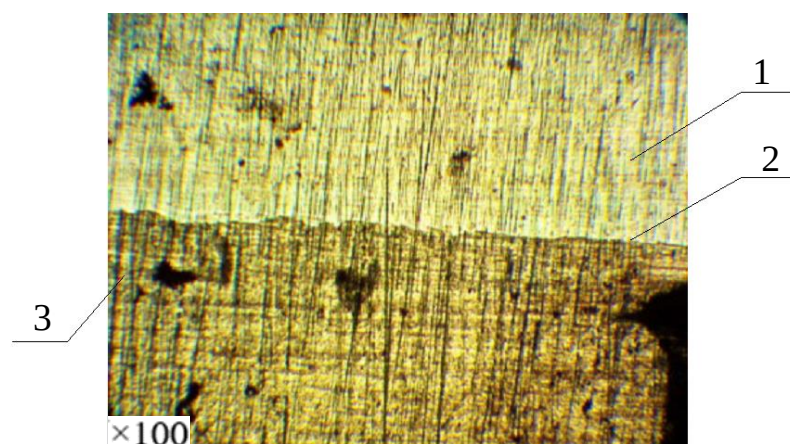


Рисунок 5.8 – Микроструктура образца №2: 1 – АД1; 2 – интерметаллид; 3 – ВТ1-0

На рисунке 5.9 показана микроструктура третьего образца. Как и на предыдущих двух образцах, здесь так же видны поперечные риски и неметаллические включения на алюминиевом слое. Видна волнообразная граница раздела титана и алюминия, характерная для сварки взрывом. Это связано с тем, что данный образец был вырезан в направлении, совпадающим с направлением движения точки контакта.

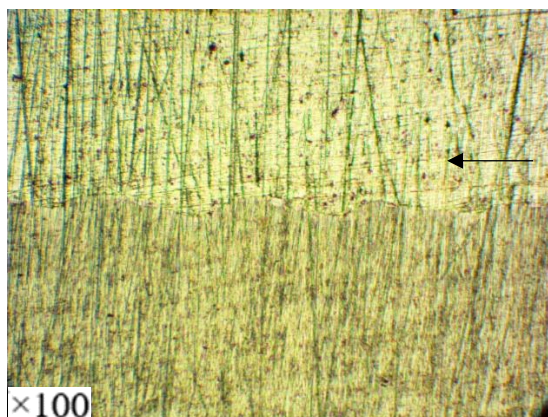


Рисунок 5.9 – Микроструктура образца №3: стрелкой показано направление прохождения ударной волны при сварке взрывом

Кроме исследования микроструктуры, на всех трех образцах были измерены толщины интерметаллидной прослойки при увеличении в 400 крат. Результаты измерений сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Измерение толщин интерметаллидного слоя на образцах

Номер образца	Толщина интерметаллида, мкм
1	20,1...26,3
2	16,0...22,2
3	6,2...10,1

Толщина определялась как произведение длины прослойки в пикселях на коэффициент перевода пикселей в микрометры, в данном случае, на 0,43. Разница толщин интерметаллического слоя на разных образцах объясняется тем, что направление вырезки образцов отличалось: у образца №3 оно совпадало с направлением прохождения ударной волны, остальные образцы были вырезаны в направлении, перпендикулярном направлению прохождения ударной волны.

5.3 Измерение микротвердости композиционного материала

Как было показано выше, в процессе металлографического исследования микроструктуры полученного композиционного материала было выявлено наличие между титановым и алюминиевым слоями интерметаллической прослойки. Одним из способов определения ее типа является измерение микротвердости зоны соединения. На основании сопоставления полученных значений микротвердости с соответствующими данными, содержащимися в литературных источниках, можно вынести предположение о виде интерметаллида.

Измерения проводились в соответствии с ГОСТ 9450-76 [73] на автоматическом микротвердомере Q10M при нагрузке 0,02 кг. Однако вследствие неточного выбора оператором места измерения микротвердости зоны соединения, не удалось получить соответствующие значения данной характеристики интерметаллического слоя и сопоставить их с литературными данными для формирования вывода о типе химического соединения. Исходя из этого, можно лишь теоретически предположить, что данная прослойка соответствует химическому соединению типа $TiAl_3$, т.к., в соответствии с расчетами, выполненными авторами работы [40], данный тип

интерметаллида на основе титана и алюминия является более устойчивым, чем остальные титано-алюминиевые химические соединения, и его образование наиболее термодинамически выгодно.

Результаты измерений микротвердости слоистого композиционного материала с промежуточным перфорированным слоем представлены на рисунке Б1 в приложении Б.

5.4 Оценка механических свойств композиционного материала

Для исследования поведения композиционного материала в условиях статического растягивающего и динамического нагружения были проведены его испытания на одноосное растяжение и ударную вязкость.

Испытание прочностных характеристик композита проводилось на разрывной машине ИР 5145-500, которая выводит в качестве результатов испытания протокол испытания и диаграмму изменения размеров образца. Протокол испытания, а также полученная диаграмма растяжения слоистого композиционного материала приведены на рисунках В1 в приложении В и Г1 в приложении Г соответственно.

Подготовка образцов, измерение их геометрических параметров до и после испытания, а также сами испытания проводились в соответствии с ГОСТ 1497-84 [74]. Плоский образец, не имеющий галтелей для закрепления в зажимах испытательной машины, был вырезан из исследуемой титано-алюминиевой пластины, причем в рабочей части образца присутствовали цилиндрические перфорации. С целью исключения проскальзывания образца в зажимах разрывной машины была задана скорость нагружения, равная 50 мм/мин. На рисунке 5.10 показаны основные размеры образца перед испытанием.

					ПГУ.ВКР.22.03.01.14МТ107.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

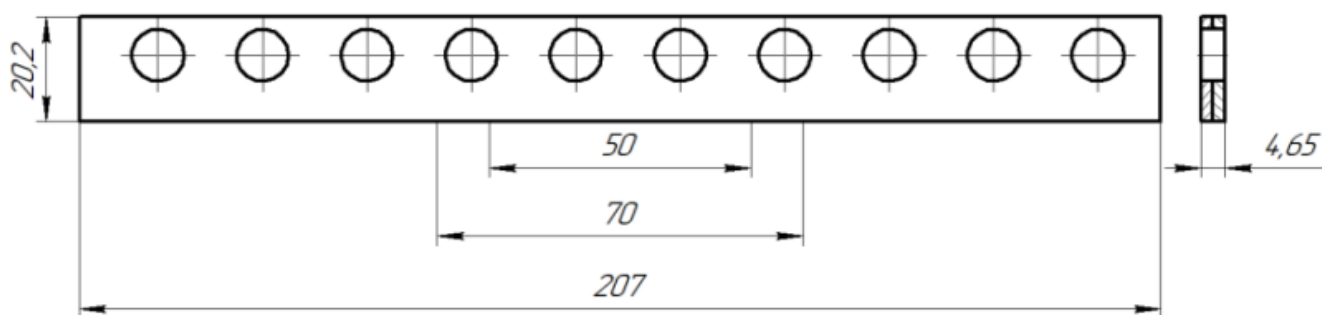


Рисунок 5.10 – Размеры образца перед испытанием

На рисунке 5.11 представлен общий вид образца перед испытанием.



Рисунок 5.11 – Общий вид образца перед испытанием

Разрыв образца в результате испытания произошел в пределах расчетной части, что показано на рисунке 5.12.



Рисунок 5.12 – Общий вид образца после разрушения

Разрушение образца произошло при максимальной нагрузке 26240 Н. Расчеты по методике, описанной в [74], а также протокол испытания, выведенный испытательной машиной, показали, что предел прочности композита при данной нагрузке составил 590,5 МПа, что больше значений, полученных для титана ВТ1-0 в работе [23] и для АД1 в [22]. Помимо предела прочности на разрыв, были определены значения условного предела текучести для исследуемого СКМ, а также его пластические свойства. В таблице 5.2 приведено сравнение прочностных и пластических характеристик исходных металлов и композиционного материала на их основе.

Таблица 5.2 – Сравнение свойств прочностных и пластических свойств композита и исходных металлов

Материал	Механические свойства при 20°C			
	Предел прочности при растяжении σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
СКМ ВТ1-0 – АД1	590,5	522,9	6,0	36,5
ВТ1-0	460,0	370,0	35,0	63,0
АД1	145,0	40,0	35,0	60,0

При сопоставлении указанных в таблице данных видно, что прочностные свойства полученного композита превосходят аналогичные показатели исходных металлов. Однако, при этом, ВТ1-0 и АД1 обладают лучшими, по сравнению с полученными в ходе испытания композита, пластическими характеристиками. Данное обстоятельство объясняется образовавшимся в ходе получения композита частичным наклепом, а также наличием между титановым и алюминиевым слоями композиционного материала интерметаллической прослойки, оказывающей противоречивое влияние на свойства СКМ: с одной стороны, происходит его упрочнение, а с другой – снижаются пластические свойства, что и подтверждает таблица сравнения.

С целью прогнозирования поведения и характера разрушения слоистого композиционного материала при ударных нагрузках было проведено его испытание на ударную вязкость. Подготовка образцов, измерение их геометрических размеров и проведение эксперимента проводилось по ГОСТ 9454-78 [75].

При исследовании ударной вязкости композита был задействован маятниковый копер модели ИО 5003-0,3-11, с максимальной энергией удара, равной 300 Дж. Эксперимент осуществлялся при комнатной температуре. Для его проведения были изготовлены 3 образца с U-образным концентратором напряжений. Эскиз, по которому изготавливались образцы, представлен на рисунке 5.13.

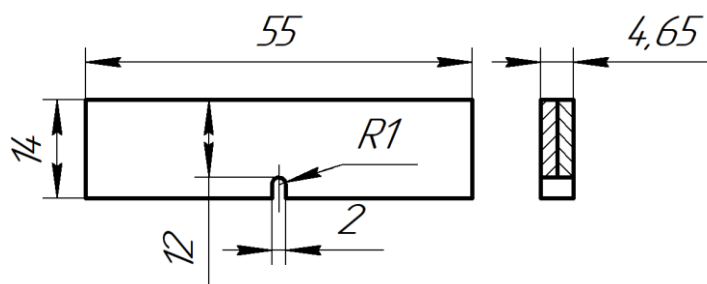


Рисунок 5.13 – Размеры образцов под испытание на ударный изгиб

Общий вид образца №1 до испытания показан на рисунке 5.14.



Рисунок 5.14 – Общий вид образца №1 до испытания

Общий вид образца №3 после испытания показан на рисунке 5.15.



Рисунок 5.15 – Образец №3 после испытания

После разрушения образцов по методике, описанной в [75], была рассчитана их ударная вязкость, составившая в среднем $68,9 \text{ Дж/см}^2$. Данное значение меньше аналогичных показателей чистых исходных компонентов композита: ударная вязкость композита с промежуточным перфорированным слоем составила 76,6 % от ударной вязкости АД1 (90 Дж/см^2 [22]), и 57,4 % – от аналогичного значения ВТ1-0 (120 Дж/см^2 [23]). Это объясняется тем, что хрупкие алюминиды титана снижают ударную вязкость композиционного материала.

Таким образом, в пятой главе были описаны следующие экспериментальные исследования:

а) Изучена микроструктура полученного композиционного материала с перфорированным промежуточным слоем. На исследуемых образцах в ходе микроскопического анализа была выявлена волнообразная граница раздела титана и алюминия, характерная для материалов, полученных сваркой взрывом, обнаружена интерметаллическая прослойка между слоями основных металлов и измерена ее толщина (у образца №1 получили диапазон значений от 20,1 до 26,3 мкм, у образца №2 от 16,0 до 22,2 мкм, у образца №3 от 6,2 до 10,1 мкм).

б) Для определения типа интерметаллида было принято решение об измерении его микротвердости. Ввиду отсутствия доступа к специализированному оборудованию, было решено обратиться к сторонней организации, однако из-за неточных действий операторов в последней, тип химического соединения установить не удалось. Данная проблема может стать предметом дальнейших исследований.

в) Проведены механические испытания исследуемого композиционного материала. Выяснилось, что композит обладает лучшими, по сравнению с исходными металлами, прочностными характеристиками (предел прочности σ_b композита составил 590,5 МПа, у ВТ1-0 и АД1 эти показатели составили 460,0 и 145,0 МПа соответственно; условный предел текучести композита $\sigma_{0,2}$ 522,9 МПа, у ВТ1-0 и АД1 эти свойства характеризуются значениями 370,0 и 40,0 МПа соответственно), но уступает им по таким свойствам, как пластичность (у композита относительное удлинение равно 6 %, относительное сужение – 36,5 %, аналогичные показатели ВТ1-0 составили 35,0 и 63,0 %, а у АД1 – 35,0 и 60,0 %) и ударная вязкость (68,9 Дж/см² у композита против 120,0 Дж/см² у ВТ1-0 и 90,0 Дж/см² у АД1). Данные результаты объясняются влиянием интерметаллической прослойки и наклепа, полученного в ходе совместной пластической деформации металлов в процессе соударения.

Заключение

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы решалась проблема исследования технологии получения слоистого композиционного материала системы «титан – алюминий». По итогам работы можно сделать следующие основные выводы:

а) Проведен аналитический обзор структуры и свойств титана ВТ1-0 и алюминия АД1, описано взаимодействие исследуемых материалов. Определены возможные типы интерметаллидов, которые могут быть образованы на границе раздела титана и алюминия ($TiAl$, Ti_3Al , $TiAl_2$, $TiAl_3$, Ti_9Al_{23}).

б) Проведен обзор методов получения титано-алюминиевых слоистых композиционных материалов. Показано, что наиболее рациональным является применение сварки взрывом.

в) Осуществлены патентные исследования по разнородным, в том числе титано-алюминиевым, композиционным материалам, полученным по технологии сварки взрывом. Были выявлены 10 патентов по улучшению прочности, жесткости, жаростойкости, износостойкости композиционных материалов, полученных сваркой взрывом.

г) Изучена микроструктура полученного слоистого композиционного материала с промежуточным перфорированным слоем. На образце, вырезанном в направлении, совпадающим с направлением прохождения точки контакта, выявлена волнообразная конфигурация границы раздела, характерная для соединений, полученных сваркой взрывом. Также была обнаружена интерметаллическая прослойка на границе раздела исходных металлов, что подтвердило предположение об образовании химических соединений при использовании форсированных режимов сварки взрывом. Измерение толщины прослойки показало следующие результаты: у образца №1 толщина составила от 20,1 до 26,3 мкм, у образца №2 от 16,0 до 22,2 мкм, у образца №3 от 6,2 до 10,1 мкм.

д) Проведены механические испытания исследуемого композиционного материала. Выяснилось, что композит превосходит исходные металлы по прочностным характеристикам (в ходе механических испытаний было получено значение предела прочности σ_b для композита на уровне 590,5 МПа, у ВТ1-0 и АД1 эти показатели равны 460,0 и 145,0 МПа соответственно; условного предела текучести композита $\sigma_{0,2}$ 522,9 МПа, у ВТ1-0 и АД1 эти характеристики соответствуют значениям 370,0 и 40,0 МПа соответственно), однако уступает им по пластическим свойствам (у композита с перфорированным промежуточным слоем относительное удлинение получилось равным 6 %, относительное сужение 36,5 %; при этом, соответствующие показатели ВТ1-0 составили 35,0 и 63,0 %, а у АД1 35,0 и 89,0 % соответственно) и ударная вязкость (68,9 Дж/см² у композита с промежуточным перфорированным слоем против 120,0 Дж/см² у ВТ1-0 и 90,0 Дж/см² у АД1).

					ПГУ.ВКР.22.03.01.14МТ107.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

Список использованных источников

1. **Арзамасов, Б.Н. Материаловедение** [Текст]: учеб. для вузов / Б.Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 648 с.
2. **Карабасов, Ю.С. Новые материалы** [Текст]: учебник / Ю.С. Карабасов [и др.]. – М.: МИСИС, 2002. – 736 с.
3. **Ковтунов, А.И. Слоистые композиционные материалы** [Текст]: учебное пособие / А.И. Ковтунов, С.В. Мямин, Т.В. Семистенова. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. – 75 с.
4. **Афонин, В.К. Металлы и сплавы** [Текст]: справочник / В.К. Афонин [и др.]. – СПб.: АНО НПО Профессионал, 2003. – 1090 с.
5. **Зубков, Л.Б. Космический металл: все о титане** [Текст]: учебник / Л.Б. Зубков. – М.: Наука, 1987. – 128 с.
6. **Чечулин, Б.Б. Титановые сплавы в машиностроении** [Текст]: учебное пособие / Б.Б. Чечулин. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
7. **Абковиц, С. Титан в промышленности** [Текст]: пер. с англ. / С. Абковиц, Дж. Бурке, Р. Хильц. – М.: Оборонгиз, 1957. – 145 с.
8. **Говоркян, Н.А. Получение металлокерамического титана и его свойства** [Текст] / Н.А. Говоркян, Б.С. Раковский // Порошковая металлургия. – 1968. – С. 227–232.
9. **Анциферов, Б.Н. Спеченные сплавы на основе титана** [Текст]: учебник / Б.Н. Анциферов, Б.С. Устинов, Г.Г. Олесов. – М.: Металлургия, 1984. – 168 с.
10. **Петрунько, А.Н. Титан в новой технике** [Текст]: учебник / А.Н. Петрунько, Ю.Г. Олесов, В.А. Дрозденко. – М.: Металлургия, 1979. – 160 с.
11. **Cao, R. On the mechanism of crack propagation resistance of fully lamellar Ti-Al alloy** [Текст] / R. Cao [et al.] // *Materials Science and Engineering*, 2006. – V. A420. – P. 122–134.

12. **Zheng, R.T. The relationship between fracture toughness and microstructure of fully lamellar Ti-Al alloy** [Текст] / R.T. Zheng [et al.] // J. Mater. Sci. – 2007. – V. 42. – P. 1251–1260.

13. **Xiao, Lv. Thermal stability of in situ synthesized high temperature titanium matrix composites** [Текст] / Lv Xiao [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – V. 467. – P. 135–141.

14. **Adharapuraru, R.R. Effects of ductile laminate thickness, volume fraction, and orientation on fatigue-crack propagation in Ti-Al₃Ti metal-intermetallic laminate composites** [Текст] / R.R. Adharapuraru, K.S. Vecchio, F. Jiang, A. Rohatgi // Metallurgical and materials transactions: A. – 2005. – V. 6. – P. 1595–1608.

15. **Евич, Я.И. Температурная зависимость предела текучести сплавов на основе триалюминида титана с L12-решеткой** [Текст] / Я.И. Евич [и др.] // Электронная микроскопия и прочность материалов: сб. науч. тр. – 2009. – № 16. – С. 98–103.

16. **Zhang, F. Grain growth and recrystallization of nano crystalline Al₃Ti prepared by mechanical alloying** [Текст] / F. Zhang [et al.] // Journal of materials science. – 2003. – V. 6. – P. 613–619.

17. **Milman, D.B. Mechanical behavior of Al₃Ti intermetallics and L12 phases on its basis** [Текст] / D.B. Milman [et al.] // Intermetallics. – 2001. – V. 9. – P. 839–845.

18. **Fleischer, R.L. Intermetallic compounds for strong high-temperature materials: status and potential** [Текст] / R.L. Fleischer, D.M. Dimiduk, H.A. Lipsitt // Annual Review of Materials Science. – 1989. – V. 19. – P. 231–263.

19. **Vecchio, K.S. Synthetic Multifunctional Metallic-Intermetallic Laminate Composites** [Текст] / K.S. Vecchio // Journal of the Minerals, Metals and Materials. – 2005. – V. 57. – P. 25–31.

20. **Ильин, А.А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства:** [Текст] справочник / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин. – М.: ВИЛС – МАТИ, 2009. – 520 с.

21. **Titanium'2003: Science and Technology** [Текст] / Proc. 10th World Conf. on

Titanium. – V. 2. – Hamburg, Germany, 2003. – P. 1219–1226.

22. **Физические свойства титана** [Электронный ресурс] // Справочник по цветным металлам: [сайт]. – URL: <http://libmetal.ru/titan/phisproptitan.htm> (дата обращения: 25.04.2018).

23. **Гуськов, М.С. Создание высокопрочного композиционного материала титан – алюминий с перфорированным интерметаллическим слоем и оксидо-керамическим покрытием** [Текст]: дис... канд. тех. наук: 05.02.01: защищена 15.10.15 / Гуськов Максим Сергеевич. – Пенза, 2015. – 151 с.

24. **Титан и его сплавы** [Электронный ресурс] // Студопедия: [сайт]. – URL: <https://studopedia.org/2-158095.html> (дата обращения: 25.04.2018).

25. **Анциферов, В.Н. Композиционные материалы и конструкции на основе титана и его соединений** [Текст]: монография / В.Н. Анциферов [и др.]. – Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики СО РАН, 2001. – 370 с.

26. **Белецкий, В.М. Алюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение** [Текст]: справочник / В.М. Белецкий, А.Г. Кривов. – Киев: КОМИН-ТЕХ, 2005. – 365 с.

27. **Квасов, Ф.И. Промышленные алюминиевые сплавы** [Текст]: справочник / Ф.И. Квасов [и др.]. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.

28. **Свойства алюминия** [Электронный ресурс] // Справочник по цветным металлам: [сайт]. – URL: <http://libmetal.ru/al/al%20prop.htm> (дата обращения: 26.04.2018).

29. **Дробышев, А.И. Качественный атомно-эмиссионный цифровой спектрографический анализ** [Текст]: методические указания / А.И. Дробышев, С.С. Савинов. – СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2014. – 20 с.

30. **Барсуков, В.И. Атомный спектральный анализ** [Текст]: учебное пособие / В.И. Барсуков. – М.: Машиностроение, 2005. – 132 с.

31. **Васильев, В.П. Аналитическая химия (часть 2)** [Текст]: учеб. для вузов / В.П. Васильев. – М.: Дрофа, 2007. – 383 с.

32. Гармаш, А.В. Введение в спектроскопические методы анализа. Оптические методы анализа [Текст]: учебное пособие / А.В. Гармаш. – М.: ВХК РАН, 1995. – 38 с.

33. Крешков, А.П. Основы аналитической химии [Текст]: учеб. для вузов: в 2 т. / А.П. Крешков. – М.: Химия, 1971. – Т. 2. – 456 с.

34. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки [Текст]: ГОСТ 4784–97. – Введ. 2000–06–30. – М.: Стандартиформ, 2009. – 11 с.

35. Трыков, Ю.П. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов [Текст]: учебник / Ю.П. Трыков, Л.М. Гуревич, В.Г. Шморгун. – М.: Metallurgizdat, 2004. – 230 с.

36. Лякишев, Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем [Текст]: справочник: в 3 т. / Н.П. Лякишев [и др.] – М.: Машиностроение, 1996. – Т. 1. – 992 с.

37. *Petrow, G. Ternary Alloys (aluminium-nickel-yttrium)* [Текст] / G. Petrow, G. Effenberg // *ASM International*. – 2005. – V. 8. – P. 58–61.

38. Хансен, М. Структура двойных сплавов [Текст]: справочник: в 2 т. / М. Хансен, К. Андерко. – М.: Metallurgizdat, 1962. – Т. 2. – 210 с.

39. *Shuster, C. Phases and phase relations in the partial system TiAl₃–TiAl* [Текст] / C. Shuster, H. Ipsen // *Zeitschrift fur metallkunde*. – 1990. – V. 6. – P. 389–396.

40. *Kaffner, U.R. Thermodynamic assessment and calculation of the TiAl system* [Текст] / U.R. Kaffner, J.C. Lin, Y.A. Chang // *Metallurgical and materials transactions A*. – 1992. – V. 23. – P. 2081–2090.

41. *Greenberg, B.A. Possible factors affecting brittleness of the intermetallic compound TiAl* [Текст] / B.A. Greenberg, V.I. Anisimov, Y.N. Gornostiev // *Scripta metalla*. – 1988. – V. 22. – P. 859–864.

42. Гринберг, Б.А. Аномалии деформационных характеристик интерметаллида TiAl [Текст] / Б.А. Гринберг [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 1992. – № 4. – С. 24–32.

43. Имаев, Р.М. Механические свойства мелкозернистого интерметаллида TiAl. Хрупко-вязкий переход [Текст] / Р.М. Имаев, О.А. Кайбышев, Г.Ю. Салищев // Физика металлов и металловедение. – 1991. – № 3. – С. 179–187.

44. *Peters, M. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications* [Текст] / M. Peters, C. Leyens. – Wiley: VCH Verlag, 2003. – 532 p.

45. *Yap, L.T. NO_x Oxy-fuel flames for uniform heat transfer* [Текст] / L.T. Yap, M. Pourkashanian // Proceedings the minerals, metals and materials society. – 1996. – V. 1. – P. 655–660.

46. Колачев, Б.А. О влиянии границ зерен на пластичность интерметаллидов [Текст] / Б.А. Колачев, А.А. Ильин, П.Д. Дроздов // Металлы. – 2001. – № 3. – С. 41–48.

47. Польшкин, И.С. Аллюминиды титана и сплавы на их основе [Текст] / И.С. Польшкин, Б.А. Колачев, А.А. Ильин // Технология легких сплавов. – 1997. – № 3. – С. 32–39.

48. Семенов, А.П. Схватывание металлов [Текст]: учебник / А.П. Семенов. – М.: Машгиз, 1958. – 280 с.

49. Дмитриев, Л.Н. Биметаллы [Текст]: монография / Л.Н. Дмитриев [и др.]. – Пермь, 1991. – 415 с.

50. Батаев, А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение [Текст]: учебное пособие / А.А. Батаев, В.А. Батаев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.

51. Куркин, С.Э. Исследование структуры и свойств композиционного материала системы алюминий – титан [Текст] / С.Э. Куркин, М.С. Холин // Вестник науки и образования. – 2015. – № 5. – С. 46–48.

52. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композитных материалов [Текст]: учебное пособие / И.М. Буланов, В.В. Воробей. – Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. – 516 с.

53. **Портной, К.И. Композиционные материалы на никелевой основе** [Текст]: учебник / К.И. Портной, Б.Н. Бабич, И.Л. Светлов. – М.: Металлургия, 1979. – 264 с.

54. **Лысак, В.И. Создание композиционных материалов сваркой взрывом** [Текст] / В.И. Лысак, С.В. Кузьмин // Вестник южного научного центра. – 2013. – № 9. – С. 64–69.

55. **Лысак, В.И. Сварка взрывом** [Текст]: учебное пособие / В.И. Лысак, С.В. Кузьмин. – М.: Машиностроение, 2005. – 543 с.

56. **Ерохин, А.В. Свойства титано-алюминиевых соединений, полученных сваркой взрывом** [Текст] / А. В. Ерохин [и др.] // Сварочное производство. – 1972. – № 7. – С. 26–27.

57. **Тучинский, Л.И. Композиционные материалы, получаемые методом пропитки** [Текст]: учебное пособие / Л.И. Тучинский. – М.: Металлургия, 1986. – 208 с.

58. **Ковтунов, А.И. Исследование технологических и механических свойств слоистых титано-алюминиевых композиционных материалов, полученных жидкофазным способом** [Текст] / А.И. Ковтунов, С.В. Мямин // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № 1. – С. 9–12.

59. **Гуревич, С.М. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов** [Текст]: учебник / С.М. Гуревич, В.Н. Замков, В.Е. Блащук. – Киев: Наукова думка, 1986. – 240 с.

60. **Открытые реестры изобретений** [Электронный ресурс] // ФИПС: [сайт]. – URL: <http://www1.fips.ru/wps/portal/Registers/> (дата обращения: 11.05.2018).

61. **Способ сварки взрывом** [Текст]: пат. 1698017 СССР: МПК В 23 К 20/08 / Ю.Н. Кусов [и др.]; заявители и патентообладатели Волгоградский инженерно-строительный ин-т и Волгоградский политехнический ин-т. – № 4744033/27; заявл. 03.10.89; опубл. 15.12.91, Бюл. № 46. – 2 с.

62. **Способ получения биметаллического материала** [Текст]: пат. 2311274 Рос. Федерация: МПК В 23 К 20/08, В 32 В 7/04 / В.С. Вакин [и др.]; заявители и

патентообладатели ЗАО «Энергометалл», В.С. Вакин. – № 2006129222/02; заявл. 08.08.06; опубл. 27.11.07, Бюл. № 33. – 11 с.

63. Биметалл повышенной прочности и способ его изготовления [Текст]: пат. 2315697 Рос. Федерация: МПК В 32 В 15/01, В 23 К 20/08 / А.З. Богунов [и др.]; заявители и патентообладатели ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», ЗАО «Импульсные технологии». – № 2005104040/02; заявл. 15.02.05; опубл. 20.07.06, Бюл. № 3. – 8 с.

64. Способ изготовления сваркой взрывом плоской биметаллической заготовки [Текст]: пат. 2397850 Рос. Федерация: МПК В 23 К 20/08 / В.С. Вакин, С.В. Бодакин, О.Н. Бессонов; заявители и патентообладатели ЗАО «Энергометалл», В.С. Вакин. – № 2009123391/02; заявл. 11.06.09; опубл. 27.08.10, Бюл. № 24. – 12 с.

65. Способ получения композиционного материала [Текст]: пат. 2407640 Рос. Федерация: МПК В 32 В 15/02, С 22 С 47/20, В 23 К 20/08 / А. Е. Розен [и др.]; заявители и патентообладатели ГОУ ВПО «Пензенский Государственный Университет», ИСМАН РАН, ООО НТЦ «Сура». – № 2008131359/02; заявл. 29.07.08; опубл. 27.12.10, Бюл. № 36. – 8 с.

66. Способ получения композиционного материала титан-алюминий [Текст]: пат. 2463140 Рос. Федерация: МПК В 23 К 20/08, В 32 В 7/04, В 32 В 15/01 / Ю.П.Трыков [и др.]; заявители и патентообладатели ГОУ ВПО «ВолгГТУ». – № 2011114531/02; заявл. 13.04.11; опубл. 10.10.12, Бюл. № 28. – 16 с.

67. Способ получения изделий с внутренними полостями сваркой взрывом [Текст]: пат. 2486043 Рос. Федерация: МПК В 23 К 20/08, В 23 К 101/14 / Ю.П. Трыков [и др.]; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВПО «ВолгГТУ». – № 2012118875/02; заявл. 04.05.12; опубл. 27.06.13, Бюл. № 18. – 19 с.

68. Способ получения покрытия [Текст]: пат. 2486999 Рос. Федерация: МПК В 23 К 20/08, С 23 С 26/00 / Ю.П. Трыков [и др.]; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВПО «ВолгГТУ». – № 2012118293/02; заявл. 03.05.12; опубл. 10.07.13, Бюл. № 19. – 13 с.

69. **Способ получения композиционного материала** [Текст]: пат. 2525205 Рос. Федерация: МПК В 32 В 7/04, В 32 В 15/01, В 23 К 20/08 / А.Е. Розен [и др.]; заявители и патентообладатели ООО ИТЦ «Сварка». – № 2013119389/02; заявл. 26.04.13; опубл. 20.07.14, Бюл. № 20. – 9 с.

70. **Способ получения композиционных изделий с внутренними полостями сваркой взрывом** [Текст]: пат. 2526357 Рос. Федерация: МПК В 23 К 20/08, В 23 К 101/04 / Л.М. Гуревич [и др.]; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВПО «ВолгГТУ». – № 2013121873/02; заявл. 13.05.13; опубл. 20.08.14, Бюл. № 23. – 16 с.

71. **Крюков, Д.Б. Создание композиционных материалов на основе Ti_3Al с применением сварки взрывом и последующей термообработки** [Текст]: материалы II Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых / Д.Б. Крюков, М.С. Гуськов. – Пенза: Изд-во Пензенского гос. ун-та, 2012. – 1064 с.

72. **Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников** [Текст]: ГОСТ 9450-76. – Введ. 1977-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 13 с.

73. **Рябов, В.Р. Сварка разнородных металлов и сплавов** [Текст] / В.Р. Рябов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 239 с.

74. **Металлы. Методы испытаний на растяжение** [Текст]: ГОСТ 1497– 1984. – Введ. 1986-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 27 с.

75. **Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах** [Текст]: ГОСТ 9454–1978. – Введ. 1979-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 14 с.

Приложение А

					ПГУ.ВКР.22.03.01.14МТ107.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

Таблица А1 – Результаты патентного поиска

Номер и название охранного документа	Страна выдачи патента, индекс классификации, дата приоритета, заявитель, патентообладатель	Цель создания технического решения, чем достигается
1	2	3
1698017 Способ сварки взрывом	СССР МПК В23К 20/08 Дата приоритета: 03.10.1989 Заявители: Кусков Ю.Н., Трыков Ю.П. и др. Патентообладатели: ВИСИ, ВПИ	<i>Цель:</i> повышение жесткости полученной конструкции. <i>Достигается</i> выполнением диагональных надрезов в неподвижном элементе и приданием им различной ориентации.
2311274 Способ получения биметаллического материала	Российская Федерация МПК В23К 20/08, В32В 7/04 Дата приоритета: 08.08.2006 Заявители: Вакин В.С., Бодакин С.В. и др. Патентообладатели: ЗАО «Энергометалл», Вакин В.С.	<i>Цель:</i> повышение прочности соединения разнородных поверхностей. <i>Достигается</i> за счет повышения однородности поверхностей при подготовке их перед соединением.
2315697 Биметалл повышенной прочности и способ его изготовления	Российская Федерация МПК В32В 15/01, В23К 20/08 Дата приоритета: 15.02.2005 Заявитель: Богунов А.С., Кузовников А.А. и др. Патентообладатели: ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», ЗАО «Импульсные технологии»	<i>Цель:</i> повышение прочности биметаллического соединения. <i>Достигается</i> выполнением соединения металлов типа «пласточкин хвост» сваркой взрывом с использованием металлической прослойки.
2397850 Способ изготовления сваркой взрывом плоской биметаллической заготовки	Российская Федерация МПК В23К 20/08 Дата приоритета: 11.06.2009 Заявители: Вакин В.С., Бодакин С.В., Бессонов О.Н. Патентообладатели: ЗАО «Энергометалл», Вакин В.С.	<i>Цель:</i> повышение прочности и качества соединения. <i>Достигается</i> размещением демпфирующих средств под неподвижной пластиной.
2463140 Способ получения композиционного материала титан-алюминий	Российская Федерация МПК В23К 20/08, В32В 7/04, В32В 15/01 Дата приоритета: 13.04.2011 Заявители: Трыков Ю.П., Писарев С.П. и др. Патентообладатель: ГОУ ВПО «ВолГТУ»	<i>Цель:</i> повышение износостойкости получаемого композита <i>Достигается</i> формированием интерметаллида между соединяемыми металлами

Продолжение таблицы А1

1	2	3
2486043 Способ получения изделий с внутренними полостями сваркой взрывом	Российская Федерация МПК В23К 20/08, В23К 101/14 Дата приоритета: 04.05.2012 Заявители: Трыков Ю.П., Писарев С.П. и др. Патентообладатели: ФГБОУ ВПО «ВолГТУ»	<i>Цель:</i> повышение жаростойкости и теплозащитных свойств получаемого композита <i>Достигается</i> переводом всего слоя алюминия в интерметаллическую прослойку
2486999 Способ получения покрытия	Российская Федерация МПК В23К 20/08, С23С 26/00 Дата приоритета: 03.05.2012 Заявитель: Трыков Ю.П., Шморгун В.Г. и др. Патентообладатель: ФГБОУ ВПО «ВолГТУ»	<i>Цель:</i> повышение жаростойкости материала <i>Достигается</i> формированием между соединяемыми слоями интерметаллидных прослоек
2522505 Способ получения сварного соединения разнородных металлических материалов	Российская Федерация МПК В23К 20/08, В32В 7/04, В32В 15/01 Дата приоритета: 26.04.2013 Заявители: Розен А.Е., Крюков Д.Б. и др. Патентообладатель: ООО ИТЦ «Сварка»	<i>Цель:</i> повышение модуля упругости и предела прочности материала <i>Достигается</i> выполнением армирующего металла в виде перфорированных листов со сквозными каналами, распределенными равномерно по площади листов
2526357 Способ получения композиционных изделий с внутренними полостями сваркой взрывом	Российская Федерация МПК В23К 20/08, В23К 101/04 Дата приоритета: 13.05.2013 Заявитель: Гуревич Л.М., Шморгун В.Г. и др. Патентообладатель: ФГБОУ ВПО «ВолГТУ»	<i>Цель:</i> повышение жаростойкости материала <i>Достигается</i> проведением технологического цикла, обеспечивающего появление сплошного интерметаллического слоя между слоями
2407640 Способ получения композиционного материала	Российская Федерация МПК В23К 20/08, В32В 15/02, С22С 47/20 Дата приоритета: 29.07.2008 Заявители: Розен А.Е., Лось И.С. и др. Патентообладатели: ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет», ИСМАН РАН, НТЦ «Сура»	<i>Цель:</i> повышение физико-механических свойств материала, в частности модуля упругости и предела прочности <i>Достигается</i> использованием слоев металла-основы в виде листов, а слоев армирующего металла – в виде фрагментов полос или проволоки

Приложение Б

					ПГУ.ВКР.22.03.01.14МТ107.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

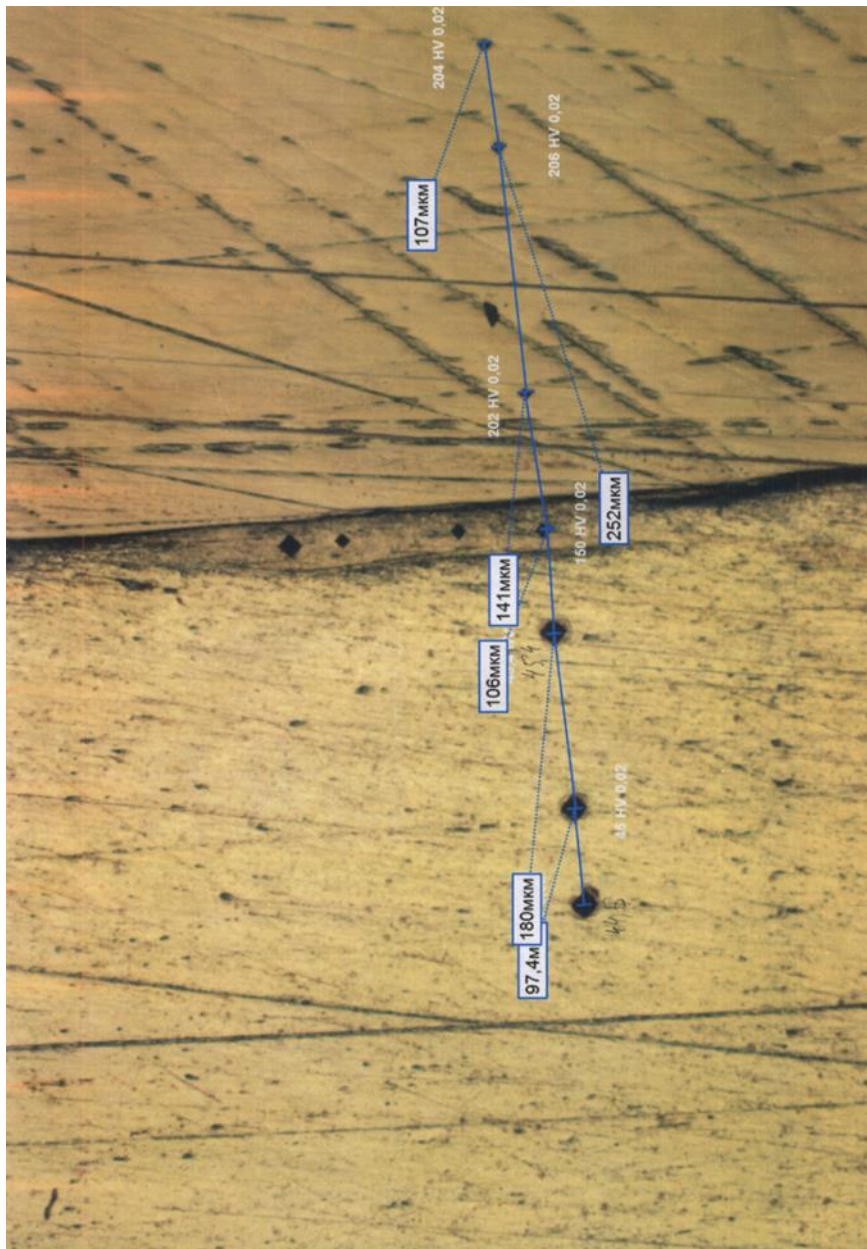


Рисунок Б1 – Результаты измерения микротвердости

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ.ВКР.22.03.01.14МТ107.ПЗ

Приложение В

					ПГУ.ВКР.22.03.01.14МТ107.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

МАШИНА ИР 5145-500
ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЯ

Поместите дополнительные сведения в файл Header.txt, который находится в папке программы, и они автоматически будут добавляться в каждый протокол. Имя файла можно изменить по команде Анализ\Параметры.

Партия	№ 1
Образец	№ 1
Наименование	СКМ Ti-Al
Марка	BT1-0 - АД1
Состояние	0
Стандарт 1	ГОСТ 1497-84
Вид испытания	растяжение
Дата	20.04.2018 15:52:01
Скорость	50,0 мм/мин
Температура	23,0 °C
Тип датчика	500000 Н
Оператор	Дормидонов
Примечание	Разрыв в расчетной зоне
Размеры плоского образца:	
- толщина	2,20; ширина 20,20 мм
- сечение	44,44 мм ²
- рабочая длина	70,00 мм
- расчетная длина	50,00 мм
Размеры после испытания:	
- толщина	1,50; ширина 18,80 мм
- сечение	28,2 мм ²
- рабочая длина	76,00 мм
- расчетная длина	53,00 мм
- удлинение после разрыва	6,000 %; (3,000 мм)
- сужение сечения	36,54 %
Расчет по перемещению:	
Временное сопротивление	590,46 МПа; (26240 Н)
Пределы текучести:	
- физические	отсутствуют
- условный (пластическая деформация 0,20%)	552,86 МПа; (24569 Н)
Условное сопротивление разрыву	200,95 МПа; (8930 Н)
Истинное сопротивление разрыву	316,67 МПа; (8930 Н)

Поместите дополнительные сведения (например, требования технической и конструкторской документации) в файл Footer.txt,

Рисунок В1 – Протокол испытания композита на растяжение

Приложение Г

					ПГУ.ВКР.22.03.01.14МТ107.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

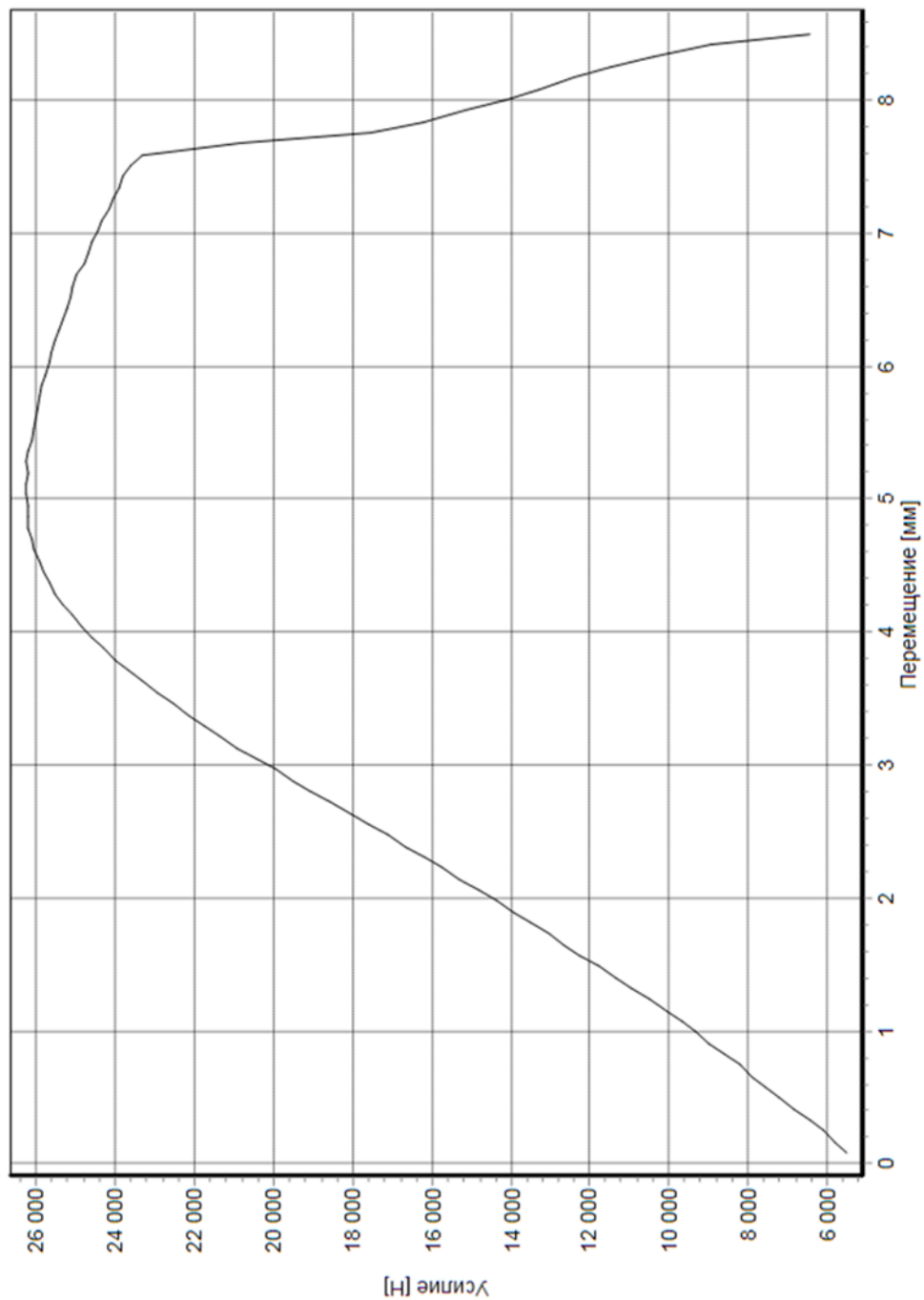


Рисунок Г1 – Диаграмма растяжения композита

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ.ВКР.22.03.01.14МТ107.ПЗ

Лист

64

Приложение Д

					<i>ПГУ.ВКР.22.03.01.14МТ107.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>65</i>



ФГБОУ ВО ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Факультет машиностроения и транспорта
Кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

Разработка технологии получения трехслойного титано-
алюминиевого композиционного материала с промежуточным
перфорированным слоем

Выполнил: студент гр. 14MT1

Дормидонов А.А.

Руководитель: д.п.н., профессор

Мещеряков А.С.

Пенза, 2018

Объект исследования – трехслойный титано-алюминиевый композиционный материал с промежуточным перфорированным слоем.

Предмет исследования – взаимосвязь между параметрами получения композиционного материала и его свойствами.

Цель работы – исследование технологии получения трехслойного титано-алюминиевого композиционного материала с промежуточным перфорированным слоем.

Задачи работы:

- ✓ провести аналитический обзор структуры и свойств титана ВТ1-0 и алюминия АД1, выявить взаимодействие исходных компонентов и определить тип интерметаллида на границе раздела;
- ✓ провести теоретический обзор способов получения титано-алюминиевых композиционных материалов;
- ✓ осуществить патентный поиск на предмет улучшения характеристик титано-алюминиевых композиционных материалов;
- ✓ определить свойства (химический состав, микроструктуру, значение механических свойств и микротвердости) слоистого композиционного материала.

Таблица 1 – Механические свойства исходных металлов

Марка металла	Механические свойства при 20 °С							
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	HV, МПа	E, МПа	G, МПа
BT1-0	460,0	370,0	35,0	63,0	120,0	147,0	1120,0	410,0
АД1	145,0	40,0	35,0	89,0	90,0	70,0	710,	270,0

Таблица 2 – Химический состав исходных металлов

Марка металла	Содержание элементов, %								
	Ti	Fe	C	Si	Примеси				
BT1-0	99,4	0,2	0,1	0,1	0,2				
Марка металла	Содержание элементов, %								
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Примеси
АД1	98,5	0,3	0,3	0,05	0,01	0,03	0,03	0,05	0,7

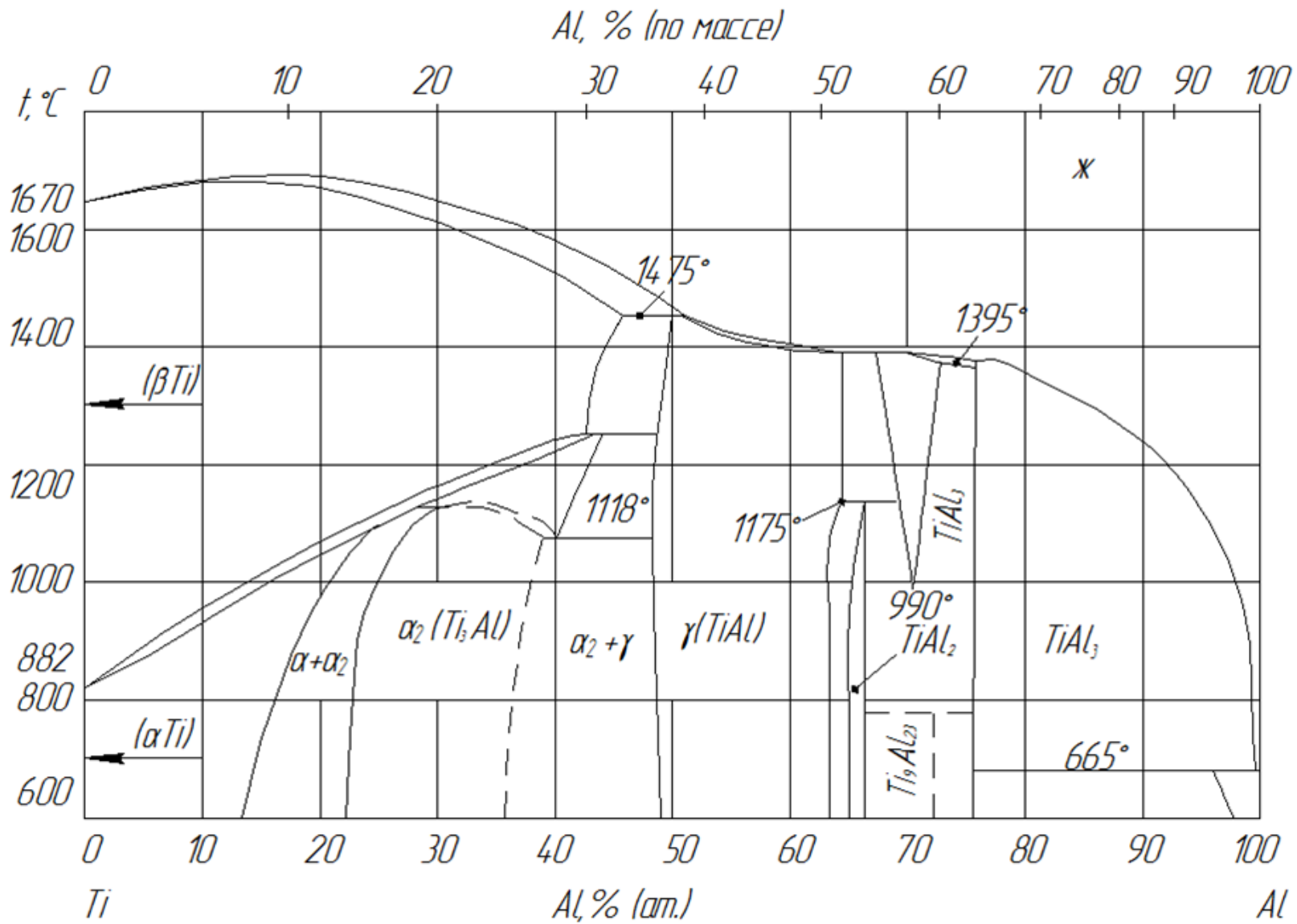


Рисунок 1 – Диаграмма состояния «титан – алюминий»

Способы получения слоистых титано-алюминиевых композиционных материалов

- ✓ прокатка;
- ✓ диффузионная сварка;
- ✓ сварка взрывом;
- ✓ самопроизвольная пропитка.

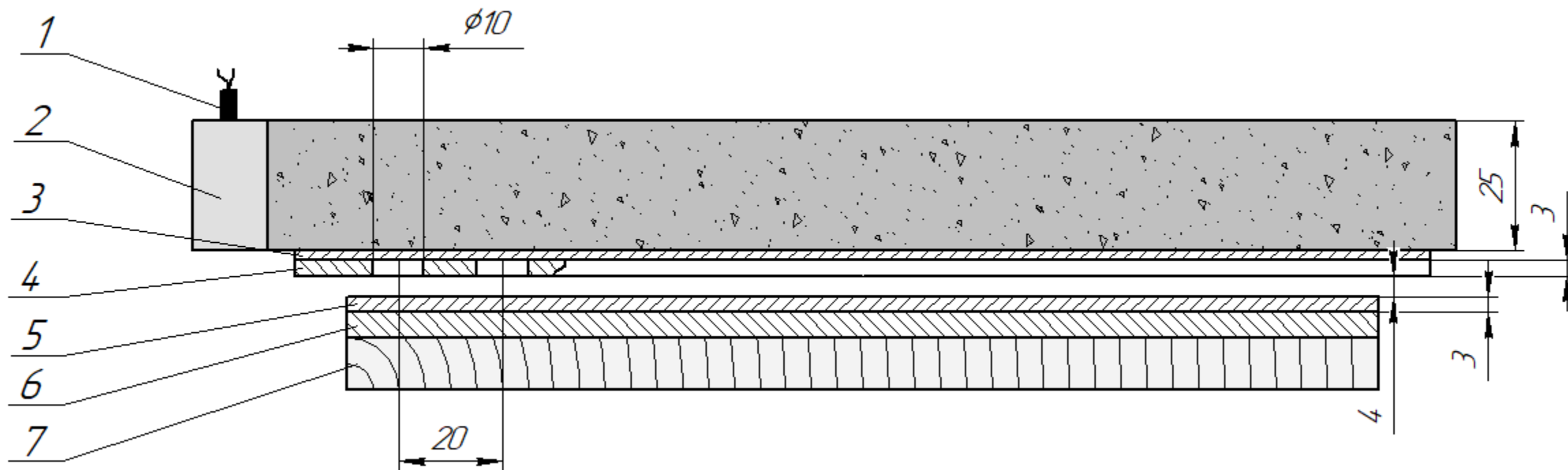


Рисунок 2 – Применявшаяся схема сварки взрывом: 1 – электродетонатор; 2 – заряд ВВ; 3 – фальш-пластина (сталь Ст3); 4 – перфорированная метаемая пластина (АД1); 5 – неподвижная пластина (ВТ1-0); 6 – подложка (сталь Ст3); 7 – опора (слой ДСП)

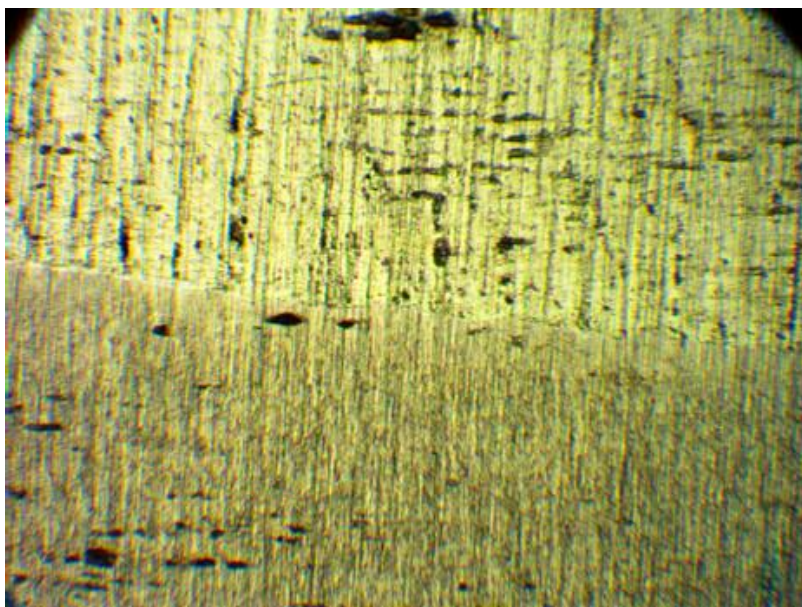


а)

б)

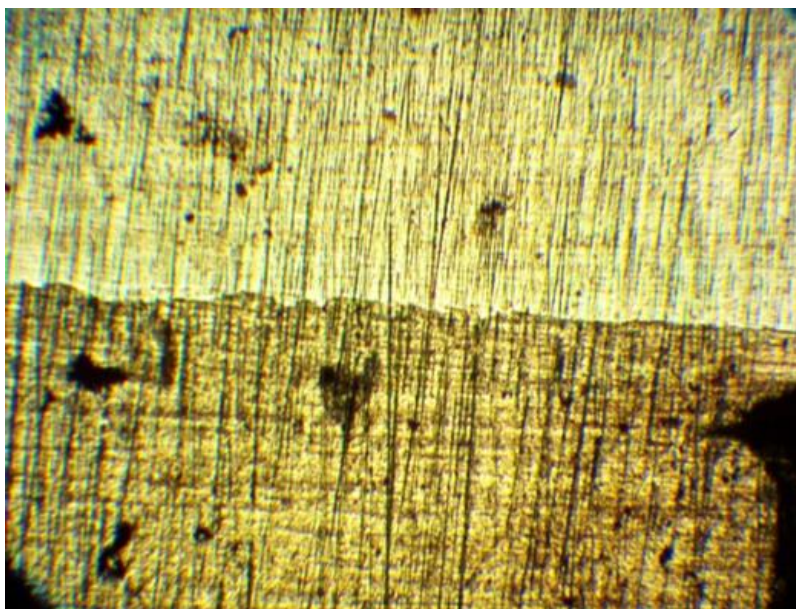
в)

Рисунок 3 – Общий вид образцов для металлографических исследований: *а)* – образец №1; *б)* – образец №2; *в)* – образец №3



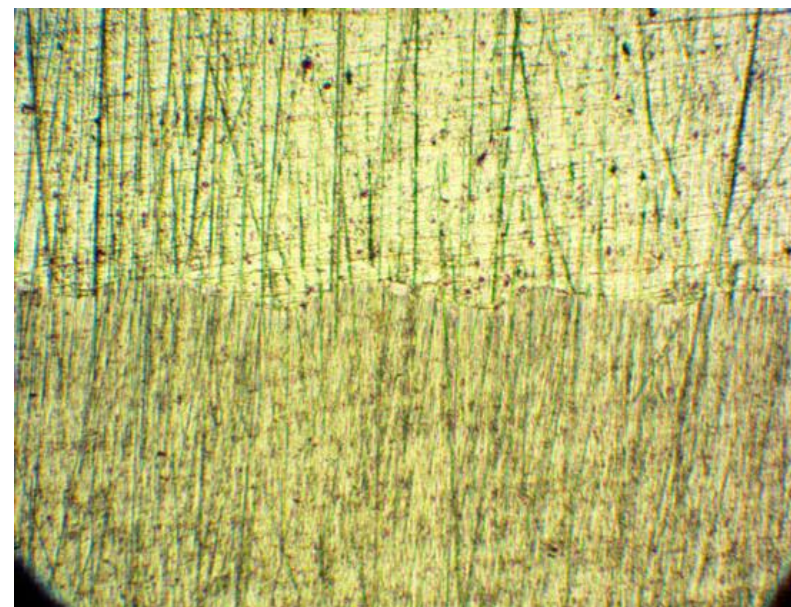
x100

а)



x100

б)



x100

в)

Рисунок 4 – Микроструктура образцов (вверху – алюминий, внизу – титан): *а)* – образец №1; *б)* – образец №2; *в)* – образец №3. На границе раздела металлов выявлена интерметаллическая прослойка

Таблица 3 – Измерение толщины интерметаллидного слоя на образцах (×400)

Номер образца	Толщина интерметаллида, мкм
1	20,1...26,3
2	16,0...22,2
3	6,2...10,1

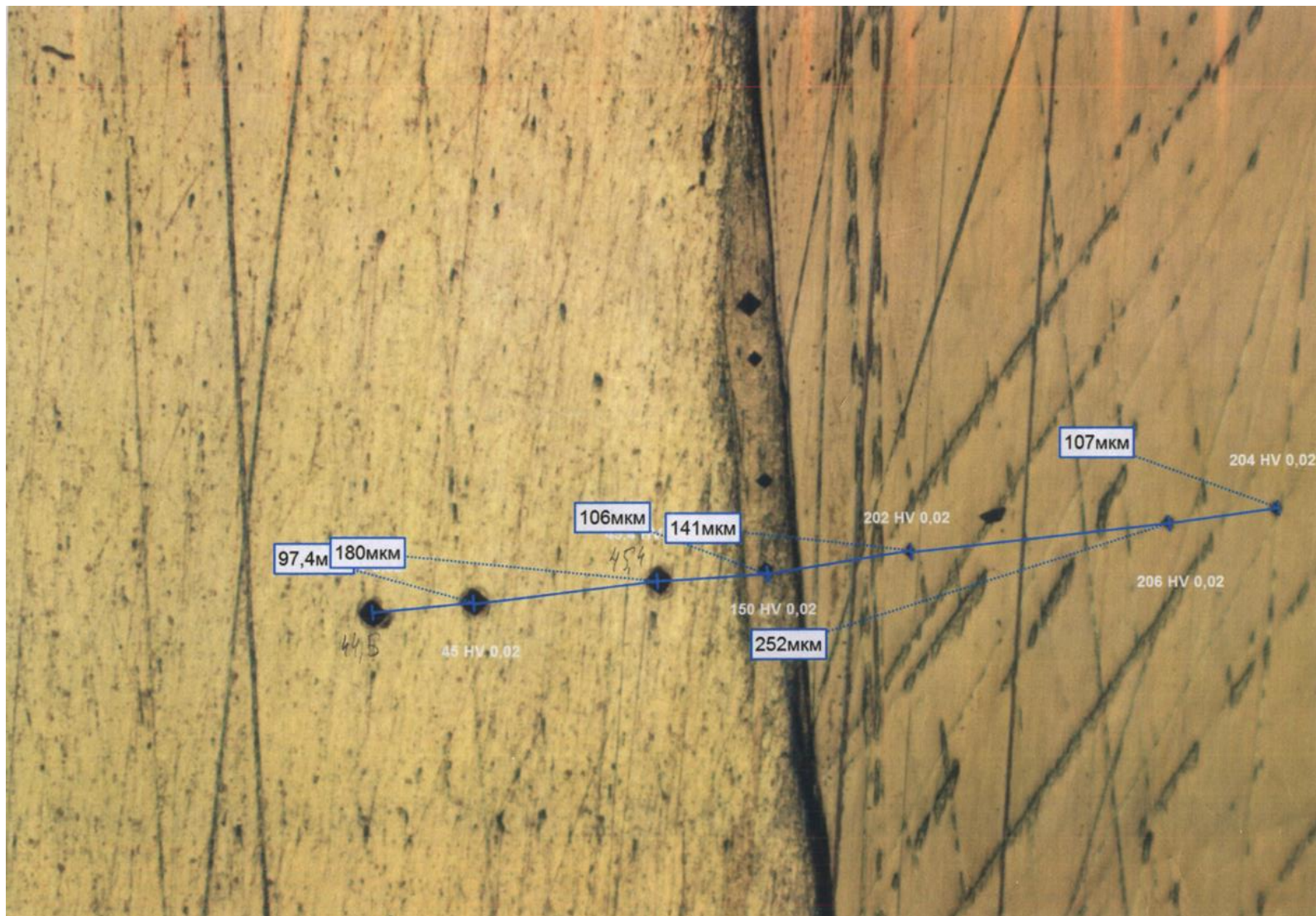
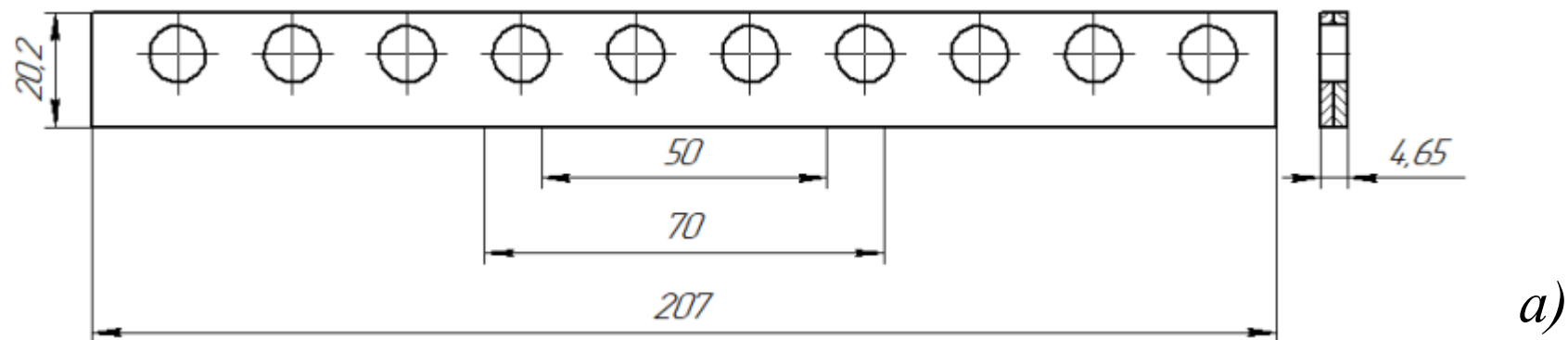


Рисунок 5 – Результаты измерения микротвердости



а)



б)

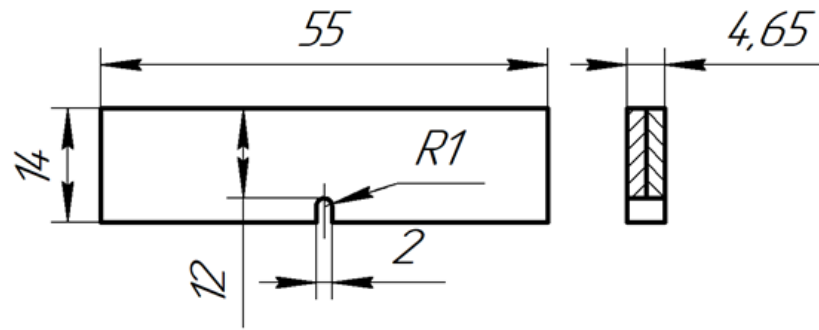


в)

Рисунок 6 – Общий вид образца для испытания на растяжение: а) – размеры образца, мм; б) – вид до испытания; в) – вид после испытания

Таблица 4 – Сравнение прочностных и пластических свойств
композита и исходных металлов

Материал	Механические свойства при 20°С			
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
СКМ ВТ1-0 – АД1	590,5	522,9	6,0	36,5
ВТ1-0	460,0	370,0	35,0	63,0
АД1	145,0	40,0	35,0	60,0



а)



б)



в)

Рисунок 7 – Общий вид образцов для испытания на ударный изгиб: а) – размеры образцов, мм; б) – вид образца №1 до испытания; в) – вид образца №3 после испытания

Основные выводы по работе

- ✓ Выполнен аналитический обзор структуры и свойств титана ВТ1-0 и алюминия АД1, описано взаимодействие исследуемых материалов. Определены возможные типы интерметаллидов, которые могут быть образованы на границе раздела титана и алюминия (TiAl , Ti_3Al , TiAl_2 , TiAl_3 , $\text{Ti}_9\text{Al}_{23}$).
- ✓ Проведен обзор методов получения титано-алюминиевых слоистых композиционных материалов. Наиболее рациональным является применение сварки взрывом.
- ✓ Осуществлены патентные исследования по разнородным, в том числе титано-алюминиевым, композиционным материалам, полученным по технологии сварки взрывом. Были отобраны 10 патентов по улучшению прочности, жесткости, жаростойкости, износостойкости композиционных материалов, полученных сваркой взрывом.
- ✓ Изучена микроструктура полученного слоистого композиционного материала с промежуточным перфорированным слоем. На образце, вырезанном в направлении, совпадающим с направлением прохождения точки контакта, выявлена волнообразная конфигурация границы раздела, характерная для соединений, полученных сваркой взрывом. Также была обнаружена интерметаллическая прослойка на границе раздела исходных металлов, что подтвердило предположение о том, что при использовании форсированных режимов возможно образование химических соединений.
- ✓ Проведены механические испытания исследуемого композиционного материала. Выяснилось, что композит превосходит исходные металлы по прочностным характеристикам (в ходе механических испытаний было получено значение предела прочности σ_b для композита на уровне 590,5 МПа, у ВТ1-0 и АД1 эти показатели равны 460,0 и 145,0 МПа соответственно; условного предела текучести композита $\sigma_{0,2}$ 522,9 МПа, у ВТ1-0 и АД1 эти характеристики соответствуют значениям 370,0 и 40,0 МПа соответственно), однако уступа-ет им по таким свойствам, как пластичность (у композита с промежуточным перфорированным слоем относительное удлинение получили равным 6 %, относительное сужение 36,5 %, при этом, аналогичные показатели ВТ1-0 составили 35,0 и 63,0 %, а у АД1 – 35,0 и 60,0 %) и ударная вязкость (68,9 Дж/см² у композита с промежуточным перфорированным слоем против 120,0 Дж/см² у ВТ1-0 и 90,0 Дж/см² у АД1).