

*На правах рукописи*



**Бочкарев Александр Геннадьевич**

***ФОРМИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ  
АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА ПРИ АРГОНОДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ  
ТОРЦЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТИТАНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ***

2.5.8

Сварка, родственные процессы и технологии  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Волгоград 2023

Работа выполнена на кафедре «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы» ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»

Научный руководитель доктор технических наук, доцент,  
**КОВТУНОВ Александр Иванович.**

Официальные оппоненты: **КОБЕРНИК Николай Владимирович,**  
доктор технических наук, доцент, ФГАУ  
«Научно-учебный центр «Сварка и контроль»  
при МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва),  
директор;

**СЛАУТИН Олег Викторович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
Волгоградский государственный технический  
университет (г. Волгоград), кафедра  
«Материаловедение и композиционные  
материалы», доцент.

Ведущая организация ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург).

Защита состоится 04 июля 2023 г. в 10<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета 24.2.282.02, созданного на базе Волгоградского государственного технического университета по адресу: 400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского государственного технического университета и на сайте <https://www.vstu.ru> по ссылке:

<https://www.vstu.ru/upload/iblock/b2d/b2dd7c91d0b5ced458e95bdfd5b655d7.pdf>

Автореферат разослан « 15 » мая 2023 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета



Хаустов Святослав Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Сплавы на основе алюминидов титана являются новым перспективным классом материалов, сочетающим в себе высокое соотношение прочность/плотность, жаропрочность, стойкость к окислению, коррозии и ползучести, а также хорошие усталостные характеристики. Вопросами исследования структуры и свойств алюминидов титана занимались *Б.А. Гринберг, В.П. Ротштейн, В.В. Будилов, В.Г. Шморгун, Л.М. Гуревич, С.А. Пячин, А.М. Ускенбаева, И.Н. Малютина, Д.В. Лазуренко, Э.Л. Варданян, С. Leyens, A.S. Ramos, A. Hirose, B. Guo, S. PalDey, P. Staron, S. Adachi, B. Carcel, Junwei Duan, L. Kong, J. Cizek, L. Shen и др.*

Интерметаллидные сплавы системы титан-алюминий могут успешно применяться для формирования поверхностных слоев на изделиях из титана и титановых сплавов, применяемых в химической и нефтехимической промышленности, от которых требуются повышенные показатели износостойкости с высокой коррозионной стойкостью. Однако низкая пластичность алюминидов титана и свойственная интерметаллидам хрупкость, особенно при комнатной температуре, ограничивают их применение в качестве конструкционных материалов. В работах авторов *О.Б. Деменова, В.М. Имаева, И.В. Зорина, И.Р. Мухаммадеева, В.Г. Анташева, В.И. Иванова, К.К. Ясинского, Н.В. Сысоевой, Т. Takahashi, F. Yang, Tae-Kyu Kim, L. Xi, I. Kaban, Shaik E. Hoosain, Lei Huang, F. Appel, C. Leyens, R. Wagner, C.R. Feng, M. Hagiwara* для повышения трещиностойкости, механических и эксплуатационных свойств алюминидов титана предлагают легирование (Nb, Ni, Cu, Si, Zr и др.), модифицирование (B, WC) и формирование оптимальной микроструктуры. Несмотря на накопленный объем научной информации, вопросы влияния параметров процесса наплавки, состава, структуры и трещиностойкости алюминидов титана остаются малоизученными.

С учетом опыта применяемых на практике методов повышения технологических, механических и эксплуатационных свойств титановых изделий целесообразно использовать технологию аргонодуговой наплавки неплавящимся электродом. Применение этого процесса особенно актуально при наплавке на титановые изделия, когда для формирования бездефектной структуры на участках термического влияния и наплавленного металла с требуемым фазовым составом необходимы более эффективные, чем погонная энергия наплавки, параметры управления режимом, что может быть достигнуто варьированием скоростью подачи присадочных проволок в жидкометаллическую сварочную ванну.

Актуальность выбранной темы диссертационного исследования подтверждается его выполнением в рамках гранта РФФИ № 17-48-630361 р\_а, № 19-38-90097 Аспиранты.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является повышение износостойкости и трещиностойкости наплавленных сплавов на основе алюминидов титана за счет управления режимами наплавки и химическим составом наплавленного металла.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Разработка методики исследования процессов формирования на титане наплавленных алюминидов титана, их структуры и свойств при аргонодуговой наплавке с алюминиевой присадочной проволокой.

2. Исследование влияния режимов и химического состава присадочных материалов при аргонодуговой наплавке на процессы формирования, химический состав, структуру и свойства наплавленных алюминидов титана на титане.

3. Разработка методики расчета химического состава наплавленного металла при заданных режимах наплавки.

4. Разработка технологических рекомендаций по аргодуговой наплавке сплавов на основе алюминидов титана с заданным химическим составом и эксплуатационными свойствами.

**Научная новизна** заключается в выявлении при аргодуговой наплавке титана с применением алюминиевой присадочной проволоки закономерностей формирования наплавленных на основе алюминидов титана валиков, их структуры и свойств.

Установлено, что при обеспечении соотношения объемного расхода алюминиевой присадочной проволоки к объему жидкометаллической титановой ванны  $q_{Al} / q_{Ti}$  в диапазоне 0,2-2 в процессе аргодуговой наплавки формируются наплавленные валики со стабильными геометрическими параметрами, однородным химическим и фазовым составом при содержании алюминия 11,5-49 масс. % на основе фаз:  $\alpha(Ti)+\alpha_2(Ti_3Al)$ ;  $\alpha_2(Ti_3Al)$ ;  $\alpha_2(Ti_3Al)+\gamma(TiAl)$ ;  $\gamma(TiAl)$ .

Показано, что максимальные значения относительной износостойкости наплавленного металла достигаются в более узком диапазоне (0,35-0,66) соотношения  $q_{Al} / q_{Ti}$ , вследствие формирования его структуры на основе фаз:  $\alpha(Ti)+\alpha_2(Ti_3Al)$  или  $\alpha_2(Ti_3Al)$ .

Выявлено, что дополнительное легирование цирконием при аргодуговой наплавке сплавов на основе алюминидов титана с содержанием алюминия до 19 масс. % и циркония с 2 до 9 масс. % повышает трещиностойкость наплавленных сплавов вследствие растворения циркония в  $\alpha_2(Ti_3Al)$ -фазе и повышении ее пластичности, что обеспечивает формирование наплавленных валиков на основе алюминидов титана без образования трещин при сохранении высоких показателей твердости и износостойкости.

**Практическая значимость.** На основании проведенных исследований разработана технология аргодуговой наплавки изделий из титана и титановых сплавов с применением алюминиевой присадочной проволоки. Разработано программное обеспечение для расчета режимов аргодуговой наплавки для получения требуемого химического состава наплавленного металла.

Предложены способы повышения трещиностойкости наплавленного металла за счет легирования Zr и Nb, а также предварительного подогрева титана.

На уровне изобретений разработаны способы получения износостойких и жаростойких покрытий на основе алюминидов титана (патенты РФ № 2699474, 2731399, 2783836).

Производственные испытания разработанного программируемого оборудования для наплавки сложных профилей и технологии наплавки сплавов на основе алюминидов титана на титан в условиях ООО «Гольяттикаучук» показали, что ресурс работы наплавленных изделий повышается в 2-2,4 раза.

**Достоверность полученных результатов** обеспечена применением современных методов исследования и аппаратуры, включая стандартные и оригинальные методики: растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, измерения геометрических параметров наплавленных валиков, измерения твердости и микротвердости, испытания на абразивное изнашивание при трении о жестко закрепленные абразивные частицы и др.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на:

1. Международной научно-практической конференции «Сварка и контроль 2018», Пермь, 2018 г.
2. Международной научно-технической конференции «Пайка -2018», Тольятти, 2018 г.
3. Всероссийской научно-технической конференции «Инновации в машиностроении», Тольятти, 2020 г.
4. II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Современные проблемы материаловедения», Липецк, 2021 г.
5. Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития сварочного производства России», Уфа, 2021 г.
6. I Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности», Могилев, 2022 г.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 29 печатных работ, из них: 1 статья, индексируемая наукометрической базой Scopus, 11 статей в российских периодических рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ. Получено 3 патента РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы, включающего 132 наименования. Объем основной части работы состоит из 171 страниц машинописного текста, 157 рисунков, 12 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** раскрыта актуальность исследования и сформулирована цель работы.

**В первой главе** представлен обзор диаграммы состояния Ti-Al. Рассмотрены механические и эксплуатационные свойства интерметаллидных сплавов системы Ti-Al, показано влияние структуры на механические свойства интерметаллидных сплавов системы титан-алюминий. Приведены основные способы повышения технологических и эксплуатационных свойств (легирование, модифицирование, управление структурой покрытия) интерметаллидных сплавов системы титан-алюминий. Проанализированы легирующие элементы и их растворимость в алюминидов титана.

Рассмотрено влияние легирующих, модифицирующих элементов, а также влияние термической обработки на механические и эксплуатационные свойства алюминидов титана.

Учитывая недостатки титана и алюминидов титана, а также методы повышения свойств интерметаллидных сплавов, указано на целесообразность использования алюминидов титана в качестве материала для формирования поверхностных слоев изделий из титана и его сплавов, работающих в химической и нефтехимической промышленности. Применение алюминидов титана в качестве защитных покрытий позволит повысить срок службы и расширить область применения титана.

Проведен обзор способов формирования интерметаллидных покрытий системы титан-алюминий, рассмотрены достоинства и недостатки данных способов. Предложено для формирования на поверхности титана слоев алюминидов титана, с учетом применяемых на практике методов повышения их технологических, механических и эксплуатационных свойств, использовать аргонодуговую наплавку

неплавящимся электродом с подачей алюминиевой присадочной проволоки в жидкометаллическую сварочную ванну.

Сформулированы задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели.

**Во второй главе** представлена методика исследования процессов аргонодуговой наплавки и свойств наплавленных интерметаллидных сплавов.

Исследования процессов аргонодуговой наплавки интерметаллидных сплавов системы титан-алюминий производили на автоматической портальной установке с двухкоординатной осью перемещения. Для наплавки интерметаллидных сплавов системы титан-алюминий применялась присадочная проволока Св-А5 диаметром 1,2 мм. Для легирования кремнием применялись сварочные проволоки Св-АК5, Св-АК12 диаметром 1,2 мм. Для введения марганца применялась проволока Св-АМц диаметром 1,2 мм. Схема наплавки проволоками Св-А5, Св-АК5, Св-АК12 и Св-АМц представлена на рис. 1а.

Для легирования: ниобием, никелем, медью, цирконием применялись дополнительные присадочные проволоки. При легировании ниобием – проволока Нб-1 ( $\varnothing$  1,5 мм), никелем - проволока НП2 ( $\varnothing$  1,2 мм), медью – проволока М1 ( $\varnothing$  1,0 мм), цирконием - проволока R702 ( $\varnothing$  1,2 мм). Схема наплавки данными материалами приведена на рис. 1б.

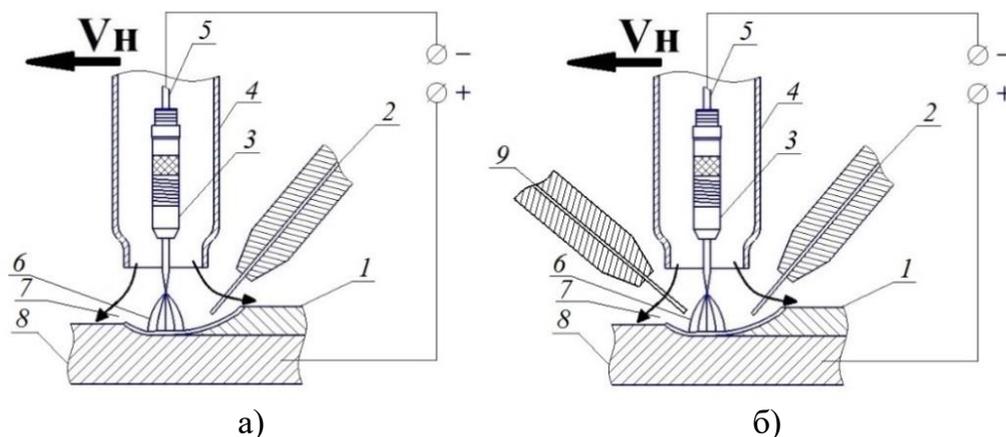


Рис. 1. Схема при введении легирующего элемента: а) в составе алюминиевой присадочной проволоки б) в виде дополнительной легированной присадочной проволоки

где: 1 – наплавленный валик, 2 – присадочная проволока (алюминиевая), 3 – держатель цанги, 4 – керамическое сопло, 5 – вольфрамовый электрод, 6 – сварочная дуга, 7 – защитная газовая атмосфера, 8 – основной металл, 9 – дополнительная присадочная проволока

Качество наплавленного валика определяли методами визуального и измерительного контроля, оценивая при этом качество поверхности, стабильность геометрических параметров наплаваемого валика по всей длине. Склонность к образованию трещин оценивалась по суммарной площади поверхностных трещин ( $\Sigma S$ , мм<sup>2</sup>) на контролируемом участке наплавки (150 мм). Суммарная площадь поверхностных трещин рассчитывалась исходя из количества, длины трещин и ширины их раскрытия.

Исследование химического и фазового состава проводили методами рентгеноспектрального и рентгенофазового анализа.

Оценку адгезионных свойств интерметаллидного слоя проводили методом царапания (скетч-тестирование) при помощи микротвердомера ПМТ-3М.

Твердость наплавленных покрытий измеряли в соответствии с ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86) Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. Измерения проводились по шкале HRC, на твердомере HBRV – 187.5.

Износостойкость наплавленных образцов оценивали при испытании на трение образцов о закрепленные абразивные частицы по ГОСТ 17367-71.

**В третьей главе** приведены результаты исследования процессов формирования, химического, фазового состава и свойств наплавленных бинарных сплавов системы Ti-Al.

Наплавка интерметаллидных сплавов системы титан-алюминий производилась на следующих режимах: скорость наплавки варьировалась от 0,1 до 0,2 м/мин. Скорость подачи присадочных проволок изменялась от 1 м/мин до 6 м/мин. Наплавку производили на постоянном токе прямой полярности. Ток дуги изменялся в диапазоне от 200 до 300 А. Наплавка производилась с подачей присадочной проволоки в хвостовую часть сварочной ванны. По осциллограммам потенциала на проволоке относительно изделия определено, что при скорости подачи 1 м/мин, происходит капельный перенос металла с частотой около 3.5 Гц, плавления в сварочной ванне не происходит. При скорости подачи присадочной проволоки 2 м/мин и более наблюдаются плавление присадочного металла в сварочной ванне. Данный диапазон режимов обеспечивает стабильное формирование геометрических параметров наплавленных валиков (рис. 2).

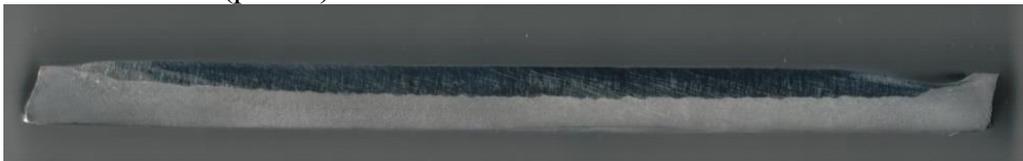


Рис. 2. Поперечный разрез наплавленного валика ( $I_n = 270$  А,  $V_n = 0,15$  м/мин.,  $V_{п/пш} = 2$  м/мин)

Ширина наплавленного валика составляла 13,7-23,5 мм. Зависимость ширины валика от режимов наплавки описывается уравнением регрессии:

$$e = 10,66 + 0,57 V_{п/пш Al} - 86,75 V_n + 0,0685 I_n$$

Высота наплавленного валика изменялась в пределах 1,3-4,5 мм в соответствии с уравнением регрессии:

$$g = 2,79 + 0,55 V_{п/пш Al} - 14,95 V_n - 0,0018 I_n$$

Глубина проплавления составляла 3,1-5,7 мм и изменялась в зависимости от режимов по уравнению регрессии:

$$h = -6,19 - 0,0369 V_{п/пш Al} - 3,78 V_n + 0,0425 I_n$$

Исследование химического состава наплавленных интерметаллидных сплавов показали, что содержание алюминия зависит и изменяется от режимов наплавки. Среднее содержание составляет 11,5-49 масс. % (при соотношении объемного расхода алюминиевой присадочной проволоки к объему жидкометаллической титановой ванны  $q_{Al}/q_{Ti}$  в диапазоне 0,2-2) и описывается уравнением регрессии:

$$Al \text{ (масс.\%)} = 51,58 + 6,65 V_{п/пш Al} - 64,16 V_n - 0,12 I_n$$

Исходя из полученных зависимостей химического состава наплавленного металла от режимов наплавки, необходимо отметить, что управлять химическим

составом наплавленного валика целесообразнее, изменяя именно скорость подачи присадочной алюминиевой проволоки (рис. 3).

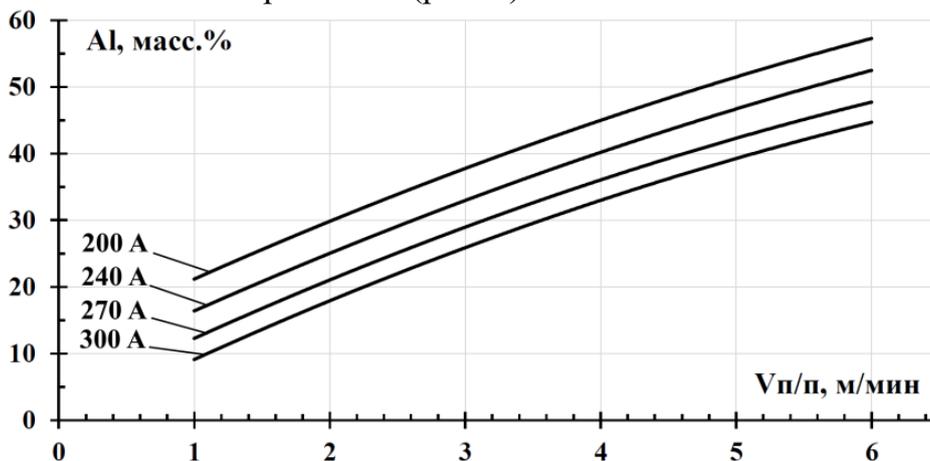
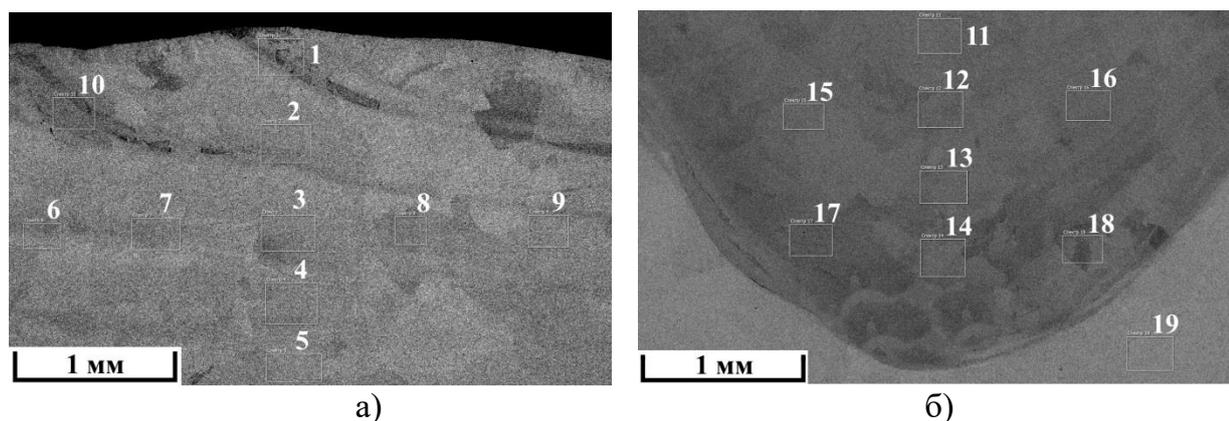


Рис. 3. Влияние режимов на содержание алюминия в наплавленных валиках ( $V_H = 0,15$  м/мин)

По сечению наплавленного валика наблюдалась неравномерность по химическому составу, которая не превышала 3 масс.%. Содержание алюминия в наплавленных валиках уменьшалось от поверхности к линии сплавления с основным металлом (рис. 4).



| Содержание элемента | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Al, масс. %         | 12,67 | 12,44 | 12,01 | 11,72 | 11,70 | 10,97 | 12,00 | 11,19 | 10,72 |
| Ti, масс. %         | 87,33 | 87,56 | 87,99 | 88,21 | 88,30 | 89,03 | 88,00 | 88,81 | 89,72 |
| Содержание элемента | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    |
| Al, масс. %         | 12,39 | 11,47 | 11,30 | 11,15 | 10,87 | 10,91 | 11,46 | 10,39 | 10,79 |
| Ti, масс. %         | 87,61 | 88,53 | 88,70 | 88,85 | 89,13 | 89,09 | 88,54 | 89,61 | 89,21 |

Рис. 4. Распределение химического состава по сечению наплавленного валика ( $I_H = 270$  А,  $V_H = 0,15$  м/мин, при  $V_{п/п} Al = 1$  м/мин, Среднее содержание алюминия 11,45 масс. %), где: а – верхняя часть наплавленного валика; б – нижняя часть наплавленного валика

Результаты микрорентгеноспектрального и рентгенофазового анализа показали, что наплавленные сплавы представлены твердым раствором алюминия в  $\alpha$  (Ti) +  $\alpha_2$

(Ti<sub>3</sub>Al) (рис. 5а), а также фазами α<sub>2</sub> (Ti<sub>3</sub>Al) (рис. 5б); α<sub>2</sub> (Ti<sub>3</sub>Al) + γ(TiAl) (рис. 5в); γ (рис. 5г).

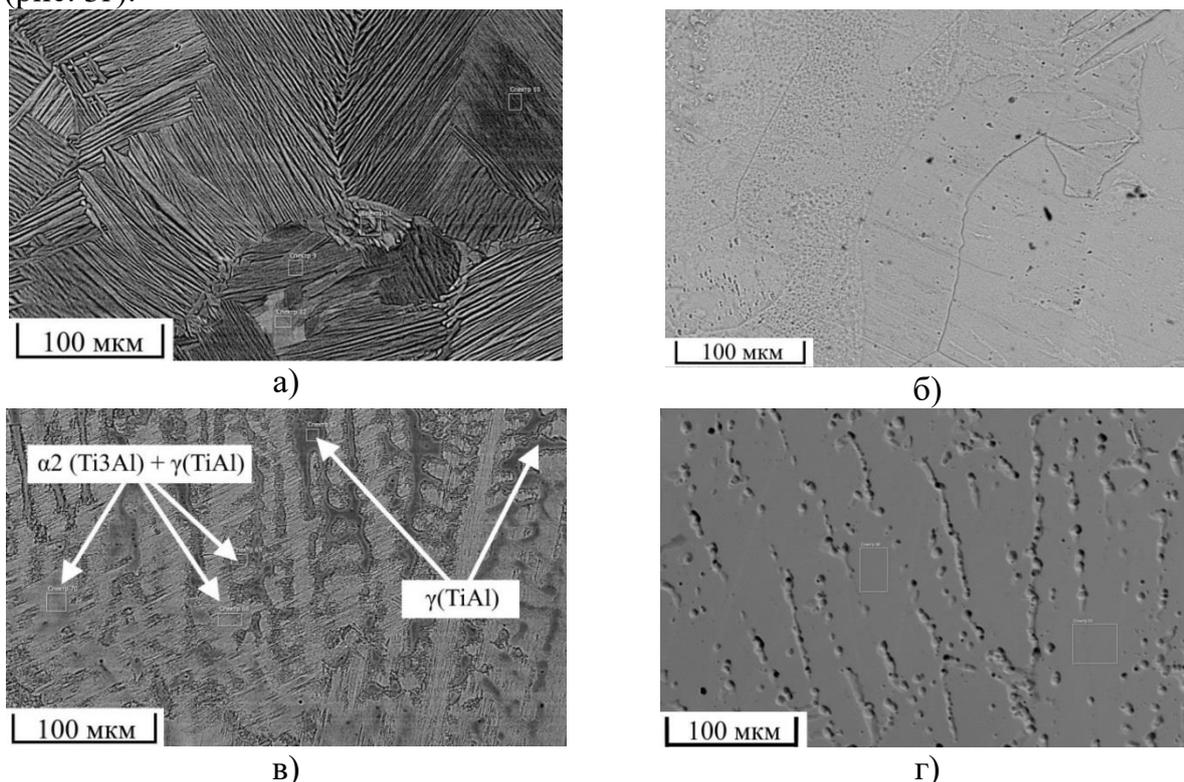


Рис. 5. Микроструктура наплавленных сплавов системы Ti-Al, где: а - фаза α (Ti) + α<sub>2</sub> (Ti<sub>3</sub>Al); б - α<sub>2</sub> (Ti<sub>3</sub>Al); в - α<sub>2</sub> (Ti<sub>3</sub>Al) + γ (TiAl); г - γ (TiAl)

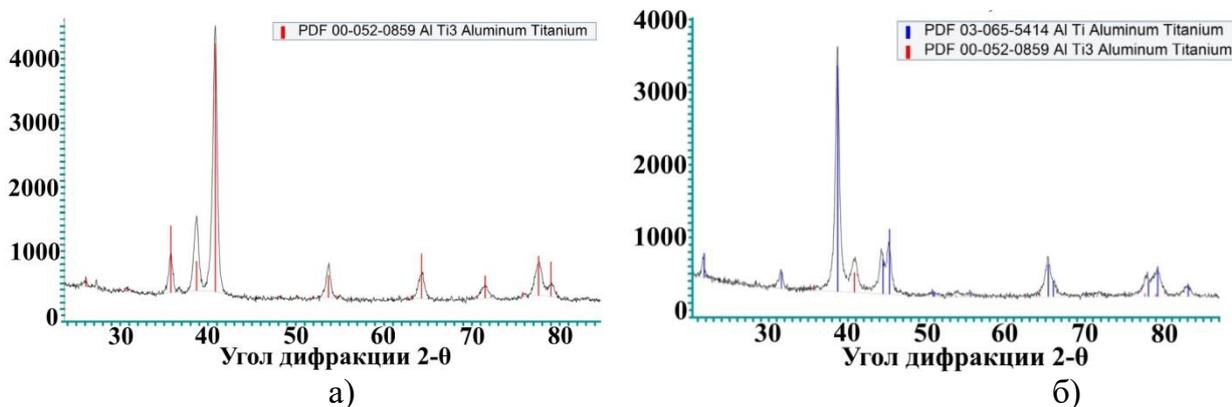


Рис. 6. Дифрактограмма, полученная с образца, представленного фазами а) α<sub>2</sub> (Ti<sub>3</sub>Al); б) γ (TiAl)+ α<sub>2</sub>

Наплавленные валики на контролируемом участке (150 мм), исходя из визуально-измерительного и капиллярного контроля, содержали поперечные трещины. Наплавленные сплавы на основе фаз α(Ti)+α<sub>2</sub>(Ti<sub>3</sub>Al) не имели поверхностных трещин, выявляемых визуально-измерительным контролем, однако после проведения капиллярного контроля на поверхности были обнаружены трещины с шириной раскрытия от 3 до 27 мкм. Контроль образцов на основе фаз α<sub>2</sub>(Ti<sub>3</sub>Al), α<sub>2</sub>(Ti<sub>3</sub>Al) + γ(TiAl), γ(TiAl) показал наличие поверхностных (поперечных) трещин. Ширина раскрытия трещин в зависимости от химического и фазового состава составляла от 16 до 156 мкм. При измерении геометрических параметров (длина, ширина раскрытия) и количества трещин определяли суммарную площадь трещин на поверхности образцов (ΣS, мм<sup>2</sup>). На основе этого оценивалась склонность к

образованию трещин наплавленных алюминидов титана: чем выше показатель  $\Sigma S$ ,  $\text{мм}^2$ , тем выше склонность наплавленного металла к образованию трещин.

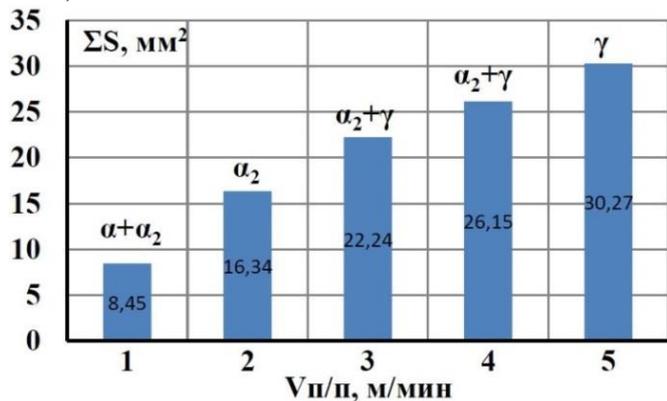


Рис. 7. Склонность к образованию трещин в зависимости от скорости подачи присадочной проволоки ( $I_H = 270$  А,  $V_H = 0,15$  м/мин, при  $V_{п/п} = 1$  м/мин содержание Al – 11,5 масс.%;  $V_{п/п} = 2$  м/мин содержание Al – 21,5 масс.%;  $V_{п/п} = 3$  м/мин содержание Al – 31 масс.%;  $V_{п/п} = 4$  м/мин содержание Al – 35 масс.%;  $V_{п/п} = 5$  м/мин содержание Al – 40,4 масс.%)

Исходя из полученных результатов, склонность к образованию трещин в наплавленных сплавах на основе алюминидов титана увеличивается с повышением содержания алюминия. Наибольшее число трещин образуется в наплавленном слое, химический состав которого соответствует  $\gamma$ -фазе.

Проведенное скретч-тестирование наплавленных валиков в плоскости металлографического шлифа показало, что микротрещины и сколы не образуются на границе «подложка-наплавленный металл» (рис. 8).

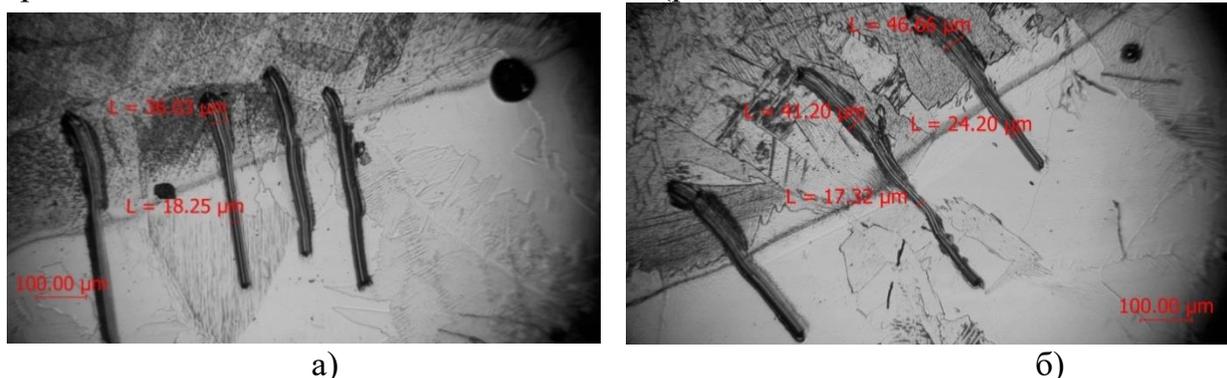


Рис. 8. Микроструктура наплавленного образца системы Ti-Al после царапания с нагрузкой 1 Н, где а - фаза  $\alpha$  (Ti) +  $\alpha_2$  ( $\text{Ti}_3\text{Al}$ ); б – фаза  $\alpha_2$  ( $\text{Ti}_3\text{Al}$ )

Твердость наплавленных интерметаллидных сплавов системы Ti-Al изменяется в интервале значений 12-36 HRC. Увеличение содержания алюминия с 11 до 30 масс.% способствует увеличению твердости наплавленных сплавов (рис. 9а). Наиболее высокую твердость имели наплавленные сплавы на основе фаз  $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$  и  $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al}) + \gamma(\text{TiAl})$ . При увеличении содержания алюминия свыше 30 масс.% в структуре наплавки увеличивается содержание фазы  $\gamma$  (TiAl), что приводит к снижению показателей твердости.

Показатели износостойкости при абразивном изнашивании у интерметаллидных сплавов выше, чем у титана. Показатели износостойкости изменяются в диапазоне от 1,2 до 3,7 единиц. Максимальная износостойкость наплавленных бинарных сплавов наблюдается при фазовом составе на основе  $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$ , содержание алюминия около 15-25 масс.% (при соотношении объемного расхода алюминиевой присадочной проволоки к объему жидкометаллической титановой ванны  $q_{\text{Al}} / q_{\text{Ti}}$  в диапазоне 0,35-0,66). С увеличением содержания алюминия в структуре наплавки увеличивается содержание фазы  $\gamma$  (TiAl), что приводит к

снижению показателей износостойкости, так как происходит хрупкое выкрашивание наплавленного металла при трении образцов о закрепленные абразивные частицы (рис. 9б).

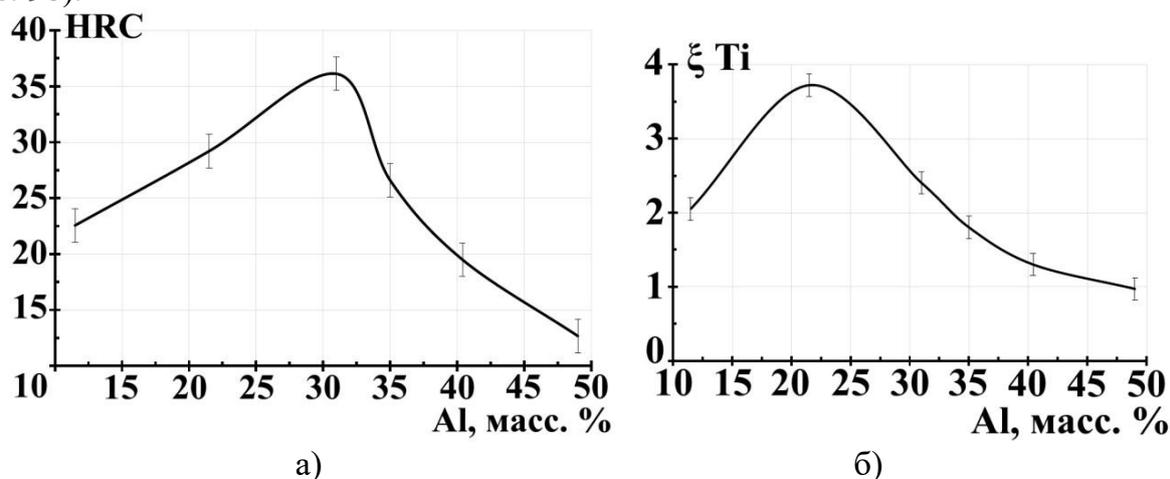


Рис. 9. Влияние содержания алюминия на а) твердость б) относительную износостойкость наплавленного металла

Для повышения трещиностойкости наплавленного металла проводились исследования предварительного подогрева образцов при температурах 200, 300 и 400°C. Проведенные исследования показали, что предварительный подогрев, вследствие увеличения доли проплавленного металла, способствует уменьшению содержания алюминия и увеличению содержания титана в наплавленном металле (рис. 10). Предварительный подогрев повысил трещиностойкость наплавленных сплавов вследствие снижения темпа охлаждения наплавленного металла (рис. 11). Средняя скорость охлаждения наплавленного металла, как показали исследования, при естественном воздушном охлаждении составляла 30-35 °C/мин. При увеличении скорости подачи присадочной проволоки скорость охлаждения незначительно увеличивалась. Средняя скорость охлаждения у образцов наплавленных с предварительным подогревом, находится в диапазоне 18-24 °C/мин. Механические и эксплуатационные свойства наплавленных сплавов при этом определяются химическими и фазовым составом.

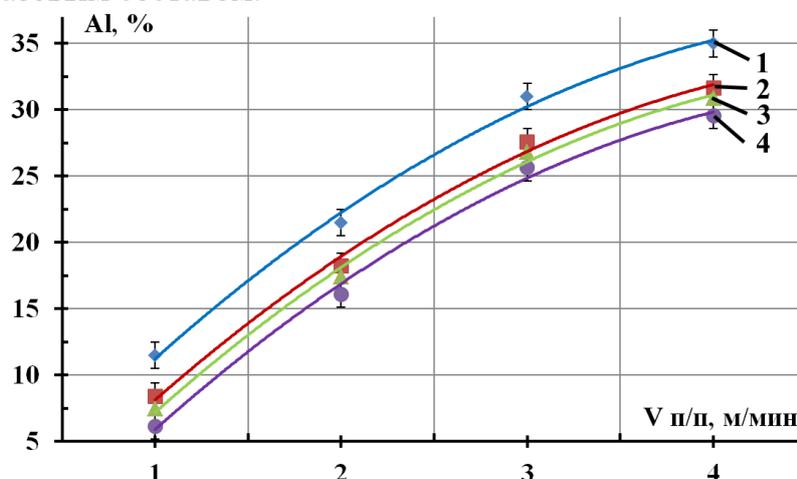


Рис. 10. Влияние скорости подачи проволоки на содержание алюминия при проведении предварительного подогрева  
 где: 1 – наплавка без проведения предварительного подогрева основного металла; 2 – предварительный подогрев основного металла до 200 °C; 3 - предварительный

подогрев основного металла до 300 °С; 4 - предварительный подогрев основного металла до 400 °С ( $I_n = 270$  А,  $V_n = 0,15$  м/мин)

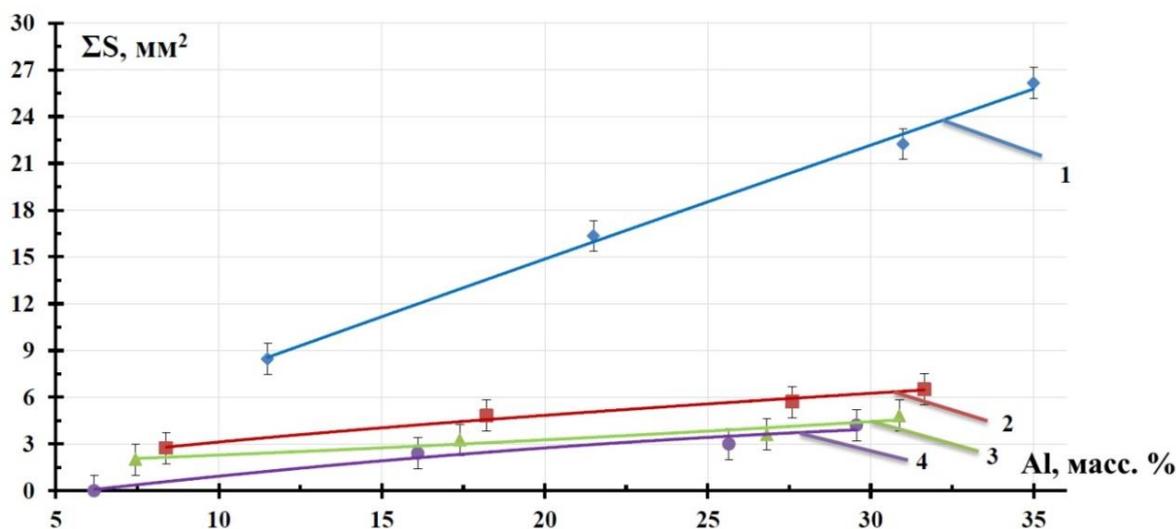


Рис. 11. Суммарная площадь трещин от содержания алюминия при наплавке интерметаллидных сплавов системы титан-алюминий

где: 1 – наплавка без проведения предварительного подогрева титановой подложки; 2 – предварительный подогрев основного металла до 200 °С; 3 - предварительный подогрев основного металла до 300 °С; 4 - предварительный подогрев основного металла до 400 °С

Исследования зоны термического влияния (ЗТВ) показали, что ее размер в исследуемых образцах составляет около 4-5 мм, при этом в ЗТВ наблюдается увеличение размера зерна, которое уменьшается по мере удаления от линии сплавления к участкам, которые в меньшей степени подвергались нагреву.

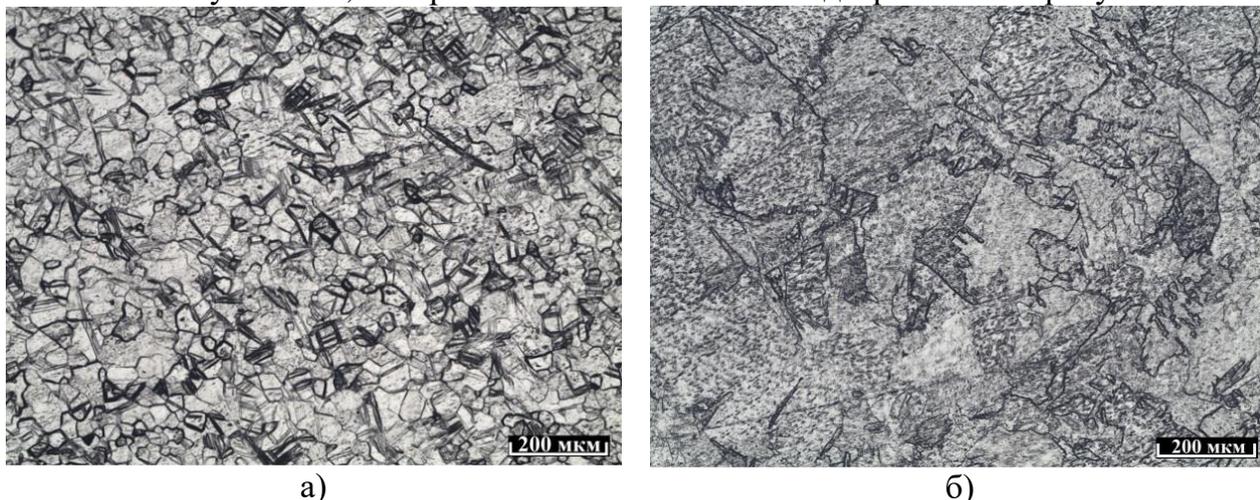


Рис. 12. Размер зерна у титановых образцов ВТ1-0, а) не подвергавшихся термическому воздействию; б) ЗТВ образца после наплавки ( $I_n = 270$  А,  $V_n = 0,15$  м/мин,  $V_{п/п} Al = 2$  м/мин,  $T_{под} = 200$ °С)

Твердость титанового сплава ВТ1-0, не подвергавшегося термическому воздействию, находится в диапазоне 131-163 НВ10. Измерение твердости образцов в поперечном сечении (рис. 13) показало, что, несмотря на термическое воздействие и изменение размера зерна, твердость зоны термического влияния находится в

диапазоне 130-145 HV10 (рис. 14), что полностью удовлетворяет требованиям нормативного документа СТ ЦКБА 045-2009 «Сварка и наплавка деталей из титана и титановых сплавов» (твердость в зоне термического влияния не должна превышать твердости основного металла).



Рис. 13. Схема измерения твердости при исследовании ЗТВ

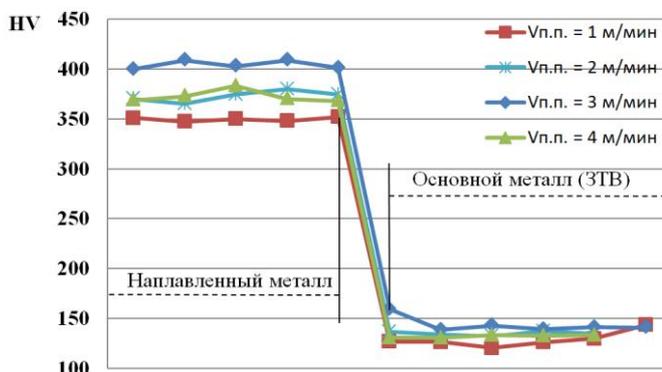


Рис. 14 – Распределение твердости по сечению образца

**В четвертой главе** рассмотрено влияние легирующих элементов на процессы формирования и свойства наплавленных сплавов системы титан-алюминий с целью повышения трещиностойкости наплавленного металла.

На основе проведенных исследований наплавки бинарных сплавов системы титан-алюминий установлено, что наилучшим соотношением износостойкости и стойкости к образованию трещин обладают наплавленные сплавы с содержанием алюминия от 15 до 25 масс.% (фазовый состав:  $\alpha$  (Ti) +  $\alpha_2$  (Ti<sub>3</sub>Al);  $\alpha_2$  (Ti<sub>3</sub>Al)). В соответствии с этим необходимо при наплавке сплавов системы Ti-Al-X (где X – легирующий элемент) подбирать режимы, обеспечивающие получение фазового состава наплавленного металла на основе фаз  $\alpha$  (Ti) +  $\alpha_2$  (Ti<sub>3</sub>Al);  $\alpha_2$  (Ti<sub>3</sub>Al) т.к. они обладают наилучшим соотношением износостойкости и стойкости к образованию трещин. Содержание легирующих элементов выбиралось исходя из области растворимости легирующего элемента в  $\alpha_2$ -фазе по тройным изотермическим разрезам Ti-Al-X (где X – легирующий элемент). Для легирования: применялись дополнительные присадочные проволоки. При легировании ниобием – проволока Nb-1 ( $\Phi$  1,5 мм), никелем - проволока НП2 ( $\Phi$  1,2 мм), медью – проволока М1 ( $\Phi$  1,0 мм), цирконием - проволока R702 ( $\Phi$  1,2 мм).

Наплавка интерметаллидных сплавов системы титан-алюминий производилась на следующих режимах: скорость наплавки 0,15 м/мин, скорость подачи присадочных проволок - алюминиевой от 1,0 до 4 м/мин, легирующей (Nb, Ni, Cu, Zr) от 0,25 до 2 м/мин. Наплавку производили на постоянном токе прямой полярности. Ток дуги при этом составлял  $I=270$  А.

Легирование цирконием и ниобием повысило трещиностойкость наплавленных алюминидов титана (рис. 15, 16). Легирование кремнием, никелем и медью не повысило трещиностойкость наплавленных алюминидов титана, поэтому дальнейшие исследования влияния легирующих элементов на механические и эксплуатационные свойства проводили только для таких элементов, как ниобий, цирконий.

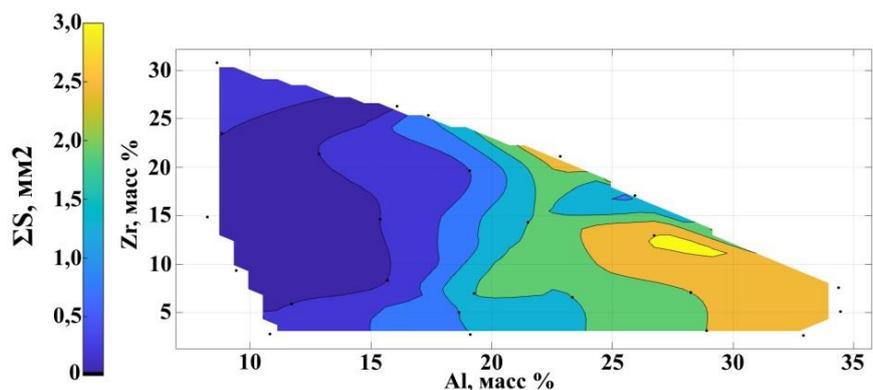


Рис. 15. Склонность к образованию трещин в наплавленных сплавах системы Ti-Al-Zr

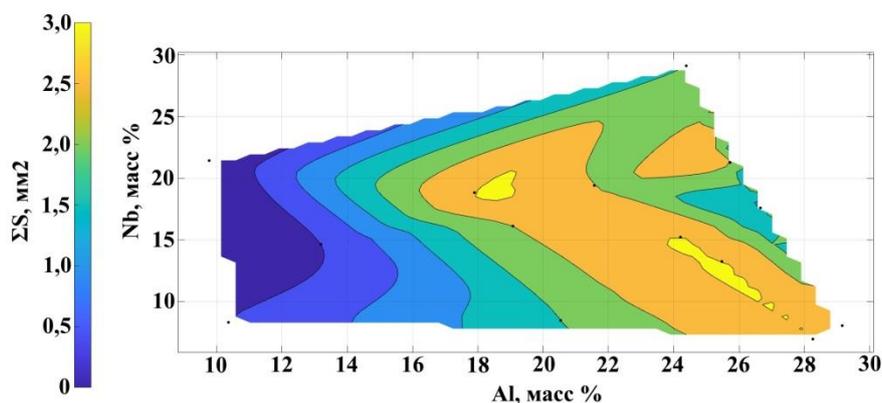


Рис. 16. Склонность к образованию трещин в наплавленных сплавах системы Ti-Al-Nb

Исследования химического состава наплавленных валиков при легировании цирконием показали, что среднее содержание химических элементов находится в следующих пределах: алюминия от 8,2 до 34,5 масс. %, циркония от 2,6 до 30,8 масс. %. Содержание алюминия и циркония изменяется в зависимости от скорости подачи присадочной алюминиевой ( $V_{п/шт}$  = 1-4 м/мин) и циркониевой проволоки ( $V_{п/шт}$  = 0,25-2 м/мин). Исходя из результатов химического и рентгенофазового анализа, структура наплавленного металла представлена фазами, легированными цирконием:  $\alpha(\text{Ti}) + \alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$ ,  $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$ ,  $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al}) + \gamma(\text{TiAl})$ .

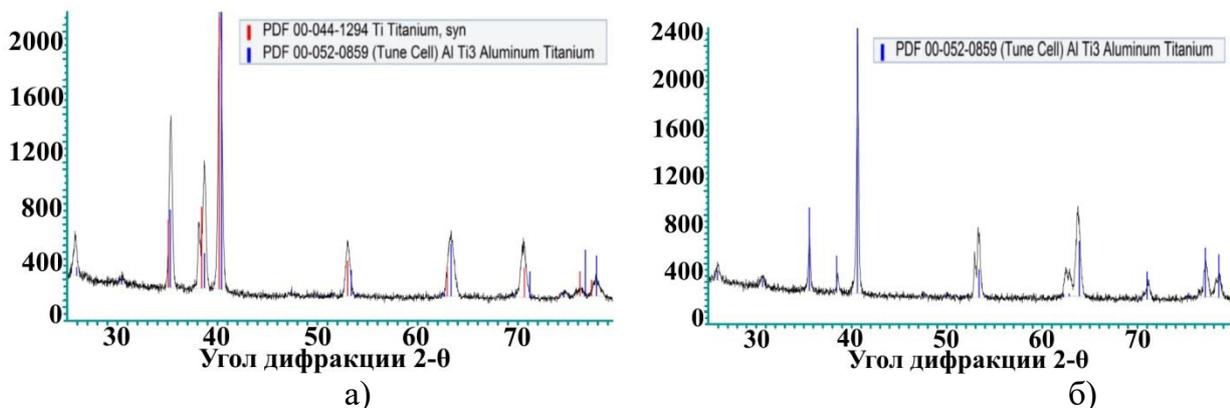


Рис. 17. Дифрактограмма, полученная с образца, представленного фазами а)  $\alpha(\text{Ti}) + \alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$ , легированный цирконием; б)  $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$ , легированный цирконием

Установлено, что при легировании ниобием химический состав наплавленных валков находится в следующих пределах: алюминия от 9,7 до 29,2 масс. %, ниобия от 7 до 29,1 масс. %. Содержание алюминия и ниобия в наплавленных валках изменяется в зависимости от скорости подачи присадочной алюминиевой ( $V_{п/мин} = 1-4$  м/мин) и ниобиевой проволоки ( $V_{п/мин} = 0,25-1$  м/мин). Рентгенофазовый и химический анализ структурных составляющих наплавленных валков показал, что структура наплавленных валков представлена фазами, легированными ниобием:  $\alpha(\text{Ti}) + \alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$ ,  $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$ ,  $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al}) + \text{O}(\text{Ti}_2\text{AlNb})$ ,  $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al}) + \gamma(\text{TiAl})$ . Помимо рефлексов от данных фаз, во всех исследуемых образцах имеются слабые рефлексы, предположительно соответствующие тройному соединению  $(\text{Al}_{0,75}\text{Nb}_{0,25})\text{Ti}$ .

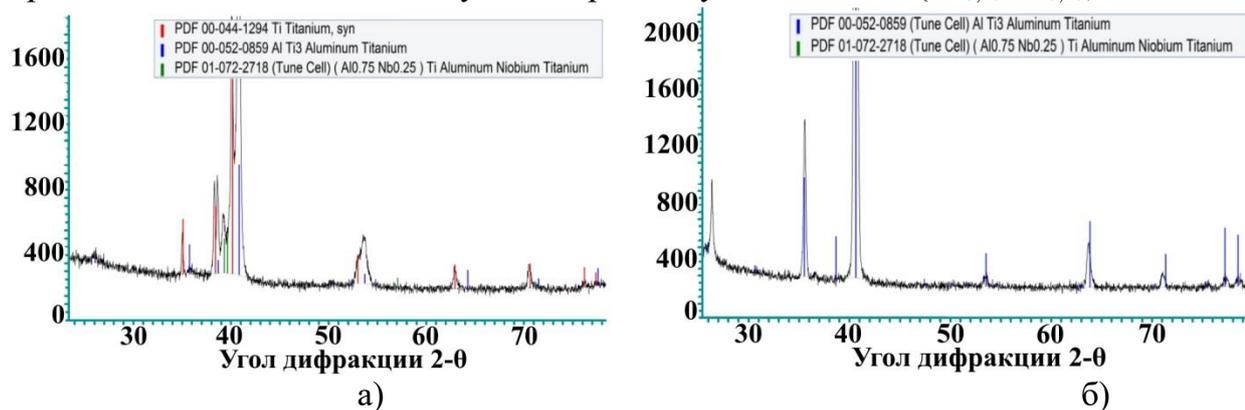


Рис. 18. Дифрактограмма, полученная с образца, представленного фазами а)  $\alpha(\text{Ti}) + \alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al}) + \text{Ti}(\text{Al}_{0,75}\text{Nb}_{0,25})$ , легированный ниобием; б)  $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al}) + \text{Ti}(\text{Al}_{0,75}\text{Nb}_{0,25})$ , легированный ниобием

Легирование наплавленных сплавов цирконием и ниобием повышает износостойкость наплавленного металла при трении о закрепленные абразивные частицы по сравнению с эталонным образцом из титана ВТ1-0. Наилучшим соотношением износостойкости и трещиностойкости обладают наплавленные сплавы: Ti-Al-Zr: Ti-9Al-9Zr; Ti-16Al-9Zr; Ti-24Al-7Zr и Ti-Al-Nb: Ti-14Al-15Nb (Цифровое обозначение указывает среднее содержание химических элементов в наплавленном образце, Ti-9Al-9Zr - 9 масс. % Al, 9 масс. % Zr, остальное Ti) (рис. 19).

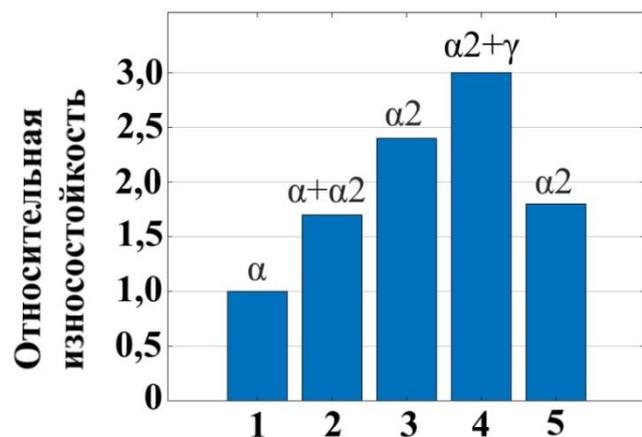


Рис. 19. Относительная износостойкость наплавленных сплавов при трении о закрепленные абразивные частицы (1 – Ti (ВТ1-0); 2 - Ti-9Al-9Zr; 3 - Ti-16Al-9Zr; 4 - Ti-24Al-7Zr; 5 - Ti-14Al-15Nb)

При совместном воздействии предварительного подогрева от 200 до 400 °С и легирования цирконием трещины в наплавленных сплавах системы титан-алюминий отсутствуют при содержании алюминия от 6 до 19 масс. % и циркония от 2 до 9 масс. %.

В связи с высокой трудоемкостью экспериментального подбора режимов наплавки, на основе проведенных исследований разработана методика расчета и программное обеспечение, которое позволяет производить расчет химического состава наплавленного валика системы Ti-Al-Zr в зависимости от режимов наплавки или расчет режимов наплавки в зависимости от требуемого химического состава наплавленного металла.

Для повышения точности расчетов была решена обратная задача, в которой, исходя из геометрических размеров наплавленного валика, определялись плотность теплового потока, эффективная мощность и КПД дуги.

Для графического представления результатов расчета были разработаны номограммы, позволяющие выбирать режимы наплавки в зависимости от требуемого химического состава наплавленного металла.

Также в данной главе представлено разработанное оборудование для наплавки интерметаллидных сплавов системы титан-алюминий и указаны рекомендации по наплавке сплавов системы титан-алюминий для деталей, работающих в химической промышленности изготовленных из титана (BT1-0).

Для наплавки алюминидов титана на титан и его сплавы была разработана автоматическая программируемая установка для наплавки сложных профилей со сварочным инвертором KEMPI MasterTig MLS 3000. Данная установка позволяет перемещаться горелке в трех плоскостях, с возможностью программирования пути наплавки. Установка состоит из двухстоечной колонны с подвижной траверсой, на которой установлен дополнительный привод для перемещения стойки со сварочной горелкой. На колонне установлены механизмы подачи присадочной проволоки и катушка с присадочной проволокой.

Для повышения стойкости деталей химического оборудования (рабочее колесо насоса 1X-80-50-200А-ТЛ-55, изготовленного из титанового сплава BT1-0) было предложено формировать на торцевой поверхности наплавленный слой системы Ti-Al-Zr.

В соответствии с критериями качества, предъявляемыми нормативным документом СТ ЦКБА 045-2009 «Сварка и наплавка деталей из титана и титановых сплавов», в деталях не допускаются трещины, поэтому была предложена технология наплавки сплавов системы Ti-Al-Zr (с содержанием Al до 19 масс.% и Zr до 9 масс. %) с проведением предварительного подогрева 200°C, исключающая образование трещин в наплавленном металле.

Рабочее колесо насоса 1X-80-50-200А-ТЛ-55 работает в условиях гидроабразивного износа в диапазоне температур 85-125 °С в контакте с формальдегидной водой, взвешенными частицами и инородными телами, которые попадают в насос при перекачке.

Были проведены исследования коррозионной стойкости наплавленного металла (Ti-16Al-9Zr) и эталонного материала из титанового сплава BT1-0 в контакте с формальдегидной водой при температуре 100°C, общее время выдержки составляло 820 часов, с взвешиванием образцов через каждые 120 часов. В ходе проведенных исследований при 820 часах выдержки, образцы не потеряли в весе от своей первоначальной массы, что свидетельствует о том, что коррозионная стойкость наплавленного металла Ti-Al-Zr (Al~16%, Zr~9% по массе) не ниже коррозионной стойкости эталонного образца из BT1-0.

Для стабильного формирования наплавленной поверхности использовали медные формирующие пластины шириной 12 мм (рис. 20). Применение медных

формирующих пластин обеспечивает стабильное формирование наплавленного валика, исключая стекание сварочной ванны на боковые поверхности пластин (рис. 21,22).

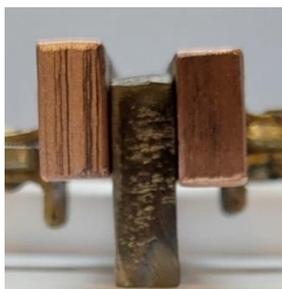


Рис. 20. Схема сборки под наплавку торцевых поверхностей с применением медных формирующих пластин



Рис. 21. Поперечное сечение валика наплавленного с применением медных формирующих пластин



а)



б)

Рис. 22. Наплавка торцевых поверхностей деталей из титана ВТ1-0 ( $s=10$  мм) где: а -  $I_n = 150$  А,  $V_n = 0,12$  м/мин, при  $V_{п/шт}$  Al= 1 м/мин,  $V_{п/шт}$  Zr= 0,5 м/мин; б -  $I_n = 200$  А,  $V_n = 0,12$  м/мин, при  $V_{п/шт}$  Al= 1 м/мин,  $V_{п/шт}$  Zr= 0,5 м/мин;

Наплавка торцевых поверхностей рабочего колеса насоса 1X-80-50-200А-ТЛ-55 производилась с проведением предварительного подогрева  $200^{\circ}\text{C}$  на следующих режимах:  $I_n = 200$  А,  $V_n = 0,12$  м/мин, при  $V_{п/шт}$  Al= 1 м/мин,  $V_{п/шт}$  Zr= 0,5 м/мин. Химический состав наплавленного металла находился в следующих пределах: алюминий 15-18 масс. % цирконий 7-9 масс. % (рис. 23).



Рис. 23. Внешний вид наплавленного рабочего колеса насоса 1X-80-50-200А-ТЛ-55

Наплавка сплава Ti-Al-Zr (алюминий 15-18 масс.% цирконий 7-9 масс.%) позволила повысить ресурс работы детали в 2-2,4 раза.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Установлено, что при отношении объемного расхода алюминиевой присадочной проволоки к объему жидкометаллической титановой ванны 0,2-2 при аргонодуговой наплавке формируются наплавленные валики со стабильными геометрическими параметрами, однородным химическим и фазовым составом при

содержании алюминия 11,5-49 масс. % на основе фаз:  $\alpha(\text{Ti})+\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$ ;  $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$ ;  $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})+\gamma(\text{TiAl})$ ;  $\gamma(\text{TiAl})$ .

2. Показано, что максимальные значения относительной износостойкости наблюдаются при отношении объемного расхода алюминиевой присадочной проволоки к объему жидкометаллической титановой ванны 0,35-0,66 вследствие формирования наплавленных сплавов на основе фаз:  $\alpha(\text{Ti})+\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$  или  $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$  с содержанием алюминия 15-25 масс. %.

3. В качестве критерия склонности наплавленных сплавов на основе алюминидов титана предложено использовать суммарную площадь поверхностных трещин ( $\Sigma S$ , мм<sup>2</sup>) на контролируемом участке наплавки. Суммарная площадь поверхностных трещин рассчитывалась исходя из количества, длины трещин и ширины их раскрытия.

4. Установлено, что предварительный подогрев основного металла от 200 до 400°C снижает скорость охлаждения наплавленных алюминидов титана в 1,3-2 раза, что обеспечивает снижение суммарной площади трещин на поверхности наплавленных валиков в 3-5 раз.

5. Установлено, что легирование цирконием и ниобием через дополнительную присадочную проволоку, вводимую в жидкометаллическую титановую ванну, в пределах растворимости в  $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$  и  $\gamma(\text{TiAl})$  - фазе снижает склонность наплавленного металла к образованию трещин при сохранении высоких показателей твердости и износостойкости наплавленного металла.

6. Установлено, что легирование алюминидов титана цирконием в количестве 2-9% при содержании алюминия до 19% и предварительный подогрев от 200 до 400°C обеспечивают формирование наплавленных валиков без образования трещин.

7. Предложенная методика расчета и разработанные номограммы позволяют выбрать оптимальные режимы аргонодуговой наплавки алюминидов титана на титан.

8. Производственные испытания разработанного программируемого оборудования для наплавки сложных профилей и технологии наплавки алюминидов титана на насосное оборудование из сплава ВТ1-0 в условиях ООО «Тольяттикаучук» показали, что ресурс работы наплавленных изделий повышается в 2-2,4 раза.

**Основные положения диссертационного исследования опубликованы в 29 работах, наиболее значимые из которых приведены ниже:**

*Статьи в периодических рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ:*

1. Ковтунов А.И., Плахотный Д.И., Гуцин А.А., Плахотная С.Е., Бочкарев А.Г., Влияние режимов наплавки на структуру и свойства покрытий системы титан-алюминий // Сварка и диагностика. 2016. №2. С. 43-45.

2. Ковтунов А.И., Гуцин А.А., Плахотный Д.И., Бочкарев А.Г. Влияние кремния на процессы формирования и свойства наплавленных сплавов системы Ti-Al // Сварочное производство. 2018. №2. С. 20-24.

3. Ковтунов А.И., Бочкарев А.Г., Гуцин А.А., Плахотный Д.И. Влияние циркония на процессы формирования и свойства наплавленных сплавов системы Ti-Al // Сварка и диагностика. 2018. №5. С. 47-50.

4. Ковтунов А.И., Семистенов Д.А., Семистенова Т.В. Бочкарев А.Г. Определение параметров распределенного источника тепла при наплавке сплавов системы титан-алюминий // *Технология металлов*. 2018. №12. С. 16-20.
5. Ковтунов А.И., Бочкарев А.Г., Плахотный Д.И., Гущин А.А. Влияние никеля на свойства наплавленных сплавов системы титан-алюминий // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2019. №1. С. 42-49.
6. Ковтунов А.И., Бочкарев А.Г., Семистенова Т.В., Гущин А.А. Влияние легирующих элементов на процессы формирования и свойства наплавленных сплавов системы Ti-Al // *Технология металлов*. 2019. №8. С. 29-39.
7. Ковтунов А.И., Бочкарев А.Г., Плахотный Д.И. Влияние кремния на жаростойкость наплавленных сплавов системы Ti-Al // *Технология металлов*. 2020. №7. С. 39-44.
8. Ковтунов А.И. Бочкарев А.Г., Плахотный Д.И. Влияние легирующих элементов на склонность к образованию трещин в наплавленных сплавах системы титан-алюминий // *Сварочное производство*. 2020. №10. С. 16-21.
9. Ковтунов А.И. Бочкарев А.Г. Исследование состава, структуры и свойств наплавленных сплавов системы титан-алюминий, легированных хромом // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2021. Т.17 №10 (202). С. 470-475.
10. Ковтунов А.И. Бочкарев А.Г., Плахотный Д.И. Исследование структуры и свойств наплавленных интерметаллидных сплавов на основе титана // *Материаловедение*. 2021. №5. С. 13-18.
11. Ковтунов А.И. Бочкарев А.Г., Хохлов Ю.Ю., Мельников В.А. Влияние условий охлаждения на склонность к образованию трещин наплавленных сплавов системы титан-алюминий // *Сварка и диагностика*. 2022. №3. С. 55-58.

*Статьи индексируемые наукометрическими базами Web of Science и Scopus:*

12. Kovtunov A.I., Bockkarev A.G., Plakhotnyi D.I. Structure and properties of surfaced intermetallic alloys based on titanium // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2022. Т. 13. № 1. С. 94-99.

*Патенты РФ:*

13. Патент 2699474 Российская Федерация, МПК В23К 9/04, В23К 103/18 Способ наплавки на титан и титановые сплавы жаростойких и износостойких покрытий на основе алюминидов титана / Ковтунов А.И., Бочкарев А.Г. Гущин А.А. Хохлов Ю.Ю.; ФГБОУ ВО ТГУ. – 2019.
14. Патент 2731399 Российская Федерация, МПК В23К 9/04, В23К 103/18 Способ получения жаростойкого слоя на основе алюминидов титана на титане и титановом сплаве / Ковтунов А.И., Бочкарев А.Г. Гущин А.А. Хохлов Ю.Ю.; ФГБОУ ВО ТГУ. – 2020.
15. Патент 2783836 Российская Федерация, МПК В23К 9/04, В23К 103/18 Способ получения жаростойкого износостойкого слоя на основе алюминидов титана на титане и титановом сплаве / Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю, Бочкарев А.Г; ФГБОУ ВО ТГУ. – 2022.

### **Личный вклад автора:**

Все выносимые на защиту научные и практические результаты получены автором самостоятельно или совместно с другими исследователями.

В работах [1,10,12,13] исследованы процессы формирования, химический состав, структура и свойства наплавленных интерметаллидных сплавов системы титан-алюминий. В работе [4] приведены исследования параметров распределенного источника тепла при наплавке сплавов системы титан-алюминий. На основе данных исследований разработаны подходы к управлению процессами аргонодуговой наплавки интерметаллидных сплавов системы титан-алюминий в зависимости от требуемого химического состава наплавленного металла. В работах [11] исследовано влияние условий охлаждения (предварительный подогрев, ускоренное охлаждение) на процессы формирования, химический состав, структуру и склонность наплавленного металла к образованию трещин. В работах [2,3,5-9,14,15] исследовано влияние легирующих и модифицирующих элементов на процессы формирования, химический состав, структуру и свойства наплавленных интерметаллидных сплавов системы титан алюминий.