

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
академик Б. Е. Патон

Ученые ИЭС им. Е. О. Патона

д.т.н. Г. М. Григоренко (зам. гл. ред.),
д.т.н. С. В. Ахонин, Д. М. Дяченко (отв. секр.),
д.т.н. И. В. Кривцун, д.т.н. Л. Б. Медовар,
д.т.н. Б. А. Мовчан, д.т.н. А. С. Письменный,
д.т.н. А. И. Устинов, д.т.н. В. А. Шаповалов

Ученые университетов Украины

д.т.н. В. С. Волошин, ПГТУ, Мариуполь
д.т.н. М. И. Гасик, НМетАУ, Днепр
д.т.н. О. М. Ивасишин, Ин-т металлофизики, Киев
д.т.н. П. И. Лобода,
НТУУ «КПИ им. И. Сикорского», Киев
д.т.н. А. В. Овчинников, ЗНТУ, Запорожье

Зарубежные ученые

д.т.н. К. В. Григорович
МИСиС, Москва, РФ
д.х.н. М. Зиниград
Ун-т Ариэля, Израиль
д.т.н. А. А. Ильин
МАТИ-РГТУ, Москва, РФ
д.ф.-м.н. Г. Младенов
Ин-т электроники, София, Болгария
д.т.н. А. Митчелл
Ун-т Британской Колумбии, Канада
д.т.н. Г. Ф. Тавадзе
Ин-т металлург. и материаловед.
им. Ф. Тавадзе, Тбилиси, Грузия
д.т.н. Цохуа Джанг
Северо-Восточный ун-т, Шеньян, Китай

Учредители

Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ
Международная Ассоциация «Сварка» (издатель)

Адрес редакции журнала
«Современная электрометаллургия»

Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Украина, 03150, г. Киев,
ул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: (38044) 200 82 77, 200 54 84
Тел.: (38044) 205 22 07
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Редакторы

Д. М. Дяченко
Электронная верстка
Л. Н. Герасименко, Т. Ю. Снегирева

Свидетельство о государственной регистрации
КВ 6185 от 31.05.2002
ISSN 2415-8445

DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem>

Рекомендовано к печати

Ученым советом ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

Журнал входит в перечень утвержденных МОН
Украины изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней

При перепечатке материалов ссылка на журнал
обязательна. За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности не несет

СОДЕРЖАНИЕ

Международная конференция «Титан 2018. Производство
и применение в Украине» 3

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Ахонин С. В., Березос В. А., Пикулин А. Н., Северин А. Ю.,
Шваб С. Л., Ерохин А. Г. Получение высокопрочного титанового
сплава BT22 способом электронно-лучевой плавки 8

Ахонин С. В., Северин А. Ю., Березос В. А., Пикулин А. Н.,
Ерохин А. Г. Особенности получения крупных слитков алюминидов
титана в электронно-лучевых установках 16

Калинюк А. Н., Дереча А. Я., Тэлин В. В., Коляда А. Ф.,
Костенко В. И., Иванов Н. М. Особенности производства ленточных
литых заготовок марок BT1-0 и GRADE 2 из низкосортного губчатого
титана 20

Педаш А. А., Клочихин В. В., Митина Т. А., Шило В. Г. Влияние
типа источника энергии при 3D принтинге на структуру и свойства
деталей из сплава Ti-6Al-4V 27

ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ПЕРЕПЛАВ

Фирстов С. А., Горная И. Д., Подрезов Ю. Н., Бондарь А. А.,
Шереметьев А. В. Свойства сплавов на основе алюминидов титана
 γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al при комплексном легировании 32

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТАЛЛУРГИИ

Григоренко Г. М., Костин В. А., Григоренко С. Г. Расчет равновесных
диаграмм состояния и фазовых превращений титановых сплавов
системы титан-алюминий 39

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Петрик И. А., Чигилейчик С. Л., Митина Т. А., Марченко Ю. А.,
Гнатенко М. О. Оценка возможности применения технологии
послойного формирования способом плазменной наплавки деталей
из титановых сплавов узлов вертолетов и ГТД 45

Ивасишин О. М., Марковский П. Е., Саввакин Д. Г.,
Бондарчук В. И., Стасюк А. А., Приходько С. В. Микроструктура
и свойства многослойных материалов на основе сплава Ti-6Al-4V,
полученных по порошковой технологии 52

ИНФОРМАЦИЯ

VI Международная самсоновская конференция «Материаловедение
тугоплавких соединений» 58

Развитие современных технологий электросталеплавильного
производства легированных сталей для высокотехнологичных
отраслей промышленности 59

Шейко И. В. — 75 60

ЗМІСТ

CONTENTS

Міжнародна конференція «Титан 2018. Виробництво
та застосування в Україні» 3International Conference «Titanium-2018. Production and
Application in Ukraine» 3

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ПРОЦЕСИ

ELECTRON BEAM PROCESSES

Ахонін С. В., Березос В. О., Пікулін О. М., Северин А. Ю.,
Шваб С. Л., Єрохін О. Г. Отримання високоміцного
сплаву титану VT22 способом електронно-променевої
плавки 8Akhonin S.V., Berezos V.A., Pikulin A.N., Severin A.Yu.,
Shvab S.L., Erokhin A.G. Producing of high-strength
titanium alloy VT22 by method of electron beam
melting 8Ахонін С. В., Северин А. Ю., Березос В. О., Пікулін О. М.,
Єрохін О. Г. Особливості отримання великих зливків
алюмінідів титану в електронно-променевих
установках 16Akhonin S.V., Severin A.Yu., Berezos V.A., Pikulin A.N.,
Erokhin A.G. Peculiarities of producing large ingots of
titanium aluminides in electron beam installations 16Калинюк О. М., Дереча О. Я., Телін В. В., Коляда О. Ф.,
Костенко В. І., Іванов М. М. Особливості виробництва
стрічкових литих заготовок марок VT1-0 та GRADE 2 з
низькосортного губчастого титану 20Kalinyuk A.N., Derecha A.Ya., Telin V.V., Kolyada A.F.,
Kostenko V.I., Ivanov N.M. Peculiarities of production
of slab-type cast billets of VT1-0 and GRADE 2 types
of low-grade spongy titanium 20Педаш О. О., Ключихін В. В., Мітіна Т. А., Шило В. Г.
Вплив типу джерела енергії при 3D принтингу на
структуру та властивості деталей зі сплаву
Ti-6Al-4V 27Pedash A.A., Klochikhin V.V., Mitina T.A., Shilo V.G.
Effect of type of power source at 3D printing on structure
and properties of Ti-6Al-4V alloy components 27

ВАКУУМНО-ІНДУКЦІЙНА ПЛАВКА

VACUUM-ARC PROCESSES

Фіртсов С. О., Горна І. Д., Подрезов Ю. М.,
Бондарь А. А., Шереметєв О. В. Властивості сплавів на
основі алюмінідів титану γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al при комплексному
легуванні 32Firstov S.A., Gornaya I.D., Podrezov Yu.N., Bondar A.A.,
Sheremetjev A.V. Properties of alloys on titanium aluminide
 γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al base at complex alloying 32

ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МЕТАЛУРГІЇ

GENERAL PROBLEMS OF METALLURGY

Григоренко Г. М., Костін В. А., Григоренко С. Г. Розрахунок
рівноважних діаграм стану і фазових перетворень
титанових сплавів системи титан-алюміній 39Grigorenko G.M., Kostin V.A., Grigorenko S.G. Calculation of
equilibrium diagrams of state and phase transformations
of titanium alloys of titanium-aluminium system 39

НОВІ МАТЕРІАЛИ

NEW MATERIALS

Петрик І. А., Чігілейчик С. Л., Мітіна Т. А.,
Марченко Ю. А., Гнатенко М. О. Оцінка можливості
застосування технології пошарового формування способом
плазмового наплавлення деталей з титанових сплавів
вузлів вертольотів і ГТД 45Petric I.A., Chigileychik S.L., Mitina T.A., Marchenko Yu.A.,
Gnatenko M.O. Evaluation of feasibility of applying the
technology of layer-by-layer forming by method of plasma
surfacing of titanium alloy parts of components of
helicopters and gas turbine engines 45Івасишин О. М., Марковський П. Є., Саввакін Д. Г.,
Бондарчук В. І., Стасюк О. О., Приходько С. В.
Мікроструктура та властивості багатопшарових матеріалів
на основі сплаву Ti-6Al-4V, отриманих за порошковою
технологією 52Ivasishin O.M., Markovsky P.E., Savvakina D.G.,
Bondarchuk V.I., Stasyuk A.A., Prikhodko S.V. Microstructure
and properties of multilayer materials on Ti-6Al-4V alloy
base, produced by powder technology 52

ІНФОРМАЦІЯ

INFORMATION

VI Міжнародна самсонівська конференція
«Матеріалознавство тугоплавких з'єднань» 58VI International Samsonov Conference «Materials science
of refractory compounds» 58Розвиток сучасних технологій електросталеплавильного
виробництва легованих сталей для високотехнологічних
галузей промисловості 59Development of present technologies of steel melting
production of alloyed steels for high-tech branches of
industry 59

Шейко І. В. — 75 60

Sheiko I.V. is 75 60

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ТИТАН 2018. ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ В УКРАИНЕ»

11–13 июня 2018 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (г. Киев) прошла Международная конференция «Титан 2018. Производство и применение в Украине». Ее организаторами выступили Национальная академия наук Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ИЭС), АО «Мотор Сич», ПАО «Институт титана», Запорожский ГТУ, Международная Ассоциация «Сварка». Конференция была посвящена 100-летию Национальной академии наук Украины. В ней приняли участие свыше 120 человек из 40 организаций. В их числе известные ученые ряда академических институтов Украины: академики Л. М. Лобанов, Г. М. Григоренко, О. М. Ивасишин, С. А. Фирстов, З. Т. Назарчук, члены-корреспонденты С. В. Ахонин и В. М. Нестеренков, профессора учебных заведений, руководители и ведущие специалисты государственных и коммерческих предприятий.

В конференции приняли участие также зарубежные специалисты из Физико-технического института НАН Беларуси, Польского института сварки, Sichuan Henghui New Material, Sichuan Technical Exchange Center, Sichuan Vanadium & Titanium Industrial Technology Institute, Panzhihua Innovation and Startup S&T Development, Panzhihua Iron and Steel Group и Panzhihua University (Китай), ASTEC Engineering GmbH (Австрия), Astron Ltd (Новая Зеландия).

Конференцию открыл зам. директора ИЭС академик Л. М. Лобанов. Он отметил актуальность тематики конференции, высокую значимость достижений украинских ученых и специалистов в этой области, поблагодарил иногородних и зарубежных участников за приезд и пожелал всем плодотворной работы.

На конференции были заслушаны 16 пленарных докладов. Большой интерес вызвал доклад академика О. М. Ивасишина (Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины) «Основные тенденции в развитии порошковой металлургии и 3D технологий титана». Основной задачей ма-

териаловедения титановых сплавов является разработка новых технологических подходов, которые обеспечивали бы снижение себестоимости производства титановых изделий при сохранении уникального комплекса физико-механических характеристик этих материалов. Применение порошковых технологий в производстве титановых сплавов и изделий является эффективным способом снизить их себестоимость, повысить конкурентоспособность с другими конструкционными материалами и, в результате, расширить сферу практического использования титана. Докладчик рассказал о современных технологиях порошковой металлургии титана, которые обеспечивают получение изделий с требуемыми физико-механическими свойствами, не уступающими свойствам материалов, полученных традиционными методами литья и горячей деформации. Значительный практический интерес представляют последние разработки в области аддитивных технологий титана, направленные на снижение отходов производства при получении высококачественных изделий для различных областей техники и медицины. В докладе обсуждено влияние задействованных технологических подходов на микроструктуру, содержание примесей и, как результат, комплекс свойств полученных титановых сплавов, композиций и изделий из них.

В докладе академика С. А. Фирстова (Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины) «Некоторые тенденции в разработке новых сплавов титана» отмечено, что определенную активность в публикациях, посвященных новым сплавам на основе титана, привлекают два направления — жаропрочные и жаростойкие сплавы титана и сплавы титана биомедицинского назначения.

В первой группе представляют интерес сплавы титана, легированные как «привычными» элементами (алюминий, олово, цирконий и др.), так и бором и кремнием, а также интерметаллидные и упрочненные интерметаллидами сплавы титана.

Основываясь на сходстве диаграмм фазовых равновесий сплавов системы титан–кремний и железо–углерод, предложено рассматривать так называемые титановые стали и титановые чугуны. Термомеханическая обработка первой группы сплавов с содержанием кремния до 3 % позволяет повысить предел текучести при температуре 700 °С до 650 МПа при достижении прочности при комнатной температуре свыше 1150 МПа. При этом жаростойкость таких сплавов существенно превосходит жаростойкость, например, сплава Т16242.

В титановых сталях, варьируя содержание легирующих элементов, можно в широких пределах изменять морфологию мартенситных фаз, регулировать прокаливаемость, а в чугунах — обеспечить высокую жаропрочность. Предел текучести при 800 °С достигает 330 МПа и выше. Возможно существенно повысить модуль Юнга до 160 ГПа. Представляет интерес образование тройных нанодисперсных эвтектических структур.

В случае сплавов титана биомедицинского применения обычно решается задача получения сплавов с модулем Юнга на уровне костного материала для увеличения биомеханической совместимости. Однако при этом снижение модуля неизбежно влечет понижение прочностных характеристик.

Поэтому для конкретных применений необходима оптимизация прочностных и упругих характеристик. Для обеспечения биосовместимости предложена разработка сплавов, легированных нетоксичными или даже полезными для человеческого организма элементами. Здесь, как и в случае жаропрочных материалов, привлекает внимание титановая сталь, легированная оптимальным количеством кремния. Показано, что введение кремния позволяет резко повысить биосовместимость титановых имплантатов в сравнении с известным сплавом ВТ6, содержащим токсичные алюминий и ванадий, и чистым титаном.

Одной из важнейших задач является переход к 3D прототипированию, для чего необходимо решать задачи получения гранул нужной дисперсности из новой группы сплавов. В докладе чл.-кор. НАН Украины *С. В. Ахонина* (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) «Развитие металлургии титана и сплавов на его основе в Украине» рассмотрены особенности металлургического производства титана и титановых полуфабрикатов в Украине.

Титан является уникальным конструкционным материалом. Благодаря высокой удельной прочности сплавы на основе титана нашли широкое применение в авиа- и ракетостроении, производстве военной техники. Хорошая коррозионная стойкость титана обуславливает его значительное использование в химическом и энергетическом машиностроении, при изготовлении теплообменного оборудования и морской техники. Отличная совместимость титана с биологическими тканями определяет его применение при создании эндопротезов.

Украина является одной из пяти стран мира, которые имеют полный цикл производства титана — от добычи титаносодержащих руд, их обогащения и производства губчатого титана до выплавки слитков титановых сплавов и производства практически полного спектра титановых полуфабрикатов (отливок, поковок, прутков, труб и проволоки).

Основой металлургического передела титана в Украине является технология электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью, которая отличается следующими преимуществами по сравнению с традиционным способом получения слитков — вакуумно-дуговым переплавом:

- полное исключение из технологического цикла операции прессования расходного электрода, которая требует специального оборудования большой мощности;
- возможность производства слитков не только круглого, но и слитков-слябов прямоугольного сечения, используемых в качестве заготовок для производства листового проката;
- гарантированное удаление тугоплавких неметаллических включений в промежуточной емкости и повышение за счет этого качества металла слитков;
- получение структурно и химически однородных слитков;
- увеличение выхода годного металла за счет сокращения количества переплавов (один вместо двух, трех).

Разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины технологические процессы электронно-лучевой плавки дают возможность получать высококачественные слитки титана и его сплавов с однородной бездефектной структурой. Эти технологии позволяют за счет использования более дешевого исходного сырья и увеличения сквозно-



Выступления академиков О. М. Ивасишина, С. А. Фирстова, З. Т. Назарчука, чл.-кор. В. М. Нестеренкова

го выхода годного металла снизить себестоимость титановых полуфабрикатов, а, следовательно, повысить конкурентоспособность и расширить области применения титана в различных отраслях промышленности.

Доклад на тему «ЭЛС тонкостенных гофрированных несущих авиационных конструкций из титанового сплава и оценка их сопротивления усталости» представил *К. С. Хрипко* (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины). В нем показаны экономические преимущества применения ЭЛС и ее технологические особенности при изготовлении балочных конструкций.

В докладе *С. П. Панова* «Titanium smelting in the laboratory disk bottom casting furnace» (Astron Ltd, New Zeland) приведены экспериментальные исследования по созданию новой технологии получения титановых изделий либо отработки новых составов титановых сплавов. В печи переплавляется таблетка титановой губки с использованием индукционного нагрева.

А. В. Овчинников (Запорожский ГТУ МОН Украины) в докладе «Применение титана в аддитивных технологиях» рассказал об основных способах формирования изделий методами аддитивных технологий. По его мнению в Запорожском регионе реальна организация научно-производственного кластера аддитивных технологий как за счет наличия производственной базы сырьевых материалов (ЗТМК, ЗМОЗ), так и за счет научно-исследовательских организаций.



Чл.-кор. С. В. Ахонин (в центре) с сотрудниками и коллегами

Доклад на тему «Титан и аддитивное производство» представил *Д. В. Ковальчук* (ЧАО «НВО «Червона хвиля», Киев), в котором был представлен анализ существующих технологий аддитивного производства титановых сплавов, соответствующих технических, технологических и экономических проблем и путей их решения.



Участники конференции из АО «Мотор Сич» во время сессии стендовых докладов



Во время посещения ГП «НПЦ «ТИТАН» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины»



У стенда Запорожского титано-магниевого комбината

Были также заслушаны доклады на темы:

«Концептуальные решения производственного цикла изготовления деталей из титановых сплавов при помощи аддитивных технологий» (Янко Т. Б., Доценко Р. Б., ПАО «Институт титана», НПП «Электромаш», Запорожье);

«High Speed Friction Welding of Titanium Alloys — Structure and Properties of Joints» (Damian Miarak¹, Jolanta Matusiak¹, Adam Pietras¹, Masiej Krystian², ¹Institut Spawalnictwa, Gliwice, Poland, ²Austrian Institute of Technology, Vienna, Austria);

«Влияние структурно-фазового состояния титановых сплавов на их механические свойства в зависимости от метода и скорости испытаний» (Марковский П. Е., Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев);

«Комплексно-легированные сплавы на основе алюминидов титана γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al» (Фир-



У стенда издательства ИЭС

стов С. А.¹, Горная И. Д.¹, Подрезов Ю. Н.¹, Бондарь А. А.¹, Романко П. М.¹, Голтвяница В. С.², Шереметьев А. В.³, ¹Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, ²ООО «Риал», ³ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье);

«Теоретическое описание равновесных диаграмм состояния и фазовых превращений титановых сплавов системы титан-алюминий» (Костин В. А., Григоренко Г. М., Григоренко С. Г., ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев);

«Особенности производства ленточных литых заготовок марки BT1-0 или GRADE 2 из низкосортного губчатого титана» (Калинюк А. Н., Дереча А. Я., Тэлин В. В., Коляда А. Ф., Костенко В. И., Иванов Н. М., ООО «Стратегия БМ», Киев);

«Микроструктура и свойства многослойных материалов на основе сплава Ti-6Al-4V, полу-



Участники конференции у входа в центральный корпус ИЭС

ченных по порошковой технологии» (Ивасишин О. М.¹, Марковский П. Е.¹, Саввакин Д. Г.¹, Стасюк А. А.¹, Приходько С. В.², ¹Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев, ²Инженерно-материаловедческий факультет, Университет Калифорнии, Лос-Анджелес, США).

На конференции были представлены 45 стендовых докладов, с которыми можно было ознакомиться до и после окончания пленарных докладов конференции и во время перерывов.

Во время работы конференции в рамках экспозиции ИЭС проведена выставка «Производство и сварка титана», в которой приняли участие Запорожский титано-магний комбинат, ЧАО «НВО «Червона Хвиля», ГП НТЦ «Патон-Армения» ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, ООО «Витова», ООО «Мелитэк-Украина», ООО «Спектро-Украина». Большой интерес у участников конференции вызвала уникальная экспозиция художественных изделий из титана, которую представил художник-сварщик Дмитрий Кушнирук.

Участники конференции имели возможность познакомиться с направлениями издательской деятельности ИЭС, в том числе с журналами «Автоматическая сварка», «Современная электрометаллургия», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «The Paton Welding Journal», а также с книгами и сборниками по сварке и производству титана. Особый интерес вызвал четвертый выпуск сборника «Титан. Технологии. Оборудование. Производство» (Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2017. — 254 с.) Сборник включает более сорока статей, опубликованных в основном в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2014–2016 гг. по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов (предыдущие три выпуска сборника «Титан. Технологии. Оборудование. Производство», включающие статьи из журналов «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за периоды 2001–2004, 2005–2010, 2011–2013 гг. находятся в открытом

доступе на сайте www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations).

По завершению пленарных докладов для участников конференции организована прогулка на теплоходе по р. Днепр, во время которой были продолжены дискуссии и обсуждения основной темы конференции: титан — металл настоящего и будущего. В непринужденной обстановке можно было задать вопросы академикам, директорам институтов и предприятий и, что важно, получить на них ответы.

Для участников конференции 13 июня была организована ознакомительная поездка на ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины». Предприятие специализируется на производстве слитков титана и его сплавов, а также жаропрочных сплавов способом электронно-лучевого переплава. Большой интерес вызвала технология оплавления поверхности готовых слитков ЭЛП, которая заменяет последующую механическую обработку.

Доброжелательная, гостеприимная, творческая обстановка конференции способствовала развитию полезных дискуссий, установлению деловых контактов. Участники конференции выразили единодушное одобрение предложения о необходимости проведения конференции «Титан. Производство и применение в Украине» на постоянной основе.

По итогам конференции «Титан 2018. Производство и применение в Украине» будут изданы труды, которые можно заказать в редакции журнала «Современная электрометаллургия» или ознакомиться в открытом доступе на сайте издательства ИЭС им. Е. О. Патона по ссылке: <http://patonpublishinghouse.com/eng/proceedings>.

Организационный комитет конференции выражает благодарность и признательность ПАО «Институт Титана», ЧАО «НВО «Червона Хвиля», НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона и Центру электронно-лучевой сварки ИЭС им. Е. О. Патона за помощь в проведении конференции «Титан 2018. Производство и применение в Украине».

В. Н. Липодаев

В настоящем выпуске журнала опубликованы статьи по материалам докладов, представленных на Международной конференции «Титан 2018. Производство и применение в Украине», которые соответствуют тематике журнала «Современная электрометаллургия».

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT22 СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ

С. В. Ахонин¹, В. А. Березос¹, А. Н. Пикулин¹,
А. Ю. Северин¹, С. Л. Шваб¹, А. Г. Ерохин²

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины».
03028, г. Киев, ул. Ракетная, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

Проведены комплексные работы по исследованию возможности получения слитков высокопрочного сложнолегированного титанового сплава VT22 из первичной шихты. По технологии электронно-лучевого переплава с промежуточной емкостью и порционной подачей металла в водоохлаждаемый кристаллизатор получены слитки диаметром 400 мм и длиной до 3 м, из которых изготовлены полуфабрикаты в виде пластин и горячепрессованных прутков диаметром 60 мм. Представлены результаты исследований структуры и механических свойств полуфабрикатов, изготовленных из слитков титанового сплава VT22. Установлено, что металл полученных слитков и полуфабрикатов соответствует требованиям стандартов как по химическому составу, так и по структуре и механическим свойствам. При этом материал характеризуется хорошей пластичностью при высоких прочностных характеристиках. Показано, что электронно-лучевая технология является эффективным способом получения сложнолегированных сплавов титана. Библиогр. 12, табл. 4, ил. 11.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; высокопрочный титановый сплав; слиток; химический состав; структура; деформация; механические свойства

Важнейшими элементами конструкций авиационной и космической техники являются детали и узлы, изготовленные из высокопрочных титановых сплавов [1]. По уровню прочности титановые сплавы принято разделять на: малопрочные (временное сопротивление разрыву менее 650 МПа); средней прочности (от 700 до 1000 МПа) и высокопрочные (более 1000 МПа). Сплав VT22 относится к высокопрочным титановым сплавам.

Сплав VT22 является двухфазным ($\alpha + \beta$)-сплавом, близким по составу к критическому. Высокопрочный сплав VT22 эффективно упрочняется с помощью термической обработки и обладает высокими эксплуатационными свойствами, позволяющими применять его в силовых конструкциях планера и шасси самолета. Из него могут быть изготовлены тяжело нагруженные силовые элементы, такие как подкосы и цилиндры шасси, кронштейны системы управления, детали механизации крыла [2].

К деталям тяжело нагруженных силовых элементов предъявляются высокие требования, которые постоянно совершенствуются и ужесточаются. Это в первую очередь относится к качеству используемых материалов [3]. Поэтому с целью широкого применения титановых сплавов в различных конструкциях необходимо не только создавать новые материалы на основе титана с более

высокими эксплуатационными характеристиками, но и в дальнейшем совершенствовать производство титановых полуфабрикатов. Любые несовершенства химической и структурной однородности в титановых сплавах приводят к снижению прочности и долговечности изделий. Получение титановых сплавов связано с трудностями, обусловленными высокой чувствительностью титана к примесям внедрения, особенно к кислороду, азоту, водороду, углероду и взаимодействием со многими химическими элементами, в результате чего образуются твердые растворы или химические соединения. Кроме того, одним из основных структурных несовершенств титановых сплавов является наличие неметаллических включений. Высокая активность титана приводит к протеканию физико-химических процессов взаимодействия с газами даже в твердом состоянии. Поэтому неметаллические включения, в частности, нитриды и оксиды, могут образовываться как в процессе выплавки слитков, так и на различных этапах технологического передела в готовую продукцию. Неметаллические включения могут быть внесены шихтовыми материалами в процессе плавки, а также сформированы во время термической обработки готового изделия. Титан активно взаимодействует не только с газами, но и с другими элементами, в том числе с легирующими

компонентами сплавов, поэтому локальное обогащение отдельных объемов слитков легирующими элементами может приводить к образованию интерметаллических включений, например, Ti_3Al , $TiCr$ и других [4].

В настоящее время не все способы производства слитков титановых сплавов позволяют получить качественный металл, а при нарушении технологического процесса производства сплавов титана в слитках обнаруживаются дефекты, которые снижают качество металла. Таким образом, решение проблемы получения качественных слитков высокопрочных титановых сплавов из различных шихтовых материалов весьма актуально.

Электронно-лучевая плавка (ЭЛП) — наиболее эффективный способ вакуумной металлургии для получения сплавов, в том числе тугоплавких и высокореакционных, со сверхнизким содержанием газов, летучих примесей и неметаллических включений. При ЭЛП возможно в широких пределах регулирование скорости плавки, благодаря независимому источнику нагрева, что, в свою очередь, позволяет регулировать продолжительность пребывания металла в жидком состоянии. ЭЛП является технологией, позволяющей практически полностью обеспечить удаление тугоплавких включений высокой и низкой плотности [5]. Таким образом, ЭЛП позволяет значительно повысить качество слитков из титановых сплавов [6–8].

Большинство высокопрочных титановых сплавов содержат в составе высокое количество легирующих элементов, что несколько усложняет их производство способом электронно-лучевой плавки. При выплавке слитков высокопрочных титановых сплавов способом ЭЛП возникает проблема обеспечения заданного химического состава слитка, так как плавка в относительно глубоком вакууме способствует избирательному испарению легирующих элементов с высокой упругостью пара [9]. В данном случае к таким элементам относятся алюминий и хром. Концентрация в слитке элементов с упругостью пара ниже упругости пара титана, в данном случае Mo , V и Zr , может даже несколько повышаться.

С целью совершенствования технологии производства слитков сложнелегированных сплавов титана в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины проведены работы по выплавке партии слитков сплава BT22. Получены слитки круглого сечения диаметром 400 мм и длиной до 3 м. Слитки получали по технологии ЭЛП с промежуточной емкостью и порционной подачей жидкого металла в водоохлаждаемый кристаллизатор (рис. 1).

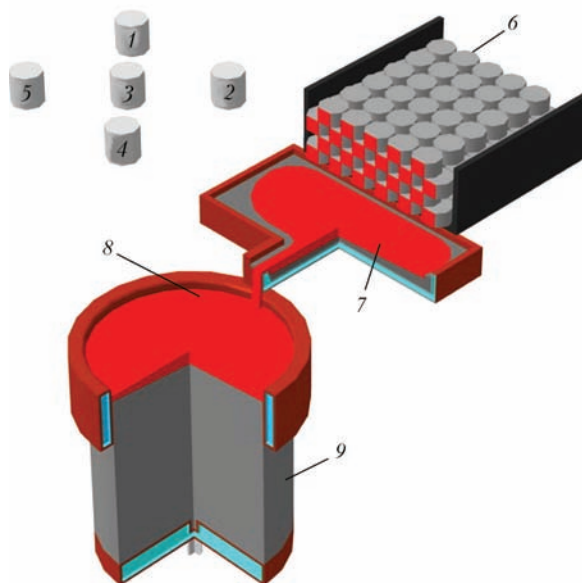


Рис. 1. Схема электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью: 1–5 — электронно-лучевые пушки; 6 — расходоуемая заготовка; 7 — промежуточная емкость; 8 — кристаллизатор; 9 — выплавляемый слиток

На основе ранее проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины фундаментальных исследований процессов испарения компонентов сплавов из расплава в вакууме [5] проводили расчеты прогнозируемого химического состава выплавляемых слитков, по результатам которых осуществляли корректировку составляющих шихтовой заготовки. Легирующие компоненты с высокой упругостью пара (Al , Cr) шихтовали с учетом компенсации потерь на испарение.

Шихтовую заготовку для выплавки слитков формировали в нерасходуемый короб. Заготовка представляла собой плотно уложенные брикеты титановой губки ТГ-120 с легирующими компонентами.

Технология получения слитков высокопрочного сплава титана BT22 в электронно-лучевой установке включала в себя следующие этапы: формирование расходоуемой заготовки; подготов-



Рис. 2. Внешний вид электронно-лучевой установки УЭ5812



Рис. 3. Процесс электронно-лучевой плавки слитка диаметром 400 мм из первичной шихты

ку оборудования и технологической оснастки к плавке; процесс плавки; контроль качества выплавленного слитка.

Для проведения опытных плавки использовали электронно-лучевую установку УЭ5812 (рис. 2, 3).

В процессе плавки контролировали следующие технологические параметры: ускоряющее напряжение электронно-лучевых пушек, токи лучей, скорости подачи исходной шихты в зону плавки и вытяжения слитка из кристаллизатора, температуру охлаждающей воды. При этом производительность процесса составляла 270 кг/ч, суммарная мощность электронно-лучевого нагрева примерно 600 кВт.

Боковая поверхность выплавленных слитков после охлаждения в вакууме до температуры ниже 300 °С чистая, повышенная концентрация примесных элементов на поверхности в виде окисленного или альфированного слоя отсутствует. Глубина поверхностных дефектов типа «гофр» составляет 2...3 мм, дефекты в виде разрывов, трещин или несплавлений отсутствуют.

Для оценки качества металла полученных слитков проводили исследование химического состава образцов, отобранных по длине слитка в верхней, средней и нижней частях. Результаты анализа химического состава металла полученных слитков показали, что распределение легирующих элемен-



Рис. 4. Внешний вид оплавленного слитка из титанового сплава BT22

тов по их длине равномерное и соответствует марочному составу (табл. 1).

Ввиду отсутствия окисленного или альфированного слоя дефекты типа «гофр» были удалены путем электронно-лучевого оплавления боковой поверхности слитка [10] (рис. 4).

Макроструктуру слитков изучали на поперечных темплетах, вырезанных из середины слитков. Выявление структуры проводили травлением темплетов в 15%-ном растворе фтористой кислоты с добавлением 3%-ной азотной кислоты при комнатной температуре.

Структура металла слитка плотная, однородная, с отсутствием различно травящихся зон по сечению слитка (рис. 5). Существенной разницы в структуре центральной зоны слитка и периферийной не наблюдается. Дефекты в виде пор, раковин, трещин и неметаллических включений не обнаружены. Характерной для слитков ВДП сегрегации легирующих элементов [11] не обнаружено. Размер зерен соответствует 7–8 баллу по 10-ти балльной шкале макроструктур.

Для исследования наличия в титановых слитках внутренних дефектов в виде неметаллических включений, пор и несплошностей использовали метод ультразвуковой дефектоскопии. Исследования проводили с помощью ультразвукового дефектоскопа УД4-76 эхоимпульсным методом при контактном варианте контроля. Рабочая частота анализа составляла 1,25 МГц, что обеспечивало максимальное соотношение сигнал/шум.

При исследовании слитков наблюдались множественные отражения малой амплитуды, что типично для литого металла и является результатом отражения сигнала от границ зерен (дендритов).

Таблица 1. Распределение легирующих элементов по длине слитка титанового сплава BT22, мас. %									
Сплав	Место отбора проб	Al	Mo	V	Fe	Cr	Zr	O	N
BT22	Верх	5,1	4,2	4,9	0,90	1,3	0,01	0,11	0,012
	Середина	5,2	4,5	4,7	1,0	1,3	0,01	—	—
	Низ	5,0	4,1	5,0	1,0	1,4	0,01	—	—
	ГОСТ 19807–91	4,4...5,7	4,0...5,5	4,0...5,5	0,5...1,5	0,5...1,5	<0,3	<0,18	<0,05

Ни в одном из слитков не выявлено несплошностей, усадочных раковин, пористости, а также единичных отражений, которые можно было бы интерпретировать как крупные неметаллические включения.

Прочность высокопрочных титановых сплавов определяется не только степенью легирования, но и структурой, которая формируется при последующих термомеханической и термической обработках. Однако с повышением прочности сплава, как правило, снижается его пластичность, что является существенным недостатком материала при изготовлении из него конструкций, работающих на знакопеременных и ударных нагрузках. Поэтому в последнее время все большее внимание уделяется оптимизации параметров деформирования слитков при изготовлении из них полуфабрикатов и режимам упрочняющей термической обработки.

Физико-химические и теплофизические особенности титана и сплавов на его основе требуют тщательного подхода к процессам их деформирования. Это обусловлено следующими факторами. Пониженная теплопроводность титановых сплавов приводит к температурным перепадам по сечению слитков и заготовок при их нагреве, возникновению значительных внутренних напряжений, а в отдельных случаях к образованию трещин. Это обуславливает необходимость ограничения скорости нагрева особенно слитков и заготовок больших размеров. При охлаждении заготовок также могут возникать значительные температурные перепады. Например, быстрое захлаживание концов заготовки, острых углов, тонких элементов сечений заготовок чрезвычайно затрудняет обеспечение равномерной деформации, приводит к образованию трещин и ряда других дефектов.

С целью дальнейшего изучения качества металла слитков сплавов титана, полученных способом ЭЛП, проведены комплексные исследовательские работы по изготовлению полуфабрикатов в виде листов. От механически обработанного слит-

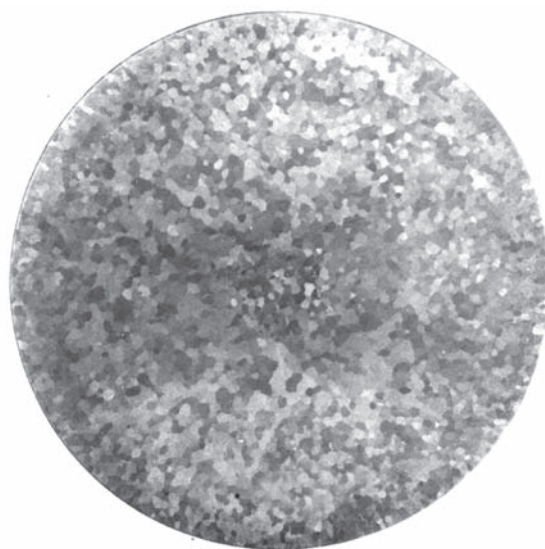


Рис. 5. Макроструктура слитка диаметром 400 мм титанового сплава BT22, полученного способом ЭЛП

ка отрезали исходные заготовки, которые подвергали горячей деформационной обработке в виде прокатки в продольном и поперечном направлениях на реверсивном прокатном ДУО-стане Skoda 355/500 (рис. 6).

Нагрев заготовок осуществляли в электропечи сопротивления без применения защитной атмосферы и защитных покрытий. Температура начала деформации составляла 1180 °С, конца — 850 °С. Были получены пластины шириной 350 мм, длиной 700 мм, толщиной 10 мм (рис. 7). На поверхности полученных пластин при визуальном осмотре трещины, расслоения, а также включения не обнаружены.

Микроструктуру пластин сплава BT22 после прокатки исследовали на микроскопе «Neophot-2». Микроструктура деформированного металла состояла из β -зерен с нерекристаллизованной пластинчатой α -фазой в объеме зерна, сгруппированной в колонии (рис. 8). Толщина пластин α -фазы составляла 0,7...2,0 мкм. В промежутках между α -колониями и α -пластинами располагалась β -фаза.

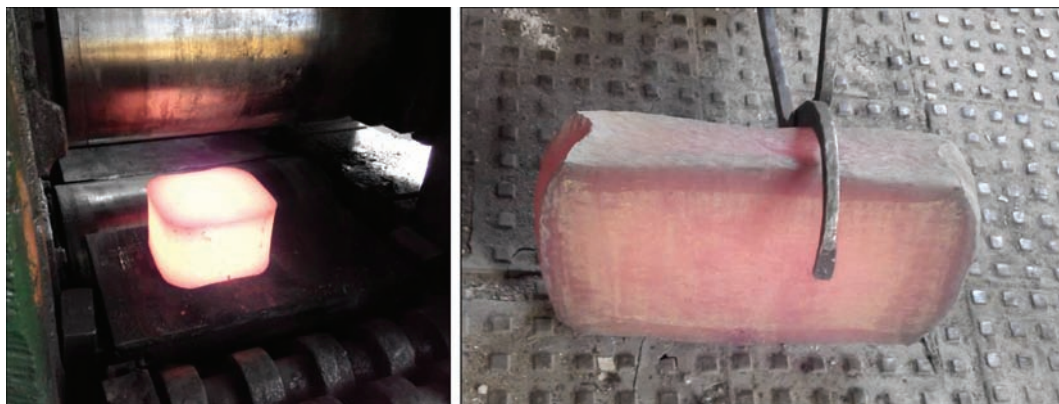


Рис. 6. Продольно-поперечная прокатка титанового сплава BT22



Рис. 7. Пластина размерами 50×700×10 мм из титанового сплава BT22

По границам β -зерен наблюдали α -оторочку. Большинство α -пластин имели волнистые границы, что может свидетельствовать о сложном внутреннем строении пластин. Сложное строение α -фазы вносит значительный вклад в увеличение прочности металла и предел прочности основного металла при этом составил 1230...1270 МПа (табл. 2). Механические свойства на растяжение определяли при нормальной температуре на цилиндрических образцах по ГОСТ 1497–84.

В дальнейшем полученные пластины подвергли отжигу по следующему режиму: нагрев до

750 °С, выдержка 1 ч с последующим охлаждением с печью [12].

Изучение микроструктуры отожженных пластин показало, что в структуре образца встречаются α -пластины с волнистыми и прямолинейными границами (рис. 9). Металл образца состоит из крупных первичных β -зерен с нерекристаллизованной внутризеренной структурой. На границах зерен присутствует α -оторочка шириной 1,5...2,5 мкм. Пластиночатая α -фаза в объеме зерна собрана в колонии, длина пластин составляет 10...30 мкм, ширина — около 1 мкм. В промежутках между α -пластинами располагается β -фаза. Границы некоторых пластин имеют извилистый характер, что может указывать на протекание процесса глобуляризации α -фазы.

Механические испытания показали некоторый разброс свойств по пределу прочности σ_b (табл. 3). Причиной этого может быть структурная неоднородность металла образцов после термомеханической обработки. Для получения наилучшего сочетания характеристик прочности для титанового сплава BT22 рекомендуется проводить более сложные режимы термической обработки. Так

Т а б л и ц а 2. Механические свойства сплава BT22 после деформационной обработки					
Сплав	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCV, Дж/см ²
BT22	1228...1274	1182...1205	12	39	19...21

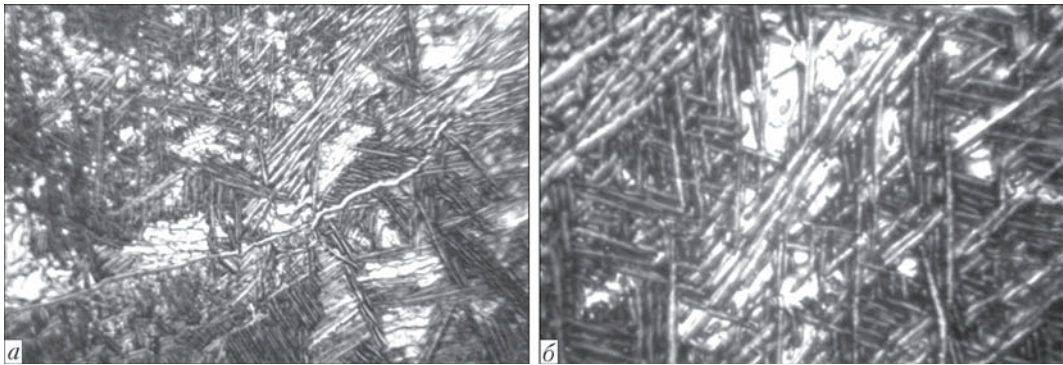


Рис. 8. Микроструктура сплава BT22 после деформационной обработки: а — ×500; б — ×1200

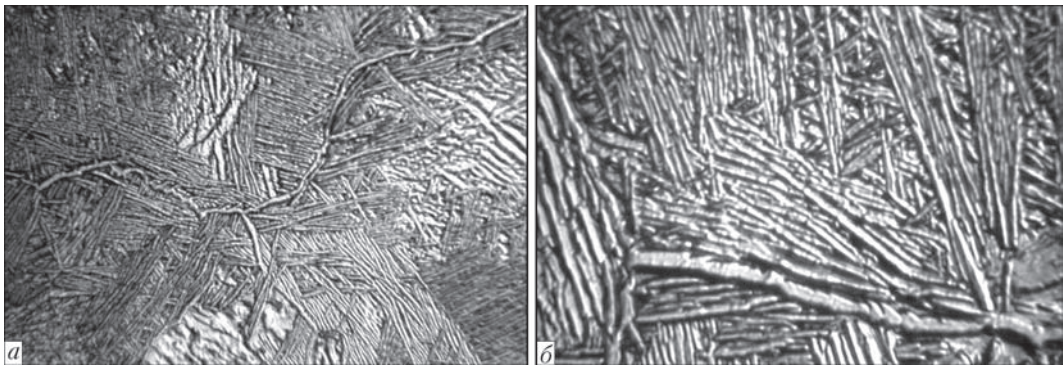


Рис. 9. Микроструктура отожженных пластин сплава титана BT22: а — ×500; б — ×1200

Т а б л и ц а 3 . Механические свойства сплава ВТ22 после отжига					
Сплав	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCV, Дж/см ²
ВТ22	1026...1088	967...981	15...17	25...30	22...25

как отожженные пластины в дальнейшем были использованы для исследования свариваемости сплава ВТ22, полученного способом ЭЛП, упрочняющую термическую обработку пластин не проводили.

Также были проведены работы по изготовлению горячепрессованных прутков диаметром 60 мм из слитка сплава ВТ22, выплавленного способом ЭЛП. Первоначально из слитка диаметром 400 мм титанового сплава ВТ22 на ковочном прессе были получены кованные заготовки диаметром 180 мм. Нагрев исходных заготовок осуществляли в печи, оснащенной газовыми горелками, до температуры 1020 °С. Перед началомковки проводили нагрев ковочного бойка до температуры 250...300 °С. Ковку на начальной стадии обработки слитков производили до степени деформации заготовки 20...30 %. Температура концаковки была не ниже 800 °С. В конце первого этапаковки полученную заготовку перерубывали на две равные части, после чего их помещали в печь с последующим нагревом до температуры 980 °С. После нагрева заготовку протягивали до диаметра приблизительно 180 мм с последующей правкой.

Далее заготовки подвергали прессованию в пруток диаметром 60 мм. Нагрев перед прессованием осуществляли в электропечи до температуры 1050...1100 °С в (α + β)-области. От полученных прутков были отобраны пробы для определения макроструктуры. В макроструктуре металла полученных прутков трещин, расслоений, пустот, металлических и неметаллических включений не обнаружено (рис. 10). Величина макрозерна соответствовала 3-баллу согласно 10-бальной шкалы макроструктур по ГОСТ 26492–85.

Полученные прутки подвергали термической обработке (нагрев до температуры 850 °С с последующей выдержкой 1,5 ч; охлаждение с печью до 790 °С, выдержка 2 ч с последующим охлаждением на воздухе; старение при 600 °С, выдержка

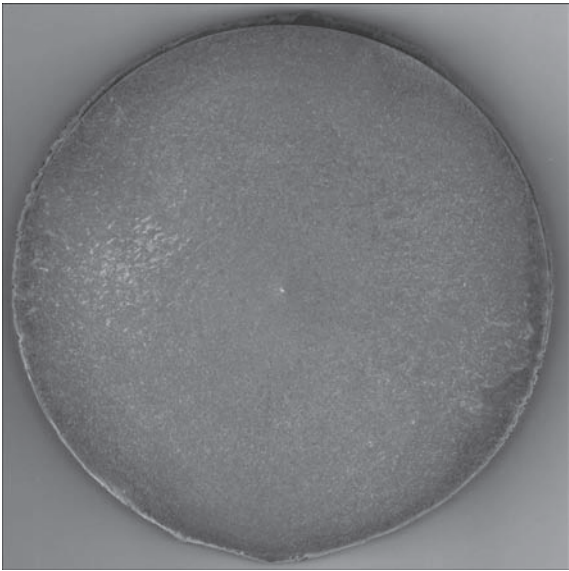


Рис. 10. Макроструктура прессованного прутка диаметром 60 мм



Рис. 11. Прессованные прутки диаметром 60 мм из титанового сплава ВТ22

4 ч с последующим охлаждением на воздухе), а затем механической до диаметра 60 мм и длиной 500...800 мм (рис. 11).

Механические свойства прессованных прутков определяли при 20 °С после проведенной термической обработки (табл. 4). Эти данные позволяют сделать вывод, что механические свойства полуфабрикатов из сплава ВТ22, полученного способом ЭЛП полностью соответствуют требованиям стандартов.

Таким образом, проведенные работы показывают, что электронно-лучевая плавка является эффективным способом получения качественных слитков из высокопрочного титанового сплава ВТ22, а качество полуфабрикатов соответствует

Т а б л и ц а 4 . Механические свойства полуфабрикатов из высокопрочного титанового сплава ВТ22, полученного способом ЭЛП							
Сплав	Вид заготовки	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCV, Дж/см ²	Твердость HB
ВТ22	Прессованный пруток	1250	1200	10	35	40	320
	ОСТ 1 90266–86	>1200	–	>6	>14	>18	300...340

требованиям стандартов. При этом металл характеризуется повышенной пластичностью при высоких прочностных характеристиках.

Список литературы

1. Хореев А. И., Хореев М. А. (2005) Титановые сплавы, их применение и перспективы развития. *Материаловедение*, **7**, 25–34.
2. Антонюк С. Л., Моляр А. Г., Калинюк А. Н. и др. (2003) Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины. *Современная электрометаллургия*, **1**, 10–14.
3. Бычков А. С., Моляр А. Г. (2016) Эксплуатационная несущая способность деталей конструкций отечественных воздушных судов транспортной категории из титановых сплавов. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, **71**, 18–29.
4. Бабенко Е. П., Долженкова Е. В. (2014) Исследование причин разрушения крупногабаритного изделия из сплава VT23. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **3**, 82–85.
5. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В., Жук Г. В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
6. Shambten C. E. (1995) Titanium alloy hearth melt «only» technology development. Titanium 95. Science and Technology. In: *Proc. of the 8-th World Conf. on Titanium* (Birmingham, UK, October 22–26, 1995), Vol. 2, 1438–1446.
7. Buttrill W. H., Shambten C. E. (1995) Hearth melt plus vacuumarc remelt: production status. *Ibid.*, pp. 1446–1454.
8. Poulsen E., Chitmis W., Made M. (1999) Status of titanium cold hearth melting. Titanium 99. Science and Technology. In: *Proc. of the 9-th World Conf. on Titanium* (Saint-Petersburg, Russia, June 7–11, 1999), Vol. 3, 1328–1335.
9. Ахонин С. В., Северин А. Ю., Березос В. А. и др. (2016) Особенности выплавки слитков титанового сплава VT19 в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью. *Современная электрометаллургия*, **2**, 23–27.
10. Ахонин С. В., Березос В. А., Пикулин А. Н. и др. (2014) Электронно-лучевое оплавление поверхности слитков титана. *Там же*, **2**, 21–25.
11. Александров В. К., Аношкин Н. Ф., Бочвар Г. А. и др. (1979) *Полуфабрикаты из титановых сплавов*. Москва, Металлургия.

12. Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Справочник. Москва, ВИЛС-МАТИ.

References

1. Khoreev, A.I., Khoreev, M.A. (2005) Titanium alloys, their application and prospects of development. *Materialovedenie*, **7**, 25–34 [in Russian].
2. Antonyuk, S.L., Molyar, A.G., Kalinyuk, A.N. et al. (2003) Titanium alloys for aircraft industry of Ukraine. *Advances in Electrometallurgy*, **1**, 9–12.
3. Bychkov, A.S., Molyar, A.G. (2016) Service load-carrying capacity of parts of structures of national transport category aircrafts from titanium alloys. *Open Inform. i Komputer. Integr. Tekhnologii*, **71**, 18–29 [in Russian].
4. Babenko, E.P., Dolzhenkova, E.V. (2014) Investigation of fracture causes of large-sized part of VT23 alloy. *Metallurg. i Gornorudnaya Promyshl.*, **3**, 82–85 [in Russian].
5. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Shambten, C.E. (1995) Titanium alloy hearth melt «only» technology development. Titanium 95. Science and Technology. In: *Proc. of the 8-th World Conf. on Titanium* (Birmingham, UK, October 22–26, 1995), Vol. 2, 1438–1446.
7. Buttrill, W. H., Shambten, C. E. (1995) Hearth melt plus vacuumarc remelt: production status. *Ibid.*, 1446–1454.
8. Poulsen, E., Chitmis, W., Made, M. (1999) Status of titanium cold hearth melting. Titanium 99. Science and Technology. In: *Proc. of the 9-th World Conf. on Titanium* (Saint-Petersburg, Russia, June 7–11, 1999), Vol. 3, 1328–1335.
9. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.A. et al. (2016) Peculiarities of melting of titanium alloy VT19 ingots in electron beam cold hearth installation. *Sovrem. Elektrometall.*, **2**, 23–27 [in Russian].
10. Akhonin, S.V., Berezos, V.A., Pikulin, A.N. et al. (2014) Electron beam melting of surface of titanium alloy ingots. *Ibid.*, **2**, 21–25 [in Russian].
11. Aleksandrov, V.K., Anoshkin, N.F., Bochvar, G.A. et al. (1979) *Semiproducs of titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
12. Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Refer. Book. Moscow, VILS-MATI [in Russian].

ОТРИМАННЯ ВИСОКОМІЩНОГО СПЛАВУ ТИТАНУ VT22 СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

С. В. Ахонін¹, В. О. Березос¹, О. М. Пікулін¹, А. Ю. Северин¹, С. Л. Шваб¹, О. Г. Єрохін²

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малеви́ча, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України».

03028, м. Київ, вул. Ракетна, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

Проведено комплексні роботи по дослідженню можливості отримання зливо́ків складнолегованого титанового сплаву VT22 з первинної шихти. За технологією електронно-променевого пере́плаву з проміжною ємністю і порціонною подачею металу в водоохолоджуваній кристалізатор отримані зливки діаметром 400 мм і довжиною до 3 м, з яких виготовлені напівфабрикати у вигляді гарячепресованих прутків діаметром 60 мм. Представлено результати досліджень структури і механічних властивостей напівфабрикатів у вигляді гарячепресованих прутків, виготовлених із зливо́ків титанового сплаву VT22. Показано, що метал отриманих зливо́ків і напівфабрикатів відповідає вимогам стандартів. При цьому метал характеризується підвищеною пластичністю при високих значеннях міцності. Показано, що електронно-променева технологія є ефективним способом отримання складнолегованих сплавів титану. Бібліогр. 12, табл. 4, іл. 11.

Ключові слова: електронно-променева плавка; високоміцний титановий сплав; зливок; хімічний склад; структура; деформація; механічні властивості

PRODUCING OF HIGH-STRENGTH TITANIUM ALLOY VT22 BY METHOD OF ELECTRON BEAM MELTING

S.V. Akhonin¹, V.A. Berezos¹, A.N. Pikulin¹, A.Yu. Severin¹, S.L. Shvab¹, A.G. Erokhin²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²SE «RPC «Titan» of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

26 Raketnaya Str., 03028, Kyiv. E-mail: titan.paton@gmail.com

The integrated works were carried out on investigation of feasibility for producing ingots of high-strength complex-alloyed titanium alloy VT22 of a primary charge.. Using technology of an electron beam cold hearth remelting and a portion supply of metal into a water-cooled mould the ingots of 400 mm diameter and up to 3 m length were produced, from which the semi-products in the form of plates and hot-pressed rods of 60 mm diameter were manufactured. Results of investigations of structure and mechanical properties of semi-products, made of titanium alloy VT22 ingots, are presented. It was found that the metal of produced ingots and semi-products is in compliance with requirements of standards both by the chemical composition and also by the structure and mechanical properties. Moreover, the material is characterized by a good ductility at high strength characteristics. It is shown that the electron beam technology is an effective method for producing the complex-alloyed alloys of titanium. 12 Ref, 4 Tabl., 11 Fig.

Key words: electron beam melting; high-strength titanium alloy; ingot; chemical composition; structure; deformation; mechanical properties

Поступила 06.11.2017

НОВЫЕ КНИГИ



Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. — 642 с. ISBN 978-617-7015-74-0

Сборник включает 86 статей и докладов сотрудников отдела физики газового разряда и техники плазмы Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, опубликованных за период 1978–2018 гг. В нем обобщен сорокалетний опыт научно-исследовательской деятельности отдела в области теоретического исследования и компьютерного моделирования физических явлений, протекающих при дуговых, плазменных, лазерных и гибридных процессах сварки, наплавки и напыления покрытий. Может быть интересен и полезен ученым, инженерам и технологам, занимающимся проблемами дуговой, плазменной, лазерной и гибридной сварки и обработки материалов, а также аспирантам и студентам, изучающим теоретические основы сварочных и родственных процессов.

Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд: Каталог інноваційних пропозицій цільової комплексної програми наукових досліджень «Ресурс». Київ: Інститут електрозварювання ім. С.О. Патона НАН України, 2018. — 65 с.

До каталогу інноваційних пропозицій увійшли 62 готових до впровадження нових розробок науковців, виконаних за Цільовою програмою НАН України з урахуванням нагальних потреб економіки держави. Вони виконані для підприємств і організацій сучасних галузей промисловості, будівництва та агропромислового комплексу.



Заказы на сборник и каталог просьба направлять
в редакцию журнала «Современная электрометаллургия»

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КРУПНЫХ СЛИТКОВ АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ УСТАНОВКАХ*

С. В. Ахонин¹, А. Ю. Северин¹, В. А. Березос¹,
А. Н. Пикулин¹, А. Г. Ерохин²

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины».
03028, г. Киев, ул. Ракетная, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

Математическая модель кристаллизации цилиндрических слитков титановых сплавов при электронно-лучевой плавке адаптирована для расчетов кристаллизации крупных слитков диаметрами от 200 до 600 мм сплавов на основе алюминидов титана. Проведены расчеты для слитка диаметром 200 мм интерметаллида TiAl. В результате расчетов получены поля температур в слитке и определены оптимальные режимы ведения плавки. На электронно-лучевой установке УЭ-208М впервые проведена опытная плавка крупного слитка диаметром 200 мм интерметаллидного сплава Ti–29Al. Исследовано качество полученного слитка и установлено, что алюминий равномерно распределен по поперечному его сечению, а это говорит о корректно подобранных с помощью математического моделирования режимах ведения электронно-лучевой плавки. Библиогр. 8, табл. 2, ил. 3.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; математическое моделирование; слиток; сплав; химический состав; структура

В промышленном производстве слитков их качество определяется совокупностью технологических факторов, включающих как условия их выплавки, так и затвердевания металла. Каждый из этих факторов имеет самостоятельное значение с точки зрения получения металлопродукции высокого качества. Однако процесс затвердевания слитка, в ходе которого происходят различного рода ликвационные и усадочные явления в совокупности с весьма сложными массо- и теплопереносом в жидкой и твердой фазах, представляется крайне важным технологическим этапом, позволяющим обеспечивать достижение максимального положительного результата посредством наложения дополнительных физических воздействий, которые могут изменять характер развития конвективных потоков в жидкой ванне, а также саму форму жидкой ванны. Основной проблемой при получении крупных слитков различных сплавов, в том числе и титановых, является возникновение дефектов макроструктуры (различные ликвации, полосчатость, послойная кристаллизация) [1–3]. Возникновение таких металлургических дефектов отрицательно сказывается на структуре и свойствах сплавов на основе алюминидов титана и является недопустимым [4]. Целью данной работы является изучение распределения легирующих элементов в глубокой жидкой ванне и слитке, разработка технологических рекомендаций по его выплавке и

получение качественного, химически однородного, бездефектного слитка алюминидов титана способом электронно-лучевой плавки (ЭЛП).

Расчет режимов плавки крупных слитков алюминидов титана. В ИЭС им. Е. О. Патона разработана математическая модель кристаллизации цилиндрических слитков титановых сплавов при ЭЛП [5–7]. Эта модель была адаптирована для расчетов кристаллизации круглых крупных слитков диаметрами от 200 до 600 мм сплавов на основе алюминидов титана. В настоящей работе расчеты проводили для слитка диаметром 200 мм интерметаллида TiAl. На основании расчетов путем изменения величины энергии, сообщаемой электронными лучами свободной поверхности слитка, получены три режима плавки: с наличием глубокой (примерно 0,05 м) ванны жидкого металла на поверхности слитка (режим 1), мелкой (приблизительно 0,02 м) (режим 2) и твердо-жидкого состояния поверхности (режим 3). Установлены мощности обогрева центральной и периферийной зон поверхности слитка, соответствующие режимам 1–3 (табл. 1).

В результате расчетов в рамках описанной модели получены поля температур в слитке (рис. 1).

В качестве базовых технологических параметров ведения плавки были приняты значения соответствующие режиму 2, что позволило получить

*По материалам доклада, представленного на Международной конференции «Титан-2018. Производство и применение в Украине», 11–13 июня 2018, г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

Таблица 1. Режимы электронно-лучевого нагрева поверхности слитка диаметром 200 мм алюминид титана в кристаллизаторе			
Номер режима	Режим	Мощность, кВт	
		центр	периферия
1	Глубокая ванна	12	12
2	Мелкая ванна	8	10
3	Твердожидкая торцевая поверхность	6	8

не глубокую ванну жидкого металла и, соответственно, не допустить возникновения химических неоднородностей.

Получение слитков диаметром 200 мм алюминид титана способом ЭЛП. На электронно-лучевой установке УЭ-208М [8] проведена опытная плавка крупного слитка диаметром 200 мм интерметаллидного сплава Ti–29Al. Слиток подвергли двойному электронно-лучевому переплаву. Первый переплав — основной, обеспечивающий введение легирующих элементов в состав сплава; второй — выравнивающий. Элемент с высокой упругостью пара (алюминий) шихтовали с учетом потерь на испарение.

Для выплавки слитков использовали шихту в следующих пропорциях: алюминий марки А5 — 57 кг, заготовка титановая — 93 кг. Внешний вид шихтовых заготовок для выплавки слитков алюминид титана приведен на рис. 2, а. Технологические параметры плавки следующие:

общая мощность ЭЛ нагрева, кВт	60
мощность в кристаллизаторе, кВт	18
скорость плавки, кг/ч	60
удельный расход электроэнергии (без учета вакуумной системы), кВт·ч/кг	1

После плавки слиток находился в камере в условиях вакуума до полного его охлаждения. Получен слиток с чистовым размером диаметром 195 мм интерметаллидного сплава Ti–29Al массой 114 кг (рис. 2, в). Внешних грубых дефектов в виде порывов и неслитин в слитках не обнаружено, поверхность удовлетворительная с небольшими гофрами. Вес слитка после механической обработки составил 90 кг (рис. 2, з).

Исследование качества крупного слитка ЭЛП алюминид титана. Содержание легирующих элементов сплава определяли методом индуктивно связанной плазмы/оптической эмиссионной спектроскопии (ICP/OES) на ICP-спектрометре ICAP 6500 DUO. Для определения химическим методом содержания кислорода, азота, водорода изготавливали образцы МИ-99 цилиндрической формы диаметром 3 и длиной 3 мм. Данные химического анализа приведены в табл. 2. Исследо-

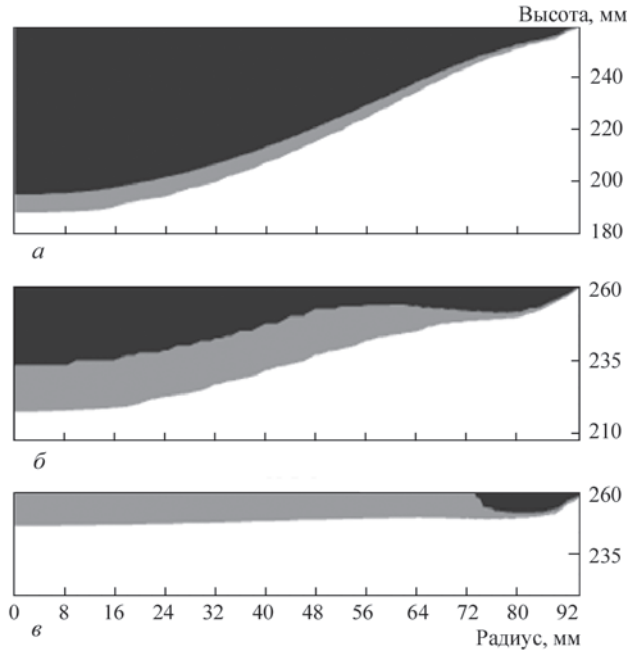


Рис. 1. Температурные поля в слитке диаметром 200 мм алюминид титана при различных режимах нагрева: а — режим 1; б — режим 2; в — режим 3

вания химического состава показали удовлетворительное распределение химических элементов по длине слитка. Отклонение в содержании элементов в головной и донной частях объясняется нестационарными режимами в начале и конце



Рис. 2. Внешний вид шихтовой заготовки (а), процесс плавки (б), слиток алюминид титана Ti–29Al после плавки (в) и механической обработки (з)

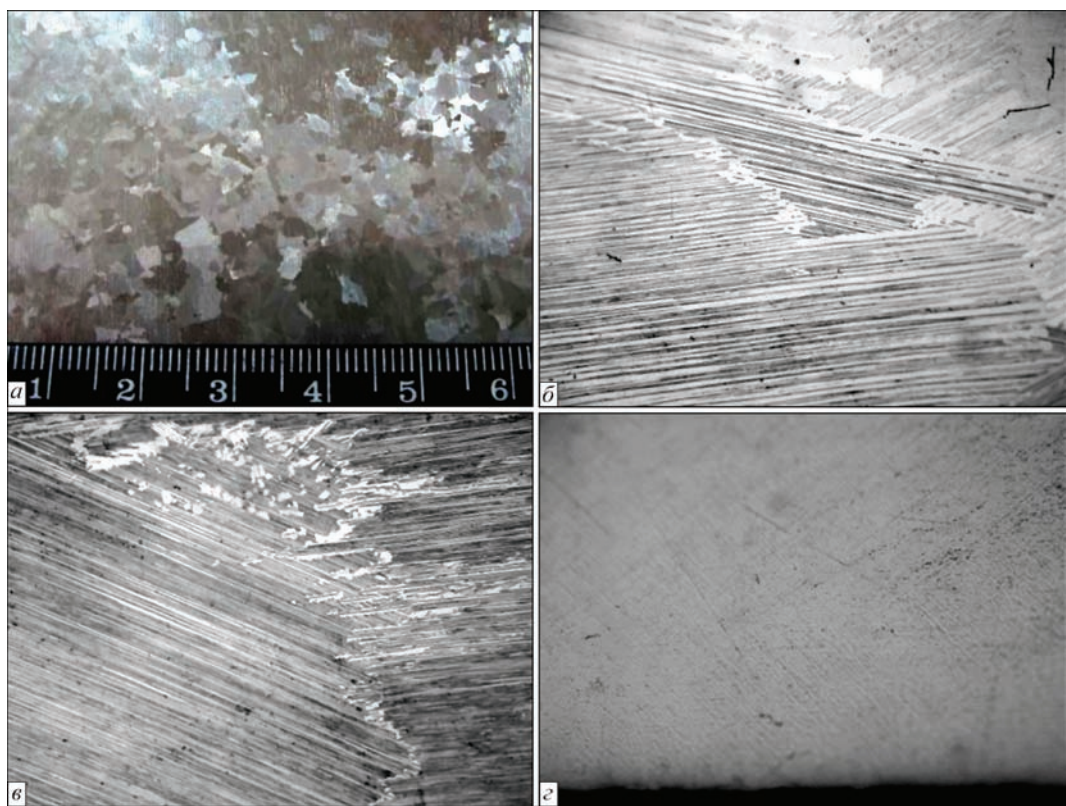


Рис. 3. Макро- (а) и микроструктура (б–г, ×250) поперечного сечения слитка диаметром 195 мм алюминида титана Ti–29Al

Т а б л и ц а 2. Химический состав слитка ЭЛП сплава Ti–29Al, мас. %				
Слиток	Место отбора пробы	Al	O	Ti
Ti–29Al	1 (головная часть)	28,0	0,12	Основа
	2	29,3		
	3	30,5		
	4	30,2		
	5	29,7		
	6 (донная часть)	23,6		

плавки при формировании затравки и выведении усадочной раковины соответственно.

Изучение макроструктуры слитка алюминида титана проводили на поперечных темплетях после травления в реактиве, мл: HF — 30; HNO₃ — 10; H₂O — 300. Определено, что в слитке формируется плотная однородная структура. Макроструктура не имеет дефектов в виде пор, раковин, трещин, расслоений и характеризуется зернами близкими к равноосным. Величина зерна, определяемая по 10-бальной шкале макроструктур Инструкции 1054-76 ВИАМ, соответствует 10 баллу. Различия в бальности зерна в центральной и периферийной частях слитка незначительны (рис. 3, а).

Для изучения распределения легирующих элементов по поперечному сечению слитка на темплете проведены исследования химического состава и микроструктуры в различных его областях: центральной, средней и у края. Для изучения химического состава из указанных областей была отобрана

стружка, а для изучения микроструктуры вырезаны и изготовлены образцы для оптической металлографии, проведенной на микроскопе «Neophot-32». Данные химического анализа (содержание Al, мас. %) из указанных областей следующие: центр — 29,25; середина — 29,30; край — 29,27.

Исследование микроструктуры показало, что в полученном материале сформировалась пластинчатая структура, представленная однонаправленными в пределах одного зерна пластинами α₂- и γ-фаз. Размер исходного зерна практически одинаков в центральной и средней областях и составляет 250...300 мкм. Размер зерен в периферийной области — 100...150 мкм, ламели ориентированы преимущественно в направлении теплоотвода (рис. 3, б–г).

Таким образом, установлено, что легирующий элемент (алюминий) равномерно распределен по поперечному сечению крупного слитка алюминида титана, что говорит о корректно подобранных с помощью математического моделирования режимах ведения электронно-лучевой плавки.

Список литературы

1. Бояршинов В. А. (1979) *Рафинирующие переплавы стали и сплавов в вакууме*. Москва, Металлургия.
2. Андреев А. Л. (ред.) (1978) *Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов*. Москва, Металлургия.
3. Пагон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В., Жук Г. В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
4. Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Справочник. Москва, ВИС-МАТИ.

5. Tripp D., Mitchel A., Hayden M. (1986) The effect of power on the thermal regime in an EB hearth. In: *Proc. of Conf. on Electron Beam Melting and Ref. State-of-the Art* (1986, Bakish Mat. Corp., Englewood, N.-Y.), 30–41.
6. Жадкевич М. Л., Статников Б. Ш., Ищенко Д. А. (1991) Исследование теплового состояния системы слиток–кристаллизатор при электронно-лучевом переплаве. *Физ. и хим. обраб. мат.*, **3**, 53–57.
7. Жук Г. В. (2003) *Основные закономерности влияния термодинамических условий кристаллизации металла при электронно-лучевой плавке на структуру и свойства слитков*: дис. ... докт. техн. наук. Киев, Институт электро-сварки им. Е. О. Патона, 351.
8. Тихоновский А. Л., Тур А. А., Кравец А. Н. и др. (1992) Электронно-лучевая установка УЭ-208. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **1**, 71–74.
3. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Ilin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Refer. Book. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
5. Tripp, D., Mitchel, A., Hayden, M. (1986) The effect of power on the thermal regime in an EB hearth. In: *Proc. of Conf. on Electron Beam Melting and Ref. State-of-the Art* (1986, Bakish Mat. Corp., Englewood, N.-Y.), 30–41.
6. Zhadkevich, M.L., Statnikov, B.Sh., Ishchenko, D.A. (1991) Examination of heat state of ingot-mould system in electron beam remelting. *Fiz. i Khim. Obrab. Mat.*, **3**, 53–57 [in Russian].
7. Zhuk, G.V. (2003) *Basic regularities of influence of thermophysical conditions of metal crystallization in electron beam melting on structure and properties of ingots*: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Kiev, PWI [in Russian].
8. Tikhonovsky, A.L., Tur, A.A., Kravets, A.N. et al. (1992) Electron beam installation UE-208. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **1**, 71–74 [in Russian].

References

1. Boyarshinov, V.A. (1979) *Refining remelting of steel and alloys in vacuum*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. (1978) *Titanium alloys. Melting and casting of titanium alloys*. Ed. by A.L. Andreev. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ВЕЛИКИХ ЗЛИВКІВ АЛЮМІНІДІВ ТИТАНУ В ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ УСТАНОВКАХ

С. В. Ахонін¹, А. Ю. Северин¹, В. О. Березос¹, О. М. Пікулін¹, О. Г. Ерохін²

¹Інститут електросварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ДП «НПЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.

03028, м. Київ, вул. Ракетна, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

Математична модель кристалізації циліндричних зливків титанових сплавів при електронно-променевої плавці адаптована для розрахунків кристалізації великих зливків діаметрами від 200 до 600 мм сплавів на основі алюмінідів титану. Проведено розрахунки для зливка діаметром 200 мм інтерметаліду TiAl. В результаті розрахунків отримані поля температур в зливку та визначено оптимальні режими ведення плавки. На електронно-променевої установці UE-208M вперше проведена дослідна плавка великого зливка діаметром 200 мм сплаву Ti–29Al. Досліджено якість отриманого зливка і встановлено, що алюміній рівномірно розподілений по поперечному перетину зливка, а це говорить про коректно підібрані за допомогою математичного моделювання режими ведення електронно-променевої плавки. Бібліогр. 8, табл. 2, іл. 3.

Ключові слова: електронно-променева плавка; математичне моделювання; зливки; сплав; хімічний склад; структура

PECULIARITIES OF PRODUCING LARGE INGOTS OF TITANIUM ALUMINIDES IN ELECTRON BEAM INSTALLATIONS

S.V. Akhonin¹, A.Yu. Severin¹, V.A. Berezos¹, A.N. Pikulin¹, A.G. Erokhin²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²SE «RPC «Titan» of the E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

26 Raketnaya Str., 03028, Kyiv. E-mail: titan.paton@gmail.com

Mathematical model of crystallization of cylindrical ingots of titanium alloys in electron beam melting was adapted for calculations of crystallization of large ingots of diameters from 200 up to 600 mm, made of alloys on titanium aluminide base. Calculations were made for 200 mm diameter ingot of TiAl intermetallic. As a result of calculations the temperature fields were obtained in ingot and optimum conditions of melting were determined. In electron beam installation UE-208M the experimental melting of large 200 mm diameter ingot of Ti–29Al intermetallic alloy was performed for the first time. The quality of the produced ingot was studied and it was found that aluminium is distributed uniformly across its section, thus testifying that the electron beam melting modes were selected properly by using the mathematic modeling. 8 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

Key words: electron beam melting; mathematic modeling; ingot; alloy; chemical composition; structure

Поступила 03.07.2018

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕНТОЧНЫХ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК МАРОК BT1-0 И GRADE 2 ИЗ НИЗКОСОРТНОГО ГУБЧАТОГО ТИТАНА*

А. Н. Калинюк, А. Я. Дереча, В. В. Тэлин,
А. Ф. Коляда, В. И. Костенко, Н. М. Иванов

ООО «Стратегия БМ».

03026, г. Киев, ул. Новая, 1. E-mail: strategiya_bm@ukr.net

Показана возможность выплавки ленточных литых заготовок (слябов) нелегированного титана марок BT1-0 и Grade 2 из шихты, включающей низкосортный губчатый титан марок ТГ-150 и ТГ-Тв. Переплавляемая шихта может содержать в своем составе до 100 % низкосортной титановой губки в зависимости от содержания примесей в ней. Высокое содержание низкосортного губчатого титана в шихте снижает себестоимость продукции. Качественные ленточные литые заготовки (слябы), отвечающие требованиям стандартов, выплавляют по технологии однократной электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью, что существенно снижает затраты по сравнению с другими переплавными процессами. Выпускаемые предприятием ООО «Стратегия БМ» слябы титана марок BT1-0 и Grade 2 имеют высокую равномерность химического состава по высоте и поперечному сечению, что обеспечивает не только требуемый уровень служебных свойств полуфабрикатов (плит, листов, штрипса и т. п.), но и их высокую повторяемость и равномерность. Библиогр. 3, табл. 2, ил. 12.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; ленточные литые заготовки; слябы; титановая губка; химический состав; содержание примесей; распределение примесей; кислородный эквивалент; механические свойства

В технологическом цикле производства титановых полуфабрикатов важное место занимает выплавка литых заготовок (слитков и слябов) [1]. Стремление к удешевлению титановой продукции стимулирует развитие технологий, которые позволяют получать наиболее экономичную форму заготовок — ленточные литые заготовки (слябы) для последующего изготовления плит, листов, штрипса и сварных труб. Ленточные литые заготовки, приближенные по своей форме к готовым полуфабрикатам, позволяют уменьшить количество стадий металлургического передела [2, 3].

Производство слитков нелегированного титана (CP-титана) с точно заданным интервалом концентраций примесей обеспечивает получение служебных свойств (σ_b , σ_r , δ , ψ) у полуфабрикатов и готовых изделий в узком строго определенном диапазоне. Поэтому важной задачей является выплавка слитков и слябов, не только отвечающих требованиям стандартов по химическому составу, но обладающих высокой химической гомогенностью. Для слябов (ленточных литых заготовок) CP-титана один из критериев качества — это содержание примесей,

разница в концентрации которых на разных уровнях сравнима с ошибкой анализа.

Метод выплавки ленточных литых заготовок.

Для получения слябов из нелегированного титана (CP-титана) марок BT1-0 и Grade 2 применяется технология однократной электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). Следует отметить, что предприятие ООО «Стратегия БМ» располагает промышленной технологией ЭЛПЕ производства слябов на электронно-лучевой установке (ЭЛУ) «СТРАТЕГИЯ-1» мегаваттного класса.

Схема плавки на плавильном оборудовании ООО «Стратегия БМ» представлена на рис. 1.

Формирование сляба производится по способу непрерывной разливки в медный проходной водоохлаждаемый кристаллизатор. Шихта 4, загруженная в неславляемые контейнеры 3 подается с двух сторон в зону плавки. Процесс плавления шихты осуществляется в плавильной камере в вакууме под воздействием электронных пучков электронно-лучевых пушек высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) 6. Управление движением

*По материалам доклада, представленного на Международной конференции «Титан-2018. Производство и применение в Украине», 11–13 июня 2018, г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

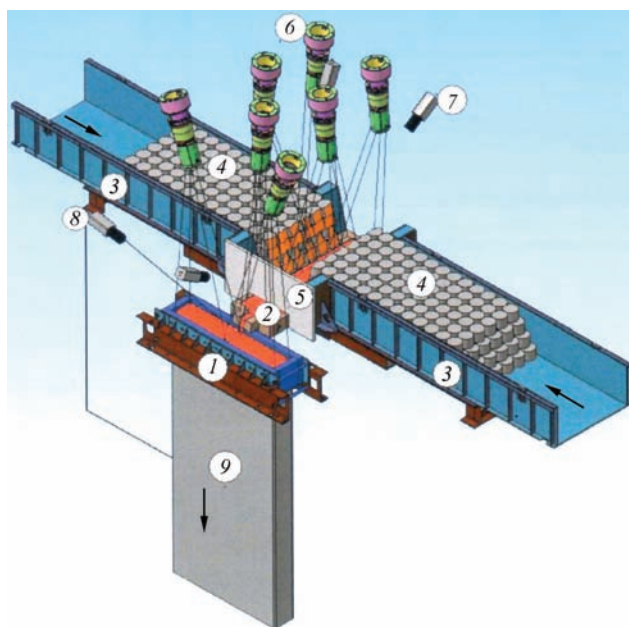


Рис. 1. Схема ЭЛПЕ на электронно-лучевой установке «СТРАТЕГИЯ-1»

(сканированием) пучков позволяет контролировать технологические режимы плавки шихты на торцах заготовок в промежуточной емкости 2 на ее сливном носке и в кристаллизаторе 1, что исключает прожоги технологической оснастки. Для исключения попадания брызг расплавленного металла в кристаллизатор 1 установлен экран 5.

Сигнал с камер видеонаблюдения 7 транслируется на мониторы главного пульта управления (ГПУ) в режиме реального времени, а также автоматически обрабатывается системой управления. Сигнал с камеры контроля уровня ванны металла в кристаллизаторе 8 позволяет в автоматическом режиме управлять устройством вытягивания слитка 9.

Рабочим газом для электронно-лучевых пушек ВТР служит смесь технического водорода и кислорода в заданной пропорции.

Схема плавки, представленная на рис. 1, позволяет реализовывать такие преимущества ЭЛПЕ как: наличие высокого вакуума примерно 10^{-3} торр в качестве защитной среды; высокую плотность энергии в электронном луче; прецизионность распределения энергии по нагреваемой поверхности; разделение процессов плавления шихты и формирования слитка.

Технические характеристики ЭЛУ «СТРАТЕГИЯ-1»

Установленная мощность, кВт	2800
Ускоряющее напряжение, кВ	30
Количество электронно-лучевых пушек, шт.	7
Рабочий вакуум, торр	10^{-3}
Производительность вакуумной системы, л/с	до 70000
Наибольшие размеры заготовки, мм	5000/920/450
Количество загрузочных устройств, шт.	2



Рис. 2. Механическая обработка слитка размерами 4300×1350×228 мм и массой 5,8 т

Количество контейнеров под загрузку, шт.	4...6
Размеры слитков, мм	4300/1350/228; 4300/1350/400
Габариты установки, м	20×20×16

Сейчас ЭЛУ «СТРАТЕГИЯ-1» выплавляет слитки массой 5,8 и 10,0 т (рис. 2, 3). Производительность установки составляет 1500 т/год.

Шихтовые материалы для выплавки ленточных литых заготовок. При производстве слитков используется комплексная шихта, состоящая из титановой губки различных марок (ТГ-90, ТГ-100, ТГ-110, ТГ-130, ТГ-150 и ТГ-Тв), а также отходов собственного производства (донных частей, стружки), образующихся в процессе механической обработки черновых слитков.

В табл. 1 приведен химический состав титановой губки, применяемой в технологии ЭЛПЕ на предприятии ООО «Стратегия БМ».

Данные таблицы показывают, что в процессе используют не только марки высокосортного губчатого титана, но и марки низших сортов титановой губки, а именно ТГ-150 и ТГ-Тв. Следует отметить, что если губчатый титан марок ТГ-90... ТГ-150 используется в производстве слитков без ограничений по химическому составу, то для губчатого титана марки ТГ-Тв определены следующие

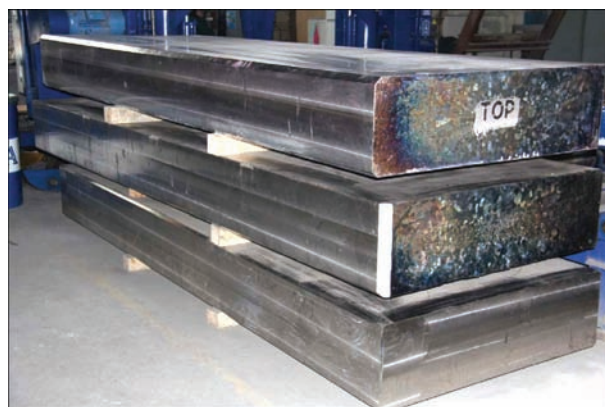


Рис. 3. Внешний вид слитков размерами 4300×1350×400 мм и массой 10,0 т

Таблица 1. Химический состав титановой губки для выплавки слэбов на ЭЛУ «СТРАТЕГИЯ-1», мас. % (не более)

Марка	Титан (не менее)	Fe	Si	Ni	C	Cl	N	O	Твердость, <i>HV</i> , 10/1000/30 (не более)
ТГ-90	99,74	0,05	0,01	0,04	0,02	0,08	0,02	0,04	90
ТГ-100	99,72	0,06	0,01	0,04	0,03	0,08	0,02	0,04	100
ТГ-110	99,67	0,09	0,02	0,04	0,03	0,08	0,02	0,05	110
ТГ-130	99,56	0,13	0,03	0,04	0,03	0,10	0,03	0,08	130
ТГ-150	99,45	0,20	0,03	0,04	0,03	0,12	0,03	0,10	150
ТГ-Тв	97,75	1,00	—	—	0,10	0,15	0,10	—	—

щие ограничения по максимальному содержанию примесей: железа (ограничено уровнем 0,20 % включительно); кислорода (ограничено уровнем 0,10 % включительно); азота (ограничено уровнем 0,03 % включительно); углерода (ограничено уровнем 0,02 % включительно); кремния и никеля (ограничено уровнем 0,02 %); остальных контролируемых элементов (см. табл. 1).

Ограничения по максимальному уровню содержания некоторых примесей введены по причине жестких требований к химическому составу готовой продукции и преследуют цель минимизировать риски, связанные с применением титановой губки низших сортов.

Титановая губка в силу особенностей технологического процесса восстановления и сепарации на выходе имеет неоднородный химический состав по примесям. Качественная титановая губка (марки ТГ-90...ТГ-130) составляет до 60 % от общего объема и в основном применяется для серийного производства литых заготовок (слитков). Губка марок ТГ-150 и ТГ-Тв не используется в печах вакуумно-дугового переплава (ВДП) из-за повышенного содержания примесей, прежде всего хлора.

Практика показала, что химический состав применяемого в ЭЛПЕ на установке «СТРАТЕГИЯ-1» губчатого титана марок ТГ-150 и ТГ-Тв различных партий значительно отличается по содержанию железа, кислорода и хлора. Это приводит к тому, что доля низкосортной губки в комплексной шихте может колебаться от 50 до 100 %.

В шихтовочных картах для каждой конкретной плавки учитывается не только химический состав по партиям различных марок титановой губки, но и химический состав возвратных отходов собственного производства, в том числе и степень окисления донных частей.

До сих пор основная часть производства титановых слитков осуществляется способом ВДП с использованием качественной титановой губки высших сортов. Применение низкосортной губки и возвратных отходов снижает себестоимость

производства готовой продукции. При этом ВДП обеспечивает выплавку слитков круглого сечения и не позволяет выплавлять слитки прямоугольного (ленточные литые заготовки/слябы).

Выплавка слэбов нелегированного титана с регламентированным содержанием примесей. В настоящее время ООО «Стратегия БМ» на своем плавильном оборудовании реализует два направления в технологии ЭЛПЕ слэбов (ленточных литых заготовок) СР-титана:

выплавку слэбов нелегированного титана марок ВТ1-0, соответствующих по химическому составу требованиям ГОСТ 19807–91, и Grade 2 с содержанием кислорода 0,095...0,130 %, железа не более 0,15 % без учета кислородного эквивалента;

выплавку слитков Grade 2 с кислородным эквивалентом (O_{Eq}) в пределах 0,17...0,25.

При реализации на практике этих направлений проводится 100%-ный контроль химического состава слэбов, ультразвуковой контроль донных и головных частей слэбов. Определение концентрации контролируемых примесей проводится по стандартным методикам. Для определения содержания железа, кремния и других элементов используется метод индуктивно связанной плазмы (ICP), углерода — кулонометрический, кислорода, азота и водорода — метод восстановительного плавления образца в потоке газа-носителя.

Обязательной процедурой является проведение 100%-ного контроля поверхности слэбов проникающими красками (penetrant control) после механической обработки. Такой контроль позволяет выявить остаточные дефекты лития с минимальными размерами до 0,1 мм и гарантировать качество металла при дальнейшем переделе на плиту, лист или штрипс.

В табл. 2 представлены требования к химическому составу титана марок ВТ1-0 и Grade 2 и характерные результаты контроля содержания примесей в слэбах размерами 4300×1350×228 мм, массой 5,8 т с различными концентрациями железа.

Таблица 2. Содержание примесей в слябах титана марки BT1-0 и Grade 2, мас. %

Марка титана		Fe	C	O	H	N
BT1-0	ГОСТ 19807–91 (не более)	0,25	0,07	0,20	0,010	0,04
BT1-0	Расчетное	0,19	0,01	0,091	–	0,008
ЭЛПЕ	Фактическое	0,19...0,20	0,005...0,012	0,089...0,094	0,0010...0,0015	0,006...0,010
Grade 2	Требования (не более)	≤0,15	≤0,02	0,095...0,130	≤0,004	≤0,015
Grade 2	Расчетное	0,12	0,01	0,103	–	0,008
ЭЛПЕ	Фактическое	0,11...0,13	0,004...0,013	0,097...0,120	0,0010...0,0015	0,004...0,010

Все слябы полностью соответствуют предъявляемым к ним требованиям. Для данного вида продукции уровень качества (содержание контролируемых примесей кислорода, азота, железа, углерода) определяется главным образом качеством используемого сырья. Концентрация примесей в слябах по сравнению с исходной практически не меняется. Иными словами, какая концентрация примесей была задана в шихте перед плавкой, такая же концентрация их будет по окончании выплавки в готовом слябе. Следует отметить, что в Украине первый титановый слиток с регламентированным содержанием кислорода в пределах 0,16...0,18 % был выплавлен в 1991 г. на электронно-лучевой установке УЭ-196 в Институте электросварки им. Е. О. Патона*.

Проведен анализ однородности распределения примесей в слябах путем отбора проб от подката толщиной 30 мм по схеме, изображенной на рис. 4. Результаты химического и газового анализов приведены на рис. 5. Слябы массой 5,8 т титана марки Grade 2 характеризуются высокой однородностью химического состава как по высоте, так и по сечению. Механические свойства листов толщиной 5,0 мм, полученных дальнейшей прокаткой металла ЭЛПЕ в продольном и поперечном направ-

лениях полностью соответствовали требованиям ГОСТ 22178–76 (рис. 6). Угол изгиба образцов листов толщиной 4,0...6,0 мм из металла ЭЛПЕ составил 143...155° при минимально допустимом значении 80° (ГОСТ 22178–76).

Слябы BT1-0 ЭЛПЕ характеризовались высокой химической однородностью по высоте. Так, концентрация кислорода изменялась в пределах 0,005 %, железа — 0,01 % (рис. 7).

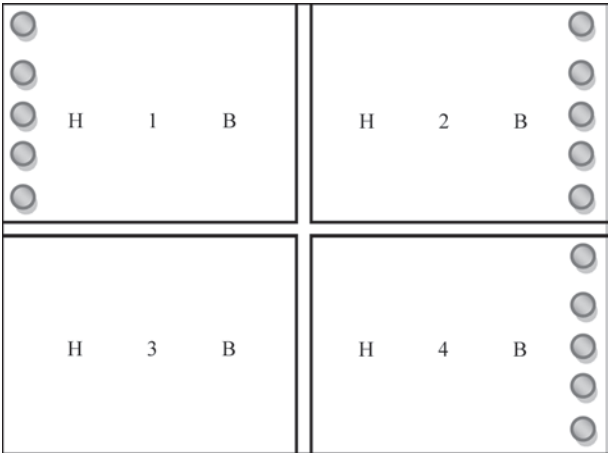


Рис. 4. Схема отбора проб для исследования образцов 1–4 на химический и газовый анализ (Н — низ; В — верх)

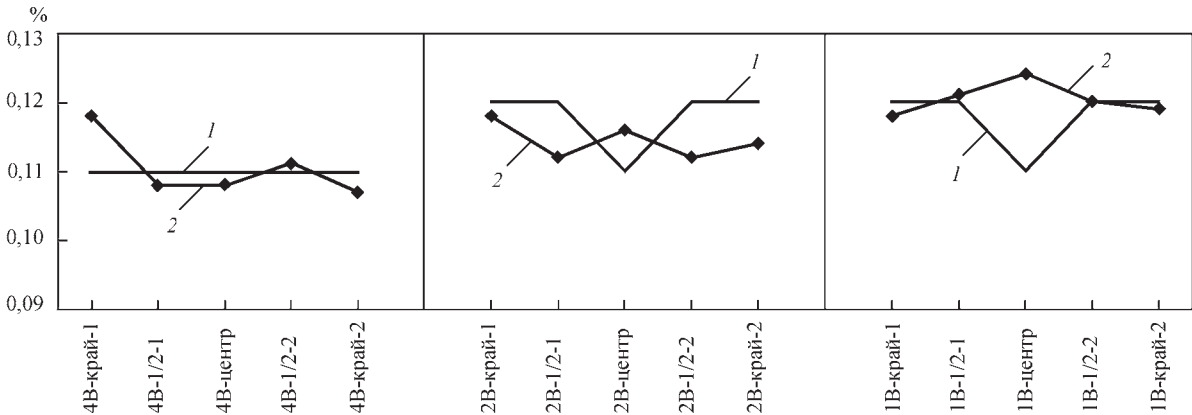


Рис. 5. Распределение железа (1) и кислорода (2) по высоте и сечению сляба размерами 4300×1350×228 мм, массой 5,8 т марки Grade 2

*В работе принимали участие Дереча А. Я., Калинюк А. Н., Салов С. Н.

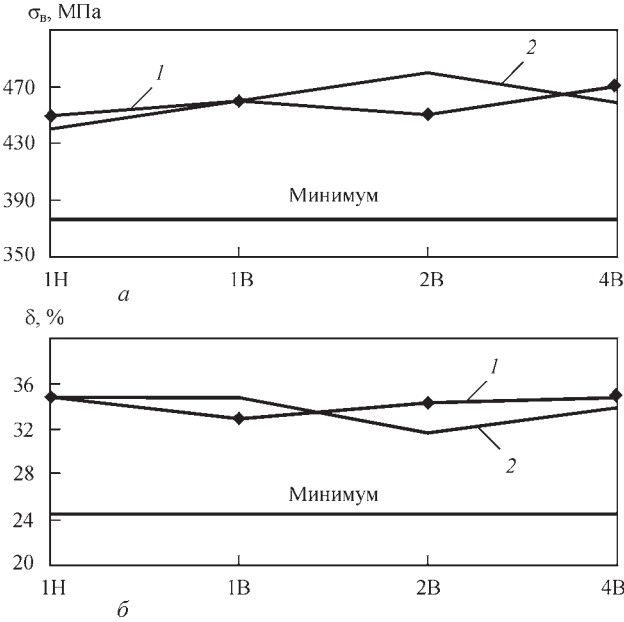


Рис. 6. Механические свойства (a — σ_b ; b — δ) листа толщиной 5,0 мм, прокатанного в поперечном (1) и продольном (2) направлениях из сляба марки Grade 2 ЭЛПЕ массой 5,8 т

Второе направление деятельности ООО «Стратегия БМ» — это производство слябов с определенным кислородным эквивалентом (O_{Eq}), который рассчитывается по формуле:

$$O_{Eq} = O + 2,5N + 0,6 Fe + 0,7 C + 0,3 Al.$$

Кислородный эквивалент (O_{Eq}) является безразмерным и связывает концентрации примесей нелегированного титана в одну величину, позволяющую в определенной степени прогнозировать служебные свойства деформированного металла (табл. 3).

Для практики плавки на ЭЛУ «СТРАТЕГИЯ-1» формула расчета O_{Eq} была видоизменена в связи с тем, что требуемая концентрация кислорода в готовом слябе, как правило, больше чем в титановой губке, являющейся основой расходуемой заготовки:

$$O_{Eq} = O_{исх.} + \Delta O + 2,5N + 0,6 Fe + 0,7 C + 0,3 Al,$$

где $O_{исх.}$ — среднее содержание кислорода в расходуемой заготовке без дополнительного содержа-

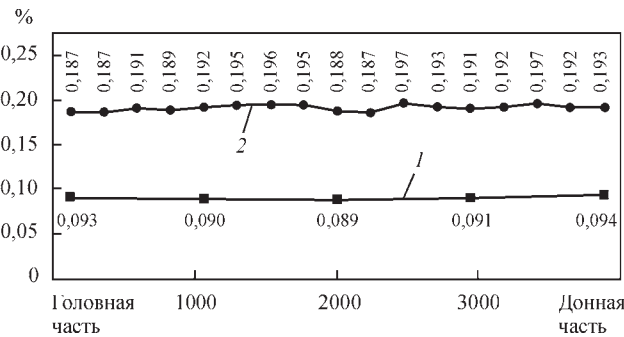


Рис. 7. Распределение железа (1) и кислорода (2) по высоте сляба марки ВТ1-0

Таблица 3. Сопоставление O_{Eq} и механических свойств нелегированного титана

Grade	O_{Eq}	σ_r , МПа
CP-1	$\leq 0,16$	170...310
CP-2	0,16...0,23	275...450
CP-3	0,23...0,28	380...550
CP-4	0,28...0,34	485...655

ния кислорода, %; ΔO — добавочное содержание кислорода в расходуемой заготовке, %.

Если для первого направления конечная концентрация кислорода в переплавленном металле определяется его концентрацией в исходной шихте, то искусственное повышение концентрации кислорода потребовало решения целого комплекса задач технологического характера. А именно, разработки методики расчета кислородного эквивалента (O_{Eq}) с учетом конечных концентраций как кислорода, так и концентраций остальных примесей, влияющих на величину O_{Eq} , шихтовки расходуемых заготовок и отработки технологических приемов проведения процесса плавки. Дополнительный кислород вводится в металл в виде оксида титана IV (TiO_2).

Все эти задачи были успешно решены при получении слябов массой 10 т нелегированного титана марки Grade 2 по нескольким типам химического состава (рис. 8). По требованию заказчика пробы

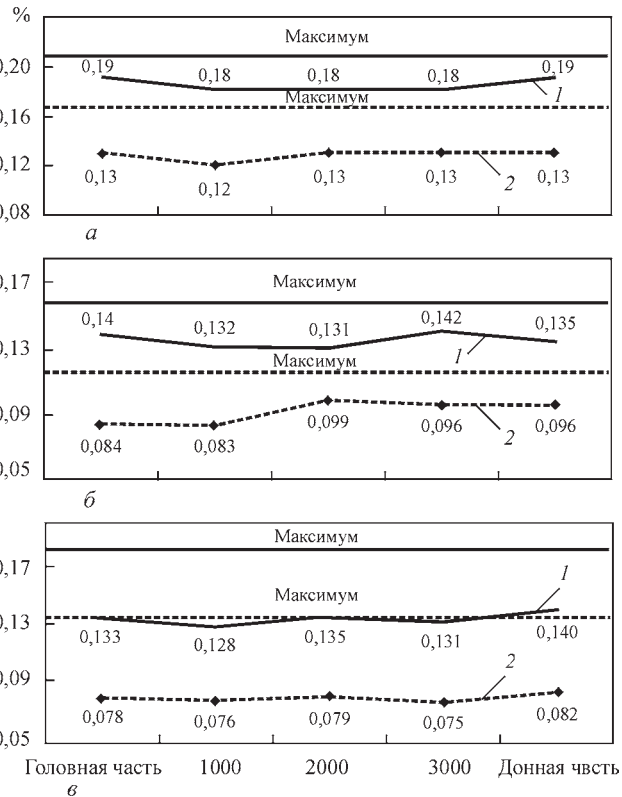


Рис. 8. Распределение кислородного эквивалента (a), железа (b) и кислорода ($в$) по высоте слябов массой 10 т, показатели находятся: 1 — в пределах 0,18...0,21; 2 — 0,111...0,17



Рис. 9. Строительство культурного центра (вид в вечернее время)



Рис. 11. Монтаж крыши культурного центра



Рис. 10. Облицовочные титановые панели



Рис. 12. Крыша из титановых листов

(пять проб) отбирали по высоте сляба по схеме: головная часть—1000 мм—2000 мм—3000 мм—донная часть.

Слябы, выплавленные по второму направлению в технологии ЭЛПЕ ленточных литых заготовок СР-титана, характеризуются высокой повторяемостью и равномерностью значений кислородного эквивалента (O_{Eq}) по высоте. Для этого направления производственной деятельности ООО «Стратегия БМ» уровень качества заготовок (содержание контролируемых примесей железа, углерода и др.) определяется, главным образом, качеством используемого сырья. Концентрация примесей в слябах по сравнению с исходной концентрацией практически не меняется. Исключение составляет кислород. Его концентрация является суммой концентраций в компонентах шихты плюс концентрация, вводимая дополнительно в виде диоксида титана.

Все слябы имеют высокую равномерность распределения других примесей, определяющих значение кислородного эквивалента (O_{Eq}). Содержание азота в слябах находится на уровне до 0,006 %, при максимально допустимом значении не более 0,020 %. Концентрация углерода находится в пределах 0,003...0,009 %, алюминия — 0,006...0,013 % при допустимых значениях не более 0,02 % и 0,06 % соответственно. Остаточное содержание водорода в слябах составляет 0,0010...0,0015 %.

Практическое применение металлургической продукции предприятия ООО «Стратегия БМ». В качестве примера использования металла, выплавленного ООО «Стратегия БМ», можно привести следующий факт. Титановый лист, изготовленный из слябов с учетом кислородного эквивалента (O_{Eq}), был применен при строительстве культурного центра в Кувейте (рис. 9–12). Для этих целей было израсходовано 300 т слябов, произведенных на ЭЛУ «СТРАТЕГИЯ-1». Проект начат в 2015 г. и считается одним из крупнейших в мире по проведению кровельных работ с применением титанового листа.

Выводы

1. Показана возможность выплавки слябов (ленточных литых заготовок) нелегированного титана марок ВТ1-0 и Grade 2 из шихты, включающей низкосортный губчатый титан марок ТГ-150 и ТГ-Тв.

2. Переплавляемая шихта может содержать в своем составе до 100 % низкосортной титановой губки марок ТГ-150 и ТГ-Тв в зависимости от содержания примесей в ней. Высокое содержание низкосортного губчатого титана в шихте снижает себестоимость продукции.

3. Качественные слябы (ленточные литые заготовки), отвечающие требованиям отечественных и зарубежных стандартов, выплавляются за один переплав (однократным ЭЛПЕ), что существенно снижает затраты по сравнению с другими переплавными процессами.

4. Выпускаемые предприятием ООО «Стратегия БМ» слэбы титана марок VT1-0 и Grade 2 имеют высокую равномерность химического состава по высоте и поперечному сечению, что обеспечивает не только требуемый уровень служебных свойств полуфабрикатов, производимых из ленточных литых заготовок, но и их высокую повторяемость и равномерность.

Список литературы

1. Мусатов М. Н., Фридман А. Ш., Фролов В. А. и др. (1990) Состояние технологии производства слитков титановых сплавов за рубежом. *Технология легких сплавов*, **8**, 60–75.
2. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. и др. (1996) Некоторые тенденции металлургического передела титана. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **1**, 25–32.

3. Жук Г. В., Калинюк А. Н., Тригуб Н. П. (2004) Производство титановых слитков-слябов методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. *Современная электрометаллургия*, **3**, 22–24.

References

1. Musatov, M.N., Fridman, A.Sh., Frolov, V.A. et al. (1990) State of the technology of production of titanium alloy ingots abroad. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, **8**, 60–75 [in Russian].
2. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V. et al. (1996) Some tendencies of metallurgical processing of titanium. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **1**, 25–32 [in Russian].
3. Zhuk, G.V., Kalinyuk, A.N., Trigub, N.P. (2004) Production of titanium ingots-slabs using method of EBCHM. *Advances in Electrometallurgy*, **3**, 20–22.

ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА СТІЧКОВИХ ЛИТИХ ЗАГОТОВОК МАРОК VT1-0 ТА GRADE 2 З НИЗЬКОСОРТНОГО ГУБЧАСТОГО ТИТАНУ

О. М. Калинюк, О. Я. Дереча, В. В. Телін, О. Ф. Коляда, В. І. Костенко, М. М. Іванов
ТОВ «Стратегія БМ».

03026, м. Київ, вул. Нова, 1. E-mail: strategiya_bm@ukr.net

Показана можливість виплавки стрічкових литих заготовок (слябів) нелегованого титану марок VT1-0 та Grade 2 з шихти, що включає в себе низькосортний губчастий титан марок ТГ-150 та ТГ-Тв. Шихта, що переплавляється може містити в своєму складі до 100 % низькосортної титанової губки в залежності від вмісту домішок у ній. Високий вміст низькосортного губчастого титану в шихті знижує собівартість продукції. Якісні стрічкові литі заготовки (сляби), що відповідають вимогам стандартів, виплавляють за технологією однократної електронно-променевої плавки з проміжною ємністю, що суттєво знижує витрати у порівнянні з іншими переплавними процесами. Сляби титану марок VT1-0 та Grade 2, що випускаються підприємством ТОВ «Стратегія БМ», мають високу рівномірність хімічного складу по висоті та поперечному перетину, що забезпечує не тільки необхідний рівень службових властивостей напівфабрикатів (плит, листа, штрипсу і т. п.), але й їх високу повторюваність та рівномірність. Бібліогр. 3, табл. 2, іл. 12.

Ключові слова: електронно-променева плавка; стрічкові литі заготовки; сляби; титанова губка; хімічний склад; вміст домішок; розподіл домішок; кисневий еквівалент; механічні властивості

PECULIARITIES OF PRODUCTION OF SLAB-TYPE CAST BILLETS OF VT1-0 AND GRADE 2 TYPES OF LOW-GRADE SPONGY TITANIUM

A.N. Kalinyuk, A.Ya. Derecha, V.V. Telin, A.F. Kolyada, V.I. Kostenko, N.M. Ivanov
LLC «Strategiya BM».

1 Novaya Str., 03026, Kyiv. E-mail: strategiya_bm@ukr.net

The feasibility of melting the slab cast billets of unalloyed titanium of grades VT1-0 and Grade 2 of charge, containing the low-grade spongy titanium of TG-150 and TG-Tv grades is shown. The charge remelted can contain in its composition up to 100 % of a low-grade titanium sponge depending on content of impurities in it. The high content of the low-grade spongy titanium in charge decreases the cost of products. The quality slab cast billets, meeting the requirements of standards, are melted by using the technology of electron beam cold hearth melting, that reduces greatly the expenses as compared with other remelting processes. The slabs of titanium of grades VT1-0 and Grade 2, produced by the enterprise LLC «Strategiya BM», have a high uniformity of chemical composition in height and cross section, thus providing not only the required level of service properties of semi-products (plates, sheets, strips, etc.), but also their high repeatability and uniformity. 3 Ref., 2 Tabl., 12 Fig.

Key words: electron beam melting; slab cast billets; titanium sponge; chemical composition; content of impurities; distribution of impurities; oxygen equivalent; mechanical properties

Поступила 26.06.2017

ВПЛИВ ТИПУ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ПРИ 3D ПРИНТИНГУ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ДЕТАЛЕЙ ЗІ СПЛАВУ Ti-6Al-4V*

О. О. Педаш, В. В. Клочихін, Т. А. Мітіна, В. Г. Шило

АТ «МОТОР СІЧ».

69068, м. Запоріжжя, просп. Моторобудівників, 15. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

В статті вивчено склад, структуру та властивості зразків зі сплаву Ti-6Al-4V, що було отримано за технологіями селективного лазерного і електронно-променевого сплавлення стосовно виробництва деталей авіаційного призначення. Проведено порівняльне дослідження структури й властивостей зразків після термічної обробки, що є властивою для сплаву Ti-6Al-4V, до та після попереднього гарячого ізостатичного пресування. Встановлено, що поява в зламах та в мікроструктурі пор й несплавлених гранул зумовлює обов'язкове проведення гарячого ізостатичного пресування деталей відповідального призначення, коли відбувається усунення подібного виду дефектів й відповідно забезпечується кращий комплекс характеристик міцності й пластичності. Бібліогр. 6, табл. 2, іл. 5.

Ключові слова: титановий сплав; адитивні технології; селективне лазерне плавлення; електронно-променеве плавлення; мікроструктура; механічні властивості

При виготовленні деталей з титанових сплавів все більш широке застосування знаходять адитивні технології (технології 3D принтингу), сутність котрих полягає в отриманні виробів шляхом пошарового нарощування матеріалу на основі комп'ютерної моделі майбутньої деталі на спеціальному обладнанні (3D принтерах) з використанням різних методів (SLM, EBM, DMLS, DMD та ін.).

На даний момент розроблено широку гаму технологій виготовлення деталей методом 3D принтингу у тому числі з титанових сплавів з використанням машин, в котрих у якості джерела підведення енергії до матеріалу побудови (дрібнодисперсного порошку), як правило, використовується лазер (один чи декілька) або електронний промінь. При використанні у якості підведення енергії лазеру або електронного променя реалізуються як певні переваги, так і недоліки, що впливають на якість деталі, що виготовляється в цілому. В літературі відмічається [1–6], що технологія селективного лазерного сплавлення (SLM) забезпечує гарну якість поверхні, а установки, котрі використовують у якості джерела енергії електронний промінь (EBM) характеризуються підвищеною продуктивністю, меншою собівартістю готової продукції й підвищеною щільністю матеріалу.

Метою роботи було провести порівняльне дослідження технологій 3D принтингу, що вико-

ристовують у якості джерел підведення енергії лазери або електронний промінь та визначення раціональної технології при виготовленні деталей авіаційної техніки.

Матеріали та методика експерименту. У якості об'єкту для досліджень використовували зразки зі сплаву Ti-6Al-4V для випробування механічних властивостей та мікроструктури, що були отримані методами селективного лазерного сплавлення та сплавленням за допомогою електронного променя.

Фракції гранул, що використовувались при виготовленні зразків, складали 20...50 мкм при отриманні лазерним сплавленням та 45...105 мкм — електронно-променевим. Вказані порошки були отримані за технологією газоструменевого розпилення розплаву інертним газом. Зразки отримували як циліндричні діаметром 14 мм, так і прямокутного перерізу 16×16 мм. Довжина зразків складала 60 мм. Побудову зразків на 3D принтері здійснювали у напрямку Z.

Для усунення внутрішньої пористості і підвищеної щільності зразків після процесу друку виконували гаряче ізостатичне пресування (ГІП) на гарячому ізостатичному пресі фірми «QUINTUS» (Швеція). ГІП проводили по режиму: нагрів до температури 920 ± 10 °C з тривалістю витримки

*По материалам доклада, представленного на Международной конференции «Титан-2018. Производство и применение в Украине», 11–13 июня 2018, г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

Т а б л и ц я 1. Хімічний склад дослідних зразків, мас. %				
Варіант технології	Ti	Al	V	C
SLM	Основа	5,9	4,3	0,06
EBM	-»-	5,8	4,0	0,07
Норми AMS 4928	-»-	5,5...6,75	3,5...4,5	≤ 0,08

2 год.; тиск робочого газу у сосуді високого тиску — 100 МПа.

Зразки після ГП піддавали термічній обробці у вакуумній печі за режимом: нагрівання $750 \pm 10^\circ\text{C}$ з витримкою 1,5 год. в середовищі динамічного вакууму ($1 \cdot 10^{-1} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ мбар), охолодження в поті інертного газу (аргону).

Для проведення порівняльних досліджень частину зразків не піддавали ГП, а проводили термічну обробку безпосередньо після друку.

Після обробки по вказаним варіантам заготовки проходили механічну обробку для забезпечення розмірів, що передбачені технічною документацією на виготовлення зразків для механічних випробувань.

Хімічний склад сплаву визначали методами спектрального й хімічного аналізів.

Механічні властивості (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ) зразків випробовували на розривній машині ZDMY 30 на відповідність вимогам стандарту AMS4928 й галузевих стандартів ОСТ1 90002 і ОСТ1 90006 на вітчизняний титановий сплав ВТ-6, що застосовується традиційно для виготовлення відповідальних деталей та вузлів в авіаційній промисловості.

Ударну в'язкість (KCU) визначали на зразках, що були випробувані на маятниковому копрі «Instron SI-1M».

Фрактографічне дослідження зламів проводили на зруйнованих при механічних випробуваннях розривних та ударних зразках під бінокулярним мікроскопом «STEMI 2000-C».

Макроструктуру вивчали на шліфах, що були виготовлені із розривних та ударних зразків в поперечному та повздовжньому напрямках.

Дослідження мікроструктури проводили на травлених мікрошліфах у поперечному та повздовжньому перерізах на мікроскопі «Axio Observer. Dlm» при збільшенні $\times 500$.

Результати досліджень. За результатами випробувань встановлено, що хімічний склад обох варіантів виготовлення зразків за основними елементами задовільний, відповідає вимогам стандарту AMS 4928 для сплаву Ti–6Al–4V і знаходиться приблизно на одному рівні в усіх досліджуваних варіантах (табл. 1).

Візуальний огляд за допомогою бінокулярного мікроскопу показав, що макроструктура зразків досліджуваних технологій виготовлення як до, так і після ГП характеризується проявом макрозерна величиною 1...3 бала при оцінюванні за шкалою макроструктур, прийнятої для титанових сплавів в авіаційній промисловості (рис. 1).

Тріщин, розшарувань, неметалевих включень, що не допускаються, ділянок ліквідаційного походження, що видимі неозброєним оком, в макроструктурі досліджуваних зразків не виявлено.

Фрактографічне дослідження показало, що злами ударних та розривних зразків характеризуються дрібнокристалевою будовою та мають світ-

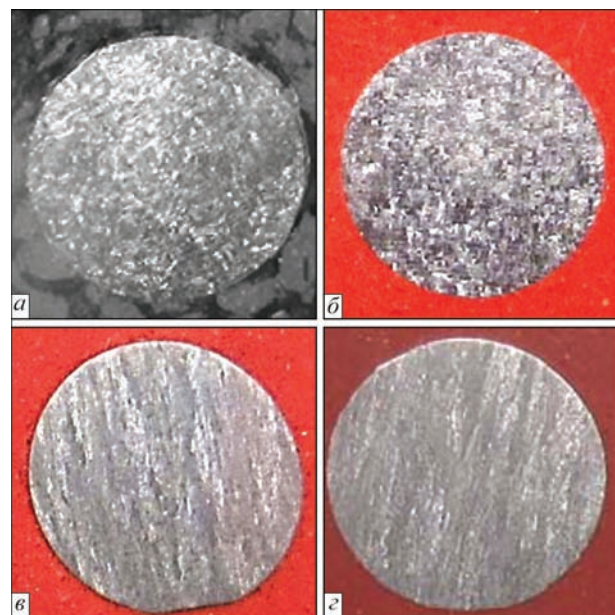


Рис. 1. Макроструктура зразків, отриманих за технологією SLM (а, б) та EBM (в, г) до ГП (а, в), після ГП (б, г), $\times 3$

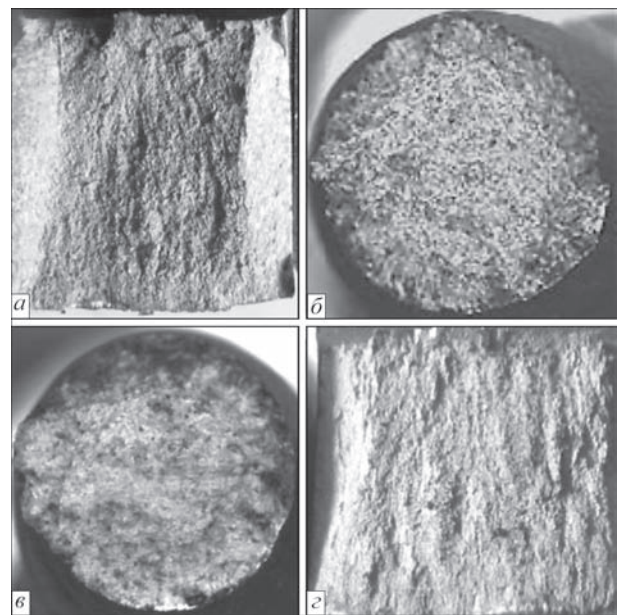


Рис. 2. Фрактографія зламів зразків, що отримані за технологіями SLM (а, б) та EBM (в, г) після механічних випробувань: а, б — до ГП; в, г — після ГП, $\times 3$

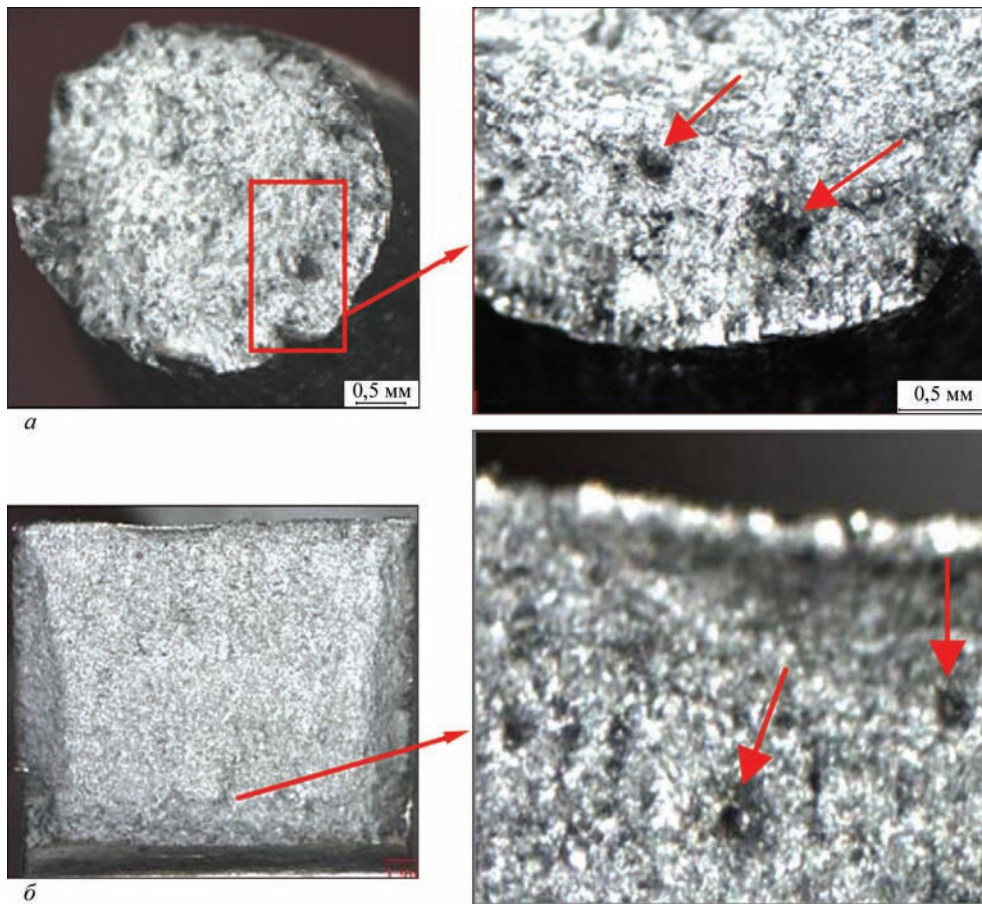


Рис. 3. Пори й включення в зламах зразків, що отримані за технологією SLM (а) та EBM (б) до ГП

лий відтінок (рис. 2). В деяких зразках до ГП виявлені поодинокі пори й округлі частинки, що виступають, котрі уявляють собою, ймовірно, не-

сплавлені частинки вихідного порошку (рис. 3). Подібне характерно для зразків, що отримані за обома досліджуваними технологіями сплавлен-

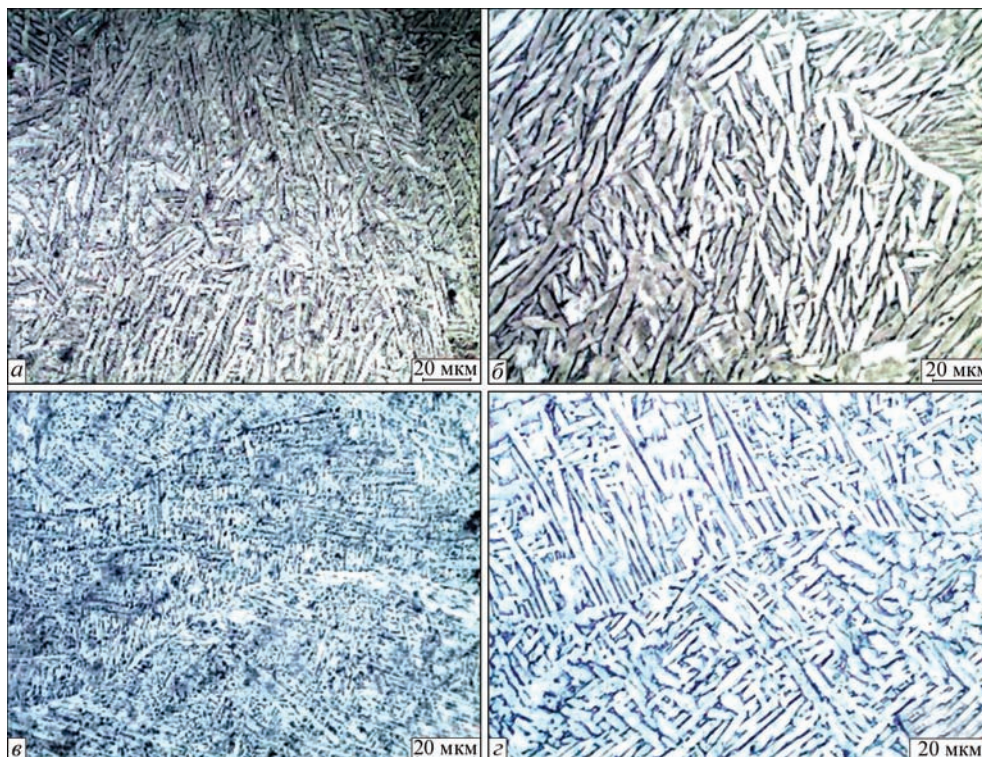


Рис. 4. Мікроструктура зразків, що отримані за технологіями SLM (а, б) та EBM (в, г) до ГП (а, в), після ГП (б, г)

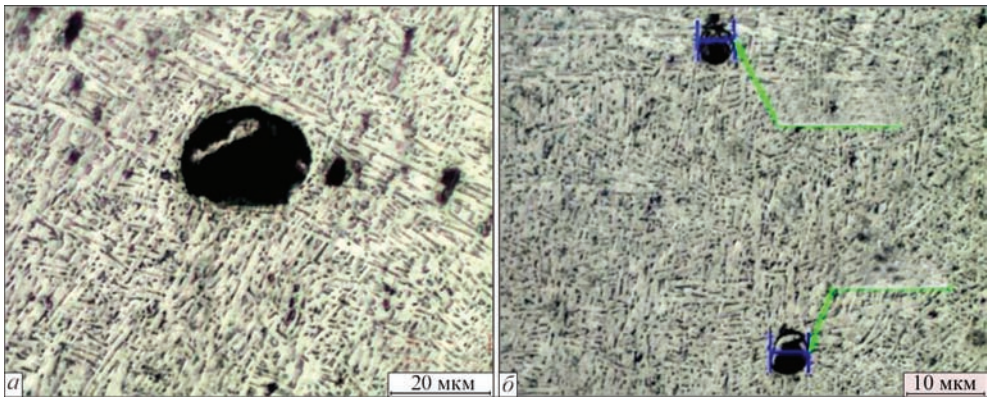


Рис. 5. Мікроструктура зразків, що отримані за технологією SLM (а) та EBM (б) до ГП

Т а б л и ц я 2. Механічні властивості дослідних зразків досліджуваних варіантів технології при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$					
Варіант технології	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
SLM	961	922	15,6	39,0	33,1
EBM	1006	959	15,2	42,7	47,9
SLM	942	920	13,4	45,1	63,2
EBM	960	914	14,6	41,2	44,7
AMS 4928	≥ 896	≥ 827	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	–
OCT1 90002 (середньогабаритні штамповані зі сплаву ВТ6 після ТМО та старіння)	930...1180	–	≥ 9	≥ 25	≥ 35
OCT1 90006 (гарячекатаний пруткок зі сплаву ВТ6)	930...1130	–	≥ 10	≥ 35	≥ 35

ня. В зламах зразків після ГП пор та часток, що виступають не виявлено.

Мікроструктура зразків, що отримані за досліджуваними технологіями виготовлення, характеризується наявністю видовженої пластинчастої α -фази у перетвореній епітаксiально зрощеній β -матриці і є характерною для сплаву Ti–6Al–4V після термічної обробки (рис. 4). Пластинчата α -фаза в структурі зразків, що пройшли ГП, відрізняється більш широкими розмірами у порівнянні зі зразками до ГП. Слід відмітити відсутність безперервного ланцюжка α -фази на міжзеренних межах перетвореної β -фази. При металографічному дослідженні суттєвої різниці у мікроструктурі зразків у повздовжньому та поперечному перерізах не виявлено.

В зразках до ГП при мікроаналізі виявлено одиничні дефекти у вигляді несплавлень й мікропор діаметром 4...32 мкм (рис. 5). Після проведення ГП структура характеризується практично повною відсутністю подібного виду дефектів.

Механічні властивості зразків, що отримані з використанням обох технологій як до, так і після проведення ГП, відповідають вимогам стандарту AMS 4928 і вітчизняних стандартів OCT1 90002 й OCT1 90006, що застосовуються при виготовленні відповідальних деталей авіаційного призначення і знаходяться приблизно на одному рівні (табл. 2).

Із результатів випробувань видно, що показники міцності зразків, що пройшли ГП, дещо нижчі за показники міцності зразків, що не піддавалися ГП, при цьому для значень характеристик пластичності й ударної в'язкості спостерігається зворотна залежність. Помітно вищі значення ударної в'язкості у зразках, що отримані за технологією SLM після ГП, ймовірно пов'язані з утворенням більш брилистий й пластинчастої α -фази і видовженими β -зернами, що формують колонії з більш постійним рівномірним розміром.

Висновки

- 1. Таким чином, виготовлення деталей та заготовок за 3D технологіями з використанням у якості джерела енергії лазера або електронного променю забезпечує рівень механічних властивостей сплаву Ti–6Al–4V у відповідності до нормативної документації на продукцію авіаційного призначення.
- 2. Виявлення в зламах та в мікроструктурі пор і несплавлень гранул обумовлює обов'язкове проведення ГП деталям відповідального призначення, що отримані методом 3D принтингу для суттєвого покращення структурного стану.
- 3. В рамках перспективних робіт при виготовленні деталей авіаційної техніки за досліджуваними технологіями автори планують проведення серії робіт по випробуванню виготовлення зразків та реальних деталей з гранул титанового сплаву

Ti–6Al–4V, що отримані плазмовим відцентровим розпиленням і характеризуються кращою сферичністю форми й відсутністю спадкових гранул.

Список літератури/References

1. Dovbysh, V.M., Zabednov, P.V., Zlenko, M.A. (2015) *Additive technologies and products from metal*. Moscow, GNTs RF FGUP NAMI [in Russian].
2. Edwards, P., O'Connor, A., Ramulu, M. (2013) Electron beam additive manufacturing of titanium components: Properties and performance. *J. of Manufacturing Sci. and Engin., Transact. of the ASME*, 135(6).
3. Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T. et al. (2010) A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti. *Acta Materialia*, 58(9), 3303–3312.
4. Mohammadhosseini, A., Fraser, D., Masood, S., Jahedi, M. (2013) Microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V manufactured by electron beam melting process. *Materials Research Innovations*, 17, 106–112.
5. Froes, F.H. (2013) Titanium powder metallurgy: Developments and opportunities in a sector poised for growth. *Powder Metallurgy Review*, 2(4), 29–43.
6. Burghardt Kloden. *Additive manufacturing — selective electron beam melting*. http://ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/en/documents/dd/infoblatter/additive_manufacturing-electron_beam_melting_fraunhofer_ifam_dresden.pdf/

ВЛИЯНИЕ ТИПА ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ ПРИ 3D ПРИНТИНГЕ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА Ti–6Al–4V

А. А. Педаш, В. В. Клочихин, Т. А. Митина, В. Г. Шило
АО «МОТОР СИЧ».

69068, г. Запорожье, просп. Моторостроителей, 15. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

В статье изучены состав, структура и свойства образцов из сплава Ti–6Al–4V, полученных по технологиям селективного лазерного и электронно-лучевого сплавления относительно производства деталей авиационного назначения. Проведено сравнительное исследование структуры и свойств образцов после термической обработки, присущей для сплава Ti–6Al–4V, до и после предварительного горячего изостатического прессования. Установлено, что появление в изломах и в микроструктуре пор и несплавленных гранул требует обязательно проведения горячего изостатического прессования деталей ответственного назначения, когда происходит устранение подобного вида дефектов и соответственно обеспечивается лучший комплекс характеристик прочности и пластичности. Библиогр. 6, табл. 2, ил. 5.

Ключевые слова: титановый сплав; аддитивные технологии; селективное лазерное плавление; электронно-лучевое плавление; микроструктура; механические свойства

EFFECT OF TYPE OF POWER SOURCE AT 3D PRINTING ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF Ti–6Al–4V ALLOY COMPONENTS

A.A. Pedash, V.V. Klochikhin, T.A. Mitina, V.G. Shilo
JSC «MOTOR SICH».

15 Motorostroiteley Ave., 69068, Zaporozhye. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

In the paper the composition, structure and properties of specimens of Ti–6Al–4V alloy, produced by technologies of a selective laser and electron beam melting are studied as-applied to manufacture of aircraft-purpose components. Comparative investigation of structure and properties of specimens after heat treatment, typical for alloy Ti–6Al–4V, before and after preliminary hot isostatic pressing, was carried out. It was found that the appearance of pores and lacks of fusion of granules in fractures and in microstructure requires the obligatory hot isostatic pressing of critical components to eliminate the above defects and to provide the better complex of characteristics of strength and ductility. 6 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Key words: titanium alloy; additive technologies; selective laser melting; electron beam melting; microstructure; mechanical properties

Поступила 11.07.2018

СВОЙСТВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ЛЕГИРОВАНИИ

С. А. Фирстов¹, И. Д. Горная¹, Ю. Н. Подрезов¹,
А. А. Бондарь¹, А. В. Шереметьев²

¹Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины.
03142, г. Киев, ул. Кржижановского, 3. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

²ГП «Ивченко-Прогресс».
69068, г. Запорожье, ул. Иванова, 2. E-mail: progress@ivchenko-progress.com

Представлены результаты изучения влияния комплексного легирования Nb (3...4 %), Mo, Cr, Zr (до 2 %), V, Y (до 0,2 %) на механические свойства литых интерметаллидных γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al сплавов, содержащих от 44,0 до 48,5 % Al, полученных способом вакуумно-дугового переплава. Определены механические свойства при испытаниях на изгиб, одноосные растяжение и сжатие. Измерены твердость по Виккерсу и длительная горячая твердость (жаропрочность). Испытания проводили в температурном интервале 20...800 °С. Показано, что оптимальные свойства при растяжении при 20 и 700 °С демонстрирует литой сплав Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo): модуль упругости составляет примерно 170 и 126 ГПа, предел прочности — 770 и 644 МПа, пластичность — 0,15 и 0,65 % соответственно. Трещиностойкость этого сплава составляет приблизительно 22,4 МПа·м^{1/2}, длительная горячая твердость при 700 °С — 2,0 ГПа, что вдвое превышает значение твердости высокотемпературных титановых сплавов. Библиогр. 20, табл. 5, ил. 1.

Ключевые слова: титановые сплавы; алюминиды титана; легирование; механические свойства; жаропрочность

За счет малой плотности (4,2...3,9 г/см³), термодинамической стабильности и жаростойкости, повышенной жесткости и высокой удельной прочности в интервале температур 600...750 °С сплавы на основе алюминидов титана γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al рассматриваются как наиболее перспективные, отвечающие современным требованиям авиакосмической, авиационной и автомобильной промышленности [1–7]. Замена суперсплавов на никелевой основе сплавами на основе алюминидов титана позволит снизить вес деталей ГТД и ГТУ в 1,5...2,0 раза вместе с их удешевлением почти на треть. Актуальной остается также задача повышения температуры, которая для коммерческих жаропрочных титановых сплавов типа IM834, BT18Y, BT41 составляет 550...600 °С, что является недостаточным для деталей компрессора и турбины ГТД нового поколения. Несмотря на большой объем работ, посвященных разработке и исследованию γ -TiAl сплавов, проблема достижения оптимального баланса свойств в литом состоянии для удешевления процессов их производства остается актуальной, поэтому необходимо продолжение исследований влияния легирования, в первую очередь Nb, в комплексе с другими β -стабилизирующими и модифицирующими элементами на свойства γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al сплавов [8–14].

Целью настоящей работы является изучение влияния комплексного легирования Nb, Mo, Cr, Zr, V и Y на физико-механические свойства литых интерметаллидных γ -TiAl сплавов разного номинального состава.

Материалы и способы исследования. Для исследований выплавлены две серии γ -TiAl сплавов, легированных 3...4 % Nb, Mo, Cr, Zr (до 2 %), V и Y (до 0,2 %) с содержанием от 44 до 48,5 % Al (тут и далее ат. %).

Слитки сплавов серии 1 получены способом вакуумно-дугового переплава в лабораторной вакуумно-дуговой печи в медном цилиндрическом охлаждаемом водой кристаллизаторе в среде аргона путем послойного расплавления спрессованных шихтовых брикетов [15]. Для слитков диаметром 65...70 мм, длиной 12 мм и весом приблизительно 200 г в качестве исходных материалов использовали губчатый титан МНТ-100 и металлы технической чистоты. Бор вводили в виде лигатуры 94Al–5Ti–1B (мас. %). Химический состав сплавов серии 1 и твердость по Виккерсу представлены в табл. 1. Сплав номер 6–1 имеет такой же состав, что и сплав 5–1, но выплавлен с использованием титановой губки ТГ100 производства Запорожского титано-магниевого комбината (ЗТМК).

Таблица 1. Химический состав и твердость по Виккерсу γ -TiAl сплавов серии 1

Номер сплава	Состав		HV 30, ГПа
	ат. %	мас. %	
1–1	Ti–44Al–5,5(Nb, Cr, Mo)	Ti–29Al–12 (Nb, Cr, Mo)	4,3
2–1	Ti–44Al–5,7(Nb, Cr, Mo, B)	Ti–29Al–12,1(Nb, Cr, Mo, B)	4,1
3–1	Ti–44Al–5,7(Nb, Cr, Mo, Y)	Ti–29Al–12,5(Nb, Cr, Mo, Y)	4,5
4–1	Ti–47Al–4,8(Nb, Cr, Mo, Zr)	Ti–31,6Al–10,2(Nb, Cr, Mo, Zr)	3,7
5–1	Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo)	Ti–32,4Al–12,2(Nb, Cr, Mo)	3,5
6–1	Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo)	Ti–32,4Al–12,2(Nb, Cr, Mo)	3,2

Для определения влияния микролегирования бором выплавлено серию 2 модельных слитков, составы которых и твердость по Виккерсу приведены в табл. 2. Для сравнения свойств химический состав сплава номер 6–2 (без добавок бора) соответствует составу сплава номер 5–1 серии 1. Слитки весом приблизительно 15 г изготовлены способом аргоно-дуговой плавки в электродуговой печи с использованием нерасходуемого вольфрамового электрода на медном поду с водным охлаждением и позволяющим получать более качественные сплавы [12].

Изучение структурно-фазового состояния сплавов выполняли способами оптической металлографии (ОМ), сканирующей (СЭМ) и трансмиссионной (ТЭМ) электронной микроскопии, рентгеновского анализа. Механические свойства сплавов изучали при испытаниях на одноосные растяжение и сжатие при температурах 20 и 700 °С. Испытания на растяжение проводили согласно ГОСТ-1497 на образцах диаметром 3 мм и длиной рабочей части 15 мм со скоростью деформации 10^{-3} с⁻¹. Удлинение фиксировали тензометрическими датчиками непосредственно с рабочей части образца. Конструкция тензометра позволяла определять деформацию образца с чувствительностью 10^{-5} и измерять модуль упругости с погрешностью не более 2 %.

Испытания на сжатие проводили со скоростью деформации 10^{-3} с⁻¹ при 20 и 700 °С методом построения диаграмм нагрузка–деформация. Образцы имели размер 3×3×5 мм согласно ГОСТ

11150–75. Для расчета трещиностойкости сплавов использовали данные испытания образцов на трехточечный изгиб при 20 °С. Жаропрочность сплавов оценивали экспресс-методом измерения долговременной горячей твердости с нагрузкой 10 Н в интервале температур 20...800 °С [16]. Измерения твердости сплавов по Виккерсу проводили при нагрузке 30 Н.

Результаты и обсуждение. Структурные исследования показали, что все сплавы имеют типичную литую дендритную структуру, размер зерна которой зависит от их состава. Так, литой сплав номер 1–1 (44 % Al) состоит из кристаллитов размером до нескольких миллиметров (рисунок, а). Дополнительное легирование бором, как известно, приводит к значительному измельчению структуры сплавов на основе γ -TiAl [17], поэтому размер зерна сплава номер 2–1 с добавкой бора уменьшился до десятков микрон (рисунок, б). Увеличение концентрации алюминия до 47 % при одинаковом содержании легирующих элементов (сплав номер 5–1) обусловило формирование четко выраженной lamellarной структуры, состоящей из двух фаз алюминидов титана — γ -TiAl и α_2 -Ti₃Al (рисунок, в, г). Согласно данным рентгенофазового анализа, СЭМ и ТЭМ в структуре изучаемых сплавов наблюдается небольшое количество β -фазы, имеющей ОЦК решетку.

Результаты измерения твердости по Виккерсу серии 1 литых γ -TiAl сплавов представлены в табл. 1. По уровню значений твердости (выше

Таблица 2. Химический состав и твердость по Виккерсу γ -TiAl сплавов серии 2

Номер сплава	Состав		HV 30, ГПа
	ат. %	мас. %	
1–2	Ti–44Al–5,6(Nb, Cr, Mo, B)	Ti–29Al–12,1(Nb, Cr, Mo, B)	4,4
2–2	Ti–45,5Al–5,6(Nb, Cr, Mo, B)	Ti–30,2Al–12,2(Nb, Cr, Mo, B)	3,7
3–2	Ti–47Al–5,6(Nb, Cr, Mo, B)	Ti–31,4Al–12,3(Nb, Cr, Mo, B)	3,2
4–2	Ti–48,5Al–5,6(Nb, Cr, Mo, B)	Ti–32,7Al–12,4(Nb, Cr, Mo, B)	2,9
5–2	Ti–47Al–4,6(Nb, Cr, Mo, B)	Ti–31,8Al–10,1(Nb, Cr, Mo, B)	3,3
6–2	Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo)	Ti–31,4Al–12,2(Nb, Cr, Mo)	3,5

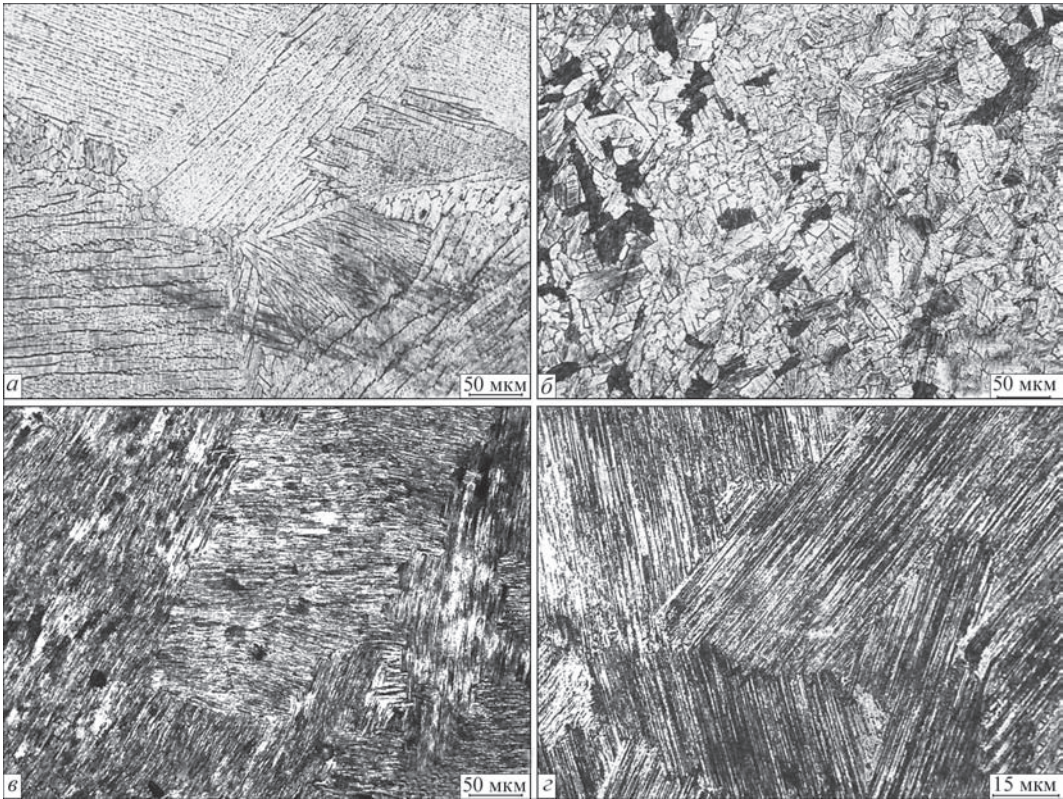


Рис. 1. Микроструктура литых γ -TiAl сплавов: *a* — номер 1–1 (Ti–44Al–5,5(Nb, Cr, Mo)); *б* — 2–1 (Ti–44Al–5,7(Nb, Cr, Mo, B)); *в, г* — 5–1 (Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo) (OM)

и ниже 4 ГПа) сплавы можно разделить на две группы. К первой относятся сплавы номер 1–1, 2–1, 3–1 с 44 % Al. Более высокие значения твердости первой группы сплавов по сравнению со второй объясняются как увеличением соотношения объемной доли α_2 -/ γ -фаз при уменьшении концентрации Al [4–6], так и существенным диспергированием структуры литых сплавов за счет модифицирующего эффекта B, Y [17–19]. Вторая группа сплавов номера 4–1, 5–1 и 6–1 содержат 47 % Al и, соответственно, большую объемную долю менее жесткой γ -TiAl фазы. Сплав номер

6–1 имеет самую низкую твердость примерно 3,2 ГПа, что может быть результатом использования в качестве исходного материала более чистой по содержанию кислорода титановой губки производства ЗТМК.

В табл. 3 представлены механические свойства литых γ -TiAl сплавов серии 1: трещиностойкость (K_{Ic}), модуль упругости (E), предел текучести ($\sigma_{0,2}$), предел прочности (σ_B), относительное удлинение (δ) и поперечное сужение (ψ), которые определяли при испытаниях на одноосное растяжение при температурах 20 и 700 °C.

Т а б л и ц а 3. Влияние легирования на трещиностойкость и механические свойства серии γ -TiAl сплавов серии 1 при одноосном растяжении при 20 и 700 °C								
Номер сплава	Состав, ат. %	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	$T_{исп}$, °C	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
1–1	Ti–44Al–5,5(Nb, Cr, Mo)	16,1	20	158	–	512	0,17	1,0
			700	116	463	501	0,28	0,57
2–1	Ti–44Al–5,7(Nb, Cr, Mo, B)	13,6	20	187	–	533	0,02	0,07
			700	113	516	562	0,28	2,6
3–1	Ti–44Al–5,7(Nb, Cr, Mo, Y)	14,8	20	170	–	523	0,03	0,14
			700	122	–	454	0,12	2,3
4–1	Ti–47Al–4,8(Nb, Cr, Mo, Zr)	20,8	20	185	394	504	0,35	1,4
			700	130	396	555	0,65	2,3
5–1	Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo)	22,4	20	170	–	770	0,15	1,2
			700	126	543	644	0,45	2,9
6–1	Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo)	21,8	20	171	510	548	0,28	0,28
			700	133	400	514	0,28	2,6

Т а б л и ц а 4. Влияние легирования на трещиностойкость и механические свойства литых γ -TiAl сплавов серии 2 при испытаниях на сжатие при 20 и 700 °С

Номер сплава	Состав сплава (ат. %)	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	$T_{исп}$, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_p , МПа	ε , %
1–2	Ti–44Al–5,6(Nb, Cr, Mo, B)	14,0	20	861	1688	7,0
			700	1119	2284	17,2
2–2	Ti–45,5Al–5,6(Nb, Cr, Mo, B)	16,7	20	809	2096	12,8
			700	844	2020	19,4
3–2	Ti–47Al–5,6(Nb, Cr, Mo, B)	24,8	20	745	2577	16,2
			700	879	2974	27,0
4–2	Ti–48,5Al–5,6(Nb, Cr, Mo, B)	14,0	20	668	2181	16,2
			700	551	2735	31,1
5–2	Ti–47Al–4,6(Nb, Cr, Mo, B)	26,4	20	852	2315	12,1
			700	617	2951	7,2
6–2	Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo)	24,4	20	814	2030	7,9
			700	867	2059	9,1
5–1	Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo)	22,4	20	852	2444	11,9
			700	844	2547	32,7

Следует отметить, что литым γ -TiAl сплавам при комнатной температуре свойственны малая пластичность и низкая технологичность [4–6], приводящие к проблемам изготовления стандартных образцов и проведения испытаний на растяжение. Кроме того, наличие литейных дефектов и примесей, поступивших из исходной титановой губки, неоднородность химического состава по сечению слитка могут также влиять на качество образцов и достоверность полученных экспериментальных данных.

Анализ результатов испытаний на растяжение образцов сплавов серии 1 показал, что практически все исследованные сплавы при 20 °С имеют достаточно высокие модули упругости на уровне 158...187 ГПа. Среди указанных сплавов модули упругости сплавов номер 4–1 и 5–1 сохраняют высокие значения и при 700 °С, а именно 130 и 126 ГПа соответственно. Наибольшие значения трещиностойкости (20,8...22,4 МПа·м^{1/2}) демонстрируют сплавы под номерами 4–1, 5–1 и 6–1 с содержанием 47 % Al.

Из данных, приведенных в табл. 3, следует, что при испытаниях образцов на растяжение в большинстве случаев не удалось достичь необходимого предела текучести по причинам, указанным выше. Это касается сплавов номер 1–1, 2–1 и 3–1 с содержанием 44 % Al. Два последних указанных сплава, легированных дополнительно бором и иттрием, имеют минимальную пластичность приблизительно 0,02...0,03 %. Измеренные при 20 °С пределы текучести ($\sigma_{0,2}$) сплавов 4–1 и 6–1 равны 394 и 510 МПа соответственно.

Максимальные значения предела прочности при 20 °С демонстрируют сплавы 5–1 и 6–1 — 770 и 548 МПа соответственно. Пластичность этих сплавов равна примерно 0,28 и 0,15 %. Сплав номер 4–1 имеет предел прочности 504 МПа и максимальную среди всех исследуемых сплавов пластичность в литом состоянии около 0,35 %. При 700 °С максимальные значения предела прочности имеют сплавы номер 2–1 (562 МПа), 4–1 (555 МПа) и 5–1 (644 МПа). Таким образом, среди сплавов серии 1 оптимальный баланс всех механических характе-

Т а б л и ц а 5. Влияние легирования на длительную горячую твердость литых γ -TiAl сплавов в интервале температур 20...800 °С

Номер сплава	Состав, ат. %	Температура, °С				
		20	500	700	750	800
1–1	Ti–4Al–5,6(Nb, Cr, Mo, B)	3,0	2,8	2,3	2,2	1,8
2–1	Ti–45,5Al–5,6(Nb, Cr, Mo, B)	2,8	2,6	2,1	1,8	1,6
3–1	Ti–47Al–5,6(Nb, Cr, Mo, B)	3,4	3,2	2,5	2,5	2,1
4–1	Ti–48,5Al–5,6(Nb, Cr, Mo, B)	2,5	1,9	1,9	1,6	1,6
5–1	Ti–47Al–4,6(Nb, Cr, Mo, B)	2,9	2,6	2,0	1,7	1,6
6–1	Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo)	2,6	2,1	1,6	1,6	1,4
5–2	Ti–47Al–4,6(Nb, Cr, Mo, B)	2,5	2,1	1,8	1,8	1,4
6–2	Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo)	2,6	2,3	2,0	1,7	1,5

ристик наблюдается для литого сплава номер 5–1, имеющего состав Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo).

Механические свойства образцов серии 2 литых γ -TiAl сплавов, учитывая небольшие размеры слитков, определяли при испытаниях на сжатие при 20 и 700 °C (табл. 4). Для сравнения в табл. 4 представлены также свойства сплава номер 5–1 (серия 1). Отмечается, что наиболее высокий уровень механических свойств как при 20 °C, так и при 700 °C имеют сплавы, содержащие 47 % Al (номера 3–2, 5–2, 6–2). Указанные сплавы наряду со сплавом номер 5–1 показывают и наибольшие значения трещиностойкости (24,4...26,4 МПа·м^{1/2}). Сплавы номер 3–2 и 5–2 (дополнительно легированные бором) имеют самые высокие прочностные характеристики при 20 и 700 °C. У сплава номер 6–2 наблюдается несколько пониженное разрушающее напряжение по сравнению со сплавом 5–1 серии 1, имеющего с ним одинаковый состав, что может быть связано с разными технологиями изготовления слитков.

Результаты измерения длительной горячей твердости (жаропрочности) литых γ -TiAl сплавов серии 1 и сплавов 5–2 и 6–2 серии 2 представлены в табл. 5. Высокие значения жаропрочности при температурах 700...750 °C имеет группа сплавов с содержанием 44 % Al. Сплавы 4–1, 5–1 и 6–1 при температуре 700 °C имеют близкие значения длительной твердости 1,9...2,0 ГПа, которые практически в два раза превышают значения твердости высокотемпературных титановых сплавов с металлической матрицей α -Ti [20].

Выводы

1. Показано, что комплексное легирование (3–4 % Nb, до 2 % (Mo, Cr, Zr), до 0,2 % (B, Y)) литых γ -TiAl сплавов с содержанием Al от 44,0 до 48,5 % обеспечило оптимальное сочетание физико-механических свойств, включая трещиностойкость и низкотемпературную пластичность у сплавов, содержащих 47 % Al.

2. Установлено, что дополнительное легирование бором и иттрием литых γ -TiAl сплавов, содержащих 44 % Al, резко измельчает зерно в литом состоянии до десятков микрометров, но, к сожалению, снижает пластичность при комнатной температуре.

3. Испытания на сжатие показали, что добавки бора приводят к значительному повышению прочностных свойств литых γ -TiAl сплавов, содержащих 47 % Al как при комнатной, так и при повышенных температурах.

4. Установлено, что оптимальный баланс свойств при 20 и 700 °C среди изученных литых γ -TiAl сплавов имеет сплав Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo) (номер 5–1): модуль упругости (E) равен примерно 170 и 126 ГПа, предел прочности при одноосном растяжении (σ_b) — 770 и 644 МПа, пластичность (δ) — 0,15 и 0,65 % соответственно. Трещиностойкость этого сплава (K_{Ic}) — 22,4 МПа·м^{1/2}. Длительная твердость сплава (жаропрочность) при 700 °C составляет около 2,0 ГПа, что практически вдвое превышает значение длительной твердости высокотемпературных титановых сплавов.

Список литературы

1. Clemens H., Mayer S. (2016) Intermetallic titanium aluminides in aerospace applications—processing, microstructure and properties. *Materials at high temperatures*. <http://dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1163792>
2. Bewlay B. P., Nag S., Suzuki A., Weimer M. J. (2016) TiAl alloys in commercial aircraft engines. *Ibid.* <http://dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1183068>
3. Toshimitsu Tetsui. (2002) Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles. *Materials Science and Engineering*, **A329–331**, 582–588.
4. Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. (2008) *Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок*. Т. 2. (Газотурбинные двигатели). Москва, Машиностроение.
5. Appel F., Paul J. D. H., Oehring M. (2011) *Gamma titanium aluminide alloys: science and technology*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
6. Kim Y.-W., Smarsly W., Lin J. et al. (2014) Gamma titanium aluminide alloys, 2014: a collection of research on innovation and commercialization of gamma alloy technology. *4th International Symposium on Gamma TiAl alloys, ISGTA 2014*. Hoboken (NJ), John Wiley & Sons, Inc.
7. Christoph Leyens, Manfred Peters (2003) *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
8. Wu X. (2006) Review of alloy and processing development of TiAl alloys. *Intermetallics*, **14**, 1114–1122.
9. Lapin J. (2009) TiAl-based alloys: Present status and future perspectives. *Hradec nad Moravicí, Metal*, **19**.
10. Hu D., Wu X., Loretto M. H. (2005) Advances in optimization of mechanical properties in cast TiAl alloys. *Intermetallics*, **13**, 914–919.
11. Фірісов С. О., Горна І. Д., Порядченко Н. Е. та ін. (2010) Високотемпературні властивості комплексно легованих сплавів на основі алюмінідів титану. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. **8**, 145–150.
12. Бондар А. А., Вітусевич В. Т., Ремез М. В. та ін. (2011) Структура та властивості титан-алюмінідних сплавів, легованих ніобієм і танталом. *Порошковая металлургия*, **7–8**, 25–45.
13. Подрезов Ю. Н., Ремез М. В., Горная И. Д. и др. (2012) Температурная зависимость механических свойств сплавов на основе интерметаллида TiAl. *Сб.: «Электронная микроскопия и прочность материалов»*. Киев, ИПМ НАНУ, **18**, сс. 57–74.
14. Ремез М. В., Подрезов Ю. М., Бондар А. А. та ін. (2016) Структура та властивості сплавів на основі TiAl, легованих ніобієм і хромом. *Порошковая металлургия*, **1–2**, 104–112.

15. Голтвяниця С. К., Голтвяниця В. С., Цивірко Е. І. (2006) Отримання щільних та однорідних виливків зі сплаву титан-алюміній. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, **1**, 57–59.
16. Борисенко В. А. (1984) *Твердость и прочность тугоплавких материалов при высоких температурах*. Киев, Наукова думка.
17. Hu D. (2002) Effect of boron addition on tensile ductility in lamellar TiAl alloys. *Intermetallics*, **10**, 851–858.
18. Wu Y., Hwang S. K. (2002) Microstructural refinement and improvement of mechanical properties and oxidation resistance in EPM TiAl-based intermetallics with yttrium additions. *Acta Materialia*, **50**, 1479–1493.
19. Горна І. Д., Яблокова Г. В., Тінков В. О. та ін. (2010) Вплив Y на структуру і властивості литого інтерметалідного сплаву Ti–36Al. Повідомлення 1. Структура і твердість литих сплавів Ti–36Al–Y. *Сб.: Современные проблемы физического материаловедения*. Киев, ИПМ НАНУ, **19**, сс. 122–127.
20. Горна І. Д., Горпенко К. О., Коваль О. Ю. та ін. (2008) Структура та фізико-механічні властивості сплавів системи Ti–Si–X. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **3**, 35–42.
7. Christoph Leyens, Manfred Peters (2003) *Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
8. Wu, X. (2006) Review of alloy and processing development of TiAl alloys. *Intermetallics*, **14**, 1114–1122.
9. Lapin, J. (2009) TiAl-based alloys: Present status and future perspectives. *Hradec nad Moravicí, Metal*, **19**.
10. Hu, D., Wu, X., Loretto, M. H. (2005) Advances in optimization of mechanical properties in cast TiAl alloys. *Intermetallics*, **13**, 914–919.
11. Firstov, S.O., Gorna, I.D., Poryadchenko, N.E. et al. (2010) High-temperature properties of complex alloys based on titanium aluminides. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **8**, 145–150 [in Ukrainian].
12. Bondar, A.A., Vitusevych, V.T., Remez, M.V. et al. (2011) Structure and properties of titanium-aluminide alloys doped with niobium and tantalum. *Poroshk. Metallurgiya*, **7–8**, 25–45 [in Ukrainian].
13. Podrezov, Yu.N., Remez, M.V., Gornaya, I.D. et al. (2012) Temperature dependence of mechanical properties of alloys based on TiAl intermetallics. In: *Electron microscopy and strength of materials: Transact. Kiev, IPMS*, **18**, 57–74 [in Russian].
14. Remez, M.V., Podrezov, Yu.M., Bondar, A.A. et al. (2016) Structure and properties of TiAl-based alloys doped with niobium and chrome. *Poroshk. Metallurgiya*, **1–2**, 104–112 [in Ukrainian].
15. Goltvyanytsya, S.K., Goltvyanytsya, V.S., Tsyvirko, E.I. (2006) Production of solid homogeneous ingots of titanium-aluminium alloy. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metallurgii ta Mashynobuduvanni*, **1**, 57–59 [in Ukrainian].
16. Borisenko, V.A. (1984) *Hardness and strength of heat-resistant materials at high temperatures*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
17. Hu, D. (2002) Effect of boron addition on tensile ductility in lamellar TiAl alloys. *Intermetallics*, **10**, 851–858.
18. Wu, Y., Hwang, S. K. (2002) Microstructural refinement and improvement of mechanical properties and oxidation resistance in EPM TiAl-based intermetallics with yttrium additions. *Acta Materialia*, **50**, 1479–1493.
19. Gorna, I.D., Yablokova, G.V., Tinkov, V.O. et al. (2010) Effect of Y on structure and properties of cast intermetallic alloy Ti–36Al–Y. Information 1: Structure and hardness of cast alloys Ti–36Al–Y. In: *Current problems of physical materials science: Transact. Kiev, IPMS*, **19**, 122–127 [in Ukrainian].
20. Gorna, I.D., Gorpenko, K.O., Koval, O.Yu. et al. (2008) Structure and physico-mechanical properties of alloys of Ti–Si–X system. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **3**, 35–42 [in Ukrainian].

References

ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІДІВ ТИТАНУ γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ ЛЕГУВАННІ

С. О. Фірстов¹, І. Д. Горна¹, Ю. М. Подрезов¹, А. А. Бондарь¹, О. В. Шереметьєв²

¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України.

03142, м. Київ, вул. Кржижановського, 3. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

²ДП «Івченко-Прогрес».

69068, м. Запоріжжя, вул. Іванова, 2. E-mail: progress@ivchenko-progress.com

Представлено результати вивчення впливу комплексного легування Nb (3...4 %), Mo, Cr, Zr (до 2 %), B, Y (до 0,2 %) на механічні властивості литих інтерметалідних γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al сплавів з вмістом Al від 44,0 до 48,5 %, отриманих способом вакуумно-дугового переплаву. Визначено механічні властивості в випробуваннях на згин, одновісний стиснення і розтягування. Вимірювані твердість по Віккерсу і довготривала гаряча твердість (жароміцність). Випробування проводили в температурному інтервалі 20...800 °С. Показано, що оптимальні властивості при розтягуванні при 20 і 700 °С демонструє литий сплав Ti–47Al–5,5 (Nb, Cr, Mo): модуль пружності

становить майже 170 і 126 ГПа, границя міцності — 770 і 644 МПа, пластичність — 0,15 і 0,65 % відповідно. Тріщиностійкість цього сплаву складає приблизно 22,4 МПа·м^{1/2}, довготривала гаряча твердість при 700 °С — майже 2,0 ГПа, що практично вдвічі перевершує значення твердості високотемпературних титанових сплавів. Бібліогр. 20, табл. 5, іл. 1.

Ключові слова: титанові сплави; алюмініди титану; легування; механічні властивості; жароміцність

PROPERTIES OF ALLOYS ON TITANIUM ALUMINIDE γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al BASE AT COMPLEX ALLOYING

S.A. Firstov¹, I.D. Gornaya¹, Yu.N. Podrezov¹, A.A. Bondar¹, A.V. Sheremetjev²

¹I.N. Frantsevich Institute of Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine.

3 Krzhyzhanovsky Str., 03142, Kyiv. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

²SE «Ivchenko-Progress».

2 Ivanov Str., 69068, Zaporozhye. E-mail: progress@ivchenko-progress.com

Presented are the results of study of effect of a complex alloying by Nb (3...4 %), Mo, Cr, Zr (up to 2 %), B, Y (up to 0.2 %) on mechanical properties of cast intermetallic γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al alloys, containing from 44.0 up to 48.5 % Al, produced by the method of vacuum arc remelting. The mechanical properties were determined at bending, uniaxial tension and compression tests. Vickers hardness and long-time hot hardness (high-temperature strength) were measured. The tests were carried out within the temperature interval of 20...800 °C. It was shown that the optimum properties during tension at 20 and 700 °C were demonstrated by the cast alloy Ti-47Al-5.5 (Nb, Cr, Mo); coefficient of elasticity was approximately 170 and 126 GPa, tensile strength was 770 and 644 MPa, ductility was 0.15 and 0.65 %, respectively. Crack resistance of this alloy is approximately 22.4 MPa·m^{1/2}, long-time hot hardness at 700 °C is 2.0 GPa, that twice increases the value of hardness of high-temperature titanium alloys. 20 Ref., 5 Tabl., 1 Fig.

Key words: titanium alloys; titanium aluminides; alloying; mechanical properties; high-temperature strength

Поступила 09.07.2018

НОВАЯ КНИГА



Мазур А. А. Очерки истории Патоновской научной школы: сборник. — 2-е изд., испр., доп. — Киев: ИЭС; Харьков: ФЛП Либуркина Л. М., 2018. — 216 с.
ISBN 978-966-8177-89-7

В сборнике представлена информация о всемирно известной Патоновской научно-инженерной школе в области сварки и родственных технологий, которая создана выдающимся ученым академиком Е. О. Патон и развита достойным продолжателем его дела академиком Б. Е. Патон. Освещены основные этапы и принципы создания и развития этой школы, ее влияние на мировую сварочную науку и технику, вклад в обеспечение экономической и военной безопасности страны.

Сборник рассчитан на широкий круг читателей, которые интересуются вопросами научно-технического, инновационного и экономического развития страны, а также молодежи, выбирающей свой жизненный путь.

Заказы на сборник просьба направлять
в редакцию журнала «Современная электрометаллургия»

РАСЧЕТ РАВНОВЕСНЫХ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ТИТАН–АЛЮМИНИЙ*

Г. М. Григоренко, В. А. Костин, С. Г. Григоренко

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

На основе методологии CALPHAD предложена методика построения равновесной диаграммы состояния и термокинетической диаграммы превращения интерметаллидного сплава системы Ti–Al. Определено влияние алюминия на температуру образования интерметаллида титана Ti_3Al . Показано, что с увеличением содержания алюминия в интерметаллиде Ti_3Al от 10 до 29 ат. % температура начала β -Ti \rightarrow Ti_3Al -превращения повышается с 520 до 1170 °C. Дальнейшее повышение содержания алюминия в интерметаллиде с 29 до 40 ат. % приводит к незначительному снижению начальной температуры превращения до 1140 °C. Разработанная методика может быть использована для моделирования термокинетических диаграмм анизотермических превращений в сложных титановых сплавах. Библиогр. 13, ил. 6.

Ключевые слова: титановые сплавы; интерметаллиды; алюминиды титана; фазовые превращения; Gleeble 3800; регрессионный анализ

Одной из актуальных проблем современного материаловедения является разработка и создание новых конструкционных материалов, эффективных способов их производства и соединения.

Первостепенная роль в решении этой задачи принадлежит созданию новых жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов, которые являются основными конструкционными материалами для многих ведущих отраслей промышленного производства: химического, энергетического и транспортного машиностроения, турбостроения, авиационной и космической техники.

К настоящему времени разработано и широко используется большое количество жаропрочных сплавов, которые работают в широком диапазоне температур и агрессивных сред. Вместе с тем проблема создания новых легких жаропрочных сплавов, работающих в среде, температура которой превышает 550...600 °C особенно актуальна, поскольку технические характеристики обычных сталей и сплавов заметно снижаются при достижении этого диапазона температур.

В этой связи представляет большой интерес изучение интерметаллидных соединений системы Ti–Al.

Благодаря уникальному сочетанию физико-механических свойств [1–3] алюминиды титана обладают высокой прочностью, модулем упругости,

жаропрочностью и жаростойкостью, антикоррозионными свойствами, сопротивлением усталостному разрушению и ползучести при низкой плотности. Широкому промышленному применению алюминидов титана препятствует их низкая пластичность, плохая обрабатываемость и повышенная хрупкость при комнатной температуре [4].

Вместе с тем сплавы системы Ti–Al обладают достаточно широким набором структур, различием в морфологии, дисперсностью фаз, что дает возможность путем использования термической обработки значительно улучшить их свойства.

Наиболее перспективными с этой точки зрения являются так называемые гамма-сплавы. В зависимости от содержания алюминия их разделяют на однофазные и двухфазные.

Однофазные гамма-сплавы, содержащие более 51 ат. % Al, малопрочные и малопластичные. Легирование таких сплавов 5 ат. % (Nb + Ta) не повышает их механических свойств, но приводит к возрастанию жаропрочности. Гамма-сплавы, содержащие менее 51 ат. % Al, являются двухфазными. В качестве второй фазы образуется Ti_3Al (α_2), количество которой при 50 ат. % Al составляет 5 %, а при 47 ат. % Al — 25 %.

Двухфазные сплавы, в структуре которых присутствует 10...15 мас. % α_2 -фазы с тонкопластинчатой структурой, обладают высокими механиче-

*По материалам доклада, представленного на Международной конференции «Титан-2018. Производство и применение в Украине», 11–13 июня 2018, г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

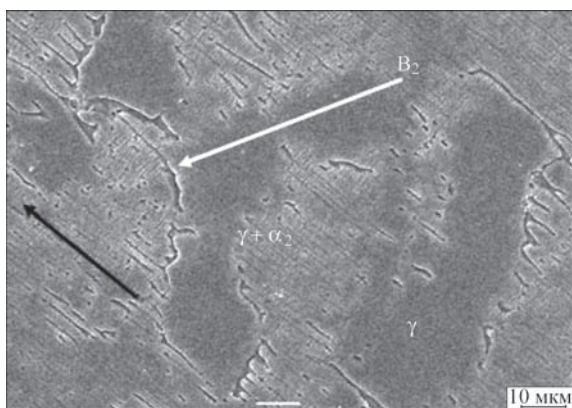


Рис. 1. Микроструктура интерметаллидного сплава Ti–38Al–7Nb–2Cr (черная стрелка — направление кристаллизации)

скими свойствами: $\sigma_B^{+20} = 520...480$ МПа и $\delta^{+20} = 2,5...2,7$ % при температуре испытаний $+20$ °С.

Термическая обработка в $(\gamma + \alpha_2)$ -области приводит к измельчению и формированию дисперсной глобулярной структуры, которая показывает незначительное улучшение пластичности и повышение прочности.

Наибольшее повышение механических свойств гамма-сплавов достигается за счет снижения содержания Al до 45...48 ат. % и легирования сплавов тугоплавкими элементами до 10 ат. % (Nb, Ta, Mo, W, Cr).

На рис. 1 представлена микроструктура экспериментального интерметаллидного сплава Ti–38Al–7Nb–2Cr электронно-лучевой выплавки.

Микроструктура слитка состоит в основном из колоний ламелей $(\gamma + \alpha_2)$ -фазы, которые направлены по оси слитка. Колонии ламелей разделяются участками массивной γ -фазы, а также расположенной по границам зерен упорядоченной β_0 (B_2)-фазой.

Улучшение технологических свойств сплавов на основе интерметаллидов титана может быть обеспечено не только за счет их легирования и ра-

финирования, но и целенаправленным изменением структурно-фазового состояния сплавов путем проведения термической обработки.

Вместе с тем влияние режимов термической обработки (температуры, скорости охлаждения) на свойства интерметаллидных сплавов системы Ti–Al изучены не достаточно полно. Это связано как со сложностью подготовки образцов интерметаллидов для исследований из-за их низкой пластичности, так и ограниченными возможностями экспериментальных методов изучения кинетики фазовых превращений в данных сплавах.

Цель данной работы — построение расчетной равновесной диаграммы состояния и термокинетической диаграммы превращения интерметаллидного титанового сплава системы Ti–Al, что представляет большой научный и практический интерес.

Методика исследований. При разработке новых перспективных материалов и сплавов сложного химического состава одной из важных проблем является отсутствие термодинамических и теплофизических данных о свойствах разрабатываемого сплава.

Для решения этой проблемы помимо прямого экспериментального подхода к определению термодинамических свойств новых интерметаллидов системы Ti–Al можно воспользоваться различными компьютерными моделями для многокомпонентных сплавов [5, 6].

Одним из основных подходов для расчета равновесных диаграмм состояния является метод CALPHAD (Calculation of PHase Diagrams) [7]. Блок-схема расчета представлена на рис. 2.

Данный метод позволяет на основе термодинамических моделей простых систем (унитарных, двойных или тройных) строить термодинамические модели многокомпонентных многофазных систем.

Термодинамические свойства каждой фазы описываются математической моделью, параметры которой вычисляются путем минимизации разности квадратов между описываемой величиной и ее экспериментальным значением в блоке «оптимизация», с учетом экспериментальных фазовых диаграмм, электронной теории, полученной из «первых принципов» (т. н. *ab initio*) и термодинамических данных отдельных фаз.

Метод CALPHAD основан на анализе экспериментальной информации о фазовых равновесиях в системе и термодинамических свойствах фаз, составляющих ее. Термодинамические свойства каждой фазы описываются математической моделью (регрессионным уравнением), параметры

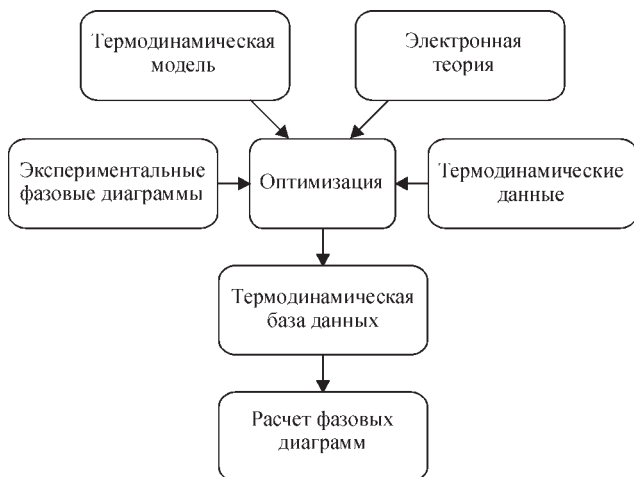


Рис. 2. Блок-схема расчета фазовых диаграмм по методу CALPHAD

которой вычисляются путем минимизации свободной энергии Гиббса, учитывая все возможные линейные комбинации фаз. Кроме того, любая термодинамическая величина может быть получена исходя из энергии Гиббса:

$$G_{m,j} = \sum_{i=1}^c x_i^0 G_i + RT y_i \sum_{i=1}^c x_i \ln(x_i) + G_{m,j}^E + G_{m,j}^{mag}, \quad (1)$$

где $G_{m,j}$ — свободная энергия Гиббса; $\sum_{i=1}^c x_i^0 G_i$ — идеальная энергия смеси; $RT y_i \sum_{i=1}^c x_i \ln(x_i)$ — неидеальная энергия взаимодействия фаз; $G_{m,j}^{mag}$ — вклад магнитного превращения.

Для любой i -фазы полная энергия Гиббса $G_{m,j}^i$ может быть представлена в виде полинома:

$$G_i^l = a_i^l + b_i^l T + c_i^l T \ln T + \sum_n d_{i,n}^l T^n + H_i^{SER} + G_{i,p}^l, \quad (2)$$

где $a_i^l, b_i^l, c_i^l, d_{i,n}^l$ — численные параметры для i -го элемента в данном фазовом состоянии.

Эта система уравнений может быть решена любым численным методом (например методом Ньютона–Рафсона), но на возможные решения накладываются ряд ограничений, связанных с за-

коном сохранения энергии, массы, мольных долей и т. д.

Значения параметров, входящих в формулу (2), приведены в базе данных SGTE (Scientific Group Thermodata Europe) [9] для всех элементов в различных фазовых состояниях.

Выполненные расчеты равновесных фаз позволяют определять разнообразные термодинамические свойства сплавов (энтальпию, теплоемкость, теплопроводность, активность), кинетические (вязкость, диффузионную подвижность), механические (предел прочности и текучести, модуль упругости и Пуассона) и межфазные (поверхностное натяжение).

При моделировании методом CALPHAD свойства материала в многокомпонентных системах могут быть записаны в общем виде:

$$\varphi = \varphi^0 + \Delta\varphi, \quad (3)$$

где φ является произвольным свойством многокомпонентной системы φ^0 , представляющей собой идеальную сумму свойств отдельных составляющих и $\Delta\varphi$ (дополнительный вклад неидеального взаимодействия между фазами).

После того, как параметры отдельных фаз определены, свойства конечного сплава рассчитываются с использованием хорошо зарекомендовав-

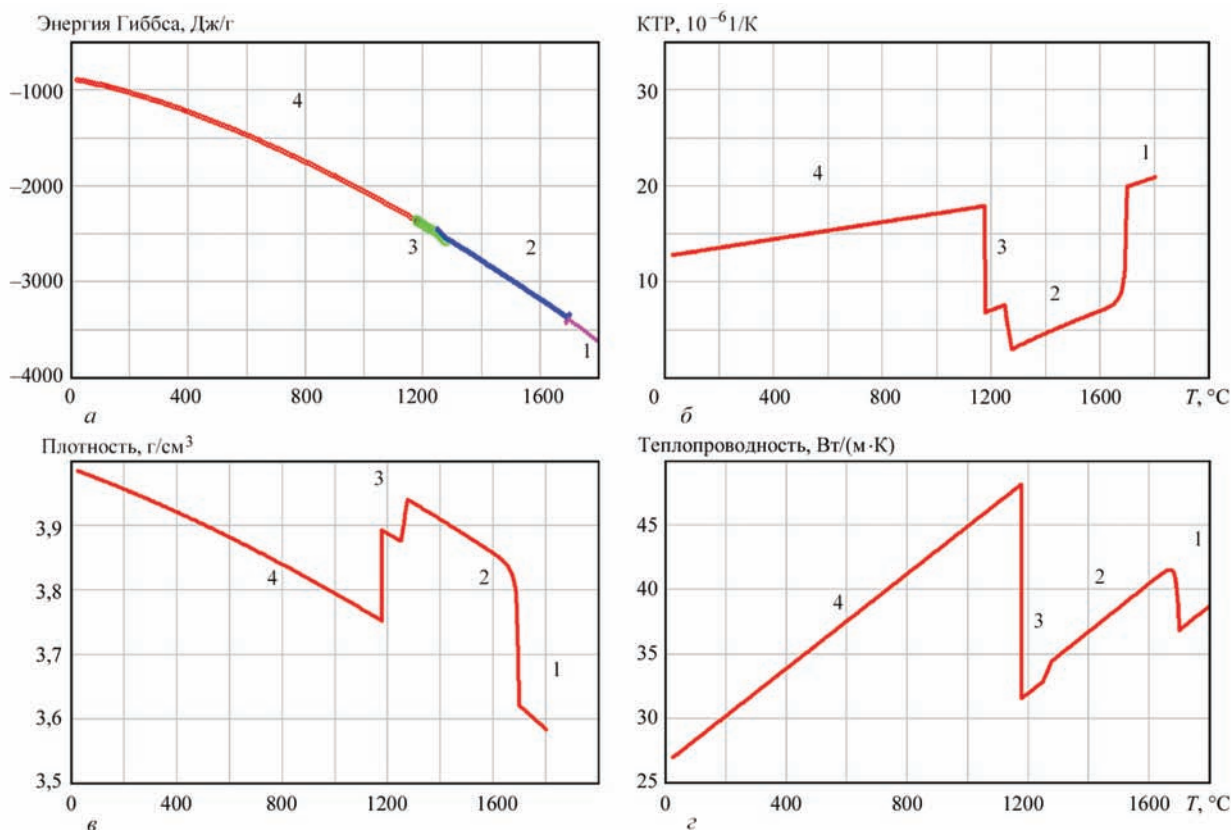


Рис. 3. Расчетные свойства интерметаллидного сплава системы Ti–Al с 30 % алюминия: а — свободная энергия Гиббса; б — коэффициент термического расширения; в — плотность; з — теплопроводность; 1 — жидкая фаза; 2 — β -фаза Ti; 3 — α -фаза Ti; 4 — фаза Ti_3Al

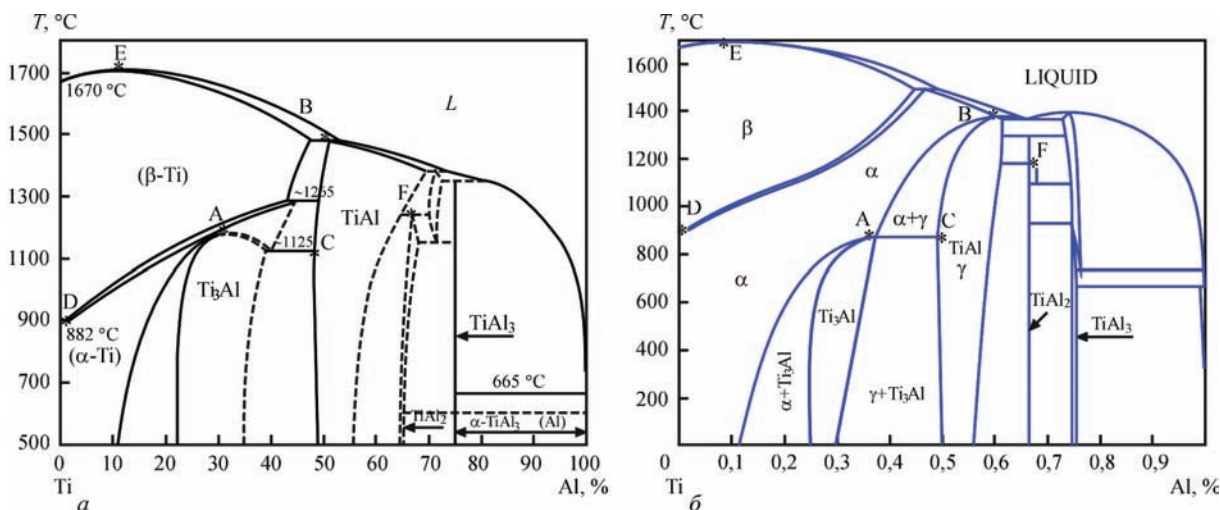


Рис. 4. Сравнение экспериментальной [13] (а) и расчетной (б) диаграммы состояния системы Ti–Al

ших себя моделей смесей [10, 11], которые позволяют учесть вклад каждой фазы в энергию Гиббса и свойства всей системы (рис. 3).

В настоящее время предложен ряд математических моделей, которые используются для различных типов фаз, создан набор термодинамических баз данных для различных материалов (сталей, титановых сплавов, интерметаллидных соединений и т. д.).

Результаты исследований и обсуждение. Используя разработанное программное обеспечение [12] и пакет программ OpenCalphad, рассчитаны коэффициенты $a_i^l, b_i^l, c_i^l, d_{i,n}^l$ модели для каждой фазы в системе Ti–Al. Коэффициенты определялись методом регрессионного анализа таким образом, чтобы разница в расчетных и экспериментальных значениях равновесных температур была минимальна. Результаты расчета равновесной диаграммы системы Ti–Al приведены на рис. 4.

Одним из эффективных способов управления структурой слитков интерметаллидных соединений системы Ti–Al является применение термической обработки.

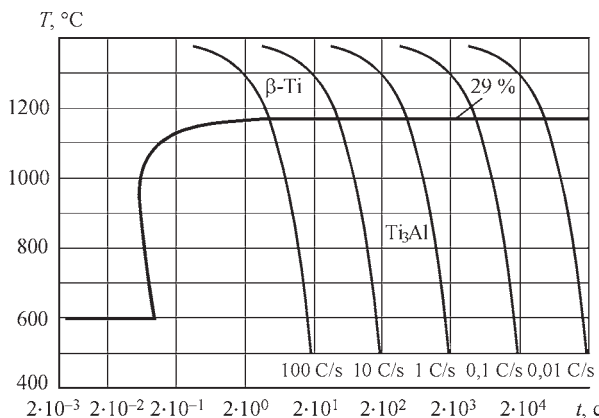


Рис. 5. Расчетная термокинетическая диаграмма превращения сплава системы Ti–Al, содержащего 30 ат. % алюминия

В связи с тем, что с увеличением скорости охлаждения слитка температуры начала фазовых превращений заметно отклоняются от равновесных, то для выбора оптимальной температуры обработки сплава обычно используются термокинетические или изотермические диаграммы превращения.

С целью определения влияния скорости охлаждения на кинетику превращений в системе Ti–Al на основе метода CALPHAD проведен расчет неравновесных температур начала образования фаз с использованием интерполяционного многочлена:

$$T = A + B \ln(\tau) + C(\ln(\tau))^2 + D(\ln(\tau))^3 + E(\ln(\tau))^4 + K(\ln(\tau))^5. \tag{4}$$

Определение значения коэффициентов уравнения (3) осуществляли на основе решения системы шести линейных алгебраических уравнений, т. к. для нахождения однозначного решения количество переменных и уравнений должно совпадать. В ходе решения предполагали, что коэффициенты уравнения (3) зависят только от содержания алюминия в исследуемом интерметаллидном сплаве.

В работе моделировали термокинетическую диаграмму превращения сплава системы Ti–Al, содержащего 30 ат. % алюминия. Выбор данного сплава обусловлен с одной стороны, уже рассчитанными термодинамическими свойствами (рис. 3), а с другой, возможностью дальнейшей экспериментальной проверки результатов моделирования.

Результаты расчета термокинетической диаграммы превращения сплава системы Ti–Al, содержащего 30 ат. % алюминия, приведены на рис. 5.

Анализ термокинетической диаграммы образования алюминидов титана в сплаве, содержащем 30 ат. % Al, показал, что в широком диапазоне скоростей охлаждения от 0,1 до 1000 °C/s температура начала образования интерметаллида Ti₃Al прак-

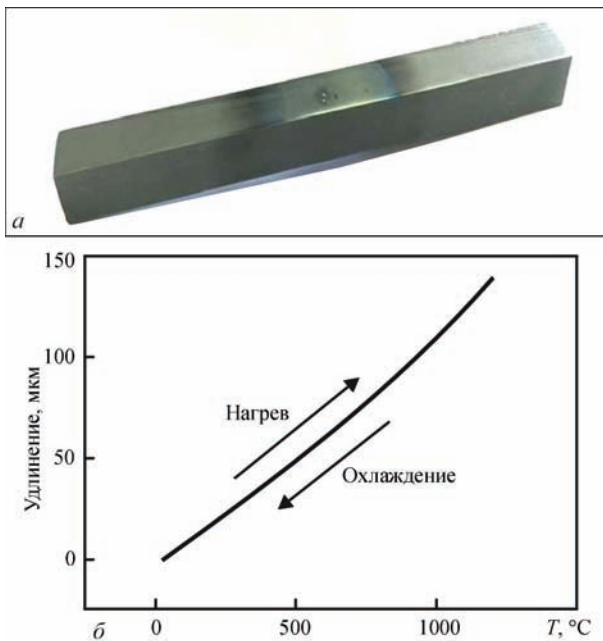


Рис. 6. Экспериментальная проверка результатов моделирования в системе Ti–Al: а — общий вид образца для построения ТКД; б — дилатометрическая кривая сплава Ti44Al7Nb3Mo. Температура не меняется и составляет 1170 °С. Данная температура достаточно близка к равновесной температуре образования Ti_3Al для данного сплава (рис. 2, а). При более высоких скоростях охлаждения наблюдается снижение температуры начала образования интерметаллида. Так, при скоростях охлаждения 1000 и 3300 °С/с температура начала образования интерметаллида Ti_3Al снижается до 1130 и 1004 °С. Время охлаждения при этом составляет 0,1 и 0,03 с соответственно.

Экспериментальная проверка расчетных результатов по определению температуры начала превращения была проведена на комплексе имитации термдеформационного состояния материала Gleeble 3800 для сплава системы Ti–Al, содержащего, ат. %: 45,5 Ti; 44,5 Al; 7 Nb; 3 Mo (рис. 6).

Сопоставление расчетной (1140 °С) и экспериментальной (1170 °С) температур начала превращения, показало их достаточно хорошее соответствие и подтвердило предположение о возможности использования метода CALPHAD для моделирования термодинамических свойств интерметаллидных сплавов системы Ti–Al.

Выводы

1. На основе метода CALPHAD разработана методика построения равновесной диаграммы состояния и термокинетической диаграммы превращения в системе Ti–Al.

2. Определено влияние алюминия на температуру начала образования фаз. Показано, что с увеличением содержания алюминия в интерме-

таллиде Ti_3Al от 10 до 29 ат. % температура начала $\beta-Ti \rightarrow Ti_3Al$ -превращения повышается от 520 до 1170 °С. Дальнейшее повышение содержания алюминия в интерметаллиде от 29 до 40 ат. % приводит к незначительному снижению начальной температуры превращения до 1140 °С.

3. Для дальнейшего уточнения расчетной модели образования алюминидов титана в системе Ti–Al целесообразно проведение прямых экспериментальных измерений.

Список литературы

- Ильин А. А., Копачев Б. А., Полькин И. С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Справочник. Москва, ВИЛС-МАТИ.
- Clemens H., Mayer S. (2013) Design, Processing, Microstructure, Properties, and Applications of Advanced Intermetallic TiAl Alloys. *Advanced Engineering Materials*, 4(22).
- Appel F., Paul J. D. H., Oehring M. (2011) *Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology*, Wiley–VCH Verlag&Co.
- Lipsitt H. A., Shechtman D., Schafrik R. E. (1991) *Met. Transact.*, 6A.
- Saunders N., Miodownik A. P. (1998) *CALPHAD — Calculation of phase diagrams*. R. W. Cahn (ed.). Elsevier Science, Oxford.
- Fan Z., Tsakiroopoulos P., Miodownik A. P. (1994) A generalized law of mixtures. *J. Mater. Sci.*, 29(141).
- Lukas H. L., Fries S. G., Sundman B. (2007) *Computational Thermodynamics: The Calphad Method*. (Cambridge, U.K., Cambridge University Press).
- Хина Б. Б., Горанский Г. Г. (2016) Термодинамика многокомпонентных аморфных сплавов: сравнение различных подходов. *Тр. Межд. науч.-техн. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Материаловедение»*, Минск.
- Dinsdale A. T. (1991) SGTE data for pure elements. *Calphad*, 15(4), 317–425.
- Ахонин С. В., Белоус В. Ю., Мужиченко А. Ф., Селин Р. В. (2013) Математическое моделирование структурных превращений в ЗТВ титанового сплава ВТ23 при сварке ТИГ. *Автоматическая сварка*, 3, 26–29.
- Орлов Н. Ю. (1986) Метод расчета самосогласованных потенциалов для смеси химических элементов. *Журнал вычислительной математики и математической физики*, 26(8), 1215.
- Григоренко Г. М., Костин В. А. (2013) Прогнозирование температур фазовых превращений в высокопрочных низколегируемых сталях. *Современная электрометаллургия*, 1, 33–39.
- (1996) *Диаграммы состояния двойных металлических систем*. Лякишев Н. П. (ред.). Москва, Машиностроение.

References

- Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Refer. Book. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
- Clemens, H., Mayer, S. (2013) Design, processing, microstructure, properties, and applications of advanced intermetallic TiAl alloys. *Advanced Engineering Materials*, 4(22).
- Appel, F., Paul, J. D. H., Oehring, M. (2011) *Gamma titanium aluminide alloys: Science and Technology*. Wiley–VCH Verlag&Co.

4. Lipsitt, H.A., Shechtman, D., Schafrik, R.E. (1991) *Met. Transact.*, **6A**.
5. Saunders, N., Miodownik, A. P. (1998) *CALPHAD — Calculation of phase diagrams*. Ed. by R. Cahn. Elsevier Science, Oxford.
6. Fan, Z., Tsakiroopoulos, P., Miodownik, A.P. (1994) A generalized law of mixtures. *J. Mater. Sci.*, **29**(141).
7. Lukas, H.L., Fries, S.G., Sundman, B. (2007) *Computational thermodynamics: The Calphad method*. Cambridge, U.K., Cambridge University Press.
8. Khina B.B., Goransky G.G. (2016) Thermodynamics of multicomponent amorphous alloys: Comparison of different approaches. In: *Proc. of Int. Sci.-Techn. Conf. on Modern Methods and Technology of Production and Processing of Materials. Materialovedenie*, Minsk [in Russian].
9. Dinsdale, A.T. (1991) SGTE data for pure elements. *Calphad*, **15**(4), 317–425.
10. Akhonin, S.V., Belous, V.Yu., Muzhichenko, A.F., Selin, R.V. (2013) Mathematical modeling of structural transformations in HAZ of titanium alloy VT23 during TIG welding. *The Paton Welding J.*, **3**, 24–27.
11. Orlov, N.Yu. (1986) A method of calculating selfconsistent potentials for a mixture of chemical elements. *USSR Comput. Math. Math. Phys.*, **26**(8), 1215 [in Russian].
12. Grigorenko, G.M., Kostin, V.A. (2013) Prediction of temperatures of phase transformations in high-strength low-alloy steels. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 33–39 [in Russian].
13. (1996) *State diagrams of binary metallic systems*. Ed. by N.P. Lyakishev. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

РОЗРАХУНОК РІВНОВАЖНИХ ДІАГРАМ СТАНУ І ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ ТИТАН–АЛЮМІНІЙ

Г. М. Григоренко, В. А. Костін, С. Г. Григоренко

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

На підставі методології CALPHAD запропоновано методику побудови рівноважної діаграми стану та термодинамічної діаграми перетворення інтерметалідного сплаву системи Ti–Al. Визначено вплив алюмінію на температуру перетворення інтерметаліду титана Ti_3Al . Показано, що зі збільшенням вмісту алюмінію в інтерметаліді Ti_3Al від 10 до 29 ат. % температура початку β -Ti \rightarrow Ti_3Al -перетворення підвищується з 520 до 1170 °C. Подальше підвищення вмісту алюмінію в інтерметаліді з 29 до 40 ат. % призводить до незначного зниження початкової температури перетворення до 1140 °C. Розроблена методика може бути використана для моделювання термодинамічних діаграм анізотермічних перетворень в складних титанових сплавах. Бібліогр. 13, іл. 6.

Ключові слова: титанові сплави; інтерметаліди; алюмініди титану; фазові перетворення; Gleeble 3800; регресійний аналіз

CALCULATION OF EQUILIBRIUM DIAGRAMS OF STATE AND PHASE TRANSFORMATIONS OF TITANIUM ALLOYS OF TITANIUM-ALUMINIUM SYSTEM

G.M. Grigorenko, V.A. Kostin, S.G. Grigorenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Basing on the CALPHAD methodology a method of construction of an equilibrium diagram of state and thermokinetic diagram of transformation of intermetallic alloy of Ti–Al system was suggested. The effect of aluminium on temperature of transformation of titanium intermetallic Ti_3Al was determined. It was shown that with increase of aluminium content in intermetallic Ti_3Al from 10 up to 29 at. % the temperature of beginning of β -Ti \rightarrow Ti_3Al transformation is increased from 520 up to 1170 °C. The further increase in aluminium content in intermetallic from 29 up to 40 at. % leads to negligible decrease in initial temperature of transformation to 1140 °C. The developed method can be applied for modeling of thermokinetic diagrams of anisothermal transformations in complex titanium alloys. 13 Ref., 6 Fig.

Key words: titanium alloys; intermetallics; titanium aluminides; phase transformations; Gleeble 3800; regression analysis

Поступила 20.06.2018

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО ФОРМИРОВАНИЯ СПОСОБОМ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ УЗЛОВ ВЕРТОЛЕТОВ И ГТД*

И. А. Петрик, С. Л. Чигилейчик, Т. А. Митина,
Ю. А. Марченко, М. О. Гнатенко
АО «МОТОР СИЧ».

69068, г. Запорожье, просп. Моторостроителей, 15. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

В работе освещен перспективный способ изготовления широкой номенклатуры крупногабаритных корпусных титановых деталей и узлов ГТД с применением технологии плазменной наплавки с присадочным материалом (проволокой). Проведена оценка структуры и механических свойств заготовок деталей из титановых сплавов, полученных выращиванием с применением плазменной наплавки, в сравнении с классическими способами их изготовления, такими как штамповка и литье. Показана экономическая эффективность данной технологии по сравнению с лазерно-порошковым способом выращивания заготовок деталей. Библиогр. 5, табл. 2, ил. 13.

Ключевые слова: плазменная наплавка; проволока; выращивание; титановые сплавы; механические свойства

Выращивание деталей способом послойной наплавки является одним из элементов аддитивного производства (АП), которое в последние годы стало очень перспективным направлением развития мировой промышленности. Аддитивные технологии (АТ) являются новыми технологиями производства деталей из металла, которые в целом ряде случаев могут заменить классические способы, такие как литье и штамповку. Среди основных преимуществ данной технологии можно выделить то, что с помощью автоматизированного компьютерного управления появляется возможность послойного изготовления нового изделия по его 3D модели. При этом значительно сокращаются время и затраты на получение нового изделия за счет исключения промежуточных стадий изготовления оснастки и пресс-форм. Это дает возможность осуществить опытную реализацию конструкторского проекта (при проектировании новых изделий или доработки существующих с целью улучшения технико-эксплуатационных характеристик) с минимальными затратами в кратчайшие сроки.

Помимо этого, данная технология дает возможность:

минимизировать влияние «человеческого фактора»;

сократить численность персонала, решив проблему нехватки квалифицированного персонала (модельщиков, формовщиков и т. д.);

устранить необходимость содержания, хранения и ремонта модельной оснастки, особенно для относительно крупногабаритных изделий;

улучшить условия труда.

К настоящему времени разработан целый ряд различных технологий аддитивного производства металлов, в т. ч. и титановых сплавов, различающихся по следующим параметрам:

расходуемому материалу (порошок, проволока или порошок в смеси со связующим веществом);

источнику нагрева (лазер, электронный луч, плазма, электрическая дуга и т. п.);

методу формирования слоев (выборочное расплавление (спекание) подготовленного слоя порошка, прямое сплавление присадочного материала на предыдущий слой или инъекционное литье) [1–5].

На данный момент при изготовлении изделий из титановых сплавов более широко применяются технологии на основе оборудования для лазерного или электронно-лучевого сплавления с использованием в качестве присадочного материала порошков.

Основное преимущество данных способов — это возможность получения изделий с высокой геометрической точностью и чистотой поверхно-

*По материалам доклада, представленного на Международной конференции «Титан-2018. Производство и применение в Украине», 11–13 июня 2018, г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

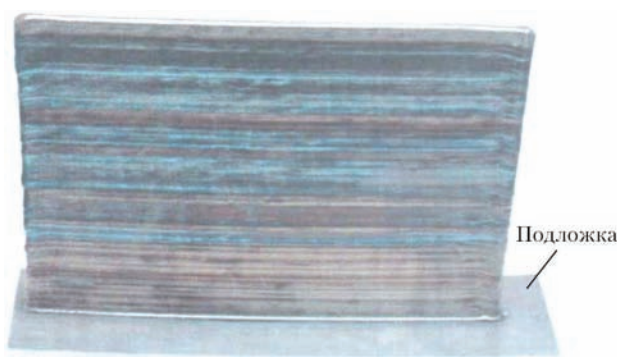


Рис. 1. Внешний вид пластины, полученной плазменной наплавкой в среде аргона с применением проволоки из сплава Ti–6Al–4V

сти. Однако производительность данных способов очень низкая (до 1 кг/ч), что ограничивает их применение при изготовлении крупноразмерных корпусных изделий.

Также следует отметить относительно высокую стоимость пригодных для аддитивных процессов титановых порошков по сравнению с аналогичными марками проволок (порошки — 400...550, проволока — 50...100 евро за 1 кг) и дорогостоящее для данных способов оборудование (более 1 млн. евро). Поэтому перспективным направлением для выращивания крупноразмерных корпусных титановых изделий может стать применение плазменной наплавки с использованием проволоки в качестве присадки. Оборудование для плазменной наплавки менее дорогостоящее (до 200 тыс. евро за 1 кг) по сравнению с лазерным и ЭЛС. В то же время использование проволоки, кроме ее отно-

сительно низкой цены, по сравнению с порошком дает 100%-ную эффективность использования материала (коэффициент использования для порошковых материалов составляет от 30 до 70 %). Также данный способ позволяет достичь существенно большей массовой производительности (до 10 кг/ч). Все это делает данный способ при выращивании крупных заготовок деталей (даже с учетом больших припусков на мехобработку в связи с более шероховатой поверхностью) с точки зрения экономики более перспективным.

Актуальной задачей становится сравнительная оценка структуры и механических свойств заготовок деталей из титановых сплавов, полученных выращиванием с применением плазменной наплавки проволокой в сравнении с классическими способами изготовления (литье, штамповка).

С этой целью исследовали заготовку в форме пластины размерами 360×250×8 мм (рис. 1), выращенную на установке для плазменной наплавки портального типа фирмы SBI в среде аргона с применением проволоки из сплава Ti–6Al–4V диаметром 1,6 мм.

Результаты исследования и их обсуждение. Согласно данным количественного спектрального анализа материал образца по содержанию легирующих элементов аналогичен отечественному сплаву ВТ6, содержание газов не превышает нормы стандарта для титановых сплавов авиационного назначения. Результаты проверки химического состава представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Химический состав образца-пластины, мас. %					
Наименование	Ti	Al	V	O ₂	N ₂
Пластина	основа	5,85	4,30	0,122	0,00435
Нормы по ГОСТ 190013-81 для сплава ВТ6	-»-	5,3...6,8	3,5...5,3	≤0,20	≤0,05

Т а б л и ц а 2. Механические свойства материала наплавленной пластины							
Номер образца	Состояние образцов	Направление вырезки	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %	ψ, %	
1	до термообработки	поперечное	928	808	15,2	45,4	
2			948	844	7,2	15,4	
3		продольное	972	851	10,8	28,3	
4			965	856	12,0	36,0	
5	после термообработки (отжиг T= 800 °С)	поперечное	913	831	17,2	54,3	
6			922	848	12,0	39,8	
7		продольное	989	910	7,2	20,2	
8			942	868	8,0	20,5	
Нормы* ОСТ 190024–94 (для плит из сплава ВТ6 толщиной 11...60 мм)		отожженное	—	900...1100	—	≥6,0	≥16,0
*Представлены для справки и не распространяются на наплавленные образцы.							

*Представлены для справки и не распространяются на наплавленные образцы.

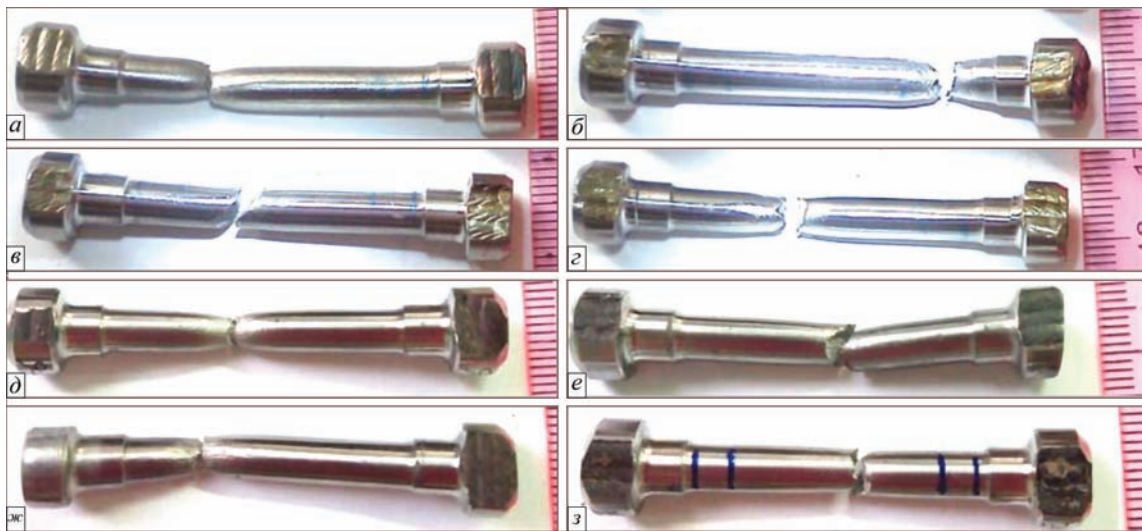


Рис. 2. Разрывные образцы после испытаний из пластины до термообработки (а — 1; б — 3; в — 2; г — 4) и после (д — 5; е — 7; ж — 6; з — 8)

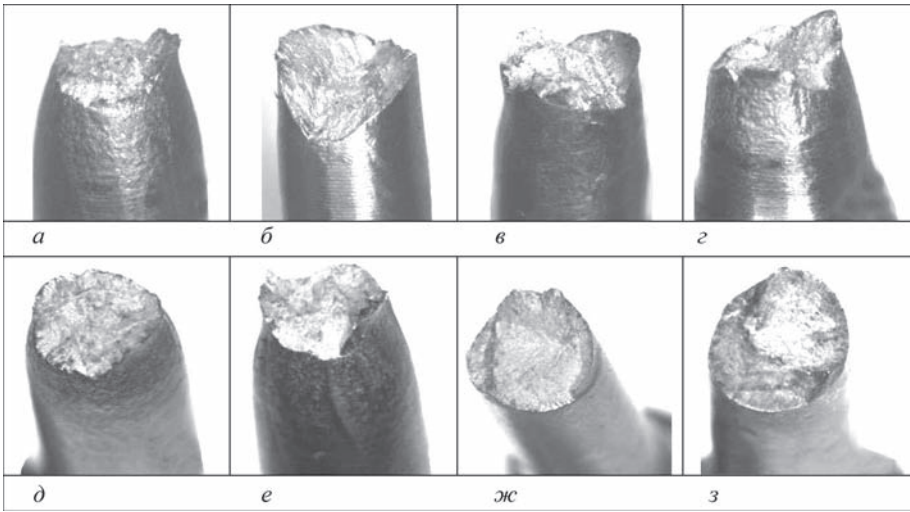


Рис. 3. Изломы образцов до термообработки (а — 1; б — 2; в — 3; г — 4) и после (д — 5; е — 6; ж — 7; з — 8), $\times 6,5$

Механические свойства проверены на стандартных разрывных образцах с рабочей частью диаметром 5 мм, вырезанных вдоль и поперек наплавленных слоев в исходном состоянии (после наплавки), а также после термообработки по режиму, рекомендуемому для деформируемых полуфабрикатов из сплава ВТ6: отжиг ($T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1\text{ ч}$), охлаждение на воздухе. Значения механических характеристик представлены в табл. 2.

Как видно из данных табл. 2, механические свойства вдоль и поперек пластины находятся примерно на одном уровне, анизотропии свойств не наблюдается. Отжиг наплавленной пластины позволил несколько повысить пластичность материала. При этом свойства образцов из исследуемой пластины до и после отжига соответствовали нормам для деформируемых полуфабрикатов (плит толщиной 11...60 мм по ОСТ 190024–94 «Плиты из титановых сплавов»).

Осмотр образцов после испытаний показал, что образцы 1, 3, 4, 5, 6 разрушены с образованием шейки вблизи излома, а образцы 2, 7, 8 — практи-

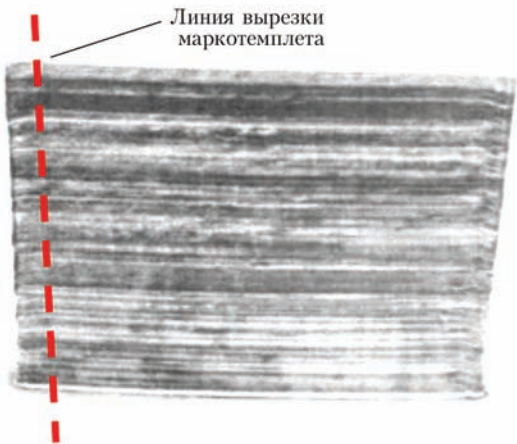


Рис. 4. Схема вырезки макротемплета из наплавленной пластины

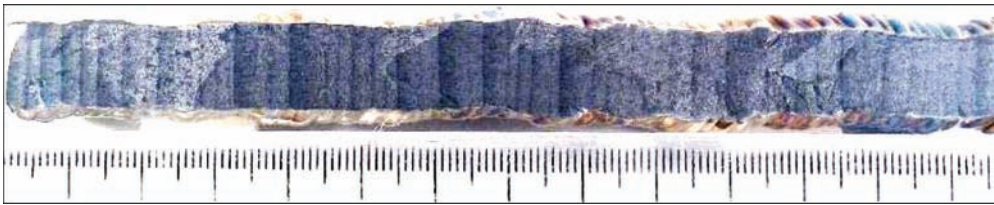


Рис. 5. Макроструктура пластины, выращенной способом плазменной наплавки (до отжига)

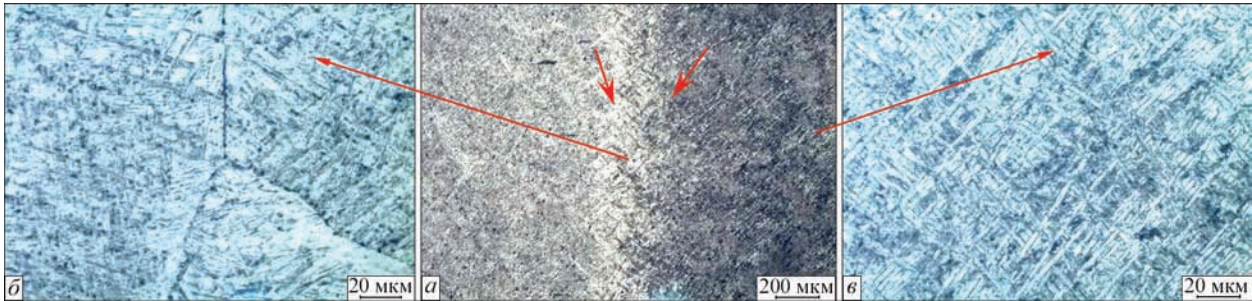


Рис. 6. Микроструктура пластины в исходном состоянии (после наплавки): *а* — $\times 50$; *б, в* — $\times 500$



Рис. 7. Микроструктура пластины после отжига: *а* — $\times 50$; *б, в* — $\times 500$

чески без видимой шейки, что подтверждает более низкие значения пластичности (рис. 2).

Осмотр с помощью бинокулярного микроскопа в изломах разрывных образцов дефектов метал-

лургического происхождения не выявил (рис. 3). Следует отметить, что рельеф изломов образцов с более низкой пластичностью отличался от остальных, имеющих мелкокристаллическое строение, разрушением вдоль нескольких плоскостей под углом к поверхности, по-видимому, по телу крупных зерен (см. рис. 3, б, ж, з).

Следует отметить, что поверхность исследуемых образцов в зоне разрушения характерна для деформируемых полуфабрикатов из титановых сплавов.

Макроструктуру изучали на темплекте, вырезанном поперек наплавленных слоев по высоте образца (рис. 4).

Визуальный осмотр показал, что в макроструктуре образца выявляются слои наплавленного металла в виде темных полос. Дефекты металлургического происхождения (поры, пустоты, раковины, включения, неслитины) не обнаружены (рис. 5).

Макроструктура пластины отличается от стандартных деформируемых полуфабрикатов наличием линий соединения сплавленных слоев, лежащих в различных кристаллографических плоскостях, по-разному отражающих свет от плоскости травленого шлифа.

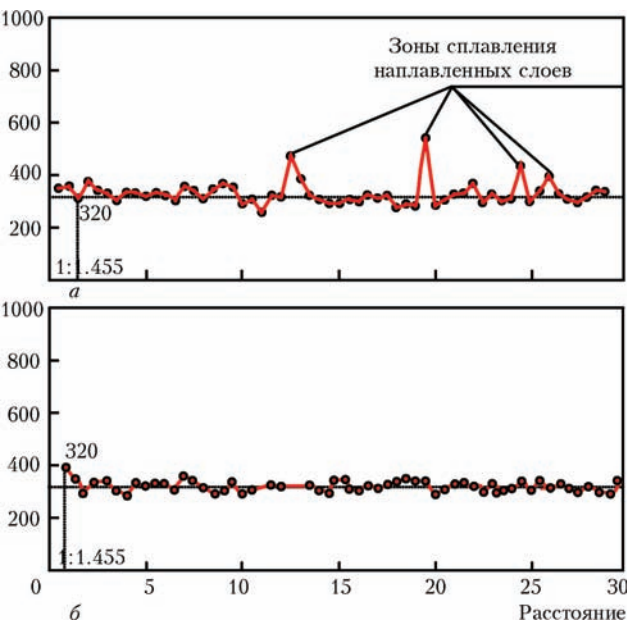


Рис. 8. Распределение микротвердости поперек наплавленных слоев пластины после: *а* — после плазменной наплавки; *б* — отжига

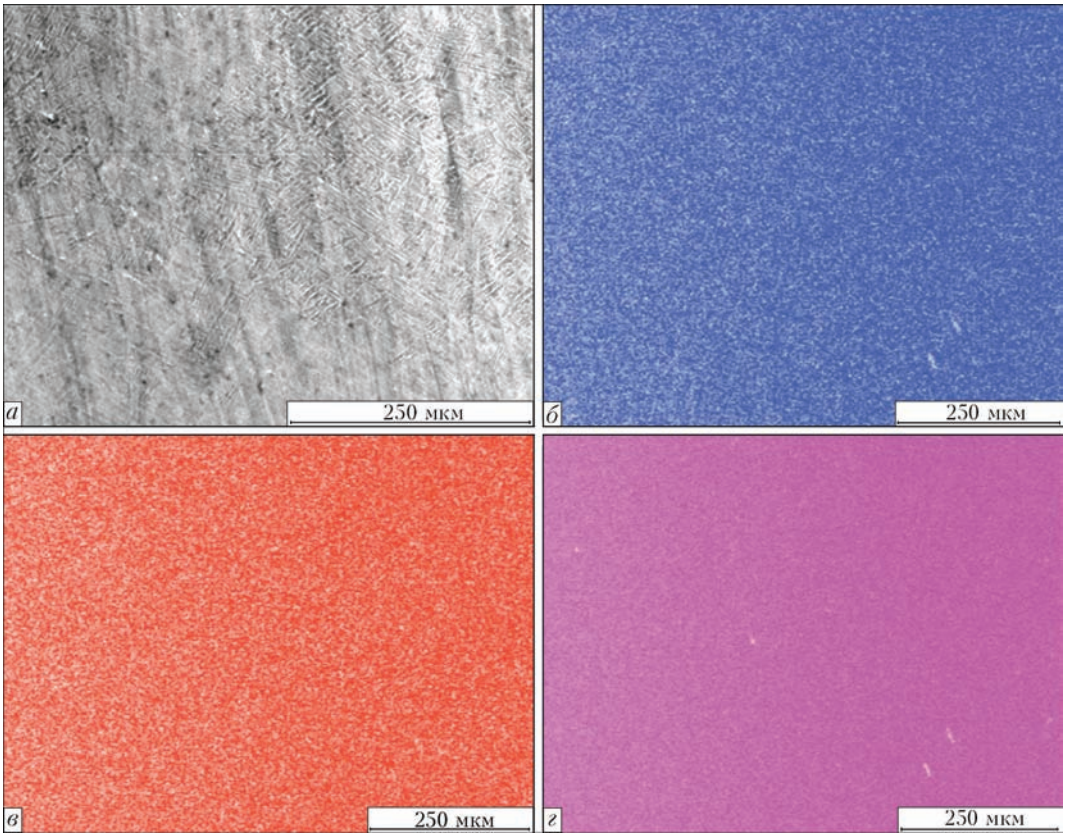


Рис. 9. Результаты РСМА в режиме карты распределения элементов по площади

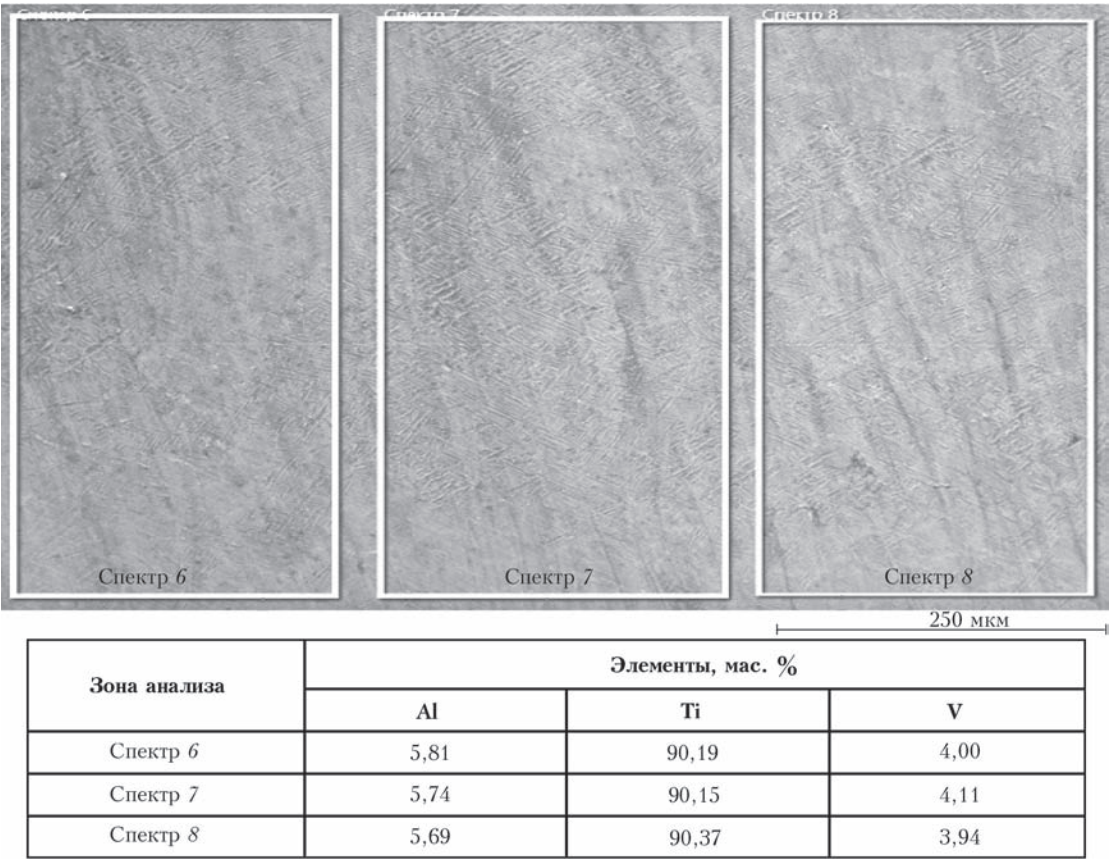


Рис. 10. Результаты РСМА фрагмента образца

Последующий микроанализ показал, что микроструктура образца в исходном состоянии (до отжига) по месту соединения наплавленных слоев и в прилегающей зоне имеет игольчатое строение (рис. 6, а, б), в остальной части структурные составляющие имеют вид пересекающихся пластин (рис. 6, а, в). После отжига при $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ микроструктура в месте соединения наплавленных слоев из игольчатой превратилась в тонкопластинчатую, в остальных зонах микроструктурных изменений не обнаружено (рис. 7).

Пластинчатая микроструктура является стандартной и допускается для ряда деформируемых полуфабрикатов, предназначенных для деталей статорного назначения авиационной техники (фланцы, проставки, кронштейны и др.), что позволяет рассматривать способ плазменной наплавки с использованием титановой проволоки как перспективную технологию получения заготовок в форме пластин.

Измерения микротвердости на образцах до и после термообработки проводили с шагом 0,5 мм поперек наплавленных слоев. В результате установлено, что значения микротвердости на всей длине находятся в пределах 298...347 HV, что является характерным для сплава ВТ6. При этом на образце до термообработки в зонах сплавления слоев наблюдалось повышение твердости от 420 до 548 HV (рис. 8, а), что обусловлено формированием в этой зоне закалочной структуры α' -фазы. После отжига при $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, как отмечалось ранее, в микроструктуре в зоне сплавления слоев произошел распад α' -фазы на пластинчатые ($\alpha + \beta$)-фазы, что подтверждается результатами замеров микротвердости (скачков твердости не наблюдали (рис. 8, б).

Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) подтвердил, что металл наплавленных слоев пластины однородный по структуре и свойствам и это можно объяснить равномерным распределением химических элементов как в зоне места соединения слоев, так и в остальном металле (рис. 9, 10).

Как видно из данных качественного и количественного РСМА содержание легирующих элементов в металле исследуемой пластины практически идентичное и равномерное между слоями, что также обусловило отсутствие анизотропии свойств и стабильный их уровень.

Выводы

1. Произведена сравнительная оценка структуры и механических свойств пластины размерами 360×250×8 мм, полученной на установке для плазменной наплавки портального типа фирмы SBI в

среде аргона с применением проволоки Ti–6Al–4V диаметром 1,6 мм с классическими способами изготовления (литье, штамповка).

2. Установлено, что химический состав материала пластины по содержанию легирующих элементов аналогичен отечественному сплаву ВТ6, при этом азот и кислород не превышает нормы стандарта для титановых сплавов авиационного назначения (ОСТ 1 90013–81). Распределение элементов в металле образца равномерное.

3. Механические свойства вдоль и поперек наплавленной пластины примерно на одном уровне, анизотропия свойств не наблюдается, при этом свойства образцов до и после отжига при $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответствуют нормам для деформируемых полуфабрикатов (плит толщиной 11...60 мм по ОСТ 190024–94).

4. Дефекты металлургического происхождения (поры, пустоты, раковины, включения, неслитины) не обнаружены. Структура металла пластины имеет признаки послойного структурирования. До отжига микроструктура образца в зоне сплавления слоев имела игольчатое строение α - и β -фаз. При этом в этой зоне по сравнению с остальными выявлены скачки значений микротвердости от 420 до 548 HV, а в остальных — 298...345 HV, что косвенно говорит о наличии метастабильной α' -фазы. В остальной части структурные составляющие имели вид пересекающихся пластин.

После отжига при $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ микроструктура в месте соединения наплавленных слоев из игольчатой превратилась в тонкопластинчатую, в остальных зонах микроструктурных изменений не обнаружено. При этом значения микротвердости находились на одном уровне по сечению образца и не превышали 345 HV.

5. Проведенные исследования доказывают, что способ послойного формирования плазменной наплавкой с присадочной проволокой заготовок статорных деталей из титановых сплавов (двухфазных) является перспективным по прочностным и физическим критериям (на уровне деформируемых полуфабрикатов).

6. Данный способ получения заготовок деталей является экономически более эффективным по сравнению с другими АТ по следующим показателям: высокая производительность (до 10 кг/ч); низкая цена титановой проволоки (50...100 евро за 1 кг) по сравнению с порошком (400...550 евро за 1 кг); 100%-ная эффективность использования присадочного материала (коэффициент использования для порошковых материалов составляет от 30 до 70 %).

Недостаток — необходимость относительно больших припусков под мехобработку по сравнению с другими способами (лазерными и ЭЛС) в связи с получением более шероховатой поверхности и значительных короблений.

Список литературы

1. Туричин Г. А., Земляков Е. В., Климова О. Г. и др. (2015) Прямое лазерное выращивание — перспективная аддитивная технология для авиадвигателестроения. *Сварка и диагностика*, **3**, 54–57.
2. Жуков В. В., Григоренко Г. М., Шаповалов В. А. (2016) Аддитивное производство металлических изделий. *Автоматическая сварка*, **5–6**, 148–153.
3. Ковальчук Д. В., Мельник В. И., Мельник И. В., Тугай Б. А. (2017) Новые возможности аддитивного производства с технологией xBeam 3D Metal Printing. *Там же*, **12**, 26–29.
4. Ахонин С. В., Вржижевский Э. Л., Белоус В. Ю., Петриченко И. К. (2016) 3D электронно-лучевая наплавка титановых деталей. *Там же*, **5–6**, 141–144.

5. Джуган А. Л., Овчинников А. В., Ольшанский В. Е. (2014) Аддитивные технологии и возможности их применения в современных условиях. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, **2**, 96–101.

References

1. Turichin, G.A., Zemlyakov, E.V., Klimova, O.G. et al. (2015) Direct laser growth as a prospective additive technology for aircraft engine building. *Svarka i Diagnostika*, **3**, 54–57 [in Russian].
2. Zhukov, V.V., Grigorenko, G.M., Shapovalov, V.A. (2016) Additive manufacturing of metal products (Review). *The Patent Welding J.*, **5–6**, 148–153.
3. Kovalchuk, D.V., Melnik, V.I., Melnik, I.V., Tugaj, B.A. (2017) New possibilities of additive manufacturing using 3D Metal Printing Technology (Review). *Ibid.*, **12**, 26–29.
4. Akhonin, S.V., Vrzhezhevsky, E.L., Belous, V.Yu. et al. (2016) Electron beam 3D-deposition of titanium parts. *Ibid.*, **5–6**, 141–144.
5. Dzhugan, A.L., Ovchinnikov, A.V., Olshansky, B.E. (2014) Additive technologies and possibilities of their application in modern conditions. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metallurgii ta Mashynobuduvanni*, **2**, 96–101 [in Russian].

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПОШАРОВОГО ФОРМУВАННЯ СПОСОБОМ ПЛАЗМОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ВУЗЛІВ ВЕРТОЛЬОТІВ І ГТД

І. А. Петрик, С. Л. Чігілейчик, Т. А. Мітіна, Ю. А. Марченко, М. О. Гнатенко

АТ «МОТОР СІЧ». 69068, м. Запоріжжя, просп. Моторобудівників, 15. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

В роботі висвітлено перспективний спосіб виготовлення широкої номенклатури великогабаритних корпусних титанових деталей і вузлів ГТД із застосуванням технології плазмового наплавлення з присадним матеріалом (дротом). Проведено оцінку структури і механічних властивостей заготовок деталей з титанових сплавів, що отримані вирощуванням із застосуванням плазмового наплавлення, в порівнянні з традиційними способами їх виготовлення, такими як штампування і лиття. Показана економічна ефективність даної технології в порівнянні з лазерно-порошковим способом вирощування заготовок деталей. Бібліогр. 5, табл. 2, іл. 13.

Ключові слова: плазмова наплавка; дріт; вирощування; титанові сплави; механічні властивості

EVALUATION OF FEASIBILITY OF APPLYING THE TECHNOLOGY OF LAYER-BY-LAYER FORMING BY METHOD OF PLASMA SURFACING OF TITANIUM ALLOY PARTS OF COMPONENTS OF HELICOPTERS AND GAS TURBINE ENGINES

I.A. Petrik, S.L. Chigilejchik, T.A. Mitina, Yu.A. Marchenko, M.O. Gnatenko

JSC «MOTOR SICH».

15 Motorostroiteley Ave., 69068, Zaporozhye. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

The work presents a challenging method of manufacture of a wide assortment of large-sized casing titanium parts and components of GTE by using the technology of plasma surfacing with a filler material (wire). Evaluation of structure and mechanical properties of semi-products of titanium alloy parts, produced by growing using the plasma surfacing, was evaluated in comparison with such classic methods of their manufacture as stamping and casting. The economic efficiency of the given technology is shown in comparison with a laser-powder method of growing the semi-products of parts. 5 Ref., 2 Tabl., 13 Fig.

Key words: plasma surfacing; wire; growing; titanium alloys; mechanical properties

Поступила 25.06.2018

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СПЛАВА Ti–6Al–4V, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ПОРОШКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ*

О. М. Ивасишин¹, П. Е. Марковский¹, Д. Г. Саввакин¹,
В. И. Бондарчук¹, А. А. Стасюк¹, С. В. Приходько²

¹Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины.

03142, г. Киев, бульв. Академика Вернадского, 36. E-mail: ivas@imp.kiev.ua

²Инженерно-материаловедческий факультет, Университет Калифорнии.

90095, Лос-Анджелес, США. E-mail: prikhodko.sergey@gmail.com

Получены 2–3-слойные структуры, состоящие из сплава Ti–6Al–4V и композитов на его основе с 5...10 % частиц TiB или TiC, методом холодного прессования и вакуумного спекания многокомпонентных порошковых смесей на основе наводороженного порошка титана. Изучены закономерности эволюции микроструктуры, пористости и усадки при спекании слоев порошковых смесей разного состава. Установлено, что добавление упрочняющих частиц карбида титана и борида титана в порошковые смеси влияет на их усадку, что создает риск разрушения многослойных структур из-за разницы в усадке прилегающих слоев разного состава. Оптимизацией параметров порошковой технологии получены слоистые материалы с заданной микроструктурой, обеспечивающей желаемое сочетание механических и эксплуатационных характеристик. Библиогр. 4, табл. 2, ил. 6.

Ключевые слова: многослойные структуры; порошковая смесь; композит; спекание; микроструктура

Материалы на основе титана благодаря сочетанию высокой удельной прочности, пластических характеристик и коррозионной стойкости находят широкое применение в авиации, машиностроении, химической промышленности, медицине, оборонной сфере [1, 2]. В то же время в ряде экстремальных условий эксплуатации (например, высокопрочные детали, работающие при повышенном износе, защитные бронепокрытия) однородные сплавы или металломатричные композиты на основе титана не обеспечивают требуемой комбинации высоких показателей прочности, твердости и износостойкости при достаточных характеристиках пластичности и трещиностойкости. Требуемого комплекса высоких характеристик в одном изделии можно достичь путем создания многослойных материалов, индивидуальные слои в которых отличаются по химическому составу и/или микроструктуре, и, соответственно, по своим механическим свойствам. Так, например, комбинация слоев металломатричных композитов, упрочненных твердыми высокомодульными частицами TiB или TiC, и слоя относительно пластичного сплава является перспективной для получения требуемого сочетания прочности, твердости и вязких характеристик. Требуемого уровня изно-

стойкости изделий в машиностроении и бронестойкости защитных титановых плит в оборонной промышленности можно достичь упрочняя поверхность сплава слоем (или несколькими слоями) металломатричных композитов. Учитывая, что технологии порошковой металлургии позволяют создавать слоистые структуры экономически эффективным путем, целью данного исследования было получение 2–3-слойных материалов, состоящих из сплава Ti–6Al–4V и композитов на его основе с 5...10 % частиц TiB или TiC, методом прессования или спекания многокомпонентных порошковых смесей.

Экспериментальная часть. В работе получены образцы, состоящие из слоев сплава Ti–6Al–4V (мас. %) и композитов на его основе с добавками 5...10 % (по объему) упрочняющих частиц TiB или TiC. Каждый слой получали из смесей на основе наводороженного порошка титана (гидрида титана TiH₂) с добавками порошковой лигатуры 60 % Al–40 % V. Для создания слоев композитов дополнительно добавляли порошки TiC или TiB₂, который формирует частицы TiB при высоких температурах вследствие реакции TiB₂ + Ti → 2TiB. Размеры порошковых частиц основы

*По материалам доклада, представленного на Международной конференции «Титан-2018. Производство и применение в Украине», 11–13 июня 2018, г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

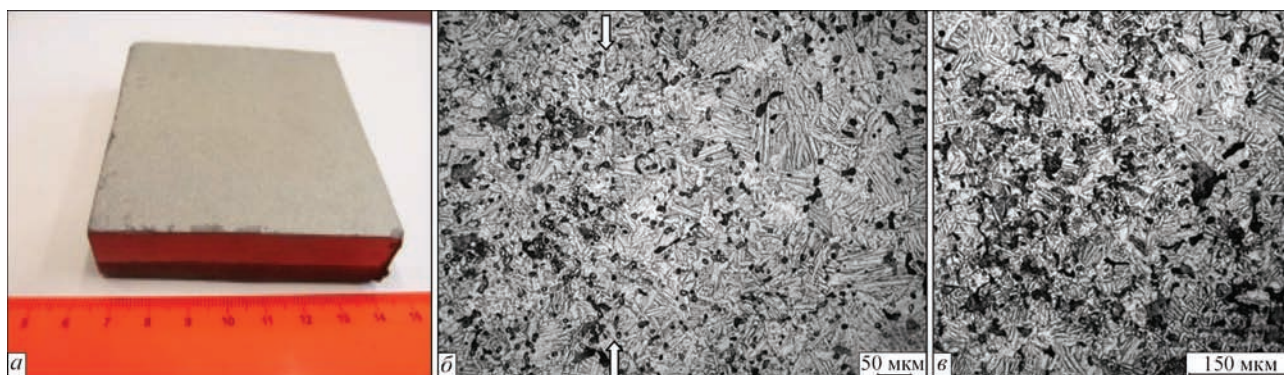


Рис. 1. Внешний вид спеченной двухслойной плиты (а) из сплава Ti–6Al–4V (верхний слой) и композита Ti–6Al–4V–10 % TiC (нижний слой); микроструктура границы раздела (показана стрелками) между слоями (б) и слоя композита Ti–6Al–4V–10 % TiC (в)

в различных экспериментах составляли от менее 40 до 100...150 мкм, размеры частиц лигатуры 60 % Al–40 % V — менее 63 мкм, а карбида титана и диборида титана — менее 30 мкм. Порошок гидрида титана использовали как основу смесей, учитывая его преимущество [3, 4] с точки зрения активации спекания порошков, очищения их от примесей водородом, и, в итоге, достижения лучшего комплекса механических свойств конечных материалов. В отдельных экспериментах вместо гидрида титана использовали титановый порошок тех же размеров для сравнения и изучения влияния водорода. Смесей, соответствующие каждому слою, готовили отдельно, после чего их послойно засыпали в пресс-форму и единоразово прессовали при комнатной температуре при давлениях 150...650 МПа, получая 2–3-слойные образцы. Спрессованные призматические заготовки размерами 65×10×10 мм и плиты 90×90 и толщиной 12...20 мм спекали в вакуумной печи при 1250 °C в течение 4 ч для одновременного удаления водорода и формирования массивного микроструктурно однородного материала в каждом слое при достаточной адгезии между ними.

Микроструктуру спеченных слоистых материалов исследовали методами оптической и сканирующей электронной микроскопии. Механические свойства оценивали как для материала каждого индивидуального слоя (твердость по Виккерсу, свойства на растяжение на цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 4 мм, выточенных из соответствующего слоя), так и для двух-слойных образцов методом трехточечного изгиба.

Результаты и обсуждение. Для достижения максимально высокого комплекса механических характеристик необходимо получение при спекании химически и микроструктурно однородного материала (сплав или композит) в каждом слое, включая однородное распределение упрочняю-

щих частиц в композитных слоях, при минимальной остаточной пористости, а также обеспечение достаточной прочности связей между слоями без трещин и повышенной пористости на границе раздела. Учитывая специфику подхода, а именно, использование наводороженного порошка титана, важным условием является практически полное удаление водорода в процессе вакуумного спекания (до концентрации менее 0,01 мас. %), чтобы избежать проявления водородной хрупкости. Удовлетворение этим критериям необходимо для достижения высокого комплекса характеристик многослойного материала в целом.

При создании 2- и 3-слойных материалов, включающих слои металломатричных композитов с 5 и 10 % TiC, спеченные образцы отвечали всем вышеприведенным критериям (рис. 1). Достаточно однородная микроструктура при наличии 3,5...4,0 % остаточных пор была получена в каждом слое без трещин и избыточной пористости на поверхности раздела слоев сплава Ti–6Al–4V и композитов Ti–6Al–4V–(5...10 %)TiC. Линейная усадка при спекании каждого слоя была в пределах 15,1...15,7 %. Такая значительная величина усадки образцов объясняется уменьшением объема каждой частички гидрида титана в процессе удаления водорода и собственно спеканием порошковых смесей. Важно отметить, что добавление в смеси 5...10 % частиц карбида титана, которые практически инертны по отношению к матрице сплава Ti–6Al–4V при спекании, крайне незначительно влияет на усадку порошковых прессовок и конечную пористость соответствующих слоев. Таким образом, были успешно получены образцы со слоистой структурой, упрочненные частицами TiC, при хорошей интеграции слоев сплава и композитов (рис. 1).

При спекании слоистых образцов, которые содержали композиты, упрочненные частицами борид титана, ситуация была принципиально иной.



Рис. 2. Внешний вид спеченных двухслойных образцов: 1 — Ti-6Al-4V; 2 — Ti-6Al-4V-10TiB

Данные образцы деформировались при спекании с появлением трещин между слоями различного состава (рис. 2). Дилатометрические исследования при нагреве монослойных порошковых прессовок различного состава показали, что если величина усадки гидроксида титана и смесей на его основе, соответствующих сплаву Ti-6Al-4V и композиту Ti-6Al-4V-10 % TiC достаточно близки, то смеси, содержащие бориды, характеризуются значительно меньшей усадкой (рис. 3). При температурах выше 900 °C, когда десорбция водорода уже завершилась, развивается реакция $TiB_2 + Ti \rightarrow 2TiB$, что сопровождается значительным увеличением пористости (рис. 4), и, как следствие, в этом температурном интервале вместо усадки наблюдается увеличение линейных размеров (и объема) смесей, состав которых соответствует композитам Ti-6Al-4V- x % TiB (рис. 3). Более того, эффект «распухания» возрастает с увеличением содержа-

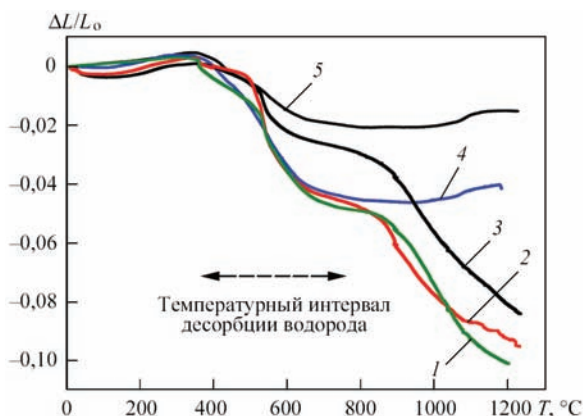


Рис. 3. Изменение линейных размеров при нагреве порошковых прессовок различного состава на основе гидроксида титана: 1 — Ti-6Al-4V; 2 — TiH_2 ; 3 — Ti-6Al-4V-10 % TiC; 4 — Ti-6Al-4V-10 % TiB; 5 — Ti-6Al-4V-20 % TiB (композит с 20 % TiB является модельным материалом, использованным для изучения влияния содержания боридов на усадку)

ния боридных частиц. При нагреве многослойных структур существенные различия в величинах линейной усадки прилегающих слоев (15...17 % для сплава и 8...11 % для композитов с частицами TiB) приводят к возникновению напряжений при спекании, нарушающих связь между слоями.

Из полученных результатов сделан вывод о необходимости контролированно регулировать усадку при спекании прилегающих слоев сплава и композита с частицами борида титана для обеспечения близких величин их усадки. Известно, что влиять на усадку при спекании порошковых прессовок можно, используя в качестве основы смесей вместо гидроксида титана титановый порошок, спекание которого характеризуется существенно меньшими объемными эффектами, а также изменяя давление прессования смесей (рис. 5, а) и размеры порошковых частиц (рис. 5, б). На рис. 5, а на примере двухслойных образцов (сплав/композит с 10 % TiB) показано влияние давления прессования порошков и наличия в них водорода на изменение величины усадки прилегающих слоев. Из данных результатов следует, что, в принципе, комбинируя эти два параметра, можно достичь достаточно близкой величины усадки слоев сплава и композита с 10 % TiB, однако при достаточно высоких давлениях прессования, что не всегда достижимо при изготовлении образцов больших размеров. Поэтому с нашей точки зрения наиболее перспективным методом воздействия на величину усадки отдельных слоев (рис. 5, б) является использование в каждом слое разных строго определенных размеров порошка основы (гидрида титана или титанового). Так, чтобы уравнивать усадку прилегающих слоев разного состава рекомендо-

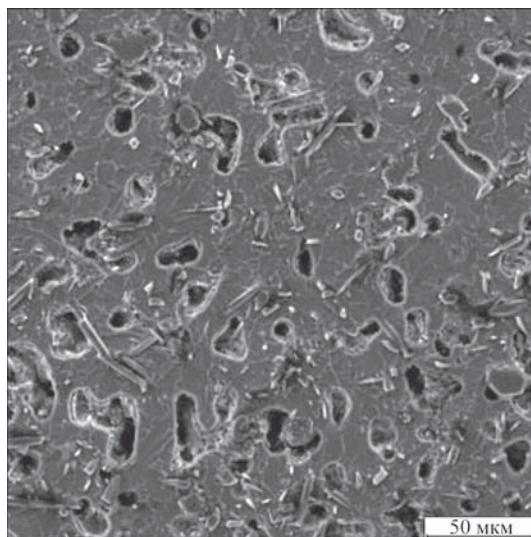


Рис. 4. Микроструктура спеченного композита Ti-6Al-4V-10 % TiB

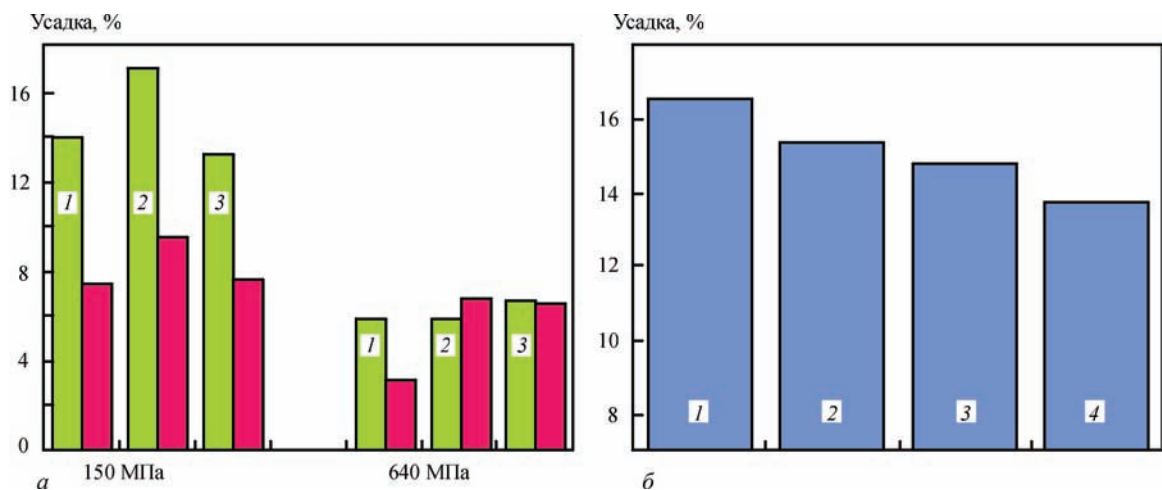


Рис. 5. Величина усадки двухслойных образцов (светлый — слой сплава, темный — композита с 10 % TiB) на основе порошка титана (1), гидрида титана (2), титана для изготовления сплава и гидрида для слоя композита (3) при разных давлениях прессования (а) и монослоев на основе гидрида титана различной дисперсности (б): 1 — < 40; 2 — < 100; 3 — 80...100; 4 — 100...125 мкм

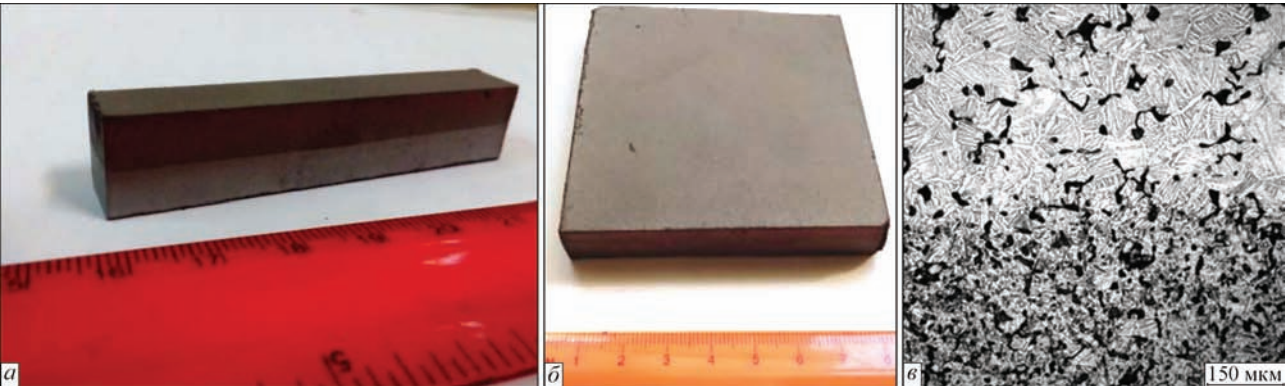


Рис. 6. Двухслойные образцы Ti–6Al–4V/Ti–6Al–4V–10 % TiB после оптимизации технологических параметров (а, б) и оптимизированная микроструктура переходного слоя (в)

вано использовать дисперсный порошок основы для увеличения усадки смесей с боридами. В то же время, относительно крупный порошок основы используется для снижения величины усадки слоя, соответствующего сплаву Ti–6Al–4V.

Оптимизацией указанных технологических параметров получены двухслойные материалы Ti–6Al–4V/Ti–6Al–4V + (5...10 %)TiB с близкой усадкой прилегающих слоев, что обеспечило отсутствие искажения формы и растрескивания между слоями при спекании (рис. 6).

По оптимальным технологическим параметрам для каждого слоя в зависимости от его состава получены монослойные образцы для предварительной оценки механических свойств (табл. 1). В данной таблице показаны свойства материала Ti–6Al–4V (образец 1), полученного по данной гидридной технологии [4]. В настоящей работе при подборе оптимальных параметров изготовления слоистых структур использовали достаточно крупные порошки гидрида титана и низкое (150 МПа) давление при прессовании порошковых смесей,

Т а б л и ц а 1. Механические свойства спеченных монослойных материалов					
Номер образца	Материал	Пористость, %	Твердость, HV	σ_b , МПа	ε , %
1	Ti–6Al–4V (результаты [4])	1,5...1,0	320...340	940...1000	10...14
2	Ti–6Al–4V	3,6	299	969	8,3
3	Ti–6Al–4V	1,8	345	1034	7,2
4	Ti–6Al–4V–5TiC	3,8	333	708	<1
5	Ti–6Al–4V–10TiC	3,6	373	618	0
6	Ti–6Al–4V–5TiB	4,5	327	847	0
7	Ti–6Al–4V–10TiB	8	324	512	0

Таблица 2. Результаты испытаний на трехточечный изгиб двухслойных образцов

Номер образца	Слой композита	$\sigma_{изг}$, МПа	ε , %
1	Ti-6Al-4V-5TiC	2140	18,5
2	Ti-6Al-4V-10TiC	2158	14,0
3	Ti-6Al-4V-5TiB	1710	10,3
4	Ti-6Al-4V-10TiB	1660	9,0

вследствие чего полученный сплав Ti-6Al-4V (образцы 2, 3) характеризовался повышенной остаточной пористостью (1,8...3,6 %). Такое повышение пористости привело к некоторому снижению механических свойств сплава Ti-6Al-4V при испытаниях на растяжение. Добавки частиц TiC или TiB при изготовлении композитов (образцы 4–7) должны повышать твердость и прочность, однако этот позитивный эффект, как правило, подавляется повышенной пористостью, имеющей особенно негативное влияние на композиты с боридными частицами.

В то же время комбинация двух слоев (сплав Ti-6Al-4V и композиты на его основе) позволяет достичь обнадеживающих результатов при испытаниях на трехточечный изгиб (табл. 2), что особенно заметно для композитов с частицами TiC. Твердый слой композита и пластичный слой сплава совместно создают достаточный баланс прочностных и пластических характеристик.

По разработанной технологии успешно изготовлены двух- и трехслойные плиты (рис. 1, а, б, в) для баллистических испытаний. Проведенные испытания показали, что спеченные плиты со слоистой структурой способны выдерживать баллистический удар, при этом их защитные характе-

ристики лучше, чем у однородных плит такой же толщины, изготовленных из литого или горячедеформированного сплава Ti-6Al-4V.

Выводы

1. Материалы, имеющие слоистую структуру, на основе сплава Ti-6Al-4V и композитов с частицами TiB и TiC успешно получены методом холодного прессования и вакуумного спекания порошковых смесей.

2. Установлены оптимальные технологические параметры (размер частиц, условия прессования смесей и их спекания), которые позволяют получить однородную микроструктуру и желаемые механические свойства в пределах каждого слоя при требуемой адгезии между слоями разного химического состава.

3. Проведены баллистические испытания, которые подтвердили преимущество полученных слоистых структур по сравнению с однородным литым/горячедеформированным сплавом Ti-6Al-4V.

Работа выполнена в рамках гранта НАТО G5030 (2016–2018) программы «НАТО за мир и безопасность».

Список литературы/ References

1. Lutjering, G., Williams, J.C. (2007) *Titanium*. Berlin Heidelberg: Springer, Second edition.
2. Montgomery, J.S., Wells, M.G.H. (2007) Titanium armor applications in combat vehicles. *JOM*, 53(4), 29–32.
3. Ivasichin, O.M., Shpak, A.P., Savvakina, D.G. (2006) Economy technology of production of titanium parts by powder metallurgy method. *Titan*, 1, 31–39 [in Russian].
4. Ivasichin, O.M., Savvakina, D.G., Moxson, V.S. (2007) Production of titanium components from hydrogenated titanium powder: Optimization of parameters. Ti-2007 Science and Technology. In: Proc. of 11th World Conf. on Titanium (Kyoto, Japan). *Japan Institute of Metals*, 1, 757–760.

МІКРОСТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ СПЛАВУ Ti-6Al-4V, ОТРИМАНИХ ЗА ПОРОШКОВОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ

О. М. Івасишин¹, П. Є. Марковський¹, Д. Г. Саввакін¹, В. І. Бондарчук¹, О. О. Стасюк¹, С. В. Приходько²

¹Інститут металознавства ім. Г. В. Курдюмова НАН України.

03142, м. Київ, бульв. Академіка Вернадського, 36. E-mail: ivas@imp.kiev.ua

²Інженерно-матеріалознавчий факультет, Університет Каліфорнії.

90095, Лос-Анджелес, США. E-mail: prihodko.sergey@gmail.com

Отримані 2–3 шарові структури, що складаються з сплаву Ti-6Al-4V і композитів на його основі з 5...10 % частинок TiB або TiC, методом холодного пресування та вакуумного спікання багатокомпонентних порошкових сумішей на основі наводненого порошку титану. Досліджено закономірності еволюції микроструктури, пористості та усадки при спіканні шарів порошкових сумішей, які відповідають сплаву та композитам. Встановлено, що додавання частинок карбіду титану та бориду титану до порошкових сумішей впливає на їх усадку, що створює ризик руйнування багатошарових структур внаслідок різниці в усадці прилягаючих шарів різного складу. Оптимізацію параметрів порошкової технології отримано шарові матеріали із заданою микроструктурою, що забезпечує бажаний комплекс механічних та експлуатаційних характеристик. Бібліогр. 4, табл. 2, іл. 6.

Ключові слова: багатошарові структури; порошкова суміш; композит; спікання; микроструктура

MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF MULTILAYER MATERIALS ON Ti-6Al-4V ALLOY BASE, PRODUCED BY POWDER TECHNOLOGY

O.M. Ivasishin¹, P.E. Markovsky¹, D.G. Savvak¹, V.I. Bondarchuk¹, A.A. Stasyuk¹, S.V. Prikhodko²

¹G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the NAS of Ukraine.

36 Academician Vernadsky Blvd., 03142, Kyiv. E-mail: ivas@imp.kiev.ua

²Engineering-Materials Science Faculty, Californian University

90095, Los-Angeles, USA. E-mail: prikhodko.sergey@gmail.com

The 2–3-layer structures, consisting of Ti-6Al-4V alloy and composites on its base with 5...10 % particles of TiB or TiC, were produced by the method of cold pressing and vacuum sintering of multi-component powder mixtures on the base of hydrogenized titanium powder. Laws of evolution of microstructure, porosity and shrinkage in sintering of layers of powder mixtures of different composition were studied. It was found that adding of hardening particles of titanium carbide and titanium boride into powder mixtures has an effect on their shrinkage, that causes the risk of fracture of multilayer structures due to difference in shrinkage of adjacent layers of different composition. By optimizing the parameters of powder technology, the laminar materials were produced with a preset microstructure, providing the desired complex of mechanical and service characteristics. 4 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Key words: multilayer structures; powder mixture; composite; sintering; microstructure

Поступила 12.07.2018

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Государственное хозрасчетное предприятие «Международный центр электронно-лучевых технологий Института электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины» (МЦ ЭЛТ) существует с 1994 г. и ведет систематические научные исследования и разработки новых материалов и защитных покрытий, получаемых с использованием электронно-лучевых технологий. Разработаны научные основы получения аморфных, нанокристаллических, дисперсноупрочненных, микрослойных, пористых и градиентных материалов и покрытий.

Технологии для нанесения градиентных защитных покрытий обеспечивают более высокую степень повторяемости состава, структуры и долговечности по сравнению с покрытиями, получаемыми по традиционной технологии.



В центре разработана технология многослойного демпфирующего и эрозионностойкого градиентного наноструктурного покрытия для защиты лопаток из титановых сплавов.

В настоящее время 16 сконструированных и изготовленных в МЦ ЭЛТ электронно-лучевых установок успешно эксплуатируются в США, Канаде, Китае и Индии. За последние годы вместе с электронно-лучевыми установками продано четыре лицензии на право промышленного использования патентов для осаждения градиентных термобарьерных покрытий с техническим сопровождением и обучением.

В МЦ ЭЛТ ведутся разработки гибридных электронно-лучевых технологий, объединяющих физические и химические процессы осаждения неорганических веществ в вакууме, которые являются реальной основой для дальнейшего научно-технического и экономического прогресса для получения защитных покрытий в различных областях современного машиностроения.

В последнее время в МЦ ЭЛТ получило развитие новое направление — электронно-лучевая технология простых и композиционных нанопорошков и наножидкостей (коллоидов), а также наноструктурных композиций растительных экстрактов с наночастицами металлов для медицины и сельского хозяйства.

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ САМСОНОВСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ ТУГОПЛАВКИХ СОЕДИНЕНИЙ»

22–24 мая 2018 г. в Киеве состоялась VI Международная самсоновская конференция «Материаловедение тугоплавких соединений» (МТС-2018), посвященная 100-летию со дня рождения выдающегося ученого Григория Валентиновича Самсонова. Организаторами конференции выступили: Национальная академия наук Украины, Министерство образования и науки Украины, Институт проблем материаловедения им. И. М. Францевича НАН Украины, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Украинское материаловедческое общество.

Международные конференции по тематике, связанной с материаловедением тугоплавких соединений, ИПМ им. И. Н. Францевича НАНУ проводит совместно с НТУУ «КПИ» регулярно раз в два года. Первая конференция, проведенная в 2008 г., была посвящена 90-летию со дня рождения Григория Валентиновича Самсонова. С его именем связана эпоха становления современного материаловедения тугоплавких соединений и разработки новейших композиционных материалов, которые предназначены для работы в экстремальных условиях.

На конференции были представлены новые достижения и рассмотрены перспективы разработки тугоплавких материалов по следующим направлениям: электронное строение и свойства тугоплавких соединений; синтез и спекание композиционных материалов на основе тугоплавких соединений и их свойства; покрытия и пленки на основе тугоплавких соединений; наноструктурные тугоплавкие соединения.

Открыли конференцию известные во всем мире ученые: академик НАН Украины Ю. М. Солонин (ИПМ им. И. М. Францевича НАНУ), член-корреспондент НАН Украины П. И. Лобода (НТУУ «КПИ имени Игоря Сикорского»), член-корреспондент НАН Украины А. В. Рагуля (ИПМ им. И. М. Францевича НАНУ).

В работе конференции, проходившей в виде сессий пленарных и стендовых докладов, было представлено порядка 200 работ.

Пленарные доклады ведущих ученых в области материаловедения представляли: академик НАН Грузии Г. Ф. Тавадзе, академик Сербской АНИ Драган Ускокович, академик НАН Украины С. А. Фирстов, члены-корреспонденты НАН Укра-

ины: Ю. В. Мильман, О. Н. Григорьев, Т. А. Прихна, профессора: М. С. Ковальченко, А. Н. Степанчук, Л. М. Куликов.

Нужно отметить активное участие в работе конференции ученых ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

Доклад «Влияние структуры на свойства покрытий, полученных многокамерным детонационным напылением» (Маркашова Л. И., Григоренко Г. М., Бердникова Е. Н., Тюрин Ю. Н., Колисниченко О. В., Титков Е. П., Половецкий Е. В.) посвящен структурным особенностям композиционных покрытий, а также оценке их влияния на механические свойства и трещиностойкость.

Доклад «Структура и свойства профилированных монокристаллов вольфрама, полученных методом плазменно-индукционного выращивания» (Григоренко Г. М., Маркашова Л. И., Бердникова Е. Н., Шаповалов В. А., Половецкий Е. В., Якуша В. В., Никитенко Ю. А., Гнздыло А. Н.) посвящен актуальному вопросу повышения производительности процесса плазменно-индукционного выращивания крупных профилированных монокристаллов тугоплавких металлов с сохранением свойств монокристалличности получаемых слитков, технология и оборудование для которых разработаны в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

Перспективными явились доклады, представленные группой отдела защитных покрытий ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, по исследованию формирования газотермических покрытий на основе сплавов системы железо–алюминий с предварительным переводом порошка в наноструктурное и аморфное состояния на этапе механохимического синтеза («Структура и свойства газотермических покрытий на основе интерметаллидов системы Fe–Al» авторов Ю. С. Борисова, А. Л. Борисовой, А. Н. Бурлаченко), а также исследованию процессов алитирования и хромоалитирования сталей 08X17T и Ст.45 для выяснения возможной замены легированной стали на углеродистую в диффузионных жаростойких покрытиях («Диффузионные жаростойкие покрытия для сталей 08X17T и Ст.45» авторов А. Л. Борисовой, Т. В. Цимбалистой, Н. И. Капорик, М. А. Васильковской).

Сборник тезисов докладов VI Международной самсоновской конференции размещен на сайте <http://www.materials.kiev.ua>.

Е. Н. Бердникова, М. А. Васильковская

РОЗВИТОК СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЕЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ГАЛУЗЕЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Розвиток стратегічних галузей, зокрема транспорту, енергетичного машинобудування, атомної енергетики та ін., невідривно пов'язаний з підвищенням вимог до якості спеціальних сталей за критеріями фізико-механічних властивостей, надійності та довговічності експлуатації.

Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» займає одну з лідируючих позицій на світовому ринку легованих сталей, експортуючи металопродукцію до 80-ти країн світу. Накопичений за більш ніж 85-річний досвід виробництва сталей з гарантовано високими показниками якості металу постійно доповнюється розробками новітніх технологій та удосконаленням діючих технологічних схем електросталеплавильного виробництва. Проривним етапом у створенні та впровадженні інноваційної металургійної технології є спосіб електрошлакового переплаву (ЕШП), реалізований на заводі «Дніпроспецсталь» вперше у світовій практиці силами вчених Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона на чолі з Б. Є. Патоном та інженерами заводу «Дніпроспецсталь». Відзначаючи 60-річчя з дня пуску в експлуатацію комплексу електрошлакового переплаву, металурги справедливо оцінюють вирішальну роль і значення способу ЕШП в розвитку особливої галузі металургії — спеціальної електрометалургії. Виняткова однорідність структури металу ЕШП визначила високий рівень фізичних і механічних характеристик і властивостей металопродукції для оборонної галузі, хімічного машинобудування, енергомашинобудування та ін. Показники якості електрошлакового металу нині є своєрідним еталоном для діючих технологій виробництва легованих сталей відповідального призначення.

У роботі, що представлена Національною металургійною академією України на здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки 2018 року на тему «Створення та впровадження інноваційних технологій електросталеплавильного виробництва легованих сталей спеціального призначення», узагальнено досвід ведучих спеціалістів ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» ім. А. М. Кузьміна», науковців Інституту чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Національної металургійної академії України та результати створення і розвитку багатадійних технологій

металургійного виробництва марок електросталі підшипникового і корозійностійкого сортаменту з метою забезпечення гарантованих показників якості металу функціонального призначення і підвищення конкурентної спроможності металопродукції на вітчизняному і зарубіжному ринках.

Авторами на основі теоретичних досліджень і виконаних в промислових умовах експериментів визначено цільовий комплекс керування якістю сталей в багатадійних технологічних схемах виробництва підшипникового і корозійностійкого металу.

В рамках розвитку теорії металургійних процесів створено наукові основи і теоретичні положення формування неметалевих включень з урахуванням вмісту і співвідношення елементів-розкислювачів, розроблена на базі сучасних положень металофізики, експериментально досліджена і обґрунтована класифікація дефектів мікроструктури міжфазових меж сталевих матриць—неметалевого включення впродовж деформаційного переділу та термообробки металу.

Реалізована концепція диверсифікації феросплавів при виробництві підшипникових сталей з урахуванням впливу умов кристалізації металу на формування неметалевих включень і дефектів макроструктури металу, створено і впроваджено новий тип виливниць із безприбутковими надставками, реалізована технологія футеровки сталерозливних ковшів тискотропними бетонними масами.

Сформована на основі інформаційно-математичного моделювання інтегрована система керування якістю металопродукції всієї технологічної схеми виробництва легованих сталей спеціального призначення забезпечила відповідність вимогам вітчизняних і світових стандартів ASTM, DIN, JSK. Підсумковий економічний ефект за усіма напрямками роботи складає 254 млн. 235 тис. грн.

Зважаючи на значимість наукових здобутків, узагальнених у роботі, незаперечну практичну спрямованість результатів впровадження наскрізних технологій у виробництво сталей спеціального призначення, робота «Створення та впровадження інноваційних технологій електросталеплавильного виробництва легованих сталей спеціального призначення» гідна здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки 2018 року.

*Академік НАН України
М. І. Гасик*

НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ

И. В. ШЕЙКО — 75



Седьмого августа 2018 г. исполнилось 75 лет ведущему научному сотруднику отдела «Плазменно-шлаковой металлургии» ИЭС им. Е. О. Патона доктору технических наук И. В. Шейко.

Иван Васильевич родился в г. Старобельск Луганской области в семье потомственного кузнеца.

И следствием с детства впитанной любви к металлу стало его поступление в ведущий технический вуз Украины — Киевский политехнический институт на механико-технологический факультет по специальности «Литейное производство черных и цветных металлов». После получения в 1967 г. диплома инженера-металлурга желание заниматься научной деятельностью предопределило его дальнейшую судьбу. Трудовая биография И. В. Шейко началась с работы в Институте проблем литья (ныне ФТИМС). В 1969 г. он поступил в аспирантуру ИЭС им. Е. О. Патона, где и поныне вот уже более 45 лет плодотворно работает. В 1975 г. он защитил кандидатскую диссертацию, а в 2003 г. — докторскую.

Работая в новом тогда направлении, связанном с плазменно-дуговой плавкой, и одновременно развивая использование высокочастотного нагрева в металлургии, И. В. Шейко были созданы научные и технологические основы процесса переплава расходуемого плазмотрона и индукционной плавки в секционном кристаллизаторе. Под его руководством и при непосредственном участии разработаны ряд технологических процессов и плавильных агрегатов с индукционным нагревом, а также плазменно-дуговых нагревателей для интенсификации плавки в индукционных открытых

и вакуумных печах, которые внедрены на предприятиях металлургического и машиностроительного комплексов (ПО «Киевтрактордеталь», «Днепроспецсталь», «Электросталь», Свердловский завод по переработке цветных металлов, Ленинбадский комбинат редких металлов и др.). Характерной особенностью всей научной деятельности Ивана Васильевича является сочетание высокого научного уровня проводимых исследовательских работ с их практическим воплощением.

В настоящее время Иван Васильевич является ведущим научным сотрудником, членом специализированного ученого совета по защите диссертаций. На его счету около 250 научных публикаций в печатных изданиях, свыше 70 авторских свидетельств и 15 патентов на изобретения. И. В. Шейко соавтор учебника для металлургических вузов и четырех монографий. Среди них ставшая в 2016 г. победителем конкурса на лучшее книжное издание НАН Украины «Плазменно-индукционное выращивание профилированных монокристаллов тугоплавких металлов», а также «Плазменные технологии и оборудование в металлургии и литейном производстве», переизданная в Англии и Китае. И. В. Шейко является лауреатом премии им. Е. О. Патона НАН Украины за цикл работ, посвященных использованию плазменных процессов и оборудования в металлургической промышленности.

Отличительной чертой Ивана Васильевича является высокая трудоспособность и жизнелюбие. Он пользуется заслуженным авторитетом у коллег и сотрудников института.

Дорогой Иван Васильевич! Искренне поздравляем Вас со славным юбилеем! Желаем новых творческих свершений, крепкого здоровья, счастья и процветания!

Подписку на журнал «Современная электрометаллургия» можно оформить непосредственно через редакцию (в т. ч. на электронную версию) или по каталогам подписных агентств «Пресса», «ПресЦентр», «АС-Media», «Информнаука», «Меркурий».

Подписано к печати 26.09.2018. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 7,9. Усл. кр.-отт. 8,2. Уч.-изд. л. 9,3
Печать ООО «ДИА», 03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.