

Министерство науки и высшего  
образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»



**XVI-я Международная  
научно-техническая конференция**

**«БЫСТРОЗАКАЛЕННЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ»**

**15 – 16 октября 2019 года**

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

Москва  
2019

УДК 621.791/.793(082)  
ББК 34.64я4+34.65я4  
Б95

**Редакционная коллегия:**

Руководитель: проф., д.т.н. Лозован А.А.

доц., к.т.н., Александрова С.С.,  
проф., д.ф.-м.н. Банишев А.Ф.,  
проф., д.т.н. Барабанова О.А.,  
проф., д.ф.-м.н. Беграмбеков Л.Б.,  
проф., д.т.н. Бецофен С.Я.,  
проф., д.ф.-м.н. Борисов А.М.,  
проф., д.т.н. Васильев В.А.,  
проф., д.т.н. Казаков В.А.,

проф., д.т.н. Конкевич В.Ю.,  
проф., д.т.н. Крит Б.Л.,  
проф., д.ф.-м.н. Кудинов В.В.,  
проф., д.ф.-м.н. Лигачев А.Е.,  
проф., д.т.н. Пашков И.Н.,  
проф., д.т.н. Серов М.М.,  
проф., д.т.н. Эпельфельд А.В.

**Б95 Быстрозакаленные материалы и покрытия // Материалы XVI-й**  
**Международной научно-технической конференции. 15–16 октября 2019 г.**  
**МАИ : Матер. конф. – Москва : Пробел-2000, 2019. – 428 с. : ил.**  
**ISBN 978-5-98604-740-9**

В сборнике опубликованы материалы докладов ведущих отечественных и зарубежных специалистов в следующих областях: быстрозакаленные материалы, модифицирование поверхности лазерными, электронно-лучевыми и ионно-плазменными методами, нанесение покрытий, композиционные материалы и неразъемные соединения, представленных на XVI-й Международной научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия», проходившей 15-16 октября 2019 г. в МАИ (г. Москва, ул. Оршанская, 3).

УДК 621.791/.793(082)  
ББК 34.64я4+34.65я4

## Содержание

### СЕКЦИЯ 1. ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И БЫСТРОЗАКАЛЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

|                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ $Al_2O_3$ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА «ЗОНАЛЬНОГО» УПЛОТНЕНИЯ ПРИ СПЕКАНИИ ПОРОШКОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ - ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ПОРОШКА ПАП-2 | 11 |
| <i>Иванов Д.А., Шляпин С.Д., Аккужин Н.Д.</i>                                                                                                                                                                          |    |
| СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА В-1469, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ                                                                                                                          | 16 |
| <i>Бецофен С.Я., Гордеева М.И.</i>                                                                                                                                                                                     |    |
| СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СПЛАВОВ ТИТАНА, АЛЮМИНИЯ И МАГНИЯ С РЗЭ                                                                                                                                                        | 21 |
| <i>Бецофен С.Я., Скворцова С.В., Грушин И.А.</i>                                                                                                                                                                       |    |
| ВЛИЯНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ НА СВОЙСТВА СОВРЕМЕННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ                                                                                                                                              | 26 |
| <i>Грушин И.А., Князев М.И.</i>                                                                                                                                                                                        |    |
| ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЕ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА Sn-8,8 МАС. % Zn                                                                                                                                                  | 30 |
| <i>Шепелевич В.Г., Зерница Д.А.</i>                                                                                                                                                                                    |    |
| СТРУКТУРА, МИКРОТВЁРДОСТЬ И СТАБИЛЬНОСТЬ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ОЛОВО-АЛЮМИНИЙ                                                                                                                       | 36 |
| <i>Гусакова О.В., Зерница Д.А., Петрушенко В.О., Шепелевич В.Г.</i>                                                                                                                                                    |    |
| МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА                                                                                            | 41 |
| <i>Грушин И.А., Герман М.А., Кузьмина Д.А.</i>                                                                                                                                                                         |    |
| МИКРОСТРУКТУРА И СТАРЕНИЕ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШЕЙ ФОЛЬГИ СПЛАВА Sn – Zn – Ga                                                                                                                                                | 47 |
| <i>Гусакова О.В., Шепелевич В.Г.</i>                                                                                                                                                                                   |    |
| ВЛИЯНИЕ НИКЕЛЯ И ХРОМА НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ СИЛУМИНОВ                                                                                                                                       | 51 |
| <i>Гусакова О.В., Шепелевич В.Г.</i>                                                                                                                                                                                   |    |
| ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЕЧЕННОГО СПЛАВА Al-Cr-Zr                                                                                                                                                            | 56 |
| <i>Агуреев Л.Е., Савушкина С.В., Лаптев И.Н., Иванов А.В.</i>                                                                                                                                                          |    |

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО  
ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА  
ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОЛУЧАЕМЫХ 60  
НАНОПОРОШКОВ

*Савкин А.В., Слепцов В.В., Кукушкин Д.Ю., Цырков Р.А.*

АЛГОРИТМ СТАТИСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРОЦЕССА  
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЗАТВЕРДЕВАНИЯ РАСПЛАВА 65

*Васильев В.А., Одинокое С.А.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ И ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕКТРОМЕТРИИ ЯДЕРНОГО ОБРАТНОГО  
АНАЛИЗА 69

*Востриков В.Г., Каменских А.И., Ткаченко Н.В.*

РАЗРАБОТКА БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ПАЯНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ 74

ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т

*Попов Н.С., Пенязь М.А., Иванников А.А., Севрюков О.Н.*

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЫСТРОЗАКАЛЕННОГО  
ВОЛОКНА ИЗ ОРТОРОМБИЧЕСКОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ  $Ti_2AlNb$  77

*Пожога О.З., Серов М.М., Ярошенко А.С., Сенкевич К.С.*

## **СЕКЦИЯ 2. МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ**

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТЫХ  
ПЛАЗМОНАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ, ОБЛАДАЮЩИХ  
ПРОГНОЗИРУЕМЫМИ СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИМИ  
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ 81

*Маркелова О.А., Таран В.М.*

КЕРМЕТНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ  $TiCN-Ni-Mo-C$   
СИНТЕЗИРОВАННЫЕ ИЗ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ  
НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ 85

*Калита В.И., Радюк А.А., Комлев Д.И., Михайлова А.Б.,  
Иванников А.Ю., Алпатов А.В., Титов Д.Д.*

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МЕХАНОЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ СЛОЕВ В ПОВЕРХНОСТНОМ  
СЛОЕ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА 91

*Банишев А.Ф., Шубный А.Г., Банишев А.А.*

ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОБРАЗОВАНИЯ  
НИТРИДНЫХ И ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ФАЗ В ПРОЦЕССЕ  
ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ 98

*Маунг Т.Х., Федоров С.В., Козочкин М.П.*

|                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ ИОНОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА<br>КЕРАМИЧЕСКИХ ARC-PVD ПОКРЫТИЙ TiCrMoN-Ni<br>С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ Ni                                                        | 104 |
| <i>Ущеко А.В., Черногор А.В., Блинков И.В., Волхонский А.О.</i>                                                                                                        |     |
| ТРИБОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ<br>МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ КРЕМНИЯ В СМЕСЯХ<br>АЦЕТИЛЕН–АЗОТ                                                           | 108 |
| <i>Хрущов М.М., Марченко Е.А., Антонова О.С., Атаманов М.В.,<br/>Петржик М.И., Суляндзига Д.А.</i>                                                                     |     |
| ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ТОКА НА СТРУКТУРУ, СОСТАВ И СВОЙСТВА<br>ОКСИДНЫХ СЛОЕВ, ФОРМИРУЕМЫХ ПЛАЗМЕННО-<br>ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ ОКСИДИРОВАНИЕМ НА АЛЮМИНИЕВО-<br>КРЕМНИЕВОМ СПЛАВЕ | 114 |
| <i>Полунин А.В., Боргардт Е.Д., Ивашин П.В., Твердохлебов А.Я.,<br/>Криштал М.М.</i>                                                                                   |     |
| МОДИФИЦИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫМ КАРБИДОМ<br>ВОЛЬФРАМА ОКСИДНЫХ СЛОЕВ, ФОРМИРУЕМЫХ ПЛАЗМЕННО-<br>ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ ОКСИДИРОВАНИЕМ НА<br>ДОЭВТЕКТИЧЕСКОМ СИЛУМИНЕ          | 120 |
| <i>Полунин А.В., Боргардт Е.Д., Шафеев М.Р., Криштал М.М.</i>                                                                                                          |     |
| ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА МИКРОДУГОВОЙ<br>ОБРАБОТКИ ТИТАНА НА МОРФОЛОГИЮ, СОСТАВ И<br>ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОКРЫТИЙ                                    | 126 |
| <i>Герасимов М.В., Богдашкина Н.Л., Кондрацкий И.О., Перетягин П.Ю.,<br/>Суминов И.В., Филонова Е.В., Щербаков А.И., Эпельфельд А.В.</i>                               |     |
| ФОРМИРОВАНИЕ ЛАМЕЛЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ И<br>ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ<br>БЕСПОРЯДОК→ПОРЯДОК В СПЛАВЕ $Au_{35,3}Cu_{52,6}Pd_{12,1}$                                   | 131 |
| <i>Александрова С.С., Медведева Е.В.</i>                                                                                                                               |     |
| ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ<br>ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ОКСИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВИСМУТА И<br>ЖЕЛЕЗА                                                         | 137 |
| <i>Храменкова А.В., Арискина Д.Н., Изварин А.И.</i>                                                                                                                    |     |
| ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГНЕТРОНА С СЭНДВИЧ<br>МИШЕНЬЮ                                                                                                           | 142 |
| <i>Козин А.А., Шестаков Д.С., Шаповалов В.И.</i>                                                                                                                       |     |
| ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛИЗАЦИИ НА СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА<br>УГЛЕРОДНОЙ ТКАНИ БУСОФИТ                                                                                               | 147 |
| <i>Борисов А.М., Горина В.А., Дителева А.О., Ковалев И.А.,<br/>Коробейников Е.В., Слепцов В.В., Суминов И.В., Чеблакова Е.Г., Шур П.А.</i>                             |     |

|                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КЕРАМИКОПОДОБНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ МИКРОДУГОВОМ ОКСИДИРОВАНИИ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э110                                                     | 151 |
| <i>Сивцова Г.В., Савушкина С.В., Ашмарин А.А., Суминов И.В., Виноградов А.В., Зилова О.С.</i>                                                               |     |
| ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ «ЛАТУНИ», НАНЕСЁННОГО МЕТОДОМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ                                                                 | 156 |
| <i>Архипов В.Е., Дмитриев В.Г., Москвитин Г.В., Пугачев М.С.</i>                                                                                            |     |
| ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ Ti-Al, СИНТЕЗИРОВАННЫХ СРЕДЕ РЕАКЦИОННЫХ ГАЗОВ                                                                                             | 161 |
| <i>Вардамян Э.Л., Назаров А.Ю., Рамазанов К.Н., Нагимов Р.Ш.</i>                                                                                            |     |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ГЕОМЕТРИЮ ДОРОЖЕК ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ             | 166 |
| <i>Завалов Ю.Н., Дубров А.В., Иванов И.М., Дубров В.Д.</i>                                                                                                  |     |
| ВЛИЯНИЕ АНОДНОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ ПАРЫ NiTi/Ti6Al4V К ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ                                                                           | 171 |
| <i>Лукина Е.А.</i>                                                                                                                                          |     |
| МАГНЕТРОННАЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С РЕАКЦИОННЫМ ПЛАЗМЕННЫМ АССИСТИРОВАНИЕМ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ $Ti_xZr_{1-x}O_2$ ПОКРЫТИЙ, УСТОЙЧИВЫХ К ЛАЗЕРНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ     | 176 |
| <i>Вольян О.Д., Крикунов А.И., Кузьмичёв А.И., Жарикова Е.С., Чуриков Д.В.</i>                                                                              |     |
| НАНЕСЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СВЕРХТВЁРДЫХ ПОКРЫТИЙ ПО ДУПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ                                                                                       | 182 |
| <i>Берлин Е.В., Гончаров И.Ю., Григорьев В.Ю., Колесников Д.А.</i>                                                                                          |     |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИОННО-АССИСТИРОВАННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И MORFOLOGИЮ ПОКРЫТИЙ TiNb                                           | 185 |
| <i>Лозован А.А., Бецофен С.Я., Ляховецкий М.А., Беспалов А.В., Грушин И.А., Павлов Ю.С., Александрова С.С.</i>                                              |     |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬЕФА АНТИАДГЕЗИОННЫХ ПО ОТНОШЕНИЮ К МИКРООРГАНИЗМАМ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ | 192 |
| <i>Елинсон В.М., Кравчук Е.Д., Шур П.А.</i>                                                                                                                 |     |
| ОПТИМИЗАЦИЯ ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ                                                                                                                            | 200 |
| <i>Щитов Н.Н.</i>                                                                                                                                           |     |
| АКТУАЛЬНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗРАБОТКЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ                                                                                                            | 207 |
| <i>Щитов Н.Н.</i>                                                                                                                                           |     |

|                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЯ<br>СМЕЩЕНИЯ НА СТРУКТУРУ, ТЕМПЕРАТУРУ И ОСТАТОЧНЫЕ<br>НАПРЯЖЕНИЯ В ТОНКИХ ПОКРЫТИЯХ, НАНЕСЕННЫХ НА МЕДНУЮ<br>ПОДЛОЖКУ ИНВЕРТИРОВАННЫМ МАГНЕТОНОМ | 214 |
| <i>Ленковец А.С., Лозован А.А., Бецоффен С.Я., Беспалов А.В.,<br/>Грушин И.А., Иванов Н.А.</i>                                                                                            |     |

### **СЕКЦИЯ 3. ЛАЗЕРНЫЕ, ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ И ИОННО- ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ**

|                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА<br>ПОТОКОМ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ ГЕЛИЯ                                                                                          | 220 |
| <i>Андреанова Н.Н., Борисов А.М., Горина В.А., Макунин А.В.,<br/>Машкова Е.С., Овчинников М.А., Слепцов В.В., Умаров Ф.Ф., Чеблакова Е.Г.</i>                          |     |
| СОЗДАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ЛАЗЕРА НА БАЗЕ<br>ЯВЛЕНИЯ ВОЛНОВОДНО-РЕЗОНАНСНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ<br>РАДИАЦИОННЫХ ПОТОКОВ                                          | 226 |
| <i>Егоров В.К., Егоров Е.В.</i>                                                                                                                                        |     |
| УВЕЛИЧЕНИЕ ЕМКОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ<br>ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗОНДА ДЛЯ СБОРА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ<br>ПЫЛИ В ITER                                                                 | 234 |
| <i>Беграмбеков Л.Б., Бидлевич О.А., Войтюк А.Н., Грунин А.В.</i>                                                                                                       |     |
| ТЕРМОДЕСОРБЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА ВОДОРОДА<br>В ВОЛЬФРАМ С БЕРИЛЛИЕВЫМИ/АЛЮМИНИЕВЫМИ СЛОЯМИ И<br>ЕГО ТРАНСПОРТ ЧЕРЕЗ ФАЗОВУЮ ГРАНИЦУ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ<br>ОБЛУЧЕНИИ | 239 |
| <i>Беграмбеков Л.Б., Довганюк С.С., Каплевский А.С., Касимова Н.Н.</i>                                                                                                 |     |
| ЛИНИЯ ОБРАБОТКИ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПО<br>ТЕХНОЛОГИИ CSSL                                                                                                      | 240 |
| <i>Ковальков В.К.</i>                                                                                                                                                  |     |
| АНОДНОЕ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ<br>СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ Fe И Ti                                                                                           | 248 |
| <i>Белкин В.С., Крит Б.Л., Морозова Н.В., Людин В.Б., Перетягин П.Ю.,<br/>Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Бенцева Е.А.</i>                                              |     |
| ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ВИП ОБРАБОТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ<br>НИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ РАЗЛИЧНОЙ<br>КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ                                                       | 255 |
| <i>Смирнова А.Н., Петров Л.М., Ашмарин А.А., Иванчук С.Б., Семенов В.Д.</i>                                                                                            |     |
| 6 КВТ ДИОДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА И<br>ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ                                                               | 260 |
| <i>Автайкин Д.А., Куницкий А.И., Микаелян Г.Т., Миряха А.Н.,<br/>Панарин В.А., Соколов С.Н., Шестак Л.И.</i>                                                           |     |

|                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КОБАЛЬТОВЫХ СТЕЛЛИТОВ<br><i>Фурман Е.Л., Усольцев Е.А., Бахтеев И.С., Фурман И.Е., Шак А.В.</i>                                                                          | 266 |
| КОНТРОЛИРУЕМОЕ ИОННОЕ АЗОТИРОВАНИЕ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ<br><i>Баннх И.О., Бецофен С.Я., Петров Л.М., Лебедев М.А.</i>                                                                                                                            | 271 |
| МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ ПОВЕРХНОСТИ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА<br><i>Рыгина М.Е., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Прудников А.Н.</i>                                                                                          | 275 |
| ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ОБРАБОТАННЫХ СИЛЬНОТОЧНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ<br><i>Теряев Д.А., Мохов В.С.</i>                                          | 279 |
| ВАКУУМНО-ДУГОВАЯ ЗАКАЛКА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ<br><i>Кузнецов В.Г.</i>                                                                                                                                                                          | 284 |
| ИЗМЕНЕНИЕ МОЩНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПУТЕМ МОДИФИКАЦИИ ПРИНИМАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НАНОКЛАСТЕРАМИ СЕРЕБРА<br><i>Крит Б.Л., Федотикова М.В., Слепцов В.В., Кукушкин Д.Ю., Горожеев М.Ю., Кувишинов В.В., Морозов Н.В.</i> | 290 |
| ЭВОЛЮЦИЯ НАНОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА ПРИ ИОННО-ИНДУЦИРОВАННОМ ГОФРИРОВАНИИ<br><i>Андреанова Н.Н., Борисов А.М., Макунин А.В., Машкова Е.С., Овчинников М.А.</i>                                                              | 295 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ФТОРУГЛЕРОДНЫМИ ПЛЕНКАМИ, СФОРМИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ<br><i>Кузькин В.И., Елинсон В.М., Обрезков О.И., Якушкин Ю.Я.</i>                 | 300 |
| ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФТОРУГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ НАНЕСЕНИЯ<br><i>Елинсон В.М., Шведов А.В., Кукушкин Д.Ю.</i>                                                   | 308 |
| ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ГЛУБИНУ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПОДЛОЖКИ В ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛА<br><i>Завалов Ю. Н., Дубров А.В., Макарова Е.С., Дубров В.Д.</i>                                                                  | 315 |

|                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ЗАВИСИМОСТЬ ЭРОЗИИ ГРАФИТА ОТ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА<br>ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОБЛУЧЕНИИ<br>ИОНАМИ ВОДОРОДА                                          | 320 |
| <i>Беграмбеков Л.Б., Грунин А.В., Долганов Г.Д., Пунтаков Н.А.</i>                                                                                        |     |
| НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ИОННОЕ АЗОТИРОВАНИЕ ТИТАНОВОГО<br>СПЛАВА ВТ6 С УМЗ СТРУКТУРОЙ                                                                          | 324 |
| <i>Хусаинов Ю.Г., Аззамов Р.Д., Рамазанов К.Н., Николаев А.А.</i>                                                                                         |     |
| ИОННО-ПУЧКОВАЯ ОБРАБОТКА ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ<br>СПЛАВА В95 ПОСЛЕ ИСКУССТВЕННОГО СТАРЕНИЯ                                                             | 328 |
| <i>Гущина Н.В., Овчинников В.В., Махинько Ф.Ф., Кайгородова Л.И.,<br/>Можаровский С.М.</i>                                                                |     |
| НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ АНОДНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТНО-<br>ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДНОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ                                                                  | 334 |
| <i>Кусманов С.А., Тамбовский И.В., Егоров Н.А., Кусманова И.А.,<br/>Мухина А.К., Белкин П.Н.</i>                                                          |     |
| ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОРЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ<br>НАПРЯЖЕНИЙ, СОЗДАННЫХ В ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ С<br>ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЙ<br>ОБРАБОТКИ | 338 |
| <i>Пугачев М.С., Сахвадзе Г.Ж.</i>                                                                                                                        |     |
| ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЙ<br>ОБРАБОТКИ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ<br>НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ                                     | 343 |
| <i>Сахвадзе Г.Г., Пугачев М.С., Сахвадзе Г.Ж.</i>                                                                                                         |     |

#### **СЕКЦИЯ 4. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НЕРАЗЪЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ**

|                                                                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И<br>ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ КОМПОЗИТА КОРУНД-ГРАФЕН                                                                                    | 349 |
| <i>Жолнин А.Г., Хафизов Р.С.</i>                                                                                                                                                |     |
| ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПАЙКА ВОЛЬФРАМА СО СТАЛЬЮ<br>ЭК-181 ДЛЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ДЕМО                                                                           | 355 |
| <i>Бачурина Д.М., Сучков А.Н., Гурова Ю.А., Севрюков О.Н.</i>                                                                                                                   |     |
| ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НА<br>МИКРОСТРУКТУРУ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ<br>МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ<br>МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ | 360 |
| <i>Смирнов А., Миронов А.Е., Кузнецова Е.В., Пристинский Ю.О.,<br/>Перетягин Н.Ю., Гершман И.С.</i>                                                                             |     |
| ЖИДКОФАЗНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ TiNi                                                                                                                                   | 366 |
| <i>Сенкевич К.С.</i>                                                                                                                                                            |     |

КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД В ОБЛАСТИ ПОЛУЧЕНИЯ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АРМИРОВАННЫХ  
ЧАСТИЦАМИ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОЙ ПРОКАТКЕ 370  
*Галкин В.И., Палтиевиц А.Р., Галкин Е.В.*

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ДИФФУЗИОННОГО СВАРНОГО  
СОЕДИНЕНИЯ КРЕМНИЙ-МЕДЬ: КРИТЕРИИ ВЫБОР ПРОСЛОЯ 376  
*Барабанова О.А., Сапожников С.З., Салмин П.А., Набатчиков С.В.*

### **СЕКЦИЯ 5. РАБОТЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ СРЕДЫ НА  
ЖАРОПРОЧНЫЕ ВОЛОКНА НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ,  
ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ГТД 384  
*Патрушев А.Ю.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИОННОГО  
АЗОТИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТАЛЕЙ  
АУСТЕНИТНОГО И МАРТЕНСИТНОГО КЛАССОВ С 387  
УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ  
*Есипов Р.С., Хусаинов Ю.Г.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ ФАСОННЫХ  
ИЗДЕЛИЙ СЛС МЕТОДОМ ИЗ ПОРОШКА АСП35 392  
*Босалыго К.А.*

СВОЙСТВА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Ti-Al,  
ОСАЖДЕННЫХ НА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТУЮ МАРТЕНСИТНУЮ 395  
СТАЛЬ  
*Нагимов Р.Ш., Назаров А.Ю.*

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ  
ЗАКАЗАННЫХ ИЗ РАСПЛАВА ВОЛОКОН СИСТЕМЫ Ti<sub>2</sub>AlNb 401  
*Ярошенко А.С.*

О ПОДХОДЕ К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ  
МОНОКРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ НА КАЧЕСТВО ДИФФУЗИОННОГО  
СОЕДИНЕНИЯ С АЛЮМИНИЕМ 405  
*Салмин П.А.*

НАНЕСЕНИЕ ДЕКОРАТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ ВАКУУМНЫМ НАПЫЛЕНИЕМ 408  
*Изотов А.Н.*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ 413  
*Гуркина Е.Д., Смирнова Е.А.*

ДЕФОРМИРУЕМЫЕ СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ 416  
*Петухова О.С., Малов О.А.*

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА ИМПУЛЬСНЫМ  
ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ 419  
*Овчарова П.А., Жуков Е.Ю.*

Авторский указатель 425

## **СЕКЦИЯ 1. ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ** **И БЫСТРОЗАКАЛЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

### **ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ $Al_2O_3$ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА «ЗОНАЛЬНОГО» УПЛОТНЕНИЯ ПРИ СПЕКАНИИ ПОРОШКОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ – ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ПОРОШКА ПАП-2**

**Иванов Д.А., Шляпин С.Д., Аккужин Н.Д.**

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт  
(Национальный исследовательский университет)»

125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4

Телефон: 8 (917) 573-39-97

E-mail: dali\_888@mail.ru

Разработка новых экономичных технологических подходов, позволяющих получать пористые керамические материалы, является весьма актуальной. Это связано с их большой востребованностью в технике, чаще всего в качестве высокотемпературной теплоизоляции (или теплозащиты), термостойкого огнеприпаса, фильтров для жидких и газовых сред, носителей катализаторов, мембран [1 - 3].

В рамках данной работы предлагается к рассмотрению технологический подход, позволяющий формировать пористую структуру в алюмооксидной керамике за счет реализации эффекта «зонального уплотнения» при спекании порошковых заготовок из высокодисперсных продуктов сгорания на воздухе алюминиевого порошка ПАП-2, которые представлены частицами наноразмерного диапазона.

Для этого порошок ПАП-2 (ГОСТ 5494-95) после выжига стеарина с поверхности его частиц по специальному режиму, загружали в огнеупорную емкость и нагревали на воздухе до температуры 550 °С, инициируя зажигание его поверхности и последующее горение всего объема данного порошка. Время горения загрузки порошка массой 50 г составило 10-15 секунд, максимальная яркостная температура горения составляла ~ 2000 °С.

После окончания горения формировался спек – продукт быстрого сгорания ПАП-2. Его измельчали в планетарной мельнице, используя емкости-барабаны и сферические помольные тела из корунда. Из измельченного спека прессовали опытные образцы под давлением 200 МПа и спекали их на воздухе при температуре 1700 °С в течение 2 часов.

Фазовый состав спека отличается содержанием весьма малого количества (% масс) высокотемпературной модификации  $\alpha$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2%) и образованием  $\text{AlN}$  (41%) и  $\text{AlON}$  (28%) в качестве доминирующих фаз – продуктов горения. Также фиксируется сохранение значительной доли неокисленного алюминия (29%).

Преимущественное образование нитридной и оксинитридной фаз происходит, по-видимому, при взаимодействии чешуйчатых частиц алюминия с адсорбированными и удерживающимися на их поверхности молекулами азота – из газовой среды ( $\text{N}_2 + 2\text{-}8\%$  об  $\text{O}_2$ ), в которой производился длительный помол алюминиевого сырья для производства данного порошка.

Сохранение неокисленного алюминия обусловлено защитным действием плотных оксидных пленок на поверхности частиц ПАП-2, удерживающих металлический расплав при нагреве выше температуры плавления алюминия.

Методом РЭМ установлено, что структура спека крайне неоднородна. Наблюдается образование сростков из полиэдрических частиц с поперечными размерами 60 – 70 нм, формирование которых объясняется процессом каплеобразования из пылевидной фракции ПАП-2 при резком перегреве выше температуры плавления алюминия с последующей реакцией капель расплава с газовой фазой и их кристаллизацией.

В структуре спека зафиксированы также изометричные и столбчатые морфологические объекты, состоящие из пластинчатых частиц, наследующих форму плоских чешуек ПАП-2.

В объеме спека также формируются нитевидные кристаллы и тонкие волокна. Согласно данным EDX их элементный состав представлен алюминием и азотом. Это позволяет сделать вывод, что эти структурные элементы

состоят из нитрида алюминия, возникающие по механизму «испарения – конденсации», описанному в работах [4, 5].

В результате измельчения спека был получен порошок, состоящий из пористых агломератов. Их размеры укладываются преимущественно в интервал 5 – 100 мкм. Они формируются из наноразмерных частиц, которые являются продуктом измельчения морфологических объектов, входящих в состав спека. Между такими наноразмерными частицами действуют дисперсионные силы, что определяет достаточно высокую прочность образующихся агломератов.

Установлено, что пористая структура материала формируется в результате «зонального уплотнения» при спекании используемой высокодисперсной, наноразмерной порошковой системы (рис. 1).

Агломераты (1), состоящие из наноразмерных частиц (2), можно рассматривать как зоны, внутри которых плотность превышает локальную плотность межагломератных границ (3). Между наноразмерными частицами имеются поры (4) (так называемые внутриагломератные поры), размер которых сопоставим с размером наночастиц (рис. 1 а).

В процессе спекания происходит усадка, сопровождающаяся сжатием агломератов (рис. 1 б). В данном случае агломераты - это зоны, в объеме которых происходит преимущественное уплотнение вследствие усадки (отсюда происхождение термина – «зональное уплотнение»).

Результатом «зонального уплотнения» является локальный отрыв по границам контактирующих соседних агломератов (1) с образованием межагломератных пор (5). При этом происходит диффузионное сращивание наночастиц с образованием зерен (6), что определяется стремлением системы к понижению поверхностной энергии.

В этом случае происходит захват в состав зерен (6) внутриагломератных пор, которые становятся внутризеренными порами (8). Далее, в результате миграции межзеренных границ (7), вследствие собирательной рекристаллизации, происходит перераспределение количества пор, содержащихся внутри зерен.

Отметим, что система межагломератных пор в образце формирует его открытое поровое пространство, а внутризеренные поры являются закрытыми.

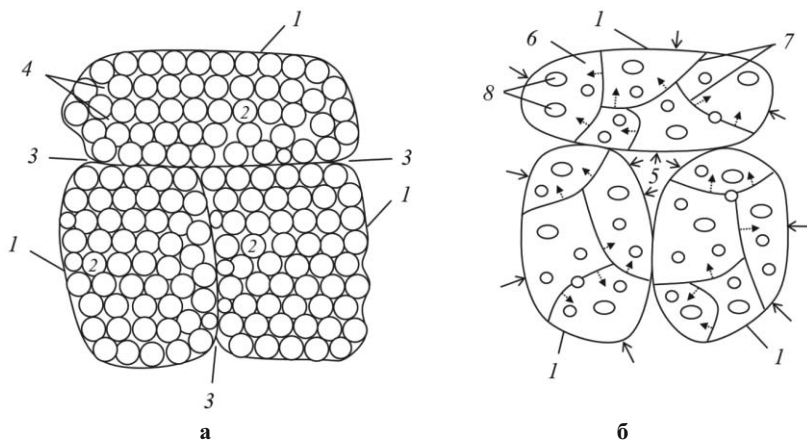


Рисунок 1 - Схематическое изображение процесса «зонального уплотнения» при спекании порошковой заготовки из наноразмерных частиц: а) – структура сырца, б) – структура спеченного материала. 1 – агломераты, 2 – наноразмерные частицы, 3 – межагломератные границы, 4 – внутриагломератные поры, 5 – межагломератная пора, 6 – зерна, 7 – межзеренные границы, 8 – внутризеренные поры (стрелками показаны направление сжатия агломератов - 1 в результате усадки и направление миграции межзеренных границ - 7 вследствие собирательной рекристаллизации)

Установлен фазовый состав спеченной керамики (% об):  $\alpha$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (97),  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$  – гиббсит (2,5), Al (0,5); размер ОКР этих фаз составлял: 100 нм, 24 нм и 42 нм – соответственно ( $\text{AlN}$  и  $\text{AlON}$  разлагаются при температуре спекания). Для нее характерно сочетание высокой пористости и значительной прочности (плотность –  $2,45 \text{ г/см}^3$ , общая пористость – 39%, открытая пористость – 30%, закрытая пористость – 9%, прочность при изгибе – 50-60 МПа).

В результате данного исследования установлено:

С использованием эффекта «зонального уплотнения» при спекании порошковых заготовок из высокодисперсных продуктов сгорания на воз-

духе чешуйчатых частиц алюминиевого порошка ПАП-2 возможно получение керамики на основе оксида алюминия, сочетающей высокую пористость и значительную прочность.

Формирование пористой структуры в спеченном алюмооксидном материале реализуется по механизму локального отрыва по границам агломератов с образованием открытых межагломератных пор, а также вследствие возникновения системы закрытых внутризеренных пор.

*Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания вузам №11.7568.2017/Б4 с использованием оборудования ресурсного центра коллективного пользования «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ*

#### Литература

1. Кац С.М. Высокотемпературные теплоизоляционные материалы. - М.: Металлургия, 1981. - 232 с.
2. Зубашенко Р.В. Термостойкие высокотемпературные теплоизоляционные изделия на основе алюмосиликатного волокна // Новые огнеупоры. – 2016. № 12. - С. 3 – 5.
3. Мокчаро А., Ломбардии М.Б., Шан А.Н. Пористая структура керамического материала, изготовленного с применением порообразующих добавок // Новые огнеупоры. – 2017. № 1. – С. 54 – 57.
4. Иванов Д.А., Ситников А.И., Шляпин С.Д. Дисперсноупрочненные, волокнистые и слоистые неорганические композиционные материалы –М.: МГИУ, 2010. – 230 с.
5. Гиваркизов Е.И. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара – М.: Наука, 1977. – 304 с.

# СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА В-1469, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Бецофен С.Я., Гордеева М.И.

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт  
(Национальный исследовательский университет)»

121552, Россия, г.Москва, Оршанская ул., д.3

Телефон: 8 (499) 141-94-64

*Исследовали распределение твердости, текстуры, фазового состава и остаточных напряжений в различных зонах соединения листов сплава В-1469, полученных сваркой трением с перемешиванием (СТП)*

Важной проблемой изготовления крупногабаритных сварных конструкций из высокопрочных алюминий-литиевых сплавов является их разупрочнение при сварке плавлением, для которой отношение прочности шва к прочности основного материала ниже 60%. Повысить эксплуатационные характеристики сварных соединений возможно за счет применения сварки трением с перемешиванием (СТП), для которой это отношения достигает 75-80% [1].

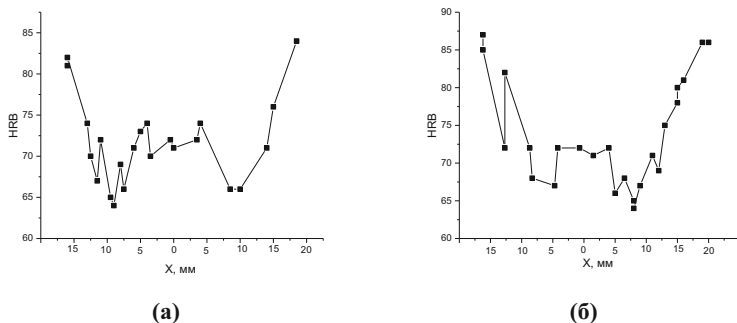


Рисунок 1 - Распределение твердости по сечению сварного соединения на расстоянии  $z=3,5$  (а) и  $z=7,0$  мм (б) от поверхности: X – расстояние от центра шва

На рис.1. приведены результаты измерения твердости в зависимости от расстояния от центра шва для двух сечений, расположенных на 3,5 и 7 мм от поверхности.

Распределение твердости имеет W-образную форму, при этом характер этой зависимости не меняется для разных сечений сварного соединения. Необходимо отметить, что минимальные значения твердости соответствуют переходной зоне между зоной перемешивания и зоной термического влияния.

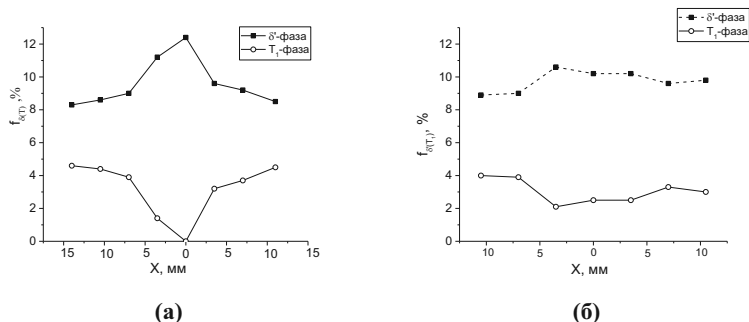


Рисунок 2 - Распределение фазового состава в поперечном сечении сварного соединения на расстоянии  $z=0$  (а) и  $z=6$  мм (б) от поверхности:  $X$  – расстояние от центра шва

Результаты КФА (рис.2) показывают, что СТП сопровождается фазовыми изменениями в результате термического воздействия сварки, которые характеризуются уменьшением количества  $T_1$ -фазы, являющейся основной упрочняющей фазой в сплавах системы Al-Cu-Li. При этом увеличение количества  $\delta'$ -фазы не может компенсировать снижение количества  $T_1$ -фазы и в результате твердость шва снижается (рис.1).

В [3] было показано, что сплав В-1469, содержащий ~8%  $\delta'$ -фазы и ~6%  $T_1$ -фазы имеет предел текучести на ~200 МПа выше, чем сплав 1441 с ~18%  $\delta'$ -фазы и близким к нулю содержанием  $T_1$ -фазы. Это объясняет снижение твердости в сварном соединении по сравнению с основным материалом, но не объясняет, почему минимум твердости расположен в переходной зоне, хотя минимум  $T_1$ -фазы соответствует зоне перемешивания, в которой твердость выше, чем в переходной зоне (рис.1).

Следует отметить, что характер распределения фазового состава меняется с глубиной и эти изменения носят немонотонный характер. Наиболее выраженный градиент фазового состава наблюдается в подповерхностных

слоях, при этом независимо от того с фронтальной или тыльной поверхности. Наименее выраженный градиент наблюдается в центральной зоне.

Измерения остаточных напряжений в поперечном относительно шва направлении в зависимости от расстояния от центра шва для различных сечений свариваемых пластин показали [2], что уровень напряжений не превышает 60 МПа (рис.3), а для некоторых сечений остаточные напряжения не превышают 30 МПа. Это значительно ниже, чем величина остаточных напряжений при сварке плавлением, когда уровень остаточных напряжений вплотную приближается к величине предела текучести.

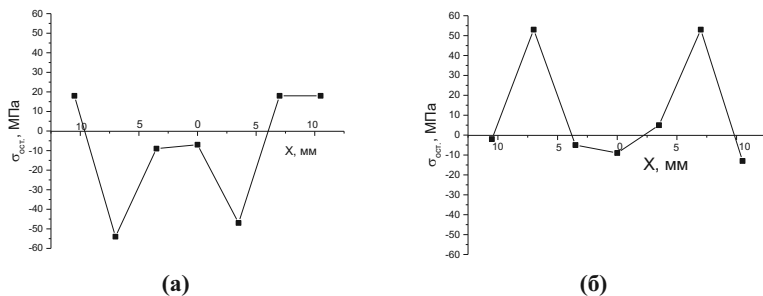


Рисунок 3 - Распределение остаточных напряжений в поперечном сечении сварного соединения на расстоянии  $z=0$  (а) и  $z=3,5$  мм (б) от поверхности:  
X – расстояние от центра шва

Характер распределения напряжений существенно меняется по мере удаления от поверхности сварного соединения. В поверхностном слое (рис.3а) сжимающие напряжения доминируют в ЗП и примыкающей к ней области ЗТВ, при этом пиковые сжимающие напряжения формируются в переходной области между ними. На расстоянии 3,5 мм от поверхности (рис.3б) характер распределения остаточных напряжений резко меняется. Здесь доминируют растягивающие напряжения, которые характеризуются «М»-образной зависимостью, которая считается характерной для распределения остаточных напряжений в СТП соединениях. По существу, распределение на поверхности соединения (рис.3а) можно рассматривать как зеркально симметричную или «перевернутую» «М»-образную зависимость. Между этими сечениями распределение напряжений имеет промежуточный характер.

Существенные изменения в процессе СТП происходят в текстуре материала. Текстура исходных пластин характеризуется текстурой «латуни»  $\{011\} \langle 211 \rangle$ , которая в ЗП в результате интенсивной сдвиговой деформации происходит преобразуется в близкое к бестекстурному состоянию. Здесь важно отметить, что в области между ЗП и ЗТВ, которая испытывает наиболее сильные изменения фазового состава и механических свойств текстура материала не отличается от текстуры основного металла. Это естественно, поскольку фазовые изменения стимулируются термическим воздействием, а текстурные только сдвиговой деформацией в ЗП.

### **Выводы**

1. Исследования соединения из сплава В-1469, полученного сваркой трением с перемешиванием (СТП) позволили найти объяснение эффекту разупрочнения материала сварного шва, который обусловлен уменьшением количества  $T_1$ -фазы от 4-5% до 0-2%, при этом увеличение доли  $\delta'$ -фазы от 8-9% до 11-13% не может компенсировать снижение количества  $T_1$ -фазы, поскольку последняя является значительно более сильным упрочнителем по сравнению  $\delta'$ -фазой.

2. В поверхностном слое СТП соединения сжимающие напряжения доминируют в области перемешивания и примыкающей к ней области ЗТВ, а в подповерхностных слоях доминируют растягивающие напряжения при этом пиковые сжимающие  $-(47-54)$  МПа и растягивающие (53 МПа) напряжения формируются в переходной зоне между областью перемешивания и ЗТВ.

3. Текстурные изменения в СТП соединении происходят только в зоне перемешивания, где текстура «латуни» в результате интенсивной сдвиговой деформации преобразуется в практически бестекстурное состояние.

### **Литература**

1. В.И. Лукин, С.Я. Бецофен, М.Д. Пантелеев, М.И. Долгова Влияние термомодеформированного цикла сварки трением с перемешиванием на формирование структуры сварного соединения сплава В-1469. Сварочное производство.-М, 2017, №7, с.17-22.
2. Бецофен С.Я. Лукин В.И. М.И. Долгова Пантелеев М.Д. Кабанова Ю.В. Фазовый состав, текстура и остаточные напряжения в соединениях из

сплава В-1469, полученных сваркой трением с перемешиванием. Деформация и разрушение материалов-М, 2017, №11, с.32-40.

3. С.Я. Бецофен, В.В. Антипов, М.И. Долгова Н.Ю. Серебренникова, Ю.А. Кабанова Исследование фазового состава, текстуры и анизотропии свойств листов из сплавов системы Al-Cu-Li-Mg Деформация и разрушение материалов-М, 2017, №1, с.24-30.

# СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СПЛАВОВ ТИТАНА, АЛЮМИНИЯ И МАГНИЯ С РЗЭ

**Бецофен С.Я., Скворцова С.В., Грушин И.А.**

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4

Телефон: +7 (499) 158-92-09

E-mail: s.betsofen@gmail.com

Согласно критерию Даркена-Гурри (КДГ) протяженные области твердых растворов на основе определенного металла могут образовывать такие легирующие элементы, которые отличаются от него величинами атомного радиуса менее 15% и электроотрицательности менее 0,2 единиц. ( $\Delta R/R < 15\%$ ,  $\Delta \chi < 0,2$ ). На рис.1. приведены значения атомных радиусов и электроотрицательностей РЗЭ, которые использовали расчетов значений  $\Delta R/R$  и  $\Delta \chi$ . На рис. 1 приведены результаты расчетов КДГ для титана и всех РЗЭ, кроме Eu и Yb с аномально высокими атомными радиусами, которые показывают, что единственным РЗЭ, который соответствует КДГ является скандий ( $\Delta R/R=10,1\%$ ,  $\Delta \chi=0,18$ ), который в соответствии с этим должен иметь значительную растворимость в твердом растворе титана, при этом остальные РЗЭ достаточно сильно выпадают из этих критериев ( $\Delta R/R=17-25\%$ ,  $\Delta \chi=0,27-0,44$ ).

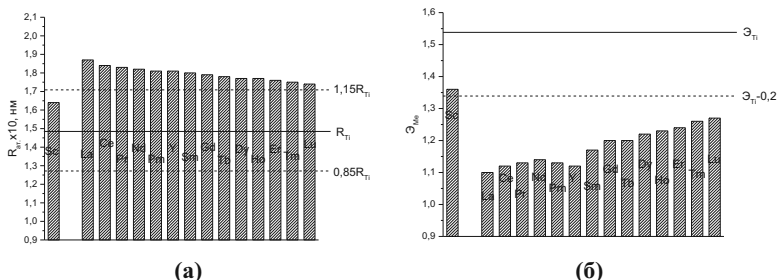


Рисунок 1 - Соотношение атомных радиусов (а)  
и электроотрицательностей (б) Ti и РЗЭ

Таким образом, из всех РЗЭ только скандий может образовывать с ти-

таном протяженную область твердого раствора, для остальных РЗЭ протяженность области твердого раствора ограничена тем больше, чем выше порядковый номер РЗЭ в периодической таблице.

В работах [1, 2] были впервые проведены исследования влияния скандия на формирование структурно-фазового состояния и свойства титановых сплавов Ti-20%Sc, Ti-6Al-XSc (X=2, 4, 6, 8 и 10%), Ti-7Al-10Sc. Показано, что прочностные характеристики сплавов Ti-Sc и Ti-Al-Sc находятся на уровне двухфазных ( $\alpha+\beta$ ) титановых сплавов, сплав Ti-23Sc показал  $\sigma_B \approx 800$  МПа и  $\delta \approx 6\%$ , а сплав Ti-7Al-10Sc  $\sigma_B \approx 1060$  МПа и  $\delta \approx 2\%$ , при этом упрочняющий и одновременно охрупчивающий эффект может быть обусловлен только образованием интерметаллидной  $Al_3Sc$  фазы. Полученные результаты показывают, что легирование скандием титана вплоть до 20% не дает такого упрочняющего эффекта, который бы позволил компенсировать его высокую стоимость, поскольку образование кубической  $Al_3Sc$  фазы в ГП сплавах Ti-Al-Sc не дает такого же структурного эффекта, как в алюминии, где скандий образует когерентную решетке алюминия кубическую фазу с упорядоченной по типу  $L1_2$  решеткой. Вместе с тем показано, что в отличие от скандия микролегирование гадолинием (0,2%), для которого согласно КДГ ( $\Delta R/R=20,1\%$ ,  $\Delta \varepsilon=0,34$ ) растворимость в титане должна быть ограниченной, дает значительное повышение показателей жаростойкости, кратковременной и циклической прочности, а также показателей свариваемости, что вероятно связано с тем, что более значительное геометрическое и химическое несоответствие гадолиния и титана обуславливает формирование эффективных упрочняющих фаз и способствуют формированию более стабильных и плотных оксидов.

Для сплавов алюминия (рис.2) ни один РЗЭ не удовлетворяет КДГ, при этом скандий занимает по существу граничное положение ( $\Delta R/R=15\%$ ,  $\Delta \varepsilon=0,25$ ).

Скандий является наиболее эффективным дисперсионным упрочнителем алюминия, поскольку при повышенных температурах имеет заметную растворимость, которая сводится практически к нулю при комнатной температуре. При этом частицы  $Al_3Sc$  выделяются в супердисперсном виде

(2-5 нм) и практически не коагулируют вплоть до 450<sup>0</sup>С. Остальные РЗЭ выходят далеко за пределы КДГ ( $\Delta R/R=22-30\%$ ,  $\Delta\chi=0,34-0,51$ ) и до сих пор не используются в алюминиевых сплавах.

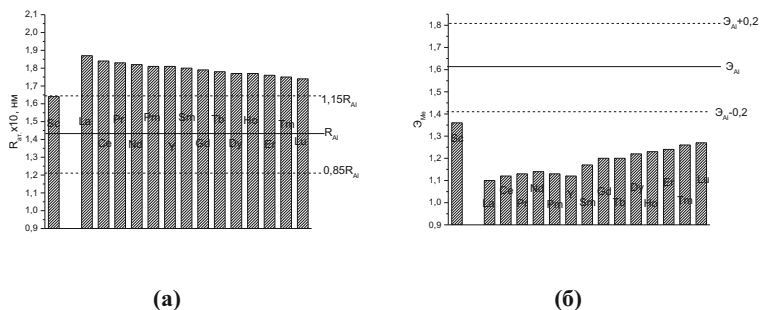


Рисунок 2 - Соотношение атомных радиусов (а) и электроотрицательностей (б) Al и РЗЭ

Для магния ситуация противоположная, все РЗЭ за исключением La ( $z=57$ ) удовлетворяют КДГ (рис.3), но этот критерий в случае магния должен быть слегка скорректирован.

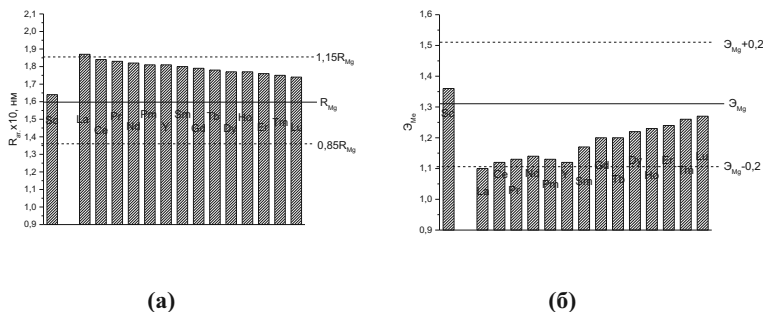


Рисунок 3 - Соотношение атомных радиусов (а) и электроотрицательностей (б) Mg и РЗЭ

Существенную растворимость в твердом состоянии дают только «тяжелые» РЗЭ, для которых в силу лантаноидного сжатия  $\Delta R/R < 13\%$ , это например Gd ( $z=64$ ), для которого  $\Delta R/R=12\%$ ,  $\Delta\chi=0,19$ , для Er ( $z=68$ ), а

$\Delta R/R=10\%$ ,  $\Delta\mathcal{E}=0,07$ . «Легкие» РЗЭ имеют заметную растворимость при повышенных температурах и почти нулевую при комнатной температуре, что делает их эффективными дисперсионными упрочнителями (рис.4). При этом наиболее эффективными являются Ce ( $z=58$ ) и Nd ( $z=60$ ), для которых  $\Delta R/R=14-15\%$ ,  $\Delta\mathcal{E}=0,18$ . Таким образом, оптимальными дисперсионными упрочнителями для Al и Mg являются РЗЭ с  $\Delta R/R=14-15\%$  (скандий для алюминия и церий с неодимом для магния). Для титана скандий является единственным элементом, для которого выполняется КДГ, однако величины  $\Delta R/R=10\%$ ,  $\Delta\mathcal{E}=0,18$  предполагает высокую растворимость в твердом состоянии, при этом упрочняющий эффект невелик и не оправдывает высокой цены скандия. Остальные РЗЭ имеют значения  $\Delta R/R=17-25\%$ ,  $\Delta\mathcal{E}=0,27-0,44$  и не могут рассматриваться как претенденты для дисперсионного упрочнения титана.

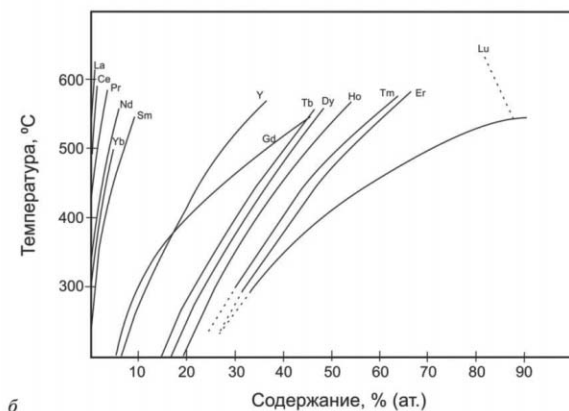


Рисунок 4 - Растворимость РЗЭ в магнии

Приведенный кристаллохимический анализ относится только к традиционному использованию легирующих элементов как твердорастворных и дисперсионных упрочнителей. Опыт использования РЗЭ в материаловедении показывает, что РЗЭ могут существенно видоизменять кристаллическую структуру и термическую стабильность оксидов. Так добавление оксида иттрия стабилизирует тетрагональную модификацию оксида циркония

и предотвращает фазовые превращения в моноклинную фазу при термоциклах, что обеспечивает высокий ресурс соответствующих теплозащитных покрытий.

#### Литература

1. Скворцова С.В., Грушин И.А., Мамонтова Н.А., Сперанский К.А., Слезов С.С. Фазовые и структурные превращения в сплавах системы Ti-6Al-Sc. // Титан. 2016. – №2 (52). С. 12-18.
2. Скворцова С.В., Грушин И.А., Сперанский К.А., Демаков А.А. Мамонтова Н.А. Влияние дополнительного легирования гадолинием на структуру и свойства опытного жаропрочного титанового сплава в литом и деформированном состояниях // Титан. 2017. – №1 (55). С. 4-9.