



ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Тезисы международной конференции
и школы молодых ученых

г. Белгород, 14–16 октября 2020 г.



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(НИУ «БелГУ»)

ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Тезисы международной конференции и школы молодых ученых

г. Белгород, 14-16 октября 2020 г.



ЭПИЦЕНТР

Белгород 2020

УДК 669
ББК 34.2
П 53

Составители:

Салищев Г.А. – д.т.н., профессор, заведующий лабораторией НИУ «БелГУ»;
Тихонова М.С. – к.ф.м.н., старший научный сотрудник лаборатории НИУ «БелГУ»;
Поволяева Е.А. – лаборант-исследователь лаборатории НИУ «БелГУ»

П 53 **Получение, структура и свойства высокоэнтропийных материалов:** Тезисы международной конференции и школы молодых ученых (г. Белгород, 14-16 октября 2020 г.) / под ред. Г.А. Салищева, М.С. Тихоновой, Е.А. Поволяевой. – Белгород : ООО «Эпицентр», 2020. – 108 с.

ISBN 978-5-6045220-0-4

Сборник содержит тезисы международной конференции и школы молодых ученых «Получение, структура и свойства высокоэнтропийных материалов». В нем представлены доклады ведущих ученых, молодых ученых, аспирантов, студентов, представителей промышленности и освещены актуальные направления в области разработки высокоэнтропийных сплавов и покрытий, новых материалов, современных методов их изучения и технологий изготовления перспективных изделий. Школа молодых ученых проводится в рамках реализации соглашения РНФ №19-79-30066.

УДК 669
ББК 34.2

ISBN 978-5-6045220-0-4

© НИУ «БелГУ», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ОРГАНИЗАТОРЫ	10
ТЕМАТИКА	11
ТЕЗИСЫ	12
ВЕДУЩИЕ УЧЕНЫЕ	12
<i>Астафурова Е. Г., Реунова К.А., Астафуров С.В., Мельников Е.В., Панченко М.Ю., Майер Г.Г., Москвина В.А.</i> ВЛИЯНИЕ АТОМОВ ВНЕДРЕНИЯ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА FeMnCrNiCo	12
<i>Bobruk E.V., Murashkin M.Yu.</i> MICROSTRUCTURE MECHANICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF AL ALLOYS AFTER ECAP-CONFORM PROCESSING AND DRAWING	13
<i>Dudova N., Mishnev R., Kaibyshev R.</i> EVOLUTION OF STRENGTHENING FACTORS DURING LONG-TERM AGING AT 650 °C IN ADVANCED 10% CR HEAT-RESISTANT STEEL	14
<i>Жеребцов С.В.</i> МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМАЦИИ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ТИТАНА	15
<i>Yetao Lu, Yulia Ivanisenko, Andrey Mazilkin, Torben Boll, Horst Hahn, Margarita Klimova, Nikita Stepanov, Sergei Zherebtzov, Gennadiy Salischchev</i> EFFECT OF CARBON ALLOYING ON THE MICROSTRUCTURE EVOLUTION OF THE Cr5CoFeNiMn ALLOY AT HIGH PRESSURE TORSION AND RESULTING MECHANICAL PROPERTIES	16
<i>Kashaev N.</i> LASER PROCESSING OF METALLIC STRUCTURAL MATERIALS: FATIGUE PROPERTIES AND FATIGUE LIFE EXTENSION APPROACHES	17
<i>Лузгин Д.В.</i> МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ОБЪЕМНЫЕ АМОРФНЫЕ СПЛАВЫ, КАК ОДНИ ИЗ САМЫХ РАЗУПОРЯДОЧЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ	18
<i>Мионов С.Ю.</i> МИКРОСТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ	19
<i>Московских Д.О., Седегов А.С., Буйневич В.С.</i> САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОЙ КЕРАМИКИ	20
<i>Нохрин А.В., Шадрина Я.С., Копылов В.И., Чувильдеев В.Н., Бобров А.А., Пискунов А.В., Берендеев Н.Н.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ПРОВОДНИКОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	21
<i>Панин П.В., Алексеев Е.Б., Лукина Е.А.</i> ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ БЕТА-ЗАТВЕРДЕВАЮЩЕГО TiAl-СПЛАВА С ВАРИАТИВНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ Zr, CR И GD ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ОСАДКЕ	22
<i>Ремпель А.А.</i> АТОМНОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ В СОЕДИНЕНИЯХ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ: РОЛЬ ПОВЫШЕННОЙ ЭНТРОПИИ	23
<i>Салищев Г.А.</i> , ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ СПЛАВЫ: 15 ЛЕТ РАЗВИТИЯ.....	24
<i>Санин В.Н., Икорников Д.М., Юхвид В.И.</i> СВС-МЕТАЛЛУРГИЯ ЛИТЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ ...	25
<i>Степанов Н.Д.</i> ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕДРЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ CoCrFeMnNi.....	26

<u>Трофимов Е.А., Остовари А., Зайцева О.В., Трофимова С.Н., Ульяницкий В.Ю., Дубенская М.А., Сова А.А., Самодурова М.Н.,</u> КАТАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ФАЗ.....	27
МОЛОДЫЕ УЧЕНЫЕ	28
<u>V.V. Krasilnikov, M.S. Al-Bdeiri, S.V. Sergeyev</u> SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN A DIESEL ENGINE EQUIPPED WITH PISTONS WITH A HEAT PROTECTION COATING	29
<u>Андреев П.В., Алексеева Л.С., Балабанов С.С., Попов А.А., Болдин М.С.</u> КИНЕТИКА СПЕКАНИЯ НАНОКОМПОЗИТОВ Si3N4/YAG	30
<u>Балякин И.А., Зайцева К.В., Юрьев А.А., Сидоров Н.И., Ремпель А.А.</u> РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ АККУМУЛИРОВАНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДА	31
<u>Барилюк Д.В., Шереметьев В.А., Прокошкин С.Д., Конопацкий А.С.</u> ПОЛУЧЕНИЕ, ИЗУЧЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО И ФАЗОВОГО СОСТАВОВ СВЕРХУПРУГОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ TI-ZR-NB С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ZR.....	32
<u>Борисов С.И., Долженко П.Д., Тихонова М.С., Беляков А.Н., Кайбышев Р.О.,</u> МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ TWIP СТАЛЕЙ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР.....	33
<u>Борисова Ю. И., Юзбекова Д.Ю., Мозучева А.А.</u> ЭФФЕКТ ПОРТЕВЕНА-ЛЕ ШАТЕЛЬЕ В АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ FE-18%CR-8%NI	34
<u>Бразников И.С., Ткачев Е.С.</u> УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ И ХРУПКО-ВЯЗКИЙ ПЕРЕХОД В 9%CR ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ ЛЕГИРОВАННОЙ ТАНТАЛОМ.....	35
<u>Буйневич В.С., Седегов А.С., Воротыло С., Московских Д.О.</u> ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО НИТРИДА (HfNbTaTiZr)N МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ.....	36
<u>Дакунь В., Мировой Ю.А., Бурлаченко А.Г., Дедова Е.С., Буякова С.П.</u> ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОЙ КЕРАМИКИ (Nb,Ti,Zr,Hf)C	37
<u>Васильев А. Е., Япрынцева М. Н., Иванов О. Н., Жежу М.В.</u> СИНТЕЗ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ BiSbTe1.5Se1.5	38
<u>Соколовский В. С., Панов Д.О., Волокитина Е.И., Салищев Г.А.</u> ВЛИЯНИЕ МЕЖПЛАСТИНЧАТОГО РАССТОЯНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА НА ОСНОВЕ ГАММА АЛЮМИНИДА ТИТАНА ЛЕГИРОВАННОГО БОРОМ И ГАДОЛИНИЕМ	39
<u>Выродова А.В., Победенная З.В., Киреева И.В., Чумляков Ю.И.</u> ДВОЙНИКОВАНИЕ И ЕГО РОЛЬ В УПРОЧНЕНИИ И РАЗРУШЕНИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ СОСРFEMNNI ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА	40
<u>M.R. Gazizov, R. Holmestad, C.D. Marioara, R. Kaibyshev</u> QUANTITATIVE ANALYSIS OF {100}AL PLATE/LATH AND <100>AL ROD PRECIPITATES IN AN AGED AL-CU-MG-SI ALLOY USING TEM.....	41
<u>Газизова М. Ю., Смирнов Н. А., Кудряшов С.И., Чэнь Ц., Ахмадеев Ю.Х., Гончаров И.Ю., Шугуров В.В., Прокопенко Н.А.</u> ОЦЕНКА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ LIPSS СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ	42

<i>Dolzhenko A.S., Belyakov A.N., Kaibyshev R.O.</i> EFFECT OF THERMOMECHANICAL TREATMENT ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF A LOW-ALLOY LOW-CARBON STEEL.....	43
<i>Dolzhenko P.D., Valiev R.Z., Belyakov A.N., Bobruk E.V., Tikhonova M.S.</i> EFFECT OF MULTIPLE FORGING AND ANNEALING ON MECHANICAL PROPERTIES OF A HIGH-MANGANESE STEEL.....	44
<i>Дрожилкин П.Д., Андреев П.В., Алексеева Л.С., Балабанов С.С., Болдин М.С., Каразанов К.О.</i> КОМПАКТИРОВАНИЕ Si₃N₄ С ДОБАВКАМИ Y₂O₃ И Al₂O₃ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ ИЗ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ.....	45
<i>Дьяченко И.И., Глезер А.М., Абаимов С.Г., Батт Х.А.</i> СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ВЭС СИСТЕМЫ CoCuFeNi ЛЕГИРОВАННЫХ МОЛИБДЕНОМ.....	46
<i>Ершов А.Е., Прохоров Д.В., Строганова Т.С., Шмытько И.М.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНФИЛЬТРАЦИИ ЧЕРЕЗ ИНЕРТНЫЙ РАСТВОРИТЕЛЬ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БИОУГЛЕРОДНОГО КАРКАСА ОЛЬХИ С РАСПЛАВОМ Sn-Ti.....	47
<i>Жидков М.В., Чень Ц., Смирнов Н.А., Кудряшов С.И.</i> СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СПЛАВА ВТ6 ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ	48
<i>Живулин В.Е., Трофимов Е.А., Стариков А.Ю., Гудкова С.А., Жеребцов Д.А., Зайцева О.В., Винник Д.А.</i> СОЗДАНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ОКСИДНЫХ ФАЗ СО СТРУКТУРОЙ МАГНЕТОПЛОМБИТА	49
<i>Жидков М.В., Газизова М.Ю., Лизачев А.Е., Ремнев Г.Е.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИОННОГО ПУЧКА.....	50
<i>Зайцева О.В., Гудкова С.А., Трофимов Е.А., Живулин В.Е., Стариков А.Ю., Винник Д.А.</i> ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ОКСИДНЫХ ФАЗ СО СТРУКТУРОЙ ПЕРОВСКИТА.....	51
<i>Zuiko I., Malopheyev S., Mironov S., Kaibyshev R.</i> ON THE EXTRAORDINARY PRECIPITATION IN AN AL-CU-MG ALLOY SUBJECTED TO FRICTION STIR WELDING	52
<i>Икорников Д.М., Санин В.Н., Голосова О.А., Юхвид В.И.</i> СВС-МЕТАЛЛУРГИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ЛИТЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Co-Cr-Fe-Ni-Mn-(X)	53
<i>Калиненко А.А., Высоцкий И.В., Малофеев С.С., Миронов С.Ю., Кайбышев Р.О.</i> ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ В ХОДЕ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРМЕШИВАНИЕМ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 6061-T6.....	54
<i>Калиничева В.А., Шереметьев В.А., Лукашевич К.Е., Прокошкин С.Д., Браиловский В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НОВОГО Ti-18Zr-14Nb (ат.%) СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.....	55
<i>Ким К.А., Калиненко А.А., Высоцкий И.В., Малофеев С.С., Миронов С.Ю., Кайбышев Р.О.</i> ВЛИЯНИЕ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРМЕШИВАНИЕМ НА ЗЕРЕННУЮ СТРУКТУРУ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 6061	56

<u>Клименко Д.Н., Жеребцов С.В., Степанов Н.Д.</u> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AL-CR-NB-TI-V-ZR В РАМКАХ МОДЕЛИ ТВЕРДОРАСТВОРНОГО УПРОЧНЕНИЯ	57
<u>Климова М.В., Семенюк А.О., Шайсултанов Д.Г., Жеребцов С.В., Салищев Г.А., Степанов Н.Д.</u> ФОРМИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ В ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОМ СПЛАВЕ AlCoCrFeMnNi	58
<u>Комаров В.С., Карелин Р., Юсупов В.С., Кавалла Р., Прокошкин С.Д.</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ MAXSTRAIN НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЗАЭВИАТОМНОГО ПО НИКЕЛЮ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ TI-NI.....	59
<u>Клименко Д.Н., Кудряцев Е.А., Жеребцов С.В.</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT6.....	60
<u>Ланцев Е. А., Малехонова Н.В., Нохрин А. В., Андреев П.В., Сметанина К.Е., Востоков М.М</u> СВЕРХНИЗКОКОБАЛЬТОВЫЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ.....	61
<u>Ткачев М.С., Пелипенко А., Луговская А., Морозова А.И., Кайбышев Р.О.</u> МИКРОСТРУКТУРА НИЗКОЛЕГИРОВАННОГО МЕДНОГО СПЛАВА ПОСЛЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОЕ ПРЕССОВАНИЯ ПО СХЕМЕ «КОНФОРМ».....	62
<u>Лукашевич К.Е., Деркач М.А., Шереметьев В.А., Кудряшова А.А., Галкин С.П., Андреев В.А., Прокошкин С.Д., Браиловский В.</u> ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ СВЕРХУПРУГОГО СПЛАВА Ti-Zr-Nb, ПОДВЕРГНУТОГО КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОКЕ	63
<u>Мартынов К.Г., Клименко Д.Н., Негодин Д.А., Жеребцов С.В.</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ НА ПРОКАТНОМ СТАНЕ РСР 14-40.....	64
<u>Магомедова Д.К., Рябокоть Д.В.</u> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ КИРУНО- И МЕЛКОЗЕРНИСТОГО AL 6101	65
<u>Максименко В.Н., Липницкий А.Г.</u> РАЗРАБОТКА N-ЧАСТИЧНЫХ МЕЖАТОМНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВОВ СИСТЕМЫ V-Nb-Mo-W	66
<u>Mishnev R., Dudova N., Kaibyshev R.</u> EFFECT OF TEMPERING TEMPERATURE ON THE STRUCTURE AND CREEP RESISTANCE OF A 10%CR MARTENSITIC STEEL.....	67
<u>Морозова А.И., Ткачев М.С., Пелипенко А., Луговская А., Кайбышев Р.О.</u> ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РКUP НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ МЕДНОГО СПЛАВА	68
<u>Москвина В.А., Астафурова Е. Г., Рамазанов К. Н., Загибалова Е. А.</u> ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ СЛОЕВ, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ ОБРАЗЦОВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ.....	69
<u>Ожерелков Д.Ю., Наливайко А.Ю., Солодов Д.О., Комиссаров А.А., Морозова А.И., Шинкарев А.С., Громов А.А.</u> ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СИНГЛ-ТРЕКОВ ПОРОШКА AL-SI-MG-CU МОДИФИЦИРОВАННОГО КВАЗИКРИСТАЛЛАМИ.....	70

<i>Наливайко А.Ю., Ожерелков Д.Ю., Морозова А.И., Шинкарев А.С., Громов А.А.</i> ЛАЗЕРНОЕ СПЕКАНИЕ АЛЮМИНИЙ–ГЛИНОЗЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА ВИХРЕВОГО СЛОЯ	71
<i>Мурашов А.А., Берендеев Н.Н., Нохрин А.В.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОРРОЗИОННО-УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПТ-3В И ПТ-7М ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.....	72
<i>Нагичева Г.С., Нохрин А.В., Берендеев Н.Н., Мелехин Н.В., Пискунов А.В., Сысоев А.Н., Грязнов М.Ю.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБРАБОТКИ ВЗРЫВОМ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ.....	73
<i>Панов Д.О., Наумов С.В., Соколовский В.С., Волокитина Е.И., Кашаев Н.С., Фентцке Ф., Динзе Р., Поляева Е.А., Алексеев Е.Б., Ночовная Н.А., Жеребцов С.В., Салищев Г.А.</i> ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА ПЕРЕД ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОРТОРОМБИЧЕСКОГО АЛЮМИНИДА ТИТАНА Ti ₂ AlNb	74
<i>Неулыбин С.Д., Шицын Ю.Д., Пермьяков Г.Л., Белинин Д.С., Варушкин С.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССЕ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ	75
<i>Федосеева А.Э., Никитин И.С., Федосеев А.Э., Кайбышев Р.О.</i> ДЕГРАДАЦИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ Re-СОДЕРЖАЩЕЙ 10%Cr СТАЛИ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ НИЗКИХ НАПРЯЖЕНИЯХ.....	76
<i>Новиков В. Ю., Гончаров И.Ю., Япрынец М.Н., Газизова М.Ю.</i> ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЗОТИРОВАНИЯ В ПЛАЗМЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И СВОЙСТВА СТАЛИ X12MФ.....	77
<i>Озеров М.С., Жеребцов С.В.</i> ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА Ti-15Mo/TiB	78
<i>Однوبокова М., Belyakov A.</i> MICROSTRUCTURE EVOLUTION IN A 304L AUSTENITIC STAINLESS STEEL DURING WARM ROLLING	79
<i>Озеров М.С., Клименко Д.Н., Мартынов К.Г., Жеребцов С.В.</i> ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ УГЛЕРОДОМ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА.....	80
<i>Остовари А., Шабурова Н.А., Зайцева О.В., Самодурова М.Н., Ульяницкий В.Ю., Дубенская М.А., Сова А.А., Трофимов Е.А.</i> ПОЛУЧЕНИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ИЗ НИЗКО- И СРЕДНЕЭНТРОПИЙНЫХ ПОРОШКОВ.....	81
<i>Панина Е.С., Юрченко Н.Ю., Степанов Н.Д., Жеребцов С.В., Салищев Г.А.</i> ДИСПЕРСИОННО-УПРОЧНЕННЫЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ Ti-Nb-Nf-Al-Ta.....	82
<i>Панов Д.О., Жеребцов С.В., Салищев Г.А.</i> МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ОБРАТНОГО МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ.....	83
<i>Панченко М.Ю., Астафурова Е.Г., Мельников Е.В., Москвина В.А., Астафуров С.В., Реунова К.А., Майер Г.Г., Михно А.С.</i> ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ АЗОТОМ НА ВОДОРОДНОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ	84

<u>Пермяков Г.Л., Ольшанская Т.В., Кривоносова Е.А., Трушников Д.Н.</u> СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ	85
<u>Морозова А.И., Пилюпенко А., Луговская А.С., Ткачев М.С., Беляков А., Кайбышев Р.О.</u> ВЛИЯНИЕ МЕТОДА ДЕФОРМАЦИИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДНОГО СПЛАВА.....	86
<u>Захвалинский В.С., Никуличева Т.Б., Пилюк Е.А., Трубаев А.А.</u> СИНТЕЗ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ РАЗБАВЛЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА (Zn _{1-x} Mn _x) ₃ As ₂	87
<u>Поволяева Е.А., Озеров М.С., Степанов Н.Д., Жеребцов С.В., Динзе Р., Кашаев Н.С.</u> ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА МЕТАЛЛ-МАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА Ti-15%Mo/TiV	88
<u>Попов А.А., Болдин М.С., Нохрин А.В., Ланцев Е.А., Мурашов А.А., Андрей П.В., Сметанина К.Е.</u> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ НА КИНЕТИКУ УПЛОТНЕНИЯ И СТРУКТУРУ АЛЮМООКСИДНОЙ КЕРАМИКИ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ.....	89
<u>Прохоров Д.В., Коржов В.П.</u> ВЛИЯНИЕ ТИТАНА И ХРОМА НА СТРУКТУРУ И ЖАРОПРОЧНОСТЬ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО Nb-СПЛАВА И ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЯ	90
<u>Реунова К.А., Астафурова Е.Г., Астафуров С.В., Мельников Е.В., Панченко М.Ю., Майер Г.Г., Москвина В.А.</u> ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ АЗОТОМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА 20Fe-20Mn-20Cr-20Ni-20Co	91
<u>Русских А.С., Красиков С.А., Жилина Е.М.</u> СИНТЕЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ АЛЮМИНОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗ МЕТАЛЛОВ IV И V ГРУПП.....	92
<u>Сараева А.А., Победенная З.В., Киреева И.В., Чумляков Ю.И.</u> ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЦ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДВОЙНИКОВАНИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ (CoCrFeNi) ₉₄ Al ₄ Ti ₂ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА	93
<u>Седегов А.С., Сиднов К., Воротыло С., Бобожанов А.Р., Московских Д.О.</u> СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ КАРБИДОВ СИСТЕМЫ Hf-Ta-Ti-Nb-Zr-Mo-C.....	94
<u>Семенюк А.О., Климова М.В., Черниченко Р.С., Шайсултанов Д.Г., Степанов Н.Д., Жеребцов С.В., Салищев Г.А.</u> ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ УГЛЕРОДОМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ КРИОГЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА CoCrFeMnNi	95
<u>Сметанина К.Е., Андреев П.В., Ланцев Е.А., Востоков М.М.</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ФАЗОВОГО СОСТАВА КЕРАМИК НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА.....	96
<u>Соболева Н.Н., Макаров А.В., Николаева Е.П., Скорынина П.А., Малыгина И.Ю.</u> ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННОГО NiCrBSiFeC-Cr ₃ C ₂ ПОКРЫТИЯ ПОСЛЕ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ	97
<u>Соколовский В.С., Панов Д.О., Волокитина Е.И., Салищев Г.А.</u> ТРАНСФОРМАЦИЯ ПЛАСТИНЧАТОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ В (α ₂ +γ)-ФАЗОВОЙ ОБЛАСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ЗАКАЛЕННОГО β-ЗАТВЕРДЕВАЮЩЕГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ ГАММА АЛЮМИНИДА ТИТАНА.....	98

<u>Ткачѳв Е.С., Борисова Ю.И.</u> ВЛИЯНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ НА МИКРОСТРУКТУРУ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ 9%CR СТАЛИ, ЛЕГИРОВАННОЙ ТАНТАЛОМ	99
<u>Торганчук В.И., Беляков А.Н., Кайбышев Р.О.</u> ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СРЕДНЕМАРГАНЦЕВОЙ СТАЛИ.....	100
<u>Ткачѳв Е.С., Борисова Ю.И.</u> ЖАРОПРОЧНОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ 10Х9МВФБР ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРИСАДОЧНОЙ 9%CR СТАЛИ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ БОРА.....	101
<u>Федосеева А.Э., Никитин И.С., Федосеев А.Э., Кайбышев Р.О.</u> ЭВОЛЮЦИЯ РЕЕЧНОЙ СТРУКТУРЫ МАРТЕНСИТА 12%Cr СТАЛЕЙ С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ N И НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ В В ПРОЦЕССЕ ПОЛЗУЧЕСТИ	102
<u>Черниченко Р.С., Климова М.В., Семенюк А.О., Шайсултанов Д.Г., Жеребцов С.В., Степанов Н.Д.</u> СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ CoCrFeMnNi ЛЕГИРОВАННОГО Al.....	103
<u>Чуракова А.А., Гундеров Д.В., Прокошкин С.Д., Шереметьев В.А., Paulo N. Lisboa Filho, Ana Paula Rosifini Alves Claro</u> ПОДВЕРГНУТЫЕ ИПД ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ Ti₁₈Zr₁₅Nb И Ti₁₀Mo₈Nb₆Zr	104
<u>Шадрин Я.С., Нохрин А.В., Копылов В.И., Бобров А.А., Чувильдеев В.Н.</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ЛИТЫХ И МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ Al-(2.5, 4)%Mg-Sc-Zr	105
<u>Шайсултанов Д.Г., Раимов К.Ш., Степанов Н.Д.</u> ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА, ДЕФОРМАЦИИ И ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ TRIP СПЛАВОВ.....	106
<u>Юрченко Н.Ю., Панина Е.С., Степанов Н.Д., Салищев Г.А.</u> ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ СПЛАВЫ С КОМПОЗИТНОЙ ЭВТЕКТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Al-Cr-Nb-Ti-Zr	107
<u>Япрыщев М.Н., Суджанская И.В.</u> СИНТЕЗ И ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ОКСИДОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦЕРИЯ	108

ОРГАНИЗАТОРЫ

ФГАОУВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

Сопредседатели организационного комитета:

- **Ремпель А.А.**, академик РАН, профессор, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией и директор Института металлургии УрО РАН.
- **Салищев Г.А.**, д.т.н., профессор, заведующий лабораторией Белгородского государственного национального исследовательского университета.

Члены организационного комитета:

- **Репников Н.И.**, к.ф.м.н., проректор по науке Белгородского государственного национального исследовательского университета.
- **Чумляков Ю.И.**, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики металлов и руководитель лаборатории физики высокопрочных кристаллов Сибирского физико-технического института Национального исследовательского Томского государственного университета.
- **Кашаев Н.С.**, к.т.н., руководитель лаборатории Гельмгольц центра Геестахт (Helmholtz-Zentrum Geesthacht), Германия.
- **Санин В.Н.**, д.т.н., зам. директора Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова РАН.
- **Иванисенко Ю.В.**, к.ф.-м.н., руководитель группы Технологического института Карлсруэ (Karlsruhe Institute of Technology), Германия.
- **Киреева И.В.**, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики металлов и главный научный сотрудник лаборатории физики высокопрочных кристаллов Сибирского физико-технического института Национального исследовательского Томского государственного университета.
- **Лузгин Д.В.**, д.т.н., заведующий лабораторией в Университете Тохоку, Япония.
- **Трофимов Е.А.**, д.х.н., профессор кафедры материаловедения и физикохимии материалов ЮжноУральского государственного университета (НИУ).
- **Астафурова Е.Г.**, д.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории физики структурных превращений Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.
- **Московских Д.О.**, к.т.н., директор НИЦ «Конструкционные керамические материалы» Национального исследовательского технического университета (НИТУ «МИСиС»).
- **Жеребцов С.В.**, д.т.н., профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий и ведущий научный сотрудник лаборатории Белгородского государственного национального исследовательского университета.
- **Степанов Н.Д.**, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории Белгородского государственного национального исследовательского университета.
- **Липницкий А.Г.**, д.ф.-м.н., профессор кафедры наноматериалов и нанотехнологий «НИУ БелГУ».
- **Тихонова М.С.**, к.ф.м.н., заведующий кафедры материаловедения и нанотехнологий и старший научный сотрудник лаборатории Белгородского государственного национального исследовательского университета, координатор конференции.

ТЕМАТИКА

Основные направления работы:

- Высоко- и средне-энтропийные сплавы, композиционно-сложные сплавы, методы их получения, структура, механические и функциональные свойства, фазовая стабильность и структурно-фазовые превращения, механизмы деформации, диффузионные процессы и процессы упорядочения;
- Высокоэнтропийные и композиционно-сложные покрытия, методы их получения, структура и свойства;
- Высокоэнтропийные керамики, методы их получения, структура и свойства;
- Разработка и изучение новых композиционно-сложных материалов для изделий техники и медицины, включая наноструктурные материалы, микроструктурный дизайн многокомпонентных материалов, перспективы практического применения;
- Передовые методы получения и обработки металлических и неметаллических материалов для конструкционных и функциональных применений, включая аддитивные технологии, новые методы литья, порошковой металлургии, сварки, обработка поверхности;
- Другие перспективные направления в области разработки новых металлических и неметаллических материалов;
- Компьютерное моделирование поведения композиционно-сложных сплавов, покрытий и керамик при разного рода воздействиях.

ТЕЗИСЫ

ВЕДУЩИЕ УЧЕНЫЕ

ВЛИЯНИЕ АТОМОВ ВНЕДРЕНИЯ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА FeMnCrNiCo

**Астафурова Е. Г.* , Реунова К. А., Астафуров С. В., Мельников Е. В.,
Панченко М. Ю., Майер Г. Г., Москвина В. А.**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

*elena.g.astafurova@gmail.com

Изучали закономерности пластической деформации и разрушения высокоэнтропийного сплава, легированного атомами азота, углерода и водорода. Сплавы 20Fe-20Mn-20Cr-20Ni-(20-x)Co-x(N,C) (x=1, 3 ат. %) были выплавлены в вакуумной индукционной печи и подвергнуты термомеханическим обработкам для формирования твердого раствора на основе аустенита. Дополнительно осуществляли электролитическое насыщение однофазных азотистых сплавов водородом. Механические испытания на одноосное растяжение для всех сплавов были проведены при комнатной температуре.

Независимо от состава сплава заготовки обладают аустенитной структурой. Легирование азотом и углеродом вызывает увеличение параметра решетки аустенита, что указывает на образование твердого раствора внедрения в исследуемых сплавах. При этом легирование азотом способствует формированию более однородных по составу сплавов по сравнению с углеродом: методами электронной микроскопии не выявлено нитридных фаз в сплавах, легированных азотом, а углеродистые сплавы содержат небольшую долю крупных карбидов. Легирование азотом сопровождается увеличением пределов текучести и прочности высокоэнтропийного сплава без потери удлинения, вызывает рост коэффициента деформационного упрочнения при деформации и изменяет форму кривых течения от параболической в сплаве без атомов внедрения к близкой к линейной в сплавах с азотом. Микромеханизмы разрушения в азотистых сплавах и сплаве без атомов внедрения аналогичны (вязкий излом с формированием ямок на поверхностях разрушения). В отличие от азотистых сплавов, углеродистые сплавы демонстрируют комплексное твердорастворное и дисперсионное твердение, но при этом снижается пластичность образцов. Закономерности деформационного упрочнения в них соответствуют сплавам с крупными некогерентными частицами, а на поверхностях разрушения помимо ямочного излома, соответствующего вязкому разрушению углеродистого аустенита, наблюдаются элементы хрупкого излома (соответствуют частицам).

Легирование азотистых сплавов водородом способствует твердорастворному упрочнению и проявлению эффектов водородной хрупкости, которые усиливаются с увеличением концентрации азота в сплаве. Легирование высокоэнтропийного сплава азотом способствует изменению микромеханизма водородно-индуцируемого разрушения от интеркристаллитного хрупкого в сплаве без атомов внедрения к смешанному (интеркристаллитное и транскристаллитное) в сплавах с азотом. При этом увеличение концентрации азота в сплаве сопровождается ростом вклада от транскристаллитных хрупких сколов при деформации наводороженных образцов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00261).

MICROSTRUCTURE MECHANICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF AL ALLOYS AFTER ECAP-CONFORM PROCESSING AND DRAWING

Bobruk E.V.¹, Murashkin M.Yu.²

¹Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia;

²Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

¹e-bobruk@yandex.ru, ²m.murashkin.70@gmail.com

This work presents the results of the study of the UFG structure produced as a result of ECAP-Conform processing in Al-Mg-Si and Al-Mg-Zr alloys. The regularities in the variation of the mechanical properties, electrical conductivity and heat resistance of UFG alloys, depending on their chemical composition and features of the produced UFG states, have been investigated. It has been shown that the formation of specified UFG structures ensures achieving a combination of their high strength and electrical conductivity, as well as heat resistance. The possibility of producing UFG conductors from Al-based alloys through ECAP-Conform processing followed by cold drawing has been demonstrated.

The authors would like to thank the Russian Science Foundation for financial support of this research by Project 17-19-01311.

EVOLUTION OF STRENGTHENING FACTORS DURING LONG-TERM AGING AT 650 °C IN ADVANCED 10% CR HEAT-RESISTANT STEEL

Dudova N.* , Mishnev R., Kaibyshev R.

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

*dudova@bsu.edu.ru

One of the advanced approaches to improve the 100,000 h creep strength of 9-12% Cr martensitic steels up to minimum of 100 MPa at 650°C is a steel alloying modification by increasing the B content and decreasing the N content. Nowadays, the role of secondary phase precipitates ($M_{23}C_6$, MX, Laves phase) in enhancing the stability of lath structure under creep condition is the subject of research interest. In this work the effect of long-term aging for 1000...~40,000 h at 650 °C on the tensile strength at ambient temperature was studied in a low-nitrogen and high-boron 10%Cr martensitic steel. In order to establish the reason for increasing the yield stress and ultimate tensile strength after 10,000 h of aging the evolution of strengthening factors was analyzed. It was revealed that a decrease in the substructure and solid solution strengthening during long-term aging is compensated by an increase in the dispersion strengthening due to precipitation of V-rich MX carbonitrides.

МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМАЦИИ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ТИТАНА

Жеребцов С.В.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
zherebtsov@bsu.edu.ru

Исследованы микроструктура и механическое поведение новых высокоэнтропийных сплавов $Al_5Nb_2Ti_4V_5Zr_26$ и $Al_4Mo_4Nb_8Ti_5Zr_34$ в литом, холоднокатаном и рекристаллизованном состояниях. В литом состоянии оба сплава имели ОЦК однофазную крупнозернистую структуру. После холодной прокатки до $\epsilon = 80\%$ сплавы демонстрируют характерное для деформированных металлов поведение с короткой стадией упрочнения и ранним образованием шейки. Отжиг при $700-800^\circ\text{C}$ привел к рекристаллизации; при этом в сплаве с Mo наблюдалось образование небольшого количества частиц фазы Лавеса C14. После отжига при $1000-1100^\circ\text{C}$ в обоих сплавах было обнаружено частичное B2 упорядочение матричной фазы. В отожженном состоянии сплавы показали довольно необычное механическое поведение, связанное с высокой прочностью, низким деформационным упрочнением и довольно большим относительным удлинением. Проявление такого поведения можно объяснить образованием т.н. дислокационных каналов из-за локального разупорядочения ОЦК-матрицы в плоскостях сдвига. Кроме того, в сплаве с ниобием наблюдалась необычная (обратная) зависимость предела текучести от размера рекристаллизованного зерна, вероятно, из-за разной степени упорядоченности матричной фазы.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 19-79-30066.

EFFECT OF CARBON ALLOYING ON THE MICROSTRUCTURE EVOLUTION OF THE Cr₅CoFeNiMn ALLOY AT HIGH PRESSURE TORSION AND RESULTING MECHANICAL PROPERTIES

Yemao Lu¹, Yulia Ivanisenko^{1*}, Andrey Mazilkin¹, Torben Boll², Horst Hahn¹, Margarita Klimova³, Nikita Stepanov³, Sergei Zharebtzov³, Gennadiy Salischchev³

¹Institute for Nanotechnology, Karlsruhe Institute for Technology, Karlsruhe, Germany;

²Institute for Applied Materials (IAM-WK), Karlsruhe Institute for Technology, Karlsruhe, Germany;

³Department of Materials Science and Nanotechnology, Belgorod State University, Belgorod, Russia

*julia.ivanisenko@kit.edu.ru

Cantor type high entropy alloys (HEA) with the reduced amount of chromium and addition of 0, 0.5 and 2 at.% of carbon were processed by high pressure torsion (HPT) under 6.5 GPa by 0.5, 1 and 3 turns at room temperature. The microstructure and mechanical properties of samples before and after HPT were investigated. In all alloys, HPT deformation leads to dramatic grain size refinement down to the nanoscale range. In particular, after three turns of HPT, the mean grain size determined from dark field transmission electron microscopy images was 45, 29 and 17 nm in samples with 0, 0.5 and 2 at.% C, respectively. In the 2 at.% C sample carbon segregations along grain boundaries were revealed by means of Atom Probe Tomography. The hardness of specimens approached the saturated values of 490 HV, 550 HV and 640 HV in alloys with 0, 0.5 and 2 at.% C, respectively, while the shear strain at HPT, γ , increases to ~ 27 . In agreement with hardness measurements, the yield stress of samples after three turns increased significantly and reached 1.7 GPa, 1.9 GPa and 2.4 GPa, but the uniform elongation was dramatically reduced. The influence of carbon content on the microstructure refinement at HPT and hardening mechanisms in nanocrystalline HEA will be discussed.

Acknowledgement: authors acknowledge the use of Karlsruhe Nano and Micro Facility (KNMF) and YL is grateful to CSC (China) for funding.

LASER PROCESSING OF METALLIC STRUCTURAL MATERIALS: FATIGUE PROPERTIES AND FATIGUE LIFE EXTENSION APPROACHES

Nikolai Kashaev

Institute of Materials Research, Materials Mechanics,
Department of Laser Processing and Structural Assessment,
Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Max-Planck-Str. 1, D-21502 Geesthacht
nikolai.kashaev@hzg.de

The research activities at Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) aim at the development of advanced lightweight components and structures, which will be based on the next generation of lightweight alloys. Laser beam processes are used for joining, additive manufacturing and locally modifying the microstructure and the mechanical properties of those alloys. In case of aircraft applications, laser beam welded structures show a better buckling behaviour under compression loading in comparison to riveted structures. The reason why the application of laser beam welding is still limited for lower fuselage applications is in their inferior damage tolerance behaviour under tensile loading in comparison to the riveted structures. In case of laser beam welding, the fatigue critical zones are located in the weld, where the crack can be initiated due to possible welding defects and in case of aluminium alloys due to the reduced strength in comparison to the sheet material. One promising way to improve the fatigue behaviour of welds is introducing compressive residual stresses, whereby laser shock peening represents an effective residual stress engineering method to generate deep compressive residual stress fields in metallic materials.

The aim of the present study was to investigate to what extent the fatigue behaviour of laser beam welded aluminium joints with already existed cracks can be improved through laser shock peening [1]. Through the application of the laser shock peening treatment on surfaces of the pre-cracked specimens, it was possible to recover the fatigue life to the level of specimens tested in as-welded condition. The results of the study showed that laser shock peening is a very promising technique to recover the fatigue life of welded joints with surface fatigue cracks. Another example is dealing with laser beam welding of high-strength titanium alloys. In spite of usually acceptable static strength level, fatigue and damage tolerance characteristics of titanium laser beam welded joints and laser additive manufactured structures are relatively poor due to inherent welding-induced defects, which are inevitable results of the laser processing. For titanium alloys, the detrimental effect of defects is further enhanced by the formation of hard and notch-sensitive martensitic microstructure within the welding seam. The study deals with the quality of laser beam welded titanium joints in terms of weld morphology, microstructure and mechanical properties. A particular emphasis is placed on investigating the effect of various welding defects on the high-cycle-fatigue performance of laser processed titanium joints. Furthermore, a model to predict the fatigue properties in the high cycle fatigue regime is proposed [2]. The fatigue-life assessment model has been developed for internally flawed materials based on a fracture-mechanics approach, which takes into account the short-crack effect.

References:

1. N. Kashaev et al. *On the application of laser shock peening for retardation of surface fatigue cracks in laser beam-welded AA6056. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 43 (2020) 1500-1513.
2. F. Fomin et al. *Probabilistic fatigue-life assessment model for laser-welded Ti-6Al-4V butt joints in the high-cycle fatigue regime. Int. J. Fatigue* 116 (2018) 22-35.

МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ОБЪЕМНЫЕ АМОРФНЫЕ СПЛАВЫ, КАК ОДНИ ИЗ САМЫХ РАЗУПОРЯДОЧЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

Лузгин Д.В.

Университет Тохоку, Сендай, Япония
dml@wpi-aimr.tohoku.ac.jp

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), являющиеся тематикой данной школы содержащие 5 и более компонентов (суть химических элементов составляющих сплав), принадлежат к середине соответствующих многокомпонентных фазовых диаграмм состояния. В этих условиях конфигурационная энтропия достигает максимальных значений, что при использовании компонентов с малой энтальпией образования смесей, затрудняет формирование интерметаллидных соединений и позволяет достигать высоких взаимных растворимостей компонентов в кристаллических решетках базовых компонентов с простым типом структуры (ГЦК или ОЦК). Как правило, данные компоненты близки по кристаллической структуре, атомному размеру и свойствам, что и объясняет их высокую взаимную растворимость в твердом состоянии в соответствии с правилами Юм-Розери. Поскольку идеально разупорядоченные высокоэнтропийные сплавы обладают невысокими механическими свойствами в них вводят элементы с высокой энтальпией смешения с другими компонентами сплава для образования локальных областей с химически упорядоченной структурой для повышения прочности ВЭС. Такие сплавы представляется более правильным именовать многокомпонентными сплавами без базового компонента.

Объемные аморфные сплавы (ОАС), также называемые металлическими стеклами, тоже предпочитают многокомпонентные составы вдалеке от границ фазовых диаграмм состояния, так как это, в частности, затрудняет системе «выбор» соответствующего кристаллического соединения при охлаждении расплава ниже температуры ликвидуса. Однако, наряду с высокой конфигурационной энтропией данные сплавы требуют и наличие высокой энтальпии смешения компонентов в жидком состоянии. Образование разупорядоченной аморфной (стекловидной) атомной структуры достигается затруднением процесса кристаллизации посредством понижения температуры ликвидуса, уменьшением стабильности кристаллических фаз, снижением диффузионной подвижности атомов, повышением вязкости расплава и другими методами до такой степени, что даже граничные твердые растворы с малым периодом решеток и простыми структурами не успевают образоваться до затвердевания. Ввиду образования топологически разупорядоченной структуры ОАС (хотя в них и присутствует топологическое и химическое упорядочение на суб-наноразмерном уровне) имеют сходство с ВЭС, в которых при наличии кристаллического дальнего атомного порядка отсутствует или сильно ослаблено химическое упорядочение компонентов. Сходства и различия в атомных структурах ОАС и ВЭС, а также их влияние на конечные свойства, будут рассмотрены в данном докладе.

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Миронов С.Ю.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
mironov@bsu.edu.ru

В данной работе представлен краткий обзор микроструктурных аспектов сварки трением с перемешиванием (СТП). Показано, что формирование зёрновой структуры в ходе СТП представляет собой довольно сложный процесс, для которого, как правило, характерно сочетание как фрагментации, так и прерывистой рекристаллизации, а также может иметь место двойникование и даже коалесценция зерен. Активация и удельный вклад каждого из этих микроструктурных механизмов в основном определяется кристаллической структурой и энергией дефекта упаковки свариваемого материала, но также в некоторой мере может зависеть от температуры СТП.

Автор выражает признательность Российскому научному фонду (РНФ) за финансовую поддержку (проект №19-49-02001).

САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОЙ КЕРАМИКИ

Московских Д.О.* , Седегов А.С., Буйневич В.С.

Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС»,
Ленинский проспект, д.4, г. Москва, 119049, Россия
*mos@misis.ru

Недавно спектр высокоэнтропийных материалов был расширен с включением не металлических элементов и создан класс высокоэнтропийной керамики (ВЭК) [1]. Авторы продемонстрировали возможность получения различных высокоэнтропийных боридов с помощью применения высокэнергетической механической обработки и искрового плазменного спекания, были получены образцы плотностью ~92%. Показано, что эти материалы действительно представляют собой новый тип сверхвысокотемпературной керамики (УНТС), а также новый класс материалов с высокой энтропией, которые не только иллюстрируют первую объемную высокоэнтропийную неоксидную керамику (бориды), но и обладают уникальной слоистой (2D) кристаллической структурой с высокой энтропией, которая заметно отличается от всех, о которых сообщалось в предыдущих исследованиях. Первоначальные оценки свойств показывают, что твердость и устойчивость к окислению полученных ВЭК выше, чем, например, характеристики пяти отдельных диборидов металлов, полученных с помощью идентичных методов.

В данной работе показана возможность применения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для получения высокоэнтропийных карбидов, боридов и нитридов на основе композиции Hf-Ta-Ti-Nb-Zr.

ВЭК была получена путем экзотермического сжигания (самораспространяющегося высокотемпературного синтеза) механически активированных наноструктурированных металлических композиционных частиц в азоте, для получения (HfTaTiNbZr)N. Для получения карбидов и боридов готовились смеси с углеродом и бором, соответственно получены (HfTaTiNbZr)C и (HfTaTiNbZr)B₂.

Список литературы:

1. J. Gild, Y. Zhang, T. Harrington, S. Jiang, T. Hu, M.C. Quinn, W.M. Mellor, N. Zhou, K. Vecchio, J. Luo, *High-Entropy Metal Diborides: A New Class of High-Entropy Materials and a New Type of Ultrahigh Temperature Ceramics*, *Scientific Reports* 6:37946.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-79-10215).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ПРОВОДНИКОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Нохрин А. В.^{1*}, Шадрин Я. С.¹, Копылов В. И.^{1,2}, Чувильдеев В. Н.¹,
Бобров А. А.¹, Пискунов А. В.¹, Берендеев Н. Н.¹

¹ Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия;

² Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь

*nokhrin@nifti.unn.ru

Целью работы является исследование термической стабильности литых и ультрамелкозернистых (УМЗ) новых микролегированных проводниковых алюминиевых сплавов, а также исследование малогабаритных проводов, изготовленных из этих сплавов. Литые сплавы были получены методом индукционного литья в вакууме, УМЗ структура была сформирована методом равноканального углового прессования (РКУП) и ротационнойковки (РК). Образцы проводов были изготовлены методом раскатки. В качестве объектов исследования выступали сплавы Al-0.6Mg-Zr-(Sc,Yb), новые микролегированные алюминиевые сплавы системы Al-Zr с различным содержанием циркония и дополнительных легирующих элементов (Hf, Yb, Er).

Проведенные исследования показали, что после литья сплавы имеют достаточно однородную крупнозернистую макроструктуру, параметры которой (доля столбчатых кристаллов и их размер) зависят от типа и концентрации легирующих элементов, а также наличия первичных частиц. Экспериментальным путем выбраны концентрации легирующих элементов и режимы литья, при которых не происходило образование первичных частиц, являющихся причиной обрыва провода при его холодной раскатке. Установлено, что введение в сплав Yb всегда приводит к образованию первичных микронных и субмикронных частиц, даже при малых (менее 0.03 вес.%) концентрациях.

Исследована термическая стабильность структуры, удельного электросопротивления, микротвердости и прочности на разрыв новых проводниковых алюминиевых сплавов в различных структурных состояниях. Показано, что длительные (100 ч) отжиги при температурах от 200 до 400 °С приводят к незначительному снижению твердости и прочности алюминиевых сплавов. На основании анализа результатов исследований удельного электросопротивления с использованием модели Мела-Джонса-Аврами-Колмогорова определены механизмы распада твердого раствора при отжиге алюминиевых сплавов. Разработана методика прогноза механических характеристик новых проводниковых алюминиевых сплавов при сверхдлительных отжигах (до 1000 ч).

Исследована термическая стабильность малогабаритных проводов, изготовленных из новых проводниковых алюминиевых сплавов, в том числе – малогабаритных проводов с медной защитной оболочкой. Исследовано влияние длительных отжигов на процессы рекристаллизации и изменение механических свойств алюминиевых проводов, а также особенности взаимной диффузии в системе «деформированная медь (оболочка) – УМЗ алюминиевый сплав (жила)» при длительном отжиге. Определены температурно-временные интервалы стабильности структуры и механических свойств малогабаритных проводов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-19-00672.

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ БЕТА-ЗАТВЕРДЕВАЮЩЕГО TiAl-СПЛАВА С ВАРИАТИВНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ Zr, Cr И Gd ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ОСАДКЕ

Панин П.В.^{1*}, Алексеев Е.Б.¹, Лукина Е.А.²

¹ФГУП «ВИАМ», г. Москва, Россия;

²ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», г. Москва, Россия

*PaninPaV@yandex.ru

Жаропрочные сплавы на основе интерметаллида TiAl (гамма-сплавы) являются перспективными материалами для изготовления деталей горячего тракта газотурбинных двигателей благодаря низкой плотности, высокой удельной прочности и жесткости при рабочих температурах до 750–800°C [1]. Однако вследствие природной хрупкости и низкой пластичности гамма-сплавов получение из них бездефектных деформированных полуфабрикатов является сложной технологической задачей. В данной работе проведены исследования по оценке технологичности нового интерметаллидного бета-затвердевающего TiAl-сплава [RU 2606368] вариативного состава (ат.%): Ti-44,5Al-2V-1Nb-xZr/yCr-(0/0,1)Gd ($x=0,5-1,5$; $y=1,5-2,5$) [2, 3]. В соответствии с ГОСТ 9917-82 на сервогидравлической испытательной машине Walter+Bai LFV-100 проведены испытания цилиндрических образцов диаметром $d=10$ и высотой $h=15$ мм на изотермическую осадку по схеме осевого сжатия при температурах 1000, 1100, 1200 и 1300 °C в интервале скоростей деформации ($\dot{\epsilon}$) от 10^{-3} до 10^{-1} с⁻¹.

Выявлено, что Cr-содержащие композиции обладают значительно более высокой технологической пластичностью в исследованных условиях деформации по сравнению с составами, содержащими Zr. Показано, что микродобавка Gd положительно сказывается на технологичности всех исследованных композиций TiAl-сплава, снижая уровень предела текучести ($\sigma_{0,2}$) и напряжений.

Показано, что с повышением температуры осадки значения напряжений понижаются во всем интервале скоростей деформации. При этом установлено, что наиболее значительное снижение уровня напряжений наблюдается при повышении температуры осадки с 1100 до 1200 °C – в 2...2,5 раза, в то время как при повышении температуры деформации с 1000 до 1100 °C – только в 1,1...1,3 раза, а с 1200 до 1300 °C – в 1,4...1,5 раза. Можно предположить, что значительное снижение уровня напряжений в интервале температур 1100–1200°C обусловлено высокой скоростью процесса разупорядочения фазы $\alpha_2(DO_{19}) \rightarrow \alpha(A3)$ при температуре 1200°C и выше.

Проведена оценка предельной степени изотермической деформации образцов из TiAl-сплава при осадке до появления первых трещин. Трещины при деформации на 65% не были выявлены для сплавов, содержащих 1,5–2,5 ат.% Cr и 0,1 ат.% Gd, после осадки при температуре 1200°C со скоростями деформации 10^{-2} и 10^{-3} с⁻¹. В Zr-содержащих сплавах первые трещины при деформации при 1200°C и $\dot{\epsilon}=10^{-2}$ с⁻¹ появляются, когда степень деформации достигает 50%.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10249).

АТОМНОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ В СОЕДИНЕНИЯХ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ: РОЛЬ ПОВЫШЕННОЙ ЭНТРОПИИ

Ремпель А.А.

Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия
rempel.imet@mail.ru

Соединения переходных металлов IV, V и VI групп с углеродом, азотом и кислородом со структурой B1 могут иметь переменный химический состав и широкие области гомогенности. Такие соединения называют нестехиометрическими, поскольку соотношения атомов металла к неметаллу в них не описываются целочисленными коэффициентами.

Ширина областей гомогенности нестехиометрических соединений существенно увеличивается при повышенных температурах (порядка 1000-2000 К) и может достигать десятка атомных процентов. В пределах области гомогенности структуру нестехиометрических соединений можно описать как твердый раствор с неупорядоченным расположением атомов по своей подрешетке. Неупорядоченное расположение атомов говорит о стабилизации структуры твердого раствора за счет высокой конфигурационной энтропии. При пониженных температурах (ниже 1000 К), роль энтропийного вклада в свободную энергию химического соединения становится менее существенной, и твердый раствор начинает распадаться на упорядоченные фазы. Атомное упорядочение происходит по механизму фазового перехода беспорядок-порядок и может быть рассмотрено в рамках теории фазовых переходов и термодинамических моделей с привлечением теории среднего поля и метода вариации кластеров.

В докладе рассматриваются общие подходы к атомному упорядочению в твердых растворах и конкретные примеры для карбидов и оксидов переходных металлов.

Список литературы:

1. Ремпель А.А., Гельчинский Б.Р. *Высокоэнтропийные сплавы: получение, свойства, практическое применение. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – Т. 63. – С. 248-253 (2020).
2. Ремпель А.А., Гусев А.И. *Нестехиометрия в твердом теле.* – М.: Физико-математическая литература. – 640 с. (2018).
3. Ремпель А.А. *Эффекты атомно-вакансионного упорядочения в нестехиометрических карбидах. Успехи физических наук.* – Т. 166. – С. 33-62 (1996).
4. Ремпель А.А. *Эффекты упорядочения в нестехиометрических соединениях внедрения.* – Екатеринбург: Наука. – 232 с. (1992).

Доклад подготовлен в рамках выполнения государственного задания ИМЕТ УрО РАН.

ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ СПЛАВЫ: 15 ЛЕТ РАЗВИТИЯ

Салищев Г.А.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
Salishchev_G@bsu.edu.ru

В докладе представлена новая стратегия легирования сплавов, которая заключается в создании комбинации нескольких (обычно ≥ 5) основных элементов в эквипроцентной или близкой к ней концентрации. Такие сплавы были названы высокоэнтропийными, ввиду роста конфигурационной энтропии при смешении.

Предсказание их структуры одна из основных задач при исследовании. В докладе рассматриваются как эмпирические критерии хорошо известные с начала 30-40-ых годов прошлого века и достаточно уверенно предсказывающие образование твердых растворов в двойных системах, так и результаты применения к многоэлементным сплавам термодинамических расчетов и первопринципных подходов, основанных на теории функционала плотности [1-3]. Анализируется строение, особенности диффузии и пластической деформации в многоэлементном твердом растворе. Долгое время твердые растворы считались разупорядоченными, однако, недавно тонкими исследованиями было обнаружено формирование ближнего порядка во взаимодействии элементов [4,6]. Показано его влияние на увеличение барьеров Пайерлса винтовых дислокаций, на морфологию и активность дислокационного скольжения, и, тем самым, на механические свойства сплавов [4-6]. На этой основе была предложена новая стратегия разработки сплавов с высокой прочностью, в частности легированием бором [5]. Демонстрируются различные примеры возникновения в структуре областей ближнего порядка, которые могут быть зародышами частиц, становясь эффективными упрочнителями [6]. Рассматривается другой путь, когда в упорядоченной B2 матрице формируются наноразмерные области B2/ОЦК, придающие сплавам баланс высоких прочностных и пластических свойств в широком интервале температур деформации [7]. Представлены результаты разработки высокоэнтропийных жаропрочных интерметаллидов. Приводятся примеры создания сплавов для криогенных применений, жаропрочных, радиационно-стойких.

Список литературы:

1. D.V. Miracle, O.N. Senkov. *Acta Materialia*, 122 (2017) 448-511.
2. В.М. Воздвиженский. *Прогноз двойных диаграмм состояния*. – М.: *Металлургия*, 1975, 224 с.
3. Sh. Luo, L. Vitos et al.. *Computational Materials Science* 186 (2021) 110021.
4. S. Yin, J. Ding, M. Asta, R.O. Ritchie. *Computational Materials* (2020) 110.
5. J. B. Seol et al. *Acta Materialia*, 194 (2020) 366-377.
6. E.P. George, W.A. Curtin, C.C. Tasan. *Acta Materialia* 188 (2020) 435-474.
7. T.E. Whitfield et al. *Scripta Materialia*, 180 (2020) 71-76.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Соглашение № 19-79-30066) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ» БелГУ.

СВС-МЕТАЛЛУРГИЯ ЛИТЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ

Санин В.Н., Икорников Д.М., Юхвид В.И.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мержанова Российской академии наук,
142432 г. Черноголовка, М.О., ул. Академика Осипьяна д.8
E-mail: svn@ism.ac.ru

Многокомпонентное легирование широко используется при разработке материалов, эксплуатируемых в экстремальных (повышенных температурах и нагрузках) условиях. В последние годы к многокомпонентным сплавам возник дополнительный интерес, связанный с обнаружением малоисследованных ранее композиций легирующих элементов и основы, находящихся в эквиатомной концентрации. Повышение вклада в образование таких систем со стороны энтропии смешения привело к тому, что их стали называть высокоэнтропийными [1].

В настоящее время уже показано, что высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) могут демонстрировать необычные физико-механические свойства, существенно расширяющие области применения современных металлических материалов.

Изначально объектами исследования были системы на основе переходных металлов эквиатомного состава. В настоящее время же исследовано более 400 композиций ВЭС включая тугоплавкие металлы и системы с существенным отклонением от эквиатомного состава.

С точки зрения расширения потенциала свойств материалов на основе ВЭС, особый интерес вызывают ВЭС в системах с участием неметаллов, таких как Si, B, N и др. (гетерогенные материалы). Начаты поиски металлокерамических композиционных материалов на основе ВЭС [2]. В таких материалах наблюдается мощный эффект структурного упрочнения в силу специфики формирования структуры в ВЭС.

Ранее авторами впервые был применен метод СВС-металлургии для получения нового класса многокомпонентных металлических материалов на основе высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) [3,4]. Получение композитов ВЭС (Co-Cr-Fe-Ni-Mn) / Me-Si-B (где Me – Mo, Ti, Nb и др.) в режиме СВС никогда ранее не исследовалось. В рамках презентации будут представлены результаты таких исследований

Список литературы:

1. Yeh, J.W.; and others. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Adv. Eng. Mater.* 2004, 6, 299-303.
2. B. Murty, and others, Chapter 5 - Synthesis and Processing, in: B. M. Y. Ranganathan (Ed.), *High Entropy Alloys*, Butterworth-Heinemann, Boston, 2014, pp. 77-89.
3. Sanin V.N., and others. Synthesis of cast high entropy alloys with a low specific gravity by centrifugal metallothermic SHS-methods. *Advanced Materials and Technologies*. 2017. № 3. с. 24-33. DOI: 10.17277/amt.2017.03.pp.024-033.
4. В. Н. Санин, и др. СВС-металлургия литых высокоэнтропийных сплавов на основе переходных металлов. Доклады академии наук, 2016, том 470, № 4, с. 421-426. DOI: 10.7868/S0869565216280124.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 19-08-01108.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕДРЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ CoCrFeMnNi

Степанов Н.Д.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
stepanov@bsu.edu.ru

Высокоэнтропийные сплавы на основе системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni с гранцентрированной кубической (ГЦК) структурой привлекают значительное внимание как перспективные конструкционные материалы благодаря необычному сочетанию прочности, пластичности и ударной вязкости при криогенной температуре. В настоящей работе рассмотрено влияние легирования элементами внедрения (углеродом и азотом) на структуру и механические свойства высокоэнтропийных сплавов CoCrFeMnNi. Метод CALPHAD использовался для анализа как влияния состава ГЦК-фазы на растворимость C/N, так и влияния содержания C/N в ГЦК фазе на величину энергии дефекта упаковки (ЭДУ). Было обнаружено, что уменьшение содержания Cr может существенно увеличить растворимость C/N. Зависимость величины ЭДУ от содержания C/N может иметь разный характер. Экспериментальные образцы сплавов с различным количеством C/N (0-2 ат.%) были получены методом индукционной плавки. Прочность сплавов была прямо пропорциональна проценту C/N. Было обнаружено, что (i) N является гораздо более сильным упрочнителем, чем C; (ii) твердорастворное упрочнение заметно усиливается с уменьшением температуры деформации с 293 до 77 К. Пластическая деформация сплавов сопровождается преимущественно планарным скольжением дислокаций, как при комнатной, так и при криогенной температуре. Путем термомеханической обработки в сплавах, легированных C/N, можно получить мелкозернистую рекристаллизованную микроструктуру. Представлен анализ влияния содержания C/N на эволюцию микроструктуры сплавов. Показано что мелкозернистые сплавы могут иметь привлекательное сочетание прочности и пластичности как при комнатной, так и при криогенной температуре. Обсуждаются взаимосвязи между химическим составом, структурой, механизмами деформации и механическими свойствами сплавов CoCrFeMnNi.

Исследования выполнены при поддержке Российского Научного Фонда, проект №18-19-00003.

КАТАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ФАЗ

Трофимов Е.А.¹, Остовари А.¹, Зайцева О.В.¹, Трофимова С.Н.¹, Ульяницкий В.Ю.²,
Дубенская М.А.³, Сова А.А.³, Самодурова М.Н.¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия;

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН), г. Новосибирск, Россия;

³Национальная Инженерная Школа Сент-Этьена (ENISE), г. Сент-Этьен, Франция
E-mail: trofimovea@susu.ru

В последние годы одним из наиболее активно развивающихся направлений наук о материалах стало направление, связанное с получением и исследованием свойств высокоэнтропийных фаз. Изначально речь шла только о металлических сплавах, однако в последнее десятилетие быстро растёт количество работ, направленных на получение и исследование свойств неметаллических высокоэнтропийных фаз – многокомпонентных фаз с близкими к эквимолярным концентрациями основных компонентов.

В ходе изучения свойств таких фаз было замечено, что их структура (в частности, высокодефектная кристаллическая решётка, характерная для них) способствует проявлению каталитической активности по отношению к важным химическим процессам, что вызвало к жизни такое новое, активно развивающееся научное направление, как создание и исследование катализаторов на основе высокоэнтропийных фаз.

Работа посвящена современному состоянию теоретических и экспериментальных исследований в области применения высокоэнтропийных фаз (как металлических, так и высокоэнтропийной керамики) в качестве основы катализаторов для различных химических реакций.

Представлены и проанализированы литературные сведения о структуре, свойствах и возможностях применения многокомпонентных фаз, состав которых характеризуется высокой конфигурационной энтропией смешения, в различных каталитических реакциях. Описаны методы получения высокоэнтропийных фаз с каталитической активностью.

Высокоэнтропийные катализаторы влияют на скорость таких важных в прикладном отношении процессов, как процессы окисления монооксида углерода, аммиака, метанола и т.п.; восстановления оксидов углерода; разложения сложных органических соединений. Особое внимание уделяется катализаторам электрохимических процессов (таким, как катализаторы процессов выделения на электродах водорода и кислорода). Помимо каталитических систем, в которых высокоэнтропийной является активная каталитическая фаза, рассматриваются системы, в которых высокоэнтропийные материалы выступают в роли носителей активных каталитических фаз.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00304).

МОЛОДЫЕ УЧЕНЫЕ

SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN A DIESEL ENGINE EQUIPPED WITH PISTONS WITH A HEAT PROTECTION COATING

V.V. Krasilnikov¹, M.S. Al-Bdeiri^{1*}, S.V. Sergeyev¹

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

*1270037@bsu.edu.ru

The work is devoted to the modified quasi-stationary method (MQM) for the analysis of the piston of a diesel engine coated with an aluminum alloy, to the numerical and analytical study of an interesting phenomenon of short-term (cyclic) and long-term response resulting from a large temporary (non-periodic) temperature transient of the engine in the combustion chamber, especially in the walls piston. Numerical predictions from simulations are in very good agreement with analytical solutions for all element types and boundary conditions. Then the influence of the time step, sampling rate of harmonic boundary conditions and grid density on the accuracy and convergence of the solution is investigated. a purely theoretical thermodynamic analysis was developed using the equations of energy and state with the corresponding heat transfer of the gas. The time-dependent boundary conditions are then applied to the gas-blown surfaces of the two-dimensional, transient finite element models of the combustion chamber component. Next, the finite element predictions of the instantaneous heat flux through each component surface are used to determine when the engine goes into quasi-stationary operation. The use of this strategy is illustrated by predicting the performance of an isolated diesel engine. The results show that our technique can reveal complex heat flux transient paths in the engine combustion chamber and significantly improve conduction heat flux models when simulating a diesel engine. And study the effect of aluminum oxide coating on the piston crown on short and long term reactions by manipulating galvanic-plasma modification (GPM).

КИНЕТИКА СПЕКАНИЯ НАНОКОМПОЗИТОВ $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{YAG}$

Андреев П.В.^{1*}, Алексеева Л.С.², Балабанов С.С.¹, Попов А.А.², Болдин М.С.²

¹ФГБУН Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН,
Нижний Новгород, Россия;

²ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Россия

*andreev@phys.unn.ru

Одним из эффективных методов получения мелкозернистых керамик с высокими физико-механическими свойствами является метод электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС). Тугоплавкие керамические композиты на основе Si_3N_4 имеют широкий спектр применения, однако за счет ковалентной природы химической связи, спекание порошка Si_3N_4 невозможно без спекающих добавок, таких как Y_2O_3 и Al_2O_3 . Использование новых методов осаждения оксидов на частицы Si_3N_4 позволяет добиться высокой равномерности распределения добавок и повысить свойства композита.

В качестве исходных материалов использовался нанопорошок Si_3N_4 (размер частиц не более 15 нм), прекурсоры $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$ и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$. Состав исходных реактивов рассчитывался таким образом, чтобы содержание оксидов Y_2O_3 и Al_2O_3 находилось в мольном соотношении 3:5 (стехиометрия иттрий-алюминиевого граната), а массовое содержание спекающей добавки в смеси составляло 10%.

Синтез исходных смесей производился методами соосаждения в водном растворе (серия 1), методом Печини (с добавлением лимонной кислоты – серия 2), методом распылительной сушки (серия 3). Полученные в результате синтезов промежуточные продукты отжигали постадийно в течение 2–8 ч при температурах 300, 500, 800, 1000 °С с диспергированием в агатовой ступке между стадиями.

Компактирование керамических образцов проводилось методом ЭИПС при давлении 70 МПа со скоростью нагрева 100 °С/мин. В качестве исходных смесей для спекания были использованы как промежуточные продукты реакции после прокаливания при 300 °С в течение 2 ч, так и продукты полного цикла отжига.

Кинетика спекания промежуточных продуктов реакции (после прокаливания при 300 °С) различно для разных методов осаждения. Для порошков серии 1 характерная плавная усадка в интервале температур 900-1580 °С. Усадка порошков серии 2 происходит в интервале температур 900-1480 °С, на температуре 1160 °С наблюдается резкий пик усадки, вероятно связанный с фазовыми превращениями в порошке. Усадка порошков серии 3 происходит в интервале температур 1100-1750 °С, пик усадки, обусловленный фазовым превращением, наблюдается при температуре 1360 °С.

Графики усадки продуктов полного цикла отжига (после прокаливания при 1000 °С) имеют характерный S-образный вид, интервал усадки для всех исследованных серий составляет 900-1200 °С. Метод приготовления порошка оказывает влияние лишь на общую величину усадки, уменьшающуюся от серии 1 к серии 3. Снижение величины усадки говорит о более плотной упаковке частиц в порошке серии 3 до начала спекания.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-60084.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ АККУМУЛИРОВАНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДА

Балякин И. А. *, Зайцева К. В., Юрьев А. А., Сидоров Н. И., Ремпель А. А.

Институт Металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия
*i.a.balyakin@gmail.com

Водородная энергетика является перспективной отраслью альтернативной энергетики. Неотъемлемой частью водородной энергетики является аккумуляция и транспортировка водорода. В связи с этим, разработка материалов, способных выступать в роли эффективных аккумуляторов, которые можно безопасно транспортировать, является актуальной научной задачей.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭСы), являясь относительно новым классом материалов, уже являются объектами исследований по аккумуляции водорода. Так, например, в работе [1] для сплава TiVZrNbHf достигнуто отношение водород/металл порядка 2.5. Большое количество всевозможных ВЭСов приводит к необходимости оценки целесообразности использования того или иного состава методами компьютерного моделирования. Компьютерное моделирование, в частности, *ab initio* методы позволяют как оценивать вероятность формирования многокомпонентного неупорядоченного твердого раствора для данного состава, а также устанавливать особенности взаимодействия водорода со сплавом.

В данной работе методом *ab initio* молекулярной динамики в пакете VASP [2] были установлены структура и динамика расплава CoCrFeNi для оценки вероятности формирования однофазного неупорядоченного твердого раствора. Кроме того, для данной системы был разработан межатомный потенциал с применением машинного обучения в рамках подхода DeePMD [3], пригодный для использования в расчетах как твердого, так и жидкого состояний. Разработка DeePMD-потенциала позволяет значительно расширить пространственно-временные масштабы атомистических расчетов. Это позволило провести расчеты твердотельной диффузии атомов водорода в матрице CoCrFeNi при различных температурах. Таким образом, в настоящей работе продемонстрирована применимость квантово-химических методов и методов машинного обучения к задаче разработки ВЭСов для водородной энергетики.

Список литературы:

1. Sahlberg M. et al Superior hydrogen storage in high entropy alloys, *Scientific Reports*, vol. 6, article number 36770, 2016.
2. Kresse G., Furthmuller J. Efficiency of *ab-initio* total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set, *Computational Materials Science*, vol. 6, iss.1, 1996.
3. Wang H. et al DeePMD-kit: A deep learning package for many-body potential energy representation and molecular dynamics, *Computer Physics Communications*, vol. 228, 2018.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием ИМЕТ УрО РАН, расчеты выполнены на кластере «УРАН» ИММ УрО РАН.

ПОЛУЧЕНИЕ, ИЗУЧЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО И ФАЗОВОГО СОСТАВОВ СВЕРХУПРУГОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Ti-Zr-Nb С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ Zr

Барилюк Д. В.^{* 1}, Шереметьев В. А.¹, Прокошкин С. Д.¹, Конопацкий А. С.¹

¹Национальный исследовательский технологический университет МИСиС,
Институт новых материалов и нанотехнологий, Москва, Россия
^{*}danybary@mail.ru

Разработка полностью биосовместимых металлических материалов для замены костной ткани является одним из наиболее перспективных направлений современного материаловедения, ставящего своей целью решение прикладных медицинских задач.

Известно, что кристаллографический ресурс обратимой деформации в сплавах системы Ti-Zr-Nb с повышенным содержанием циркония после термомеханической обработки (ТМО) может достигать 8% [1]. Однако для его реализации при комнатной температуре необходимо обеспечить материалу оптимальный фазовый состав. Оптимизация химического состава является эффективным способом управления фазовым составом. Таким образом, целью данной работы является разработка нового сверхупругого титанового сплава медицинского назначения, а также изучение его химического и фазового составов.

Методом вакуумно-дугового переплава был получен лабораторный слиток состава Ti-44Zr-10Nb (ат.%). Полученный сплав был подвержен гомогенизационному отжигу при 950 °С в течение 1 ч с закалкой в воду и последующей ТМО по схеме: холодная прокатка со степенью истинной деформации $\epsilon = 0,3$ и последующим отжигом при 550 °С и закалкой в воду. Химический состав изучали методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Средний химический состав сплава Ti-44Zr-10Nb составил: Ti-46,1±0,1, Zr-43,8±0,1, Nb-10,0±0,1, что подтверждает хорошее соответствие полученного состава номинальному. Размер зерен образца после гомогенизации исследовали методом оптической микроскопии. Средний размер зерна составил 427 ± 90 мкм. После проведения ТМО фазовый состав сплава был изучен методом рентгенофазового анализа (РФА). По результатам РФА был сделан вывод о том, что при комнатной температуре сплав представлен только β -фазой. Для более выраженного сверхупругого поведения материала отсутствие мартенситной фазы при комнатной температуре является предпочтительным.

Таким образом, исследуемый сплав обладает перспективным фазовым составом и представляет интерес для дальнейшего исследования особенностей микроструктуры и функциональных свойств.

Список литературы:

1. Н.У. Kim, S. Miyazaki, *Ni-Free Ti-Based Shape Memory Alloys*, Butterworth-Heinemann (2018) 57-59.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №20-63-47063).

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ TWIP СТАЛЕЙ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР

Борисов С.И.*, Долженко П.Д., Тихонова М.С., Беляков А.Н., Кайбышев Р.О.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
*borisov.sg99@gmail.com

Высокомарганцевые стали с эффектом TWIP исследуются уже много лет. Они показывают превосходные свойства при растяжении в основном за счет деформационного двойникования. Двойникование является преобладающим механизмом деформации в интервале ЭДУ от 20 до 60 мДж/м². А в сталях класса TWIP температура оказывает существенное влияние на ЭДУ.

В качестве объекта исследования были выбраны две высокомарганцевые TWIP стали: Fe-0,6%С-17%Mn-0,05%Nb-1,5%Al и Fe-0,74%С-17%Mn. После выплавки стали подвергались отжигу и прокатке в лист при температуре 1150°C. Затем проводилась прокатка в лист при температуре 1100°C с последующей прокаткой при 800°C. Общее обжатие при каждой прокатке составляло 60%, образцы охлаждались в воде. Испытания на растяжение проводились со скоростью деформации 10⁻³с⁻¹ при комнатной температуре, при 300°C и при 500°C на разрывной машине Instron 5882. Для выявления тонкой структуры сталей проводились электронно-микроскопические исследования с использованием просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) марки JEOL JEM-2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Результаты испытаний на растяжение показали, что в стали Fe-17Mn-0.05Nb-1.5Al-0.6C при температурах испытаний 25°C и 300°C предел текучести ниже на ~130 МПа и ~80 МПа, чем в стали Fe-17Mn-0.74C. Однако наблюдается обратная зависимость для предела прочности: так при комнатной температуре в стали Fe-17Mn-0.05Nb-1.5Al-0.6C предел прочности на 50 МПа больше, а при 300°C на 30 МПа меньше. При температуре 500°C различий между прочностными свойствами не наблюдается. В стали Fe-17Mn-0.74C наблюдается наибольшее значение относительно удлинения при всех температурах испытания.

Повышение температуры испытания до 300°C и 500°C приводит к резкому падению механических свойств в исследуемых сталях и одновременно с этим сведению эффекта деформационного упрочнения до минимума. Это связано с повышением ЭДУ при повышении температуры и как следствие переходом металла из зоны двойникования в более приоритетную зону скольжения [1,2].

Данное суждение так же подтверждается и ПЭМ-исследованиями. По результатам просвечивающей электронной микроскопии видно, что при температуре испытаний 500°C на растяжение сталь имеет дислокационную структуру, а плотность дислокаций превышает 10¹⁵ м⁻². В то время как при комнатной температуре преобладает двойниковая структура.

Список литературы:

1. Remy L. Temperature variation of the intrinsic stacking fault energy of a high manganese austenitic steel //Acta metallurgica. – 1977. – Т. 25. – №. 2. – С. 173-179.
2. Shternern V., Timokhina I. B., Beladi H. On the work-hardening behaviour of a high manganese TWIP steel at different deformation temperatures //Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Т. 669. – С. 437-446.

ЭФФЕКТ ПОРТЕВЕНА-ЛЕ ШАТЕЛЬЕ В АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ Fe-18%Cr-8%Ni

Борисова Ю. И.^{*}, Юзбекова Д. Ю., Могучева А. А.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия

^{*}borisovayuliya94@mail.ru

В связи с растущим спросом на специальные стали для производства современного оборудования, разработки высокопрочных аустенитных сталей являются предметом исследований во всех странах мира. Данные стали являются предметом тщательных исследований из-за их исключительной коррозионной стойкости и механических свойств. В частности, метастабильные аустенитные стали, такие как нержавеющая сталь типа Fe-18%Cr-8%Ni, демонстрируют превосходные свойства при растяжении. Однако, при повышенных температурах наблюдается проявление неустойчивости пластического течения, что приводит к появлению нежелательной шероховатости на поверхности изделий. Целью данной работы является исследование проявления эффекта Портевена-Ле Шателье в стали аустенитного класса Fe-18%Cr-8%Ni.

Слитки исследуемой стали Fe-18%Cr-8%Ni были прокованы при температуре 1180°C. Далее была проведена термическая обработка, включающая нагрев до температуры 1150°C, выдержку при этой температуре в течение 1 часа с последующим охлаждением в воде. Структура исследуемой стали после стандартной термической обработки представляла собой полностью отожженные аустенитные зерна со средним размером ~ 14 мкм и высокой плотностью дислокаций внутри зерен. Электронно-микроскопические исследования показали наличие частиц Nb(C, N) внутри аустенитных зерен.

Механические испытания на одноосное растяжение при скорости деформации $1 \times 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ показали, что в интервале температур от 530°C до 680°C деформация образцов сопровождается неустойчивостью пластического течения, проявляющейся в виде зубчатости на деформационных кривых. При температуре 530°C и 560°C после скачков характерных для типа А наблюдаются редкие не глубокие скачки характерные для типа В. В интервале температур 590-680°C на деформационных кривых наблюдается только тип А прерывистого течения, выражающийся в резком возрастании напряжений течения и их резком спаде. Стоит отметить, что при увеличении температуры испытания частота скачков напряжения течения увеличивается, а их амплитуда уменьшается. Температура эксплуатации сталей данного типа составляет ~620°C. При данной температуре, в интервале скоростей деформации от $1 \times 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ до $1 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$, также наблюдается проявление эффекта ПЛШ. При более высоких скоростях деформации наблюдается зубчатость характерная для типа А, а при низкой скорости деформации зубчатость типа В. Известно, что зубчатость типа А является следствием плоского скольжения, выражающегося в распространении деформационных полос на большие расстояния, и связана с взаимодействием подвижных дислокаций и атомов внедрения, таких как азот и углерод.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 20-58-53053 с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ «БелГУ».

УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ И ХРУПКО-ВЯЗКИЙ ПЕРЕХОД В 9%CR ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ ЛЕГИРОВАННОЙ ТАНТАЛОМ

Бражников И.С.* , Ткачев Е.С.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
*1216318@bsu.edu.ru

Ударная вязкость является важной механической характеристикой мартенситных сталей, так как она позволяет оценить стойкость структуры стали противостоять образованию и распространению трещин при динамическом нагружении.

В работе, в качестве материала исследования, была использована жаропрочная 9%Cr сталь мартенситного класса Fe-9Cr-3Co-2W-Mo-V-Nb-B-Ta. Обработка стали включала гомогенизационный отжиг при 1200°C, нормализацию при температуре 1050°C в течение 0,5 часа, и отпуск при температурах до 780°C. Исследования фрактографии поверхности разрушенных образцов проводились с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Quanta 600 при ускоряющем напряжении 20кВ с использованием детектора обратно-рассеянных электронов.

Ударная вязкость была исследована после отпуска при температурах в интервале 450-780°C. Установлено, что сталь показывает самую низкую ударную вязкость 5,1 Дж/см² после отпуска при температуре 500°C, что указывает на явление обратимой отпускной хрупкости. Значительное повышение ударной вязкости наблюдается только при увеличении температуры отпуска выше 765°. После отпуска при температуре 780°C ударная вязкость составила 119,5 Дж/см².

Анализ фрактографии поверхности разрушенных образцов Шарпи показал, что стальные образцы, отпущенные при температурах 750 и 765°C, разрушаются по хрупкому механизму. Тем не менее, размер фасеток скола образца, отпущенного при 750°C, меньше и они имеют более сложную форму, что указывает на частое отклонение направления распространения трещины, что приводит к повышению ударной вязкости. Поверхность разрушения в зоне распространения трещины образца, отпущенного при 780°C характеризуется наличием вязких участков с ямочным изломом наряду с плоскими фасетками скола. Это указывает на смешанный механизм разрушения.

Для определения температуры хрупко-вязкого перехода ($T_{ХВП}$) и температуры, соответствующей 50% вязкого излома, исследуемая сталь, подверженная отпуску при выбранной оптимальной температуре 780°C, была испытана на ударную вязкость при температуре испытаний от -25 до 100 °C. $T_{ХВП}$, рассчитанная как средняя точка между нижней и верхней «полочкой», для исследуемой стали составила 34°C.

Для определения температуры, соответствующей 50% вязкого излома, был посчитан процент вязкой составляющей для образцов, испытанных при температурах от -25 до 100°C. $T_{ХВП}$, определенная как температура, соответствующая 50% вязкого излома, составила 29°C.

Таким образом, значение $T_{ХВП}$ рассчитанной по ударной вязкости (34°C) и по доли вязкой составляющей на поверхности образцов (29°C) демонстрируют хорошее соответствие.

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО НИТРИДА (HfNbTaTiZr)N МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

Буйневич В.С.*, Седегов А.С., Воротыло С., Московских Д.О.

Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС»,
Ленинский проспект, д.4, г. Москва, 119049, Россия
*buynevich.vs@misis.ru

Высокоэнтропийные керамики (ВЭК) (карбиды, нитриды, бориды, силициды и т.д.) благодаря уникальному сочетанию физико-химических свойств представляют большой интерес как для фундаментальных исследований, так и для практического применения в различных отраслях промышленности. Большинство работ в области ВЭК посвящено получению высокоэнтропийных карбидов и боридов и изучению их свойств, при этом нитриды остаются по-прежнему малоизученными и были получены лишь в виде тонких плёнок. Также, основываясь на знании свойств бинарных нитридов (высокая твердость и прочность, сверхвысокие температуры плавления, высокая теплопроводность, термическая и химическая стабильность) и корреляции этих свойств с концентрацией валентных электронов, предполагается, что высокоэнтропийные нитриды, по сравнению с бинарными соединениями, будут обладать более высокими механическими свойствами из-за повышенной концентрации валентных электронов, что делает их особенно привлекательными для различных передовых применений [1]-[3].

В данной работе был впервые получен объёмный высокоэнтропийный нитрид (HfNbTaTiZr)N посредством трёхстадийной технологии получения ВЭК, включающей в себя самораспространяющийся высокотемпературный синтез в атмосфере азота механически активированных металлических прекурсоров и последующую консолидацию методом искрового плазменного спекания. В качестве основы была выбрана тройная керамика $Ti_{0,5}Ta_{0,5}N$, обладающая наиболее высоким значением твердости 31 ГПа среди всех нитридов переходных металлов [3]. Однако для достижения эффекта стабилизации энтропии были дополнительно введены три металлических компонента (Hf, Nb, Zr). Полученный (HfNbTaTiZr)N обладает высокими значениями твердости и трещиностойкости, которые значительно превосходят значения, ожидаемые для данной керамики.

Список литературы:

1. *Valence electron concentration as an indicator for mechanical properties in rocksalt structure nitrides, carbides and carbonitrides / K. Balasubramanian e.a. // Acta Mater. – 2018. – № 152. – P. 175-185.*
2. *Sangiovanni, D. G. Electronic mechanism for toughness enhancement in $Ti_x M_{1-x} N$ ($M = Mo$ and W) / D. G. Sangiovanni, V. Chirita, L. Hultman // Phys. Rev. – 2010. – № 81. – P. 104107.*
3. *Sangiovanni, D. G. Supertoughening in B1 transition metal nitride alloys by increased valence electron concentration / D. G. Sangiovanni, L. Hultman, V. Chirita // Acta Mater.. – 2011. – № 59. – P. 2121-2134.*

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-79-10215).

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОЙ КЕРАМИКИ (Nb,Ti,Zr,Hf)C

Дакунь В. ¹, Мировой Ю.А. ^{1,2}, Бурлаченко А.Г. ², Дедова Е.С. ^{1,2*}, Буякова С.П. ^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия;

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия
*lsdedova@yandex.ru

Высокоэнтропийные материалы представляют собой новый класс материалов, вызывающий значительный научный и практический интерес. Теория высокоэнтропийных растворов заключается в том, что выигрыш в энтропии смешения способствует формированию одной кристаллической фазы, представляющей из себя неупорядоченный твердый раствор замещения, при этом подавляется образование термодинамически конкурирующих промежуточных интерметаллидных соединений. На сегодняшний день концепция высокой энтропии успешно используется при исследовании керамических материалов. Максимальная конфигурационная энтропия обеспечивает уникальные свойства высокоэнтропийной керамики, в том числе высокие механические свойства и термодинамическую стабильность при температурах ~ 2000 °С. Подавляющее большинство работ, посвященных высокоэнтропийной керамике на основе карбидов, направлено на получение твердых растворов и изучение их свойств. Однако наблюдается недостаток информации, касающейся структурообразования высокоэнтропийных твердых растворов. Целью работы является исследование структурообразования высокоэнтропийной керамики на основе карбидов.

Материалом для исследований выступил высокоэнтропийный карбид металлов (Ti,Zr,Nb,Hf)C, полученный из порошков TiC, ZrC, HfC и NbC в эквимолярном соотношении. Приготовление порошковых смесей с их одновременной активацией производилось в планетарной мельнице-активаторе в среде аргона в течение 3 минут. Образцы керамических композитов получены методом горячего прессования при в интервале температур от 1400°С до 1900 °С с и давлением 50 МПа в атмосфере аргона. Фазовый состав керамических материалов анализировался по рентгеновским дифрактограммам.

На дифрактограммах системы TiC–ZrC–HfC–NbC наблюдалось исчезновение рефлексов исходных карбидов при повышении температуры от 1400 до 1900 °С. Установлено, что в пики ZrC и TiC не регистрировались на рентгенограммах образцов, полученных при 1500 °С, а рефлексы HfC отсутствовали на рентгенограммах образцов, полученных при температуре 1700 °С. Монофазный твердый раствор формировался при спекании под давлением при температуре 1700 °С. Установлено, что карбид гафния выступает в качестве матричного материала, в кристаллической решетке которого происходит замещение атомов гафния элементами растворенных карбидов с последующим формированием высокоэнтропийного твердого раствора. Фазовый состав керамики (Ti,Zr,Nb,Hf)C был представлен твердым раствором замещения с ГЦК решеткой по типу каменной соли ($a = 4,5195 \text{ \AA}$).

Работа проводилась в рамках Государственного задания ИФПМ СО РАН (программа III.23.2.3).

СИНТЕЗ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ $\text{BiSbTe}_{1.5}\text{Se}_{1.5}$

Васильев А. Е., Япрынцеv М. Н.* , Иванов О. Н., Жежу М.В.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Российская Федерация
*yaprintsev@bsu.edu.ru

Актуальная проблема современного материаловедения- разработка новых полупроводниковых материалов, обладающих повышенной термоэлектрической эффективностью (ZT). Высокий коэффициент термо-э.д.с, высокая удельная электропроводность и низкая теплоемкость-условия которым должен удовлетворять эффективный термоэлектрический материал. Одним из методов повышения термоэлектрической добротности термоэлектрических соединений является снижение решеточной теплопроводности¹. Создание высокоэнтропийных соединений – эффективный способ снизить теплопроводность² и улучшить термоэлектрические свойства. Так, в данной работе были синтезированы составы на основе $\text{BiSbTe}_{1.5}\text{Se}_{1.5}$ с добавлением в состав меди Cu сольвотермально-микроволновым методом. Данные рентгенофазового анализа показали, что все образцы порошков являются однофазными и соответствуют ромбоэдрической структуре ($R\bar{3}m$) Компактирование полученных порошков осуществляли методом искрового плазменного спекания на установке SPS-25/10, с параметрами компактирования 40 МПа и 5 минут выдержки. В диапазоне 300-600К были измерены термоэлектрические свойства (коэффициент Зеебека, электрическое сопротивление, теплопроводность).

Список литературы:

1. Poudel B. High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys / B. Poudel, Q. Hao, Y. Ma, Y. Lan, A. Minnich, B. Yu, et al. // *Science*. – 2008. – V. 320. – P. 634-638.
2. Z.Fan Thermoelectric high-entropy alloys with low lattice thermal conductivity / Z.Fan, H.Wang, Y.Wu, X. J. Liu and Z.P. Lu // *RSC Advances*. . – 2016. – V. 6. – P. 52164-52170

ВЛИЯНИЕ МЕЖПЛАСТИНЧАТОГО РАССТОЯНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА НА ОСНОВЕ ГАММА АЛЮМИНИДА ТИТАНА ЛЕГИРОВАННОГО БОРОМ И ГАДОЛИНИЕМ

Соколовский В. С. *, Панов Д.О., Волокитина Е.И., Салищев Г.А.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Россия
*sokolovskiy@bsu.edu.ru

Современные β -затвердевающие сплавы на основе гамма алюминидов титана являются перспективными материалами для применения в качестве высокотемпературных конструкционных материалов, особенно в авиакосмической промышленности [1]. Сплавы на основе гамма алюминидов титана демонстрируют высокие удельные характеристики, жаропрочность, термическую стабильность и сопротивление окислению [1]. Такие свойства сплавов на основе интерметаллидов обусловлены упорядоченной структурой фаз и наличием доли ковалентной связи. Одним из самых главных препятствий для применения данного класса сплавов является низкая пластичность при комнатной температуре [1, 2].

Повышение механических свойств при комнатной температуре, в частности прочности и пластичности возможно при снижении размеров пластинчатых ($\alpha_2+\gamma$) колоний. Достижение данной цели возможно методом всесторонней деформации при повышенных температурах. В процессе деформации происходит трансформация пластинчатой структуры в глобулярную. Присутствие в сплаве частиц обогащенных гадолинием и боридов позволяет сохранить малый размер зерен при дальнейшей термической обработке.

Проведено исследование влияния межпластинчатого расстояния в сплаве Ti-43,2Al-1,9V-1,1Nb-1,0Zr-0,2Gd-0,2B на механические свойства при комнатной температуре. Методом всесторонней изотермическойковки ниже температуры эвтектоидного превращения получена однородная мелкозернистая структура сплавов с размером зерен/частиц ~ 1 мкм. После термической обработки в однофазной α -области и последующего старения в ($\alpha_2+\gamma$)-фазовой области получен набор структурных состояний с межпластинчатым расстоянием (λ) $\sim 10, 100$ и 800 нм. В результате механических испытаний на растяжение установлено, что при увеличении межпластинчатого расстояния предел текучести снижается с 820 до 620 МПа. При этом максимальная прочность и относительное удлинение были получены при межпластинчатом расстоянии 100 нм и составили 860 МПа и $2,9\%$, соответственно. Аналогичные зависимости были получены после испытаний на сжатие. Анализ деформационного рельефа и тонкой структуры сплава после деформации указывает на равномерное протекание пластической деформации при $\lambda \sim 100$ нм. В случаях $\lambda \sim 10$ нм и ~ 800 нм наблюдается локализация пластической деформации на границах пластинчатых колоний и в пластинах γ -фазы.

Список литературы:

1. *Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology* / F. Appel – Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Weinheim, 2011. – 745 p.
2. *Titanium and Titanium Alloys* / Leyens C. and Peters – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003. – 532 p.

ДВОЙНИКОВАНИЕ И ЕГО РОЛЬ В УПРОЧНЕНИИ И РАЗРУШЕНИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ СОСРFE MN NI ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА

Выродова А.В.*, Победенная З.В., Киреева И.В., Чумляков Ю.И.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия
*wirodowa@mail.ru

На монокристаллах эквиатомного высокоэнтропийного сплава (ВЭС) CoCrFeMnNi с низкой величиной энергии дефекта упаковки $\gamma_0 = 0.02$ Дж/м², ориентированных вдоль $[\bar{1}11]$, $[\bar{1}44]$, $[\bar{1}23]$ и $[011]$ направлений, исследовано влияние двойникования на вид кривых течения «напряжение-деформация» ($\sigma(\epsilon)$), коэффициент деформационного упрочнения $\Theta = d\sigma/d\epsilon$, пластичность и разрушение при деформации растяжением. Установлено, что сильная ориентационная зависимость кривых течения $\sigma(\epsilon)$, $\Theta = d\sigma/d\epsilon$, пластичности и разрушения в монокристаллах CoCrFeMnNi ВЭС наблюдается при температуре жидкого азота, когда двойникование является основным механизмом пластической деформации.

Показано, что при 77 К при развитии двойникования преимущественно в одной системе на кривых течения $\sigma(\epsilon)$ наблюдается эффект разупрочнения, а при развитии двойникования в нескольких системах одновременно со скольжением имеет место эффект упрочнения. Максимальный эффект деформационного упрочнения при развитии двойникования в двух системах получен в $[\bar{1}11]$ - и $[\bar{1}44]$ - кристаллах эквиатомного CoCrFeMnNi ВЭС. Максимальный эффект разупрочнения имеет место в $[011]$ - кристаллах с начала деформации CoCrFeMnNi ВЭС, когда двойникование развивается в одной системе. Развитие двойникования преимущественно в одной системе подавляет множественность скольжения и смещает образование шейки по условию Консидера к большим деформациям, что приводит к увеличению протяженности стадии линейного упрочнения и пластичности кристаллов $[\bar{1}23]$ и $[011]$ до 100 – 115 %. Развитие двойникования в нескольких системах при 77 К сопровождается уменьшением пластичности в два раза.

Впервые показано, что достижение высоких значений деформационного упрочнения при множественном двойниковании, подавление скольжения и релаксации напряжений за счет скольжения или двойникования при пересечении тонких двойников приводит к разрушению квазисколом в $[\bar{1}44]$ - кристаллах CoCrFeMnNi ВЭС при 77 К. При уменьшении деформационного упрочнения за счет развития двойникования преимущественно в одной системе одновременно со скольжением уровень напряжений для хрупкого разрушения в $[\bar{1}11]$ -, $[\bar{1}23]$ - и $[011]$ - кристаллах CoCrFeMnNi ВЭС не достигается, поскольку раньше достигаются напряжения для формирования шейки по условию Консидера, и эти кристаллы разрушаются вязко при 77 К.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-19-00217.

QUANTITATIVE ANALYSIS OF $\{100\}_{\text{Al}}$ PLATE/LATH AND $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$ ROD PRECIPITATES IN AN AGED AL-CU-MG-SI ALLOY USING TEM

M.R. Gazizov^{1*}, R. Holmestad², C.D. Marioara³, R. Kaibyshev⁴

¹ Laboratory of Mechanical Properties of Nanostructured Materials and Superalloys, Belgorod State University, Pobeda, 85, Belgorod, 308015, Russia;

² Department of Physics, Norwegian University Science and Technology (NTNU), Trondheim, 7491, Norway;

³ Materials and Nanotechnology, SINTEF Industry, Trondheim, 7465, Norway
*gazizov@bsu.edu.ru

Precipitate parameters, such as length, diameter and thickness of rationally oriented $\{100\}_{\text{Al}}$ plate/lath and $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$ rod precipitate in an age hardenable aluminum alloy have been examined quantitatively. The nano-scale plates/laths and rods were formed in Al-Cu-Mg-Si alloys during aging. An appropriate procedure of the plate- and rod-shaped precipitate separation was suggested to determine the parameters as well as their distribution histograms using bright-field (BF) and dark-field (DF) transmission electron microscopy (TEM) images taken in $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$ and $\langle 110 \rangle_{\text{Al}}$ zone axes. Equations to estimate the precipitate number density and volume fraction have been found.

Acknowledgement: This work was financially supported by the Faculty of Natural Sciences at the Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Project No. 81617879 and The Ministry of Education and Science and Council on Grant No. 075-15-2019-994. The authors acknowledge support from The Research Council of Norway (NFR), and industrial partners through the following projects 247783, 247598 and 237885. The TEM work was carried out on the NORTEM infrastructure (NFR 197405) at the TEM Gemini Centre, Trondheim, Norway. The authors are grateful to the staff of the TEM Gemini Center at NTNU and the Joint Research Center at Belgorod State University for their assistance with the structural and mechanical characterizations.

ОЦЕНКА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ LIPSS СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ

Газизова М. Ю.¹, Смирнов Н. А.², Кудряшов С.И.², Чэнь Ц.², Ахмадеев Ю.Х.³,
Гончаров И.Ю.¹, Шугуров В.В.³, Прокопенко Н.А.³

¹ ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия;

² Физический институт им П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия;

³ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия
SmolyakovaMarina@mail.ru

Известно, что при трении реальная площадь контакта значительно меньше фактической, и она играет важную роль в определении трибологических свойств фрикционной пары. Существует множество теоретических работ по расчету реальной площади контакта и ее влиянию на величину коэффициента трения и на износостойкость материала/покрытия. Однако, на практике, особенно на производстве, как правило, использует только параметры шероховатости. В рамках данной работы была проведена оценка возможности сопоставления 3D параметров шероховатости и значений коэффициентов трения, полученных при трении со смазкой (смазка для режущего инструмента, моторное масло). За основу были взяты функциональные параметры шероховатости: S_{ci} (коэффициент заполнения материалом), S_{vi} (индекс удержания жидкости/коэффициент заполнения впадин) и S_{bi} (опорный индекс поверхности). В качестве объекта исследований было выбрано покрытие TiN, сформированное методом плазменно-ассистированного вакуумно-дугового напыления, с последующим структурированием поверхности лазером ультракороткой длительности. В результате на поверхности TiN были получены периодические поверхностные структуры (laser-induced periodic surface structure (LIPSS)). Сканирование поверхности лазером проводилось в двух направлениях: параллельное и крестообразное.

Сопоставление параметров шероховатости и полученных коэффициентов трения выявило следующие зависимости. При испытаниях образцов с параллельной структурой в моторном масле минимальный коэффициент трения наблюдался при повышенных значениях индекса опорной поверхности S_{bi} , т.е. когда площадь контакта больше. Напротив, при трении в масле для режущего инструмента снижение площади контакта позволяет понизить коэффициент трения, соответственно при низких значениях S_{bi} . При трении образцов с крестообразной структурой, как в моторном масле, так и в масле для режущего инструмента, увеличение значения коэффициента заполнения материалом S_{ci} приводит к снижению коэффициента трения. Также наблюдается зависимости коэффициента трения с коэффициентом заполнения впадин S_{vi} – чем ниже S_{vi} , тем меньше коэффициент трения. Таким образом, можно сказать, что в случае фрикционных испытаний крестообразных структур параметры удержания жидкости являются определяющими. Различия в зависимости влияния функциональных параметров шероховатости на величину коэффициента трения для моторного масла и масла для режущего инструмента, объясняются различной вязкостью смазки и особенностями присадок, используемых в них.

Работа проводилась в рамках гранта РНФ № 19-79-00295.

EFFECT OF THERMOMECHANICAL TREATMENT ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF A LOW-ALLOY LOW-CARBON STEEL

Dolzhenko A.S.^{*}, Belyakov A.N., Kaibyshev R.O.

Belgorod State University, Belgorod, Russia

^{*}dolzhenko_a@bsu.edu.ru

High-strength low-alloy steels are one of the most widely used classes of materials. One of the significant disadvantages of such steels is their relatively high temperature of the ductile-brittle transition, below which the impact toughness of the steels drops sharply, i.e., the steel becomes brittle, which can lead to a sudden catastrophic failure of the construction. Currently, special attention is paid to the development of structural steels and alloys adapted to the climatic conditions of the Far North, for use in facilities for the production, storage and transportation of gas and oil on the Arctic shelf, as well as for constructions for various engineering applications, operated under low temperature conditions. In this regard, methods for improving the mechanical properties, primarily the impact toughness at low temperatures, of low-alloy high-strength steels are of particular interest.

A low-carbon low-alloy steel with a chemical composition of Fe – 0.03C – 0.23Si – 0.19Cr – 1.54Mn – 0.04Nb – 0.016Al – 0.12Mo – 0.21V(all in mass%), was subjected to initial heat treatment (annealing at 1423 K for 1 hour followed by oil quenching) and, then, rolling at 923 K to a total strain of 1.5 (tempforming).

The developed microstructure of the investigated steel is characterized by grain elongation along the rolling direction. The steel samples subjected to tempforming exhibit impact toughness of KCV = 410 J/cm² at room temperature. A decrease in the test temperature to 233 K leads to a slight decrease in the KCV value to 340 J/cm². It should be noted that the impact specimens do not completely destroyed even at a test temperature of 233 K, suggesting higher real values of impact strength. Upon further cooling to 77 K, the impact toughness decreases to 19 J/cm². The high fracture toughness is attributed to delamination, when fracture is accompanied by splitting along the rolling plane with high energy absorption. Both the yield strength and the ultimate tensile strength increase with a decrease in test temperature. The ultimate strength at room temperature is 797 MPa, and at 77 K the ultimate strength increases to 1198 MPa. Total elongation comprises 13.5% at a temperature of 293 K. A decrease in temperature to 183 K leads to increase in elongation to 17.9%. Then, total elongation decreases to 11.6% as test temperature decreases to 77 K.

The study was financially supported by the Russian Science Foundation (Project No. 20-19-00497). Authors are grateful to the staff of the Joint Research Center, Technology and Materials, of the Belgorod State National Research University.

EFFECT OF MULTIPLE FORGING AND ANNEALING ON MECHANICAL PROPERTIES OF A HIGH-MANGANESE STEEL

Dolzhenko P.D.^{1*}, Valiev R.Z.², Belyakov A.N.¹, Bobruk E.V.², Tikhonova M.S.¹

¹Belgorod State University, Belgorod, Russia;

²Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

*dolzhenko.p@yandex.ru

Austenitic high manganese steels exhibiting the twinning-induced plasticity (TWIP) effect are of great interest in materials science and considered as advanced structural materials for a variety of critical applications. These steels are characterized by outstanding work hardening properties, which slow down the localization of deformation during tensile deformation and therefore provide high uniform elongation. These properties of steels with a high manganese content, that is, a combination of high strength and high ductility, make them a very attractive structural material for use in automobiles. An increase in the strength of structural steels can be achieved as a result of severe plastic deformation at room temperature (cold deformation). However, an increase in strength in this case can be accompanied by significant decrease in plasticity. Retention of a sufficiently high level of strength and an increase in plasticity can be achieved through the formation of fine-grained microstructure, which can be obtained as a result of special thermomechanical treatment combining deformation and annealing.

A high-manganese TWIP steel with a chemical composition of Fe-0.03C-28Mn-1.5Al (all in mass%) was subjected to homogenizing annealing at 1423 K for 1 hour followed by rolling at 1423 K and then to multiple forging at room temperature to a total strain of 2. After multiple forging, the samples were annealed at temperatures in the range from 673 to 1073 K for 30 minutes.

In the initial state, the investigated steel has a yield strength of 255 MPa, and elongation of 45%. The steel samples subjected to multiple forging demonstrate an increase in the strength properties with an increase in the total forging strain. The yield strength reaches 1260 MPa at total strain of 2. In contrast, elongation decreases with increasing total strain, approaching 5.3% at total strain of 2. After multiple forging to a total strain 2, the samples were annealed at temperatures of 673, 773, 823, 873, 973, 1073 K for 30 minutes. Annealing at 673 and 773 K does not lead to significant changes in mechanical properties. Further increase in the annealing temperature leads to a decrease in the strength and significant increase in plasticity. As a result of annealing at a temperature of 823 K, the yield stress comprises 880 MPa with total elongation of 15%. Annealing at a temperature of 973 K leads to a decrease in the yield stress to 465 MPa, while total elongation increases to 50%. Annealing at 1073 K leads to the values of strength and plasticity close to the initial state. The microhardness values significantly increase during multiple forging from 120 to 370 HV. Annealing at different temperatures affects the microhardness values in the same way as the yield strength. Namely, with an increase in the annealing temperature, the microhardness values decrease to values close to the initial state.

The reported study was funded by RFBR according to the research project №19-38-50113.

КОМПАКТИРОВАНИЕ Si_3N_4 С ДОБАВКАМИ Y_2O_3 И Al_2O_3 МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ ИЗ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Дрожилкин П.Д.¹, Андреев П.В.^{2*}, Алексеева Л.С.¹, Балабанов С.С.², Болдин М.С.¹, Каразанов К.О.¹

¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Россия;

² ФГБУН Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН, Нижний Новгород, Россия

*andreev@phys.unn.ru

Один из современных методов создания тугоплавких керамических композитов на основе Si_3N_4 методом искрового плазменного спекания (ЭИПС) заключается в предварительном нанесении ультратонких покрытия спекающей добавки на порошки нитрида кремния различной дисперсности. Разработка технологии плакирования ультратонкими (в пределе нанотолщинными) слоями оксидов требует оптимизации режимов осаждения, в том числе и решения проблемы предварительной де-агломерации Si_3N_4 .

Решение этой проблемы может быть достигнуто с применением осадительных методов, в основе которого лежит технологическая операция осаждения из растворов $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$ и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ слоев оксидов системы Y_2O_3 – Al_2O_3 на поверхность частиц нитрида кремния, находящихся при комнатной температуре во взвешенном состоянии в растворе нитратов.

В качестве исходных соединений использовался порошок α - Si_3N_4 (размер частиц не более 5 мкм, содержание β -фазы не более 5%), прекурсоры $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$ и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$. Расчет прекурсоров осуществлялся таким образом, чтобы содержание оксидов Y_2O_3 и Al_2O_3 находилось в мольном соотношении 3:5 (стехиометрия иттрий-алюминиевого граната), содержание спекающей добавки составляло 10% масс. смеси.

Синтез исходных смесей производился методами соосаждения в водном растворе, методом Печини (с добавлением лимонной кислоты), в желатиновой матрице и методом распылительной сушки. Для формирования оксидной фазы полученные в результате синтезов промежуточные продукты отжигали постадийно в течение 2–8 ч при температурах 300, 500, 800, 1000 °С с диспергированием в агатовой ступке между стадиями. Фазовые превращения в смеси изучались с использованием рентгенофазового анализа на каждом из этапов отжига, а также методом дифференциальной сканирующей калориметрии порошков. Для изучения микроструктуры порошков использовался метод растровой электронной микроскопии.

Компактирование керамических образцов проводилось методом ЭИПС при давлении 70 МПа со скоростью нагрева 100°С/с. В качестве исходных смесей для спекания были использованы как продукты после полного цикла отжига до 1000°С, так и продукты реакции после прокаливания при 300°С в течение 2 ч.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-60084.

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ВЭС СИСТЕМЫ CoCuFeNi ЛЕГИРОВАННЫХ МОЛИБДЕНОМ

Дьяченко И.И.^{1,2}, Глезер А.М.², Абаймов С.Г.¹, Батт Х.А.¹

¹Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия;

²НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

E-mail: Dchmail93@gmail.com

В настоящее время ВЭС пользуются большим интересом в научной среде, что обусловлено большим диапазоном механических свойств, потенциально достижимых в данных многокомпонентных системах [1,2]. Рассматриваемая система представляет интерес в области исследования влияния искажений кристаллической решётки на механические свойства под воздействием больших пластических деформаций. Данная работа посвящена исследованию возможности получения гомогенных сплавов системы CoCuFeNi+Mo методами порошковой металлургии [3], исследованию протекающих фазовых превращений в процессе синтеза и исследованию механических свойств полученных образцов.

В качестве объектов исследований в данной работе выступали сплавы на основе эквиатомной системы CoCuFeNi, легированные молибденом в концентрациях 1, 5 и 9% ат. Прекурсоры были синтезированы методом механического легирования порошков в шаровой планетарной высокоэнергетической мельнице. Фазовые превращения в материалах исследовались методами рентгенофазового анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии. Прекурсоры подвергались компактации методом искрового плазменного спекания. В процессе исследований были найдены оптимальные режимы спекания для обеспечения низкой пористости образцов. Механические свойства полученных образцов изучались методами одноосного растяжения и микротвёрдости по Виккерсу.

Список литературы:

1. D.B. Miracle & O.N. Senkov (2017) A critical review of high entropy alloys and related concepts, *Acta Materialia*, 122, 448-511.

2. Ming-Hung Tsai & Jien-Wei Yeh (2014) High-Entropy Alloys: A Critical Review, *Materials Research Letters*, 2:3, 107-123.

3. L. Liu et. al. Microstructure and the properties of FeCoCuNiSn_x high entropy alloys, *Mat. Sci. & Eng. A* (2012), 548, 64-68.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНФИЛЬТРАЦИИ ЧЕРЕЗ ИНЕРТНЫЙ РАСТВОРИТЕЛЬ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ БИОУГЛЕРОДНОГО КАРКАСА ОЛЬХИ С РАСПЛАВОМ Sn-Ti

Ершов А.Е.* , Прохоров Д.В., Строганова Т.С., Шмытько И.М.

Институт физики твердого тела Российской академии наук, Россия

*ershov@issp.ac.ru

Основной задачей материаловедения является получение материалов с оптимальными эксплуатационными характеристиками. Эта комплексная задача, включающая в себя подбор химического состава материалов, а также организацию его микроструктуры. Для этого используются как косвенные (химическая и термическая обработка и др.) так и прямые методы (аддитивные технологии, диффузионная сварка, и др.) или их комбинация. Одним из интересных и относительно новых способов обеспечения регулярной направленной структуры материалов является использование в качестве основы для их получения древесины (биоморфные материалы) [1].

За последние 20 лет для получения таких материалов применяли различные методы, такие как LSI (liquid silicon infiltration), PVD, CVD, и др., в результате чего были получены различные типы биоморфных карбидных и оксидных керамик и композитов. В последние годы был предложен еще один метод получения биоморфных материалов – инфильтрация через инертный растворитель [2-4]. На первом этапе данного метода древесина превращается в биоуглеродный каркас путем пиролиза в инертной атмосфере. На втором этапе полученный каркас помещают в расплав, состоящий из нереагирующего с углеродом растворителя, в котором растворен карбидообразующий элемент. Достоинствами данного метода является сравнительно низкие (~1000 °С) температуры процесса, что позволяет проводить его без использования специального оборудования, а также универсальность, т.е. возможность получать каркасы из различных карбидов (в частности тугоплавких) при подборе подходящих пар растворитель-карбидообразующий элемент [4]. В качестве растворителя могут использоваться расплавы солей [2, 3] или металлов. В последнем случае помимо карбидов также могут образовываться тройные соединения, в частности МАХ-фаза Ti_2SnC [4]. Данная работа посвящена исследованию данного процесса на примере взаимодействия биоуглеродного каркаса на основе ольхи с расплавами системы Sn-Ti, изучению кинетики процесса и термодинамической стабильности получаемых материалов.

Список литературы:

1. Greil P., Lifka T., Kaindl A. *Biomorphic cellular silicon carbide ceramics from wood: I. Processing and microstructure. Journal of the European Ceramic Society*, 1998. 18(14), 1961-1973.
2. Kan, Xiaoqing, et al. «Low-temperature fabrication of porous ZrC/C composite material from molten salts.» *Ceramics International* 43.8 (2017): 6377-6384.
3. Ding, J., et al. «Preparation of porous TiC/C ceramics using wooden template in molten salt media.» *Advances in applied ceramics* 112.3 (2013): 131-135.
4. Ershov A.E., Prokhorov D.V., Stroganova T.S., Shmytko I.M. *New method of obtaining heat-resistant biomorphic composites with carbide reinforcement. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 848, I. 1, 12017.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-03-01007.

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СПЛАВА ВТ6 ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Жидков М.В.^{1*}, Чень Ц.², Смирнов Н.А.², Кудряшов С.И.²

¹ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Россия;

²Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

*zhidkov@bsu.edu.ru

Одним из перспективных направлений в области создания новых технологий обработки материалов является поверхностная модификация металлов и сплавов концентрированными потоками энергии, в частности, лазерным излучением ультракороткой длительности. Развивающиеся при таком воздействии процессы, связанные с перестройкой структуры, физико-химическими превращениями и изменением топографии поверхности, зачастую позволяют придавать материалу уникальный комплекс свойств. У ряда материалов после такой обработки обнаружено проявление супергидрофобных [1] и супергидрофильных свойств [2], улучшение трибологических характеристик [3] и антибактериальных свойств поверхности [4].

В данном исследовании нами проведена поверхностная обработка образцов титанового сплава ВТ6 лазерными импульсами фемтосекундной длительности ($\tau = 320$ фс, $\lambda = 1030$ нм) на воздухе и в воде. Показано, что обработка с плотностью энергии одиночного импульса в диапазоне $0.08-1.2$ Дж/см² приводит к формированию на поверхности титанового сплава ВТ6 периодических поверхностных структур. Период структур зависит от параметров и среды обработки. Показано, что многоимпульсная обработка на воздухе позволяет придавать поверхности сплава ВТ6 сверхгидрофобные свойства ($\Theta \sim 150^\circ$). Методами рентгеноструктурного анализа проведена количественная оценка распределения остаточных напряжений 1 рода (макронапряжений) в приповерхностных слоях. Использовалась стандартная съемка по методу $\sin^2\psi$ и анализ в скользящем рентгеновском пучке (GIXD-метод). При анализе тонких слоев глубиной до 3.5 мкм установлено, что многоимпульсная обработка на воздухе с плотностью энергии 1.2 Дж/см² приводит к формированию растягивающих остаточных напряжений (до 150 МПа). Обработка с более низкими плотностями энергии 0.08 и 0.4 Дж/см² позволяет формировать сжимающие напряжения максимальной величиной 300 и 350 МПа, соответственно. Обнаружено, что фемтосекундная лазерная обработка может приводить к увеличению объемной доли β -фазы титана в приповерхностных слоях сплава ВТ6.

Список литературы:

1. A. Y. Vorobyev, C. Guo. *J. Appl. Phys.* 117, 033103 (2015).
2. Yu. R. Kolobov, M. Yu. Smolyakova, A. Yu. Kolobova, A. A. Ionin, S. I. Kudryashov, S. V. Makarov, P. N. Saltuganov, D. A. Zayarny, A. E. Ligachev. *Laser Phys. Lett.* 11, 125602 (2014).
3. J. Bonse, R. Koter, M. Hartelt, D. Spaltmann, S. Pentzien, S. Höhm, J. Krüger. *Appl. Phys. A.* 117, 103 (2014).
4. A. Jaggesar, H. Shahali, A. Mathew, P. K. D. V. Yarlagadda. *J. Nanobiotechnol.* 15, 64 (2017).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (Соглашение № 19-79-00257) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ «БелГУ».

СОЗДАНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ОКСИДНЫХ ФАЗ СО СТРУКТУРОЙ МАГНЕТОПЛЮМБИТА

Живулин В. Е.*, Трофимов Е. А., Стариков А. Ю., Гудкова С. А.,
Жеребцов Д. А., Зайцева О. В., Винник Д. А.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия
*splav.zlat@mail.ru

Цель наших исследований – изучение возможности создания высокоэнтропийных фаз со структурой магнетоплюмбита, т.е. полизамещённых твёрдых растворов, в которых стабилизации их структуры способствует высокая конфигурационная энтропия смешения компонентов, а также исследование структуры полученных фаз и их характеристик [1-4].

В процессе экспериментальных работ разными методиками получены и исследованы более 150 экспериментальных образцов различного состава.

Наиболее интересные результаты получены при исследовании систем: $BaFe_6(AlTiCrGaInCu)_6O_{19}$; $(BaSrCaLa)(FeTiAlMnCoInGaCr)_{12}O_{19}$; $BaFe_6(TiCoGaInCr)_6O_{19}$. В ходе проведённых работ были исследованы образцы этих систем различного количественного состава. Рентгенофазовый анализ образцов позволил подтвердить фазовую чистоту созданных материалов. На основе полученных дифрактограмм проведен расчет параметров кристаллической решётки исследуемых фаз и сделано заключение о том, что данные кристаллические структуры относятся к той же группе, что и структура магнетоплюмбита (P6(3)/mmc).

Исследованы магнитные и электрические характеристики ряда полученных в ходе исследования монофазных образцов.

Анализ хода и результатов проведённых экспериментов позволил сделать новые важные выводы об оптимальных методиках синтеза кристаллов высокоэнтропийных фаз со структурой магнетоплюмбита.

Результаты, полученные в рамках проведённых исследований, послужат основой для создания новых перспективных для применения в различных областях современной электроники функциональных материалов на базе высокоэнтропийных фаз со структурой магнетоплюмбита.

Список литературы:

1. Vinnik D.A., Zhivulin V.E., Trofimov E.A. et al. Extremely polysubstituted magnetic material based on magnetoplumbite with a hexagonal structure: synthesis, structure, properties, prospects, *Nanomaterials*, 2019, vol. 9, is. 4, 559.
2. Vinnik D.A., Trofimov E.A., Zhivulin V.E. et al. High-entropy oxide phases with magnetoplumbite structure, *Ceramics International*, 2019, vol. 45, is. 10, pp. 12942-12948.
3. Vinnik D.A., Trofimov E.A., Zhivulin V.E. et al. The new extremely substituted high entropy $(Ba,Sr,Ca,La)Fe_{6-x}(Al,Ti,Cr,Ga,In,Cu,W)_xO_{19}$ microcrystals with magnetoplumbite structure, *Ceramics International*, 2020, vol. 46, is. 7, pp. 9656-9660.
4. Vinnik D.A., Trukhanov A.V., Podgornov F.V. et al. Correlation between entropy state, crystal structure, magnetic and electrical properties in M-type Ba-hexaferrites, *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, vol. 40, is. 12, pp. 4022-4028.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-73-10049).

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИОННОГО ПУЧКА

Жидков М. В.^{1*}, Газизова М. Ю.¹, Лигачев А. Е.², Ремнев Г. Е.³

¹ ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Россия;

² Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия

³ НИУ «ТПУ», г. Томск, Россия

*zhidkov@bsu.edu.ru

Поверхностная обработка металлов и сплавов потоками ионов успешно применяется для улучшения их эксплуатационных характеристик: твердости, износостойкости, коррозионных свойств и т.д. В данной работе мы исследовали влияние обработки мощными импульсными ионными пучками (МИИП) на изменение структуры и коррозионных свойств аустенитной стали 12Х18Н10Т.

Поверхностную обработку образцов проводили в Томском политехническом университете на установке «ТЕМП-4М» [1] потоком ионов C^{n+} с энергией однозарядных ионов 250 кэВ при давлении остаточных газов внутри камеры $(4-5) \cdot 10^{-2}$ Па. Плотность мощности одиночного импульса составляла $\sim 10^7$ Вт/см². Установлено, что облучение МИИП может приводить к появлению на поверхности стали дефектов типа кратеров и модификации приповерхностного слоя с образованием более равноосной зеренной структуры с высокой долей большеугловых границ зерен. Обнаружено улучшение стойкости стали к межкристаллитной коррозии после поверхностной обработки МИИП.

Список литературы:

1. Remnev G.E., Shulov V.A. *Application of high-power ion beams for technology. Laser and Particle Beams*. 1993. V. 11. № 4. P.707-731.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 20-08-00907 с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ «БелГУ».

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ОКСИДНЫХ ФАЗ СО СТРУКТУРОЙ ПЕРОВСКИТА

Зайцева О. В.*, Гудкова С. А., Трофимов Е. А., Живулин В. Е.,
Стариков А. Ю., Винник Д. А.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия
*nikonovaolga90@gmail.com

Целью наших исследований стало получение образцов новых высокоэнтروпийных оксидных фаз со структурой перовскита для систем, которые ранее не становились объектом исследования с позиций создания высокоэнтропийных фаз, а также исследование состава, структуры и свойств полученных образцов [1]. В отличие от работ по получению частично замещённых перовскитов, в ходе наших работ отобранные системы изучены, прежде всего, в области, в которой энтропия смешения достигает максимума – т.е. в области, где концентрации основных компонентов одного типа (А или В для формулы ABO_3) близки к эквимолярным.

В ходе серий предварительных экспериментов определяли оптимальную температуру твердофазного синтеза. Для этого образцы заданного состава термообработывали при температурах от 1000 до 1400 °С с интервалом 50 °С в атмосфере воздуха в течение 5 часов. Затем полученные образцы исследовали посредством электронного микроскопа. Критерием того, что температура синтеза оптимальна, считали величину и форму образовавшихся кристаллов. Необходимо было подобрать температуру, которая с одной стороны обеспечивала бы образование достаточно крупных кристаллов высокоэнтропийных перовскитных фаз с характерной формой и с другой стороны не приводила бы к оплавлению кристаллов.

Найденные таким образом оптимальные температуры использовали в ходе термообработки образцов основной серии. По окончании термообработки образцы охлаждали, после чего исследовали излом таблеток, прежде всего, с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM7001F, снабжённого рентгеновским спектрометром Oxford INCA X-max 80 для элементного анализа образцов. Также с целью исследования структуры полученные образцы исследовали методом рентгенофазового анализа с помощью рентгеновского порошкового дифрактометра Rigaku Ultima IV с $Cu\ K\alpha$ -излучением.

В общей сложности в процессе экспериментальных работ разными методиками получены и исследованы 110 экспериментальных образцов различного состава. Получены и проанализированы новые данные о структуре и фазовом составе образцов.

Главным результатом исследований, является демонстрация возможности синтеза нового класса материалов – высокоэнтропийных перовскитов, составы которых ранее не были представлены в литературе, в системах, в которых ранее высокоэнтропийные перовскиты не синтезировали.

Список литературы:

1. Vinnik D.A., Trofimov E.A., Zhivulin V.E. et al. High entropy oxide phases with perovskite structure, *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, is. 2, 268.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-73-10046).

**ON THE EXTRAORDINARY PRECIPITATION IN AN AL–CU–MG ALLOY
SUBJECTED TO FRICTION STIR WELDING**

Zuiko I. *, Malopheyev S., Mironov S., Kaibyshev R.

Laboratory of Mechanical Properties of Nanostructured Materials and Superalloys, Belgorod
National Research University. Belgorod, Pobeda str. 85, Russia

*zuiko_ivan@bsu.edu.ru

The work deal with FSW of cold rolled AA2519. Non-uniformity distribution of all second phase precipitates (including coherent θ'' and non-coherent θ) was shown *via* TEM-technique. Nucleation of stable θ -phase along with decreased dislocation density lead to drop (~ 60 HV_{0.2}) in microhardness of nugget zone.

СВС-МЕТАЛЛУРГИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ЛИТЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Co-Cr-Fe-Ni-Mn-(X)

Д.М. Икорников, В.Н. Санин, О.А. Голосова, В.И. Юхвид

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова
Российской академии наук,
142432 г. Черноголовка, М.О., ул. Академика Осипьяна д.8
E-mail: denis-ikornikov@yandex.ru

Новым и привлекательным подходом к разработке новых сплавов, которые в перспективе могли бы заменить ряд существующих коммерческих сплавов, является использование концепции высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) отличительной чертой которых является присутствие как правило 5 и более элементов с эквитонной концентрацией. Одними из наиболее перспективных ВЭС на основе системы CoCrFeNiMn с привлекательным комплексом свойств могут являться комплексно легированные и структурно упрочненные ВЭС. Весь спектр материалов на основе ВЭС и их возможных свойств до настоящего времени не раскрыты.

В настоящей работе исследована возможность получения, ВЭС на основе системы CoCrFeNiMn-(X) в режиме горения, методами центробежной СВС-металлургии [1]. Впервые отработаны химико-технологические приемы модифицирования, литого CoCrFeNiMn сплава непосредственно (in-situ) в процессе синтеза, путем введения легирующих компонентов в исходные экзотермические составы.

Проведен анализ микроструктуры и фазового состава полученных сплавов NiCrCoFeMn при введении избыточного алюминия NiCrCoFeMn-Al_x (интерметаллидной упрочнение) и комплексной модифицирующей добавки Ti-Si-B(C) (керамическое упрочнение). При увеличении содержания добавки Ti-Si-B(C) микроструктура продуктов синтеза формируется на основы матрицы из ВЭС и наблюдаются выделения новых структурных элементов на основе карбидов и боридов Ti. Морфология и концентрация таких выделений зависит от концентрации добавки.

Получен положительный экспериментальный опыт по синтезу литых ВЭС системы NiCrCoFeMn-Al_x с высоким содержанием Al (до эквимольного состава).

Анализ полученных данных позволяет сделать заключение о перспективности исследуемых материалов и метода их получения для формирования объёмных nano структурных материалов. Получение металлических композиционных материалов на основе нового принципа формирования полиметаллических сплавов может существенно расширить базу для создания новых материалов и способствовать созданию новых образцов техники.

Список литературы:

1. Sanin V.N., Ikornikov D.M., Golosova O.A., Andreev D.E., Yukhvid V.I. Centrifugal metallothermic SHS of cast Co–Cr–Fe–Ni–Mn–(X) high-entropy alloys. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2020, Vol. 61, No. 4, pp. 436–445.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 19-08-01108.

ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ В ХОДЕ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРМЕШИВАНИЕМ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 6061-T6

Калиненко А.А.* , Высоцкий И.В., Малофеев С.С.,
Мионов С.Ю., Кайбышев Р.О.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Российская федерация
*kalinenko@bsu.edu.ru

С термомеханической точки зрения сварка трением с перемешиванием (СТП) представляет собой уникальное сочетание очень больших деформаций, высокой температуры и относительно высокой скорости деформации. Поведение материала в таких экстремальных условиях деформации изучено не очень хорошо, и поэтому микроструктурные исследования СТП-швов представляют существенный академический интерес. Кроме того, понимание фундаментальных основ процессов формирования зеренной структуры в ходе СТП должно усовершенствовать современные представления о взаимосвязи микроструктуры и свойств в СТП-материалах и, таким образом, позволит оптимизировать их эксплуатационные характеристики. Несмотря на обширные исследования в этой области, микроструктурное поведение некоторых важных конструкционных материалов остается не вполне ясным. Чтобы внести свой вклад в эту важную работу, в настоящем исследовании была изучена эволюция зеренной структуры в ходе СТП алюминиевого сплава 6061-T6. Для более глубокого понимания этого процесса был использован метод ориентационной микроскопии (EBSD).

Во всем диапазоне изученных режимов СТП установлено, что в сформировавшейся в зоне перемешивания зеренной структуре, преобладают почти равноосные зерна с относительно большой долей малоугловых границ (МУГ), а также выраженной текстурой простого сдвига типа В/-В $\{112\}\langle 110\rangle$. Во всех состояниях было установлено, что развитие зеренной структуры обусловлено экстенсивным формированием границ деформационного типа, их постепенным преобразованием в большеугловые границы (БУГ) зерен. Соответственно, фрагментация зерен является ключевым механизмом формирования зеренной структуры. Стоит отметить, что при относительно высоких температурах сварки наблюдается постепенное подавление этого механизма. Этот удивительный результат объясняется уменьшением плотности дислокаций из-за их аннигиляции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 19-49-02001.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НОВОГО Ti-18Zr-14Nb (ат.%) СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Калиничева В.А.^{1*}, Шереметьев В.А.¹, Лукашевич К.Е.¹,
Прокошкин С.Д.¹, Браиловский В.²

¹НИТУ «МИСиС», Москва, Россия;

²Высшая технологическая школа, Монреаль, Канада

*viktoriyasurovix@gmail.com

За последнее десятилетие аддитивные технологии вышли на первое место при выборе подхода к изготовлению металлических деталей со сложной геометрией. Аддитивное производство позволяет легко масштабировать идеи от прототипа до технологии производства, которая востребована при производстве пористых материалов и персонализированных имплантатов для биомедицинских применений. Много внимания сейчас уделяется развитию послойного синтеза и обработке новых металлических биоматериалов, в частности сплавов на основе Ti-Zr-Nb с памятью формы. Высокий уровень биомеханической совместимости этих сплавов обеспечивается низким модулем Юнга и сверхупругим поведением, близким к поведению костной ткани.

В данной работе из нового сплава Ti-18Zr-14Nb (в ат.%) методом селективного лазерного плавления (СЛП) на установке *SLS TruPrint 1000* было получено 14 образцов размером 10x10x10мм по разным режимам печати. Режимы для СЛП нового сплава (мощность лазера, скорость сканирования и шаг сканирования) были установлены на основании аналитической модели с использованием физических характеристик порошка. Для определения наилучшего сочетания параметров синтеза у образцов была определена пористость, шероховатость поверхности и твердость. Микроструктуру образцов в горизонтальном и вертикальном сечении изучали методами световой и электронной сканирующей микроскопии с использованием дифракции отраженных электронов (EBSD).

На основании анализа дефектности и пористости были установлены режимы печати, при которых удается достичь наибольшей плотности образцов (более 99,6%). Эти режимы соответствуют плотности энергии лазера 68-75 Дж/мм³ и скорости построения 7-9 см³/ч.

Для изучения влияния термической обработки на структуру и свойства образцы подвергли отжигу при температурах 400-900°C в течении 30 мин. в защитной атмосфере аргона с последующим охлаждением в воде. В исходном состоянии твердость сплава после разных режимов СЛП составляет 240-280HV. Отжиг при 400°C приводит к резкому повышению твердости до 250-300HV, что связано с формированием в сплаве α - и ω -фаз. Увеличение температуры до 500-600°C постепенно снижает твердость до уровня исходной. Дальнейшее повышение температуры обработки до 700-800°C способствует увеличению твердости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-00299).

ВЛИЯНИЕ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА ЗЕРЕННУЮ СТРУКТУРУ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 6061

**Ким К.А.* , Калининко А.А., Высоцкий И.В., Малофеев С.С.,
Миронов С.Ю., Кайбышев Р.О.**

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
*life.has.a.corner@gmail.com

В данной работе исследовалась связь между термическом циклом сварки трением с перемешиванием (СТП) и зеренной структурой, формирующейся в зоне перемешивания алюминиевого сплава 6061. С этой целью СТП осуществлялась в интервале температур от 255 до 425°C и диапазоне скоростей охлаждения от 11 до 50 °C/с, а сформировавшиеся микроstructures исследовались посредством ориентационно микроскопии (EBSD). Установлено, что во всем исследованном интервале условий эволюция микроstructures определялось непрерывной рекристаллизацией. При повышенных температурах, однако, конкурирующее развитие процессов возврата замедляло кинетику рекристаллизации. Было также показано, что в ходе охлаждения сварного шва до комнатной температуры в материале имела место ограниченная метадинамическая рекристаллизация.

Авторы признательны Российскому научному фонду (РНФ) за финансовую поддержку (проект №19-49-02001).

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AL-CR-NB-TI-V-ZR В РАМКАХ МОДЕЛИ ТВЕРДОРАСТВОРНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Клименко Д.Н.* , Жеребцов С.В., Степанов Н.Д.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
*klimenko@bsu.edu.ru

Согласно классическому определению высокоэнтропийные сплавы (ВЭСы) представляют собой многокомпонентные системы, имеющие почти эквиатомный состав с содержанием элементов в диапазоне от 5 до 35 ат.% [1]. Высокая энтропия такой смеси способствует образованию твердого раствора на основе гранецентрированной кубической (ГЦК) или объемно-центрированной кубической (ОЦК) решетки [2]. Они показывают отличные прочностные свойства и хорошую износостойкость при низких и высоких температурах [3–5]. Для классических однофазных ВЭСов твердорастворное упрочнение дает определяющий вклад в прочностные характеристики. На основании анализа твердорастворного упрочнения в бинарных системах с помощью классического подхода Лабуша [6], и распространения его на многокомпонентные сплавы для ВЭСов был разработан ряд моделей для расчета твердорастворного упрочнения [7-9]. В сочетании с эмпирическими правилами предсказания фазового состава модель твердорастворного упрочнения может служить основой системы поиска ВЭСов с хорошими прочностными характеристиками.

Данный подход был использован для сплавов системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr. В рамках разработанной системы поиска были выбраны и выплавлены 8 модельных сплавов, после чего испытаны на сжатие при комнатной температуре и при 600°C. Модельные сплавы показали хорошее соответствие с теоретическими расчетами, средняя погрешность прогнозирования предела текучести для комнатной температуры составила 11%, для 600°C погрешность составила 16%, что указывает на перспективность данного подхода при разработке высокоэнтропийных сплавов системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr.

Список литературы:

1. J.W. Yeh, S.K. Chen, S.J. Lin, et al., *Adv. Eng. Mater.* 6 (2004) (pp. 299–203).
2. Y. Zhang, Y.J. Zhou, J.P. Lin, G.L. Chen, P.K. Liaw, *Adv. Eng. Mater.* 10 (2008) 534-538.
3. C.Y. Hsu, J.W. Yeh, S.K. Chen, T.T. Shun, *Metall. Mater. Trans. A* 35A (2004) 1465-1469.
4. O.N. Senkov, G.B. Wilks, J.M. Scott, D.B. Miracle, *Intermetallics* 11 (2011) 698-706.
5. O.N. Senkov, S.V. Senkova, B. Miracle, C. Woodward, *Mater. Sci. Eng. A* 565 (2013) 51-61.
6. X. Yang, Y. Zhang, *Mater. Chem. Phys.* 132 (2012) 233-238.
7. I.Toda-Caraballo, P.E. Rivera-Díaz-del-Castillo, *Acta Materialia* 85 (2015) 14-23.
8. Z. Wang, Q. Fang, J. Li, B. Liu, et al., *Journal of Materials Science & Technology*, 34 (2018) 349-354.
9. F.G. Coury, M. Kaufman, A.J. Clarke *Acta Materialia* 175 (2019) 66-81.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 19-79-30066.

ФОРМИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ В ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОМ СПЛАВЕ AlCoCrFeMnNi

Климова М.В.* , Семенюк А.О., Шайсултанов Д.Г., Жеребцов С.В.,
Салищев Г.А., Степанов Н.Д.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский
университет», Белгород, Россия
*klimova_mv@bsu.edu.ru

Создание новых конструкционных металлических материалов с улучшенными по сравнению с уже используемыми сплавами механическими свойствами является одной из традиционных ключевых задач материаловедения. Повышение прочности металлических материалов традиционными способами всегда приводит к снижению пластичности. Разработка сплавов с гетерогенными микроструктурами представляется довольно перспективной задачей для разрешения этого компромисса. Тем не менее, возможности традиционных подходов к созданию новых металлических материалов, основанных на одном компоненте, во многом уже исчерпаны и не приводят к существенному повышению свойств. Концепция высокоэнтропийных сплавов (ВЭСов) открывает широкие возможности для разработки новых сплавов с уникальными физико-механическими свойствами. Высокоэнтропийные сплавы на основе системы Co-Cr-Fe-Ni-Mn с ГЦК структурой могут рассматриваться как перспективные конструкционные материалы; однако возможности их применения ограничиваются невысокими прочностными характеристиками. Одним из эффективных подходов к упрочнению однофазных ВЭСов является их легирование с целью дисперсионного упрочнения. Однако стоит отметить, что особенности формирования гетерогенных структур, состоящих из пластичной матрицы и твердых упрочняющих частиц, в высокоэнтропийных системах на основе ГЦК на сегодняшний день практически не изучены.

В работе представлен микроструктурный дизайн высокоэнтропийного сплава CoCrFeMnNi, легированного 7,5ат.% алюминием. Деформационно-термическая обработка сплава обеспечивает формирование гетерогенной микроструктуры, состоящей из частично рекристаллизованной ГЦК матрицы, упрочненной преимущественно пластинчатыми частицами второй фазы, объемная доля которых составляет ~25%. Вторая фаза представляет собой упорядоченную по типу В2 фазу состава NiAl, зарождение которой происходит согласно ориентационному соотношению Курдюмова-Закса. Частицы располагаются вдоль бывших деформационных границ, образуя ламельную структуру, ориентированную вдоль направления прокатки. Обсуждаются закономерности процессов рекристаллизации матрицы и особенности формирования частиц второй фазы в ходе последеформационного отжига, влияние температуры и продолжительности отжига на структуру и механические свойства сплава. Применение деформационно-термической обработки и получение гетерогенной структуры в сплаве приводит к четырехкратному повышению предела текучести по сравнению с однофазным состоянием – до 900 МПа, при этом предел прочности сплава составляет 1200 МПа в сочетании с пластичностью 22%.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00003).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ MAXSTRAIN НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЗАЭВИАТОМНОГО ПО НИКЕЛЮ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ Ti-NI

Комаров В.С.^{1,2,3*}, Карелин Р.^{1,2}, Юсупов В.С.¹, Кавалла Р.³, Прокошкин С.Д.¹

¹Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН;

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»;

³Технический университет «Фрайбергская горная академия»

*vickomarov@gmail.com

Сплавы с памятью формы (СПФ) на основе Ti-Ni в настоящее время входят в число перспективных, активно развивающихся функциональных материалов. Благодаря своим уникальным свойствам (эффект памяти формы, сверхупругость, способность генерации реактивных напряжений) они находят широкое применение в различных отраслях техники и медицины. Усложнение конструкций и интеллектуальных устройств, действующих на основе эффекта памяти формы (ЭПФ), влечет за собой повышение требований к комплексу свойств. Термомеханическая и термическая обработка СПФ на основе Ti-Ni эффективно управлять комплексом механических и функциональных свойств за счёт формирования широкого спектра структур (ультрамелкозернистой, полигонизованной, рекристаллизованной).

Интенсивная пластическая деформация (ИПД) является одним из наиболее эффективных способов измельчения структуры и соответствующего повышения механических и функциональных свойств СПФ на основе Ti-Ni. С её помощью в данных сплавах можно сформировать ультрамелкозернистую структуру, обеспечивающую существенное повышение функциональных свойств.

Деформацию СПФ Ti-50,9 ат.% Ni проводили в изотермических условиях по схеме MaxStrain, которая заключается в чередовании сжатия образца по двум взаимно перпендикулярным осям. Температурные интервалы мартенситных превращений оценивали методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Структуру исследовали рентгенографически и электронномикроскопически. Обратимую деформацию определяли термомеханическим методом при изгибе.

В данной работе было исследовано впервые проведена деформация по схеме MaxStrain стареющего СПФ Ti-Ni при температурах 350 °С со степенью накопленной деформации $e = 6,6$. Полученная структура находится в нанометрическом диапазоне, со средним размером элементов структуры менее 100 нм. Нанокристаллическая структура, сформированная в результате MaxStrain деформации, обеспечивает значительное повышение значений полной обратимой деформации с 4 до 12 % по сравнению с контрольной обработкой.

В работе показана возможность применения деформации по схеме MaxStrain при деформационно-температурных условиях, характерных для формирования структуры, близкой к нанокристаллической.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-60090.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT6

Клименко Д.Н. *, Кудрявцев Е.А., Жеребцов С.В.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Российская Федерация
*klimenko@bsu.edu.ru

Измельчение микроструктуры двухфазных титановых сплавов до наноразмеров позволило существенно проявление эффекта сверхпластичности на несколько сотен градусов [1]. К настоящему моменту наиболее изученным двухфазным титановым сплавом является сплав VT6, в котором низкотемпературная сверхпластичность наблюдалась уже при 550°C [2]. Также было установлено [2], что основным механизмом, контролирующим сверхпластичность при столь низких температурах, является зернограничное проскальзывание, аккомодированное дислокационным скольжением и диффузией легирующих элементов. Дальнейшее изучение эффекта низкотемпературной сверхпластичности позволило предположить, что микролегирование Fe и Mo модельного сплава VT6 может сказаться на характере низкотемпературного сверхпластического течения сплава и оказать влияние на основные контролирующие его механизмы.

В работе изучался технический сплав VT6 дополнительно легируемый 0,5% Fe и 0,75% Mo (по массе). Низкотемпературное сверхпластическое течение сплава было исследовано в ходе испытаний на растяжение с использованием плоских образцов в интервале температур 500-800°C и скорости деформации $2 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Анализ микроструктуры деформированных образцов проводился на рабочих участках и захватах после деформации на 25%, 50% и 85%. Деформированные образцы исследовались при помощи методик растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Было установлено, что в микролегирование сплава VT6 приводит к увеличению доли β -фазы с 11% до 19%, при этом кинетика огрубления структуры заметно замедляется. Такие различия указывают на существенное изменение роли фазовых превращений в механизмах аккомодации зернограничного проскальзывания.

Список литературы:

1. Salishchev G.A., Valiakhmetov O.R., Galeev R.M. *Formation of Submicrocrystalline Structure in the Titanium Alloy VT8 and Its Influence on Mechanical Properties // Journal of Materials Science, 1993, 28, 2898-2902.*

2. Zherebtsov S.V., Kudryavtsev E.A., Salishchev G.A., Straumal B.B., Semiatin S.L. *Microstructure Evolution and Mechanical Behavior of Ultrafine Ti-6Al-4V During Low-Temperature Superplastic Deformation // Acta Materialia, 2016, v. 121, 152-163.*

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 18-48-310023 с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ «БелГУ».

СВЕРХНИЗКОКОБАЛЬТОВЫЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

Ланцев Е. А.*, Малехонова Н.В., Нохрин А. В., Андреев П.В.,
Сметанина К.Е., Востоков М.М

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
*elancev@nifti.unn.ru

Целью работы являлось изучение особенностей электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС) мелкозернистых сверхникрокобальтовых твердых сплавов на основе карбида вольфрама с различным содержанием кобальта WC-(0.3-1)вес.%Co и, в частности, изучение влияния малых добавок кобальта на микроструктуру и механические свойства полученных образцов.

В качестве объектов исследования в работе выступили нанопорошки монокарбида вольфрама α -WC, полученные плазмохимическим методом с последующим восстановительным отжигом в водороде при температуре 1050 °С (3 ч). В нанопорошок карбида вольфрама с начальным размером частиц 95 нм методом осаждения из спиртового раствора солей $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ добавлялись различные концентрации кобальта: 0.3, 0.6 и 1 вес.% Co. Осаждение солей проводилось в условиях активного перемешивания, при температуре 100 °С. После осаждения полученные нанопорошки WC-Co подвергались восстановительному отжигу в водороде последовательно при температуре 300 °С (1 ч) и 700 °С (3 ч). Отжиг проводился в водородной печи Nabertherm RS 120/750/13.

Компактирование образцов диаметром 12 мм и высотой $h = 4$ мм проводилось методом электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС) при помощи установки Dr. Sinter model SPS-625 (Япония). Спекание нанопорошков проводилось в вакууме (2-5 Па), в режиме непрерывного нагрева. Спекание в условиях непрерывного нагрева осуществлялось путем нагрева образцов с заданной скоростью 50 °С/мин до температуры спекания T_s с последующим охлаждением в свободном режиме. Выдержка при температуре T_s отсутствовала. Спекание проводилось в условиях одноосного давления 70 МПа, которое прикладывалось к образцу одновременно с началом нагрева. В процессе экспериментов контролировалась зависимость усадки (L) и скорости усадки (S) порошков от температуры нагрева и времени изотермической выдержки.

Было показано, что полученные методом ЭИПС образцы имеют высокую плотность (96.4-98.4% от теоретической величины), мелкозернистую структуру и высокие механические свойства: твердость твердого сплава WC-0.3%Co составляет ~20.5 ГПа, а величина коэффициента трещиностойкости по Палмквисту – $K_{IC} = 7.1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Процесс высокоскоростного спекания ультрамелкозернистых сверхникрокобальтовых твердых сплавов можно представить в виде последовательной смены следующих механизмов: перегруппировка частиц при пониженных температурах (Стадия I) → спекание частиц WC-Co за счет диффузионной ползучести кобальта по Коблу, интенсивность которой определяется скоростью зернограничной диффузии (Стадия II) → спекание за счет диффузионной ползучести, скорость которой лимитируется скоростью объемной диффузии в кобальте (Стадия III-1) → спекание частиц карбида вольфрама по межзерненным границам WC/WC в условиях интенсивного роста зерен (Стадия III-2).

Работа выполнена при поддержке РФФ №18-73-10177.

МИКРОСТРУКТУРА НИЗКОЛЕГИРОВАННОГО МЕДНОГО СПЛАВА ПОСЛЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОЕ ПРЕССОВАНИЯ ПО СХЕМЕ «КОНФОРМ»

Ткачев М.С.¹, Пелипенко А.¹, Луговская А.¹,
Морозова А.И.^{1,2*}, Кайбышев Р.О.¹

¹ ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия;

² НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

*morozova.ai@misis.ru

В качестве материала исследования был выбран сплав Cu-0,1%Cr-0,1%Zr (масс.%). Медный сплав был подвергнут обработке на получение пересыщенного твёрдого раствора (закалка) при температуре 920 °С 1 ч с охлаждением в воду, часть образцов была состарена при температуре 500 °С в течение 4 ч. Деформацию осуществляли методом равноканального углового прессования по схеме «Конформ» (РКУП-К) (угол пересечения каналов матрицы 120 °С) при комнатной температуре по маршруту Вc. Осуществляли 1, 2, 4, 8 проходов. Микроструктуру деформированного материала исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии с использованием микроскопа Nova NanoSem 450 FEI, соответственно. Образцы для микроскопии готовили с помощью электролитической полировки тонких фольг при температуре -20 °С в электролите 25%ННО₃ и 75%СН₃ОН. Средний размер зерен, плотность дислокаций, долю большеугловых (БУГ) и малоугловых границ (МУГ), долю ультрамелкозернистой структуры (УМЗ) оценивали с помощью программного обеспечения OIM Analysis по картам дифракции обратно-рассеянных электронов. Плотность дислокаций оценивали по изображениям структуры, сформированным в просвечивающем микроскопе.

В таблице представлены основные микроструктурные параметры материала после деформации.

Таблица. Параметры микроструктуры сплава Cu-0,1%Cr-0,1%Zr после РКУП-К

Состояние		Размер зерен, мкм	Доля БУГ	Микронапряжения, °	Доля УМЗ
закалка	исходное	140.3	0.95	0.2	0.001
	1 проход	58.62	0.11	1.13	0.001
	2 проход	14.08	0.13	1.59	0.010
	4 проход	2.72	0.17	1.96	0.058
	8 проход	1.10	0.36	1.76	0.352
старение	исходное	120.2	0.98	0.5	0.001
	1 проход	30.92	0.11	1.54	0.003
	2 проход	31.03	0.11	1.17	0.006
	4 проход	2.73	0.23	2.52	0.055
	8 проход	1.02	0.34	2.72	0.258

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки РФ в рамках программы Грант Президента для государственной поддержки молодых российских ученых (Соглашение № 075-15-2020-407 от 18.03.2020). Коллектив исследователей выражает благодарность д.т.н. Г. И. Раабу за помощь в проведение РКУП-К.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ СВЕРХУПРУГОГО СПЛАВА Ti-Zr-Nb, ПОДВЕРГНУТОГО КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОКЕ

Лукашевич К.Е.^{1*}, Деркач М.А.¹, Шереметьев В.А.¹, Кудряшова А.А.¹, Галкин С.П.¹,
Андреев В.А.², Прокошкин С.Д.¹, Браиловский В.³

НИТУ «МИСиС», Москва, Россия¹;

Институт металлургии и материаловедения им. Байкова, Москва, Россия²;

Ecole de Technologie superieure, Montreal, Canada³

*4lukash4@gmail.com

В настоящее время крайне актуальной проблемой является создание материала для внутрикостных имплантов, который удовлетворял всем биохимическим (имел в своём составе только биосовместимые компоненты) и биомеханическим (по своим механическим свойствам был близок к костной ткани человека, имел высокие прочностные характеристики, низкий модуль Юнга и т.д.) требованиям. В полной мере этим требованиям могут удовлетворять металлические сверхупругие сплавы с памятью формы (СПФ) на основе системы Ti-Zr-Nb. Термомеханическая обработка (ТМО), включающая радиально-сдвиговую прокатку (РСП), ротационную ковку (РК) и последеформационный отжиг (ПДО) позволяет эффективно управлять функциональными свойствами.

В данной работе слиток сплава Ti-28Zr-21Nb (в масс. %) был подвергнут ТМО по разным режимам, включающим РСП ($\epsilon = 2,73$) при температуре 900 °С, высокотемпературную и низкотемпературную ТМО. ВТМО была проведена методом РК ($\epsilon = 1,69$) при температурах 500-800 °С. НТМО включала в себя РК ($\epsilon = 1,42$) при температуре 600 °С, последующей РК ($\epsilon=0,3$) при 25°С и ПДО при 500-750 °С. Структурно-фазовое состояние полученных прутков изучали при помощи рентгеноструктурного анализа, световой и электронной микроскопии. Функциональные свойства определяли в условиях циклических испытаний на растяжение и изгиб.

РСП приводит к формированию неоднородной структуры по всему сечению заготовки. В центре заготовки формируются равноосные зёрна, средний размер которых равен 32 мкм, они сменяется динамически рекристаллизованной структурой со средним размером зерна 5 мкм на краю поперечного сечения. Низкотемпературная ТМО формирует наследуемую после РСП неоднородную структуру, а ПДО при температуре 750 °С выравнивает структуру по сечению всего прутка. ТМО с температурой РК 800 °С формирует динамически полигонизованную структуру β -фазы со средним размером зерна 28 мкм. РК при более низких температурах наследует неоднородность структуры после РСП. Оптимальными функциональными свойствами: низким модулем Юнга (около 40 ГПа), большой разницей между дислокационным и фазовым пределом текучести, наивысшим значением обратимой деформации (~5,2%) обладает образец после НТМО с температурой отжига 550 °С.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 20-63-47063).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ НА ПРОКАТНОМ СТАНЕ РСП 14-40

Мартынов К.Г.^{1*}, Клименко Д.Н.², Негодин Д.А.³, Жеребцов С.В.²

¹Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов
«Прометей» НИЦ «Курчатовский институт», Санкт-Петербург, Россия;

²ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский
университет», Белгород, Россия;

³Чапецкий механический завод, Глазов, Россия

*4xes@mail.ru

При разработке технологии винтовой прокатки для производства горячедеформированных труб диаметром более 250 мм на прокатном стане СВП-500 возникает ряд проблем, влияющих на качество труб, таких как: винтовой след, образующийся на внешней поверхности труб, и изгиб труб, вследствие чего последующие производственные операции могут быть затруднены. Для решения данных проблем были выполнены следующие экспериментальные и лабораторные исследования: несколько экспериментальных трубных заготовок с оправками и без них прокатывали до различной степени деформации на лабораторном прокатном стане РСП 14-40 для получения наилучшего соотношения толщины стенки к внешнему диаметру. Проведен анализ распределения температурного поля и интенсивности деформации в очаге деформации прокатки трубных заготовок. На этапе моделирования также проводилась качественная оценка влияния участка калибровочных валков, используемого в промышленной технике, на внешнюю поверхность горячедеформированных труб. Проанализированы варианты изменения угла участка калибровочных валков винтового прокатного стана для последующего совершенствования инструмента.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ КПРОНО- И МЕЛКОЗЕРНИСТОГО AL 6101

Магомедова Д.К.^{1*}, Рябоконь Д.В.²

¹Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия;

²Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
Санкт-Петербург, Россия

*magmedva.dasha@mail.ru

Вопрос расчёта прочности и долговечности различных конструкций из металлов – один из важнейших в современном мире. Для его решения необходимо знание различных механических критериев материала, таких как прочность, пластичность и др.

В данной работе приведены данные расчёта критических напряжений, которые определяют зарождение пор внутри материала, в данном случае в Al-6101, при статическом нагружении, также показана методика проведения эксперимента для фиксации образованных пор при растяжении до образования трещин внутри исследуемых образцов. Зарождение пор, а также их дальнейшее слияние и образование трещин символизирует собой первую стадию разрушения материала. Таким образом, имея данный о критических напряжениях материала, можно спрогнозировать его разрушение.

Список литературы:

1. Argon A.S., Im J., Needleman A. *Distribution of plastic strain and negative pressure in necked steel and copper bars. Metallurgical Transactions* 824-volume 6A, April 1975.

2. Валиев Р. З., Александров И. В. *Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. Москва: Логос. 2000. 272 с.*

3. M.Yu. Murashkin, I. Sabirov, X. Sauvage, R.Z. Valiev *Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity // J. Mater. Sci. (2016) 51, 33-49.*

4. M. Murashkin, A. Medvedev, V. Kazykhanov, A. Krokhin, G. Raab, N. Enikeev and R.Z. Valiev *Enhanced Mechanical Properties and Electrical Conductivity in Ultrafine-Grained Al 6101 Alloy Processed via ECAP-Conform // Metals (2015) 5, 2148-2164.*

Данная работа выполнена в рамках проекта РНФ №17-19-01311.

РАЗРАБОТКА N-ЧАСТИЧНЫХ МЕЖАТОМНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВОВ СИСТЕМЫ V-Nb-Mo-W

Максименко В. Н. *, Липницкий А. Г.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
*maksimenko.vya.nik@gmail.com

Термодинамические характеристики как функции температуры и концентрации компонентов определяют атомную структуру равновесного состояния высокоэнтропийных сплавов. Наиболее перспективный подход к теоретическому прогнозу термодинамических характеристик многокомпонентных сплавов основан на использовании методов атомистического моделирования. Это обусловлено постоянным повышением вычислительной мощности современных компьютеров и совершенствованием методов теоретических расчетов. Вместе с тем, применение этого подхода к высокоэнтропийным сплавам остается ограниченным из-за недостаточной разработанности потенциалов для многокомпонентных систем. Одной из проблем является необходимость учета угловых зависимостей при существенно ковалентном характере химической связи, что ограничивает использование ряда хорошо апробированных методов построения потенциалов, в которых угловые зависимости не учитываются.

В настоящей работе мы разрабатываем потенциалы V-Nb-Mo-W с использованием недавно развитого n-частичного подхода к построению межатомных потенциалов для систем с металлическим и ковалентным характером химической связи, который корректно учитывает угловые зависимости [1,2]. Достоверность прогноза термодинамических характеристик в этом подходе обусловлена включением экспериментальных и CALPHAD данных об энтальпии и объеме образования твердых растворов при высоких температурах в построение потенциалов [2]. Особым достоинством подхода является его направленность на моделирование многокомпонентных систем, что достигается необходимостью разработки межатомных потенциалов только для каждой пары компонентов в сплаве для получения полного набора потенциалов для моделирования системы при любых концентрациях компонентов.

С использованием разработанных потенциалов мы далее проводим расчеты термодинамических характеристик ряда сплавов системы V-Nb-Mo-W для установления особенностей зависимости термодинамических характеристик от концентрации компонентов и температуры в многокомпонентных сплавах на примере рассмотренной системы. Разработанные новые потенциалы могут быть использованы для исследования свойств сплавов системы V-Nb-Mo-W при любых концентрациях компонентов в широкой области температур методами атомистического моделирования.

Список литературы:

- 1. Lipnitskii A. G., Saveliev V. N. Development of n-body expansion interatomic potentials and its application for V //Computational Materials Science. – 2016. – Т. 121. – С. 67-78.*
- 2. Maksimenko V. N., Lipnitskii A. G., Nelasov I. V. Construction of interatomic potentials of VW on the basis of CALPHAD data on the formation enthalpy //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – Т. 2167. – №. 1. – С. 020213.*

EFFECT OF TEMPERING TEMPERATURE ON THE STRUCTURE AND CREEP RESISTANCE OF A 10%CR MARTENSITIC STEEL

Mishnev R. *, Dudova N., Kaibyshev R.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Belgorod National Research University», Belgorod, Russia

* mishnev91@mail.ru

High-chromium creep-resistant martensitic steels are widely used for critical components of fossil power plants that operate at temperatures up to 620 °C due to their excellent creep resistance. The newest generation of 9–10% Cr steels with 3 wt.% Co additions, an increased B content (≥ 0.008 wt.%) and a highly reduced N content (< 0.008 wt.%) was developed to increase the stability of TMLS and, therefore, the creep strength. A ten-fold increase in the rupture time of these steels relative to that of P92-type steels was attained by decreasing the size of $M_{23}C_6$ boundary carbides to ~ 70 nm. However, the exact reasons of improved creep strength of the 10%Cr steel, which provide unique creep resistance, are not completely understood. It is known that by changing the tempering temperature, it is possible to make significant changes in the structure, in particular to control the particle size of the second phases. The aim of the present work is to study microstructure after tempering temperature 750°C and determine the effect of lowering the tempering temperature from 770 to 750°C on time to rupture in creep testing at 650°C.

A 10% Cr steel with the chemical composition (in wt.%) 0.1% C, 0.06% Si, 0.1% Mn, 10.0% Cr, 0.17% Ni, 0.7% Mo, 0.05% Nb, 0.2% V, 0.003% N, 0.008% B, 2.0% W, 3.0% Co, 0.002% Ti, 0.006% Cu, 0.01% Al and Fe-balance was examined. The steel was subjected to normalizing at 1060°C for 30 min and tempering at 750°C for 3 h. TMLS after tempering at 750°C is characterized by an average size of prior austenite grains (PAG) of about 35 μm and an average width of martensite laths of 275 nm. Dislocation density is about $2.3 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$. Nanoscale $M_{23}C_6$ -type carbides with a mean size of 55 nm are located HABs of PAGs, packets, and blocks and LABs of laths nearly in the equal proportion. Nb-enriched M(C,N) carbonitrides with sizes of 20 nm are uniformly distributed within the martensite laths. It should be noted that V-rich M(C,N) particles, as after tempering at 770°C are not observed. Scarce, fine W-rich M_6C carbides with an average dimension of 25 nm were found whereas no Laves phase precipitates were observed.

The effect of reducing the tempering temperature from 770 by 20°C on structural changes in steel was shown. A decrease in the tempering temperature from 770 to 750°C leads to a decrease in the lath width and the formation of $M_{23}C_6$ particles of smaller sizes (55 nm). These structural changes do not lead to an increase in the time to rupture at the creep test at 650°C and applied stresses of 180 and 160 MPa. However, time to rupture at test with applied stress of 140 MPa increases by more than two times from 1426 to 3909 hours.

The study was financially supported by the Russian Science Foundation, under grant No. 19-79-00195. The authors are grateful to the staff of the Joint Research Center, Belgorod State University, for their assistance with instrumental analysis.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РКУП НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ МЕДНОГО СПЛАВА

Морозова А.^{1,2*}, Ткачев М.С.¹, Пелипенко А.¹, Луговская А.¹, Кайбышев Р.О.¹

¹ ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия;

² НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

*morozova.ai@misis.ru

Медный сплав Cu-0.3%Cr-0.5%Zr был выбран в качестве материала для исследования. Сплав был подвержен обработке на получение пересыщенного твердого раствора при температуре 920 °С в течение 0,5 ч с последующим охлаждением в воде. Большая пластическая деформация была осуществлена равноканальным угловым прессованием (РКУП) при температурах 200 °С, 300 °С и 400 °С по маршруту Вс. Были получены образцы после 1, 2, и 4 проходов РКУП. Механические испытания были проведены с использованием испытательной машины Instron 5882 при начальной скорости деформирования $\approx 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ на плоских образцах с рабочей частью следующей конфигурации: 1,5мм x 3мм x 6мм. Распад пересыщенного твердого раствора (ПТР) оценивали по изменению электропроводности с помощью прибора Константа К-6.

Кривые «Истинное напряжение – Истинная деформация» были проанализированы с помощью соотношения Войса. Определены константы, которые соответствуют деформационному упрочнению (σ_v) и деформационному возврату (ε) в процессе растяжения образцов (таблица). Деформация при повышенных температурах способствует распаду пересыщенного твердого раствора, причем с повышением температуры и степени деформации доля распада ПТР возрастает. Установлена логарифмическая зависимость между деформационным упрочнением и степенью распада ПТР: $\sigma_v = -88 \ln f - 1151$. Динамический возврат скачкообразно возрастает на порядок в интервале температур 300-400 °С.

Таблица. Доля распада ПТР, коэффициенты, характеризующие величину деформационного упрочнения σ_v и деформационного возврата ε медного сплава

Состояние		Доля распада ПТР, %	σ_v , МПа	ε
исходное		0	-500	-0.345
200 °С	1 проход	10.39	-413	-0.002
	2 проход	13.7	-427	-0.003
	4 проход	19.3	-497	-0.002
300 °С	1 проход	14.1	-322	-0.004
	2 проход	21.2	-465	-0.004
	4 проход	30.9	-515	-0.004
400 °С	1 проход	24.2	-475	-0.015
	2 проход	46.8	-580	-0.015
	4 проход	55.8	-605	-0.018

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки РФ в рамках программы Грант Президента для государственной поддержки молодых российских ученых (Соглашение № 075-15-2020-407 от 18.03.2020).

ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ СЛОЕВ, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ ОБРАЗЦОВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ

Москвина В. А.^{1*}, Астафурова Е. Г.¹, Рамазанов К. Н.², Загибалова Е. А.^{1,3}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия;

²Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия;

³НИ Томский политехнический университет Томск, Россия

*valya_moskvina@mail.ru

С использованием методов просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в работе изучено влияние исходной структуры – высокодефектной зеренно-субзеренной, сформированной при предварительной пластической деформации, и крупнозернистой структуры на особенности фазового состава и микроструктуры поверхностных композиционных слоев, сформированных при диффузионном ионно-плазменном насыщении образцов аустенитной нержавеющей стали (АНС, Fe-16,8Cr-13,3Ni-2,7Mo-1,7Mn-0,6Si-0,01C, масс. %). Две партии заготовок АНС были подвергнуты холодной прокатке до степеней осадки 80 % (Режим 1–P1) и 40 % (Режим 2–P2). P1-образцы были исследованы в прокатанном состоянии, P2-образцы были подвергнуты отжигу при температуре $T=1050^{\circ}\text{C}$ (5 ч, закалка в воду). P1-образцы обладали разориентированной зеренно-субзеренной структурой ($d < 1$ мкм) с высокой плотностью деформационных дефектов. P2-образцы имели крупнозернистую аустенитную структуру ($d=55$ мкм). Ионно-плазменную обработку (ИПО) P1- и P2-образцов проводили на установке ЭЛУ-5 в смеси газов 70% Ar/25% N₂/5% C₂H₂ в течение 12 часов при температуре $540 \pm 10^{\circ}\text{C}$. ПЭМ-анализ микроструктуры проводили в поперечном сечении ИПО-обработанных поверхностей P1 и P2-образцов.

ИПО-обработка способствует формированию поверхностно-упрочненной области глубиной ≈ 150 мкм в P-1 и ≈ 50 мкм в P-2 образцах. Особенности изменения микроструктуры в поверхности P1- и P2-образцов позволяют выделить характерные области: композиционный слой, диффузионную зону и матрицу. Для P1-образцов композиционный слой характеризуется микроструктурой, состоящей из протяженных областей легированного азотом и углеродом аустенита Fe- $\gamma_{\text{N,C}}$, феррита Fe- $\alpha_{\text{N,C}}$, и мелкодисперсных карбонитридов и нитридов Fe₄(N,C) и Cr(N,C). Микроструктура диффузионной зоны представлена протяженными областями с Fe- $\gamma_{\text{N,C}}$ фазой и высокой плотностью деформационных двойников. По мере удаления от поверхности, структура становится близкой к исходной зеренно-субзеренной. Фазовый состав композиционного слоя аналогичен в P1- и P2-образцах, но особенности распределения фаз в них различны. Для P2-образцов микроструктура композиционного слоя представлена исходно-крупными зернами с Fe- $\gamma_{\text{N,C}}$ -фазой со строчечным расположением частиц Fe₄(N,C)-фазы внутри зерен. Протяженность участков с таким строчечным расположением частиц составляет 1–3 мкм, причем «строчки» располагаются параллельно друг другу и образуются вдоль определенных кристаллографических плоскостей в аустенитной структуре зерен. Мелкодисперсные частицы (<1 мкм) фазы Cr(N,C) образуются преимущественно вдоль границ зерен. Частицы Fe₄(N,C)-фазы наблюдаются реже при достижении глубины $\approx 15-18$ мкм в P2-образцах. На глубине ≈ 50 мкм микроструктура P2-образцов аналогична исходной – аустенитной крупнокристаллической.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента РФ (СП-14.2019.1).

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СИНГЛ-ТРЕКОВ ПОРОШКА AL-SI-MG-CU МОДИФИЦИРОВАННОГО КВАЗИКРИСТАЛЛАМИ

Ожерелков Д. Ю.^{1*}, Наливайко А. Ю.¹, Солодов Д. О.¹, Комиссаров А. А.¹, Морозова А. И.^{1,2}, Шинкарев А. С.¹, Громов А. А.¹

¹Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС»,
Москва, Россия;

² «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»,
Белгород, Россия
*d.ozherelkov@gmail.com

Порошковые материалы на основе алюминия широко используются в качестве сырья для получения 3D объектов методами аддитивных технологий. Создание композиционных материалов, путем модифицирования матрицы алюминиевого сплава упрочняющими частицами, такими как Al_2O_3 , SiC, B_4C , AlN, TiC, TiO_2 и др., позволяет получить материал с высокой удельной прочностью и хорошей износостойкостью. Алюмоматричные композиты, благодаря высокому комплексу удельных механических характеристик в сочетании с малым весом, находят различные применения в аэрокосмической, оборонной и автомобильной промышленности.

Однако изготовление функциональных компонентов сложной конфигурации, которые используются в аэрокосмической и автомобильной промышленности, не всегда возможно с использованием традиционных технологий производства. Развитие современных аддитивных методов производства (в первую очередь селективного лазерного сплавления) позволяет изготавливать сложные технологические компоненты с усовершенствованными характеристиками.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию экспериментального алюминиевого порошка системы Al-Si-Mg-Cu, модифицированного квазикристаллическими частицами Al-Cu-Fe предназначенного для изготовления 3D объектов технологией селективного лазерного сплавления (SLM технология). Высокая твердость и хорошая износостойкость, сопровождаемые низким коэффициентом трения квазикристаллов, делают возможным применение алюминиевых сплавов в гильзах цилиндров и поршнях автомобильных двигателей.

В работе были изучены три экспериментальных состава алюминиевых композитов с добавками 1, 4 и 8% квазикристаллов $Al_{45}Cu_{33}Fe_{22}$ с использованием матрицы режимов: мощность лазера варьировалась от 250 до 370 Вт, скорость сканирования варьировалась в диапазоне от 850 до 1650 мм/с. Описан процесс выбора оптимального режима сплавления новых композиций порошков алюминия с учетом ограниченного количества доступного материала. Исследование состояло из трех основных этапов: (i) детальная характеристика исходного порошка; (ii) формирование отдельных сингл-треков по выбранной матрице параметров; (iii) исследование характеристик полученных сингл-треков с использованием оптической микроскопии, структурного анализа и определения микротвердости. На основании полученных результатов были выбраны оптимальные составы и предложены оптимальные параметры селективного лазерного сплавления композиционных материалов.

Работа проведена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 19-79-30025.

ЛАЗЕРНОЕ СПЕКАНИЕ АЛЮМИНИЙ–ГЛИНОЗЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА ВИХРЕВОГО СЛОЯ

Наливайко А. Ю.^{1*}, Ожерелков Д. Ю.¹, Морозова А. И.^{1,2},
Шинкарев А. С.¹, Громов А. А.¹

¹Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС»,
Москва, Россия;

²ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия

*nalivaiko@misis.com

Как известно, алюмоматричные порошковые композиты (Al/MMCs) в настоящее время относятся к группе перспективных материалов для аддитивного производства, что обусловлено легким весом, высокой прочностью и относительно низкой себестоимостью. В свою очередь использование системы Al–Al₂O₃ в аддитивном производстве представляет особый интерес, поскольку добавка глинозема позволяет повышать эксплуатационные характеристики изделий без образования нежелательных фаз в процессе синтеза. Известно множество способов получения порошковых Al–Al₂O₃ композитов, однако для промышленного производства наиболее интересны технологичные и малоресурсозатратные методы. Одним из таких способов является классический метод порошковой металлургии – механическое смешивание порошков.

Настоящее исследование посвящено изучению свойств порошковых Al–Al₂O₃ композитов, полученных с использованием аппарата вихревого слоя, и определению уровня механических характеристик изделий, синтезированных лазерным спеканием. В работе использовался аппарат вихревого слоя, представляющий собой цилиндрическую камеру, расположенную в индукторе вращающегося электромагнитного поля. Перемешивание порошков осуществлялось цилиндрическими ферромагнитными элементами, приводимых в движение магнитным полем. Аппарат вихревого слоя характеризуется не только эффективным перемешиванием порошковой смеси, но и частичным измельчением материала, что в свою очередь приводит к более равномерному распределению по размерам частиц получаемого порошкового композита. Лазерное спекание осуществлялось на установке SLM Solutions 280 HL, использующей технологию селективного лазерного плавления (SLM / LPBF технология).

В работе представлено детальное описание использованных исходных материалов, параметров смешения порошков и режимов лазерного спекания. На основании результатов исследования представлены технические решения по соотношению алюминиевого порошка и глинозема в композиционном материале, а также по режимам лазерного спекания.

Работа проведена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 19-79-30025.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОРРОЗИОННО-УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПТ-3В И ПТ-7М ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Мурашов А.А. *, Берендеев Н.Н., Нохрин А.В.

Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия
*aamurashov@nifti.unn.ru

В качестве объекта исследования выступали промышленные псевдо- α титановые сплавы: ПТ-3В (Ti-4.73вес.%Al-1.88вес.%V) и ПТ-7М (Ti-2.2вес.%Al-2.5вес.%Zr). Сплавы испытывались в состоянии поставки (крупнокристаллическое состояние), а также в мелкозернистом состоянии. Мелкозернистая (МЗ) структура в сплавах формировалась методом ротационнойковки (РК) и методом равноканального углового прессования (РКУП). Ротационнаяковка проводилась с помощью ротационно-ковочной машины фирмы R5-4-21 HIP «Heinrich Muller Maschinfabrik» при комнатной температуре до степени деформации 70%. РКУП осуществлялось с помощью гидравлического пресса Fischer HF400L при температурах от 375 до 475 °С, число циклов прессования (N) варьировалось от 1 до 4. Испытания на усталость проводились на цилиндрических образцах по схеме «изгиб с вращением» в 3%-ном водном растворе NaCl и на воздухе. Частота нагружения составляла 50 Гц.

Исследования микроструктуры показали, что в исходном состоянии (состояние поставки) наблюдается сильно неоднородная крупнокристаллическая структура. В сплавах ПТ-3В и ПТ-7М присутствуют выделения частиц β -фазы по границам зерен α - и α' -фазы. После РК и РКУП в сплавах формируется мелкозернистая структура со средним размером фрагментов ~0.2-0.5 мкм, данную структуру можно охарактеризовать как смешанную зеренно-субзеренную.

Проведены исследования механических свойств, а также стойкости сплавов к усталостному и коррозионно-усталостному разрушению сплавов в крупнокристаллическом и мелкокристаллическом состоянии. Показано, что формирование мелкозернистой структуры в сплавах ПТ-3В и ПТ-7М методом РК и РКУП приводит к существенному увеличению прочностных характеристик материалов, в частности твердости, а также к повышению усталостной прочности титановых сплавов по сравнению с исходным крупнокристаллическим состоянием сплавов.

Проведен фрактографический анализ изломов образцов крупнокристаллических и мелкозернистых титановых сплавов после усталостных и коррозионно-усталостных испытаний. Выявлены основные стадии зарождения и роста трещины в крупнокристаллических и мелкозернистых сплавах.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект №0729-2020-0060).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБРАБОТКИ ВЗРЫВОМ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Нагичева Г. С.*, Нохрин А. В., Берендеев Н. Н., Мелехин Н. В.,
Пискунов А. В., Сысоев А. Н., Грязнов М. Ю.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

*nagicheva@mail.ru

Целью работы являлось моделирование процесса обработки взрывом углеродистой стали методом конечных элементов в программной среде ANSYS Workbench и верифицирование результатов расчетов путем проведения экспериментальных исследований структуры и свойства углеродистой стали У8 в исходном состоянии и после взрывной упрочняющей обработки. Сталь исследовалась с использованием методик металлографии, измерения микротвердости и макротвердости по Роквеллу, а также испытания на абразивный износ. Структурное состояние углерода в стали исследовали с использованием метода внутреннего трения.

Анализ результатов компьютерного моделирования показал, что процесс деформации при взрывном нагружении протекает неравномерно в продольном и поперечном сечениях цилиндрической заготовки. Значения давления во время взрыва достигают нескольких гигапаскалей, что приводит к упрочнению стальной заготовки в отдельных зонах. Построены карты распределения давлений и температур в различных сечениях стальной заготовки. Для проведения исследований выбраны участки с максимальной расчетной величиной упрочнения.

Металлографические исследования показали, что сталь У8А в исходном состоянии имеет перлитную микроструктуру, преимущественно пластинчатого характера. В структуре стали присутствуют зоны сфероидизированного перлита, что приводит к неоднородному распределению и снижению микротвердости в этих участках. Показано, что обработка взрывом не приводит к заметному общему повышению макротвердости и износостойкости стали, но сопровождается незначительным повышением микротвердости в областях пластинчатого (до ~2800 МПа) и сфероидизированного перлита (до ~2300 МПа).

Исследования внутреннего трения показали, что в исходном состоянии наблюдается пик внутреннего трения при температуре нагрева ~160 °С, который имеет, вероятно, дислокационную природу. После взрывной обработки наблюдается повышение фона внутреннего трения, обусловленное, очевидно, увеличением плотности решеточных дислокаций. На температурной зависимости внутреннего трения наблюдается пик Снука-Кестера при температуре ~270 °С. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при взрывной обработке происходит повышение концентрации углерода на ядрах решеточных дислокаций, обусловленное, очевидно, «уходом» атомов углерода из пластин цементита Fe₃C. Это приводит к частичной сфероидизации пластин цементита и снижению износостойкости стали.

Работа выполнена при поддержке проекта № 075-03-2020-191/5 Минобрнауки.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА ПЕРЕД ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОРТОРОМБИЧЕСКОГО АЛЮМИНИДА ТИТАНА Ti_2AlNb

Панов Д.О.¹, Наумов С.В.^{1*}, Соколовский В.С.¹, Волокитина Е.И.¹, Кашаев Н.С.²,
Фентике Ф.², Динзе Р.², Поволяева Е.А.¹, Алексеев Е.Б.³, Ночовная Н.А.³,
Жеребцов С.В.¹, Салищев Г.А.¹

¹ФГАОУ ВО «Белгородский Государственный Национальный Исследовательский Университет», г. Белгород, Россия;

²Отдел лазерной обработки и структурной оценки,
Гельмгольц – Центр, Гестахт, Германия;

³ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
г. Москва, Россия

*NaumovStanislav@yandex.ru

Сплавы на базе орторомбического алюминид титана (Ti_2AlNb) являются одними из наиболее перспективных жаропрочных сплавов для изделий авиакосмической и автомобильной отрасли благодаря высоким удельным прочностным характеристикам, сравнительно низкой плотности и стойкости к окислению. Однако технологические свойства этих сплавов, например, свариваемость, ограничивают возможности их применения. Лазерная сварка позволяет получать высокоточные конструкции без дополнительных механических правок и поэтому являются одним из наиболее перспективных способов получения неразъемных соединений из сплавов Ti_2AlNb . Однако, лазерная сварка может сопровождаться трещинообразованием и существенным снижением пластичности. Таким образом, целью данной работы является исследование возможностей получения качественных сварных соединений из сплавов на базе Ti_2AlNb за счет варьирования технологических параметров лазерной сварки и последующей термической обработки.

В работе использовали сплав ВТИ-4: $Ti-23Al-23Nb-1,4V-0,8Zr-0,4Mo-0,4Si$ ат.% с ламельной морфологией О-фазы. Исследованный сплав в исходном состоянии обладал следующими механическими свойствами: $\sigma_B=1390$ МПа, $\sigma_{0,2}=1320$ МПа и $\delta=11,3$ %. Сварку лазерным лучом проводили при комнатной температуре, а также с предварительным нагревом 200-800 °С. Показано, что разрушение сварных соединений из ВТИ-4 происходит преимущественно по сварному шву и по зоне сплавления. При лазерной сварке без подогрева возникают поперечные трещины, в то время как подогрев перед сваркой исключает образование таких дефектов. Наиболее высокий уровень прочности и пластичности сварных соединений получен при сварке с предварительным нагревом до 200-400 °С ($\sigma_B=1100-1170$ МПа, $\sigma_{0,2}=1080$ МПа, $\delta=4,2-4,4$ %). Последующая термическая обработка по режимам НТ1 (закалка + старение) или НТ2 (старение) сварных соединений, полученных при сварке с предварительным нагревом до 200 °С включительно, не привела к существенному улучшению механических характеристик сварных соединений. Однако термическая обработка по режиму НТ1 сварных соединений, полученных с предварительным нагревом до 400 °С, повысила пластичность в 1,5 раза с сохранением прочностных характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 19-79-30066).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССЕ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ

Неулыбин С.Д.^{1*}, Щицын Ю.Д.², Пермяков Г.Л.², Белинин Д.С.², Варушкин С.В.²

¹Институт механики сплошных сред, филиал ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь;

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

г. Пермь

*sn-1991@mail.ru

В последние годы широкое распространение получили аддитивные технологии, однако их широкое внедрение в производство сдерживается недостаточной изученностью влияния послойного наложения металла, отсутствием технологических рекомендаций получения бездефектной структуры и требуемых механических свойств. Это предопределило необходимость совершенствования процессов наплавки при аддитивном производстве [1].

Получение мелкозернистой структуры наплавленного металла позволяет обеспечить высокие механические свойства, а также повысить существенным образом технологическую прочность, коррозионную стойкость и надежность, увеличивая ресурс работы механизма в целом. Наиболее удобным механизмом модификации наплавляемого металла представляется воздействие на жидкую ванну в процессе наплавки [2].

Анализ литературных источников позволил выявить ряд технологических приемов, позволяющих получить измельченную структуру [3].

В работе проведены исследования по повышению качества наплавляемых слоев из стали 12Х18Н10Т при аддитивном производстве. Исследования производили при плазменной наплавке проволокой 12Х18Н10Т на установке с инверторным источником питания с возможностью высокочастотного импульсного воздействия.

По результатам исследования показано влияние частоты колебания на структуру и твердость наплавленных слоев. Выбран оптимальный режим и произведена наплавка контрольного образца для механических испытаний.

Список литературы:

1. Кривоносова Е.А. Разработка технологии послойного выращивания заготовки из высоколегированной стали методом плазменной наплавки /Ю.Д. Щицын, Д.Н. Трушников, С.Н. Акулова, А.В. Мышкина, С.Д. Неулыбин, А.Ю. Душина // *Металлург.* – 2019. – №2. – С. 70-77.
2. Сутырин Г.В. Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны // *Автоматическая сварка.* – 1975. – № 5. – С. 7-9.
3. Аристов С.В., Руссо В.Л. Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава // *Сварочное производство.* – 1982. – № 11. – С. 42-44.
4. Петров А. В., Бирман У.И. Кристаллизация металла шва при импульсно-дуговой сварке // *Сварочное производство.* – 1968. – № 6. – С. 1-3.
5. Щицын Ю. Д., Кривоносова Е. А., Неулыбин С.Д., Ольшанская Т.В., Никулин Р.Г., Федосеева Е. М., Терентьев С.А. Использование плазменной наплавки для аддитивного формирования заготовок из алюминиевых сплавов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение.* 2019. – Т. 21 (№ 2.). – С. 63-73. DOI 10.15593/2224-9877/2019.2.08.
6. Алов А.А., Виноградов В.С. Повышение качества металла сварных швов // *Сварочное производство.* – 1957. – № 7. – С. 9-10.
7. E. A. Krivonosova , Yu D Schitsin, D. N. Trushnikov, S.N. Myshkina, A.V. Akulova, S.D. Neulybin., A Yu Dushina / *Influence of surfacing technologies on structure formation of high-temperature nickel alloys*// *Metallurgist*, Vol. 63, Nos. 1-2, May, 2019. – P. 197-205/ DOI 10.1007/s11015-019-00810-1.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-60043\19 и финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по государственному заданию FSNM-2020-0028.

ДЕГРАДАЦИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ Re-СОДЕРЖАЩЕЙ 10%Cr СТАЛИ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ НИЗКИХ НАПРЯЖЕНИЯХ

Федосеева А. Э.*, Никитин И. С., Федосеев А. Э., Кайбышев Р. О.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
*fedoseeva@bsu.edu.ru

Жаропрочные 9-12%Cr мартенситные стали широко используются в качестве материалов для электростанций, работающих на угольном топливе. Основной причиной высокого сопротивления ползучести сталей с 9-12% Cr является замедление превращения структуры троостомартенсита в субзеренную структуру в условиях кратковременной и длительной ползучести. Рост мартенситных реек обычно сопровождается укрупнением частиц фазы Лавеса, что является одной из причин, вызывающих снижение сопротивления ползучести. Добавление Re сильно влияет на выделение фазы Лавеса, что положительно влияет на сопротивление ползучести при высоких приложенных напряжениях. Целью настоящей работы является рассмотрение микроструктурных аспектов снижения сопротивления ползучести мартенситной 10%Cr-3%Co-3%W-0.2%Re стали в условиях ползучести 650°C/120 МПа.

Рений-содержащая 10%Cr-3%Co-3%W сталь была получена методом вакуумной индукционной плавки. Затем сталь была подвергнута нормализации при 1050°C в течение 1 часа и отпуску при 770°C в течение 3 часов. Испытания на ползучесть проводили при 650°C и приложенными напряжениями в диапазоне от 100 до 200 МПа до разрушения. Структурная характеристика образцов после ползучести была проведена с использованием просвечивающего электронного микроскопа JEM Jeol-2100 и сканирующего электронного микроскопа Quanta 600 FEG.

После термической обработки Re-содержащей 10%Cr-3%Co-3%W стали было обнаружено образование структуры троостомартенсита с шириной мартенситных реек 290 нм. Внутри мартенситных реек была обнаружена высокая плотность дислокаций $2 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$. В процессе отпуска карбиды $M_{23}C_6$ со средним размером 67 нм выделяются по границам зерен и мартенситных реек, а карбонитриды NbX со средним размером 35 нм – равномерно по ферритной матрице.

Анализ механических свойств выявил появление переломов на кривой длительной прочности и зависимости минимальной скорости ползучести от приложенного напряжения при напряжениях ниже 140 МПа, хотя при напряжении 140 МПа время до разрушения изучаемой стали достигает уникально высоких значений. Такая сильная деградация сопротивления ползучести может быть связана с сильным укрупнением частиц фазы Лавеса. После испытания на ползучесть в условиях 650°C/120 МПа структура троостомартенсита сильно эволюционировала, трансформировавшись в субзеренную структуру со средним размером субзерен 1,5 мкм. Средние размеры карбидов $M_{23}C_6$ и карбонитридов NbX составили 120 и 50 нм, соответственно. Были обнаружены очень крупные частицы фазы Лавеса с размерами более 2 мкм, хотя средний размер этих частиц составил 250 нм. Излом разрушенного образца в условиях ползучести 650°C/120 МПа носит, преимущественно, вязкий характер, при этом имеет несколько очень крупных пор и трещин, которые и стали причиной разрушения. На дне крупных пор можно рассмотреть светлые крупные частицы, которые, скорее всего, являются частицами фазы Лавеса. Несмотря на то что доля крупных частиц фазы Лавеса не превышала 5% от числа всех фаз Лавеса, именно они послужили местами зарождения крупных пор и трещин.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 19-73-10089).

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЗОТИРОВАНИЯ В ПЛАЗМЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И СВОЙСТВА СТАЛИ X12MФ

Новиков В. Ю.* , Гончаров И.Ю., Япрынцев М.Н., Газизова М.Ю.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
*novikov_v@bsu.edu.ru

Из-за растущей потребности в обработке сверхвысокопрочных сталей с пределом прочности около 1500 МПа возникает необходимость увеличения срока службы изделий из инструментальных сталей. Инструментальная штамповая сталь X12MФ получила широкое распространение в промышленности благодаря высоким механическим свойствам, в том числе высокой стойкости к истиранию. Однако данная сталь обладает относительно невысокой коррозионной стойкостью. Одним из наиболее эффективных методов модификации поверхности для улучшения основных эксплуатационных свойств инструментальных сталей является ионно-плазменное азотирование.

В данной работе процесс азотирования проводился с использованием высокоэффективного генератора плазмы на основе высокочастотного индукционного разряда (трансформаторно связанная плазма ТСП). Он позволяет создавать однородную плазму высокой плотности и даёт возможность независимого управления энергией и плотностью потока ионов, поступающих на подложку [1].

Исследовано влияние технологических параметров процесса ионно-плазменного азотирования на структурно-фазовое состояние и механические свойства стали X12MФ. По результатам исследований продемонстрирована возможность улучшения коррозионной стойкости исследуемого материала за счёт изменения содержания нитридных фаз (Fe_3N , Fe_4N , CrN) в поверхностном слое в зависимости от выбранного режима азотирования.

Список литературы:

1. Берлин Е.В., Григорьев В.Ю., Сейдман Л.А. *Индуктивные источники высокоплотной плазмы и их технологические применения* // М: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 464 с. [ISBN: 978-5-94836-519-0].

ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА Ti-15Mo/TiB

Озеров М. С. *, Жеребцов С. В.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Россия

* ozerov@bsu.edu.ru

Получение металл-матричных композитов (ММК) путем введения упрочнителей в пластичную матрицу является перспективным способом повышения прочности и твердости титана. Среди различных армирующих элементов TiB обладает плотностью, близкой к плотности титана, и создает низкие остаточные напряжения благодаря хорошему кристаллографическому сопряжению с матрицей. Однако значения пластичности полученного композита невысоки и при комнатной температуре нулевые. Один из возможных вариантов решения этой проблемы может быть связан с изменением структуры матрицы с ГПУ-решетки на объемно-центрированную кубическую (ОЦК) посредством добавления бета-стабилизатора (-ов), например, Mo. Эффективным методом повышения пластичности композитов Ti/TiB также является деформационно-термическая обработка. Кроме того, термомеханическая обработка может значительно повысить прочность и твердость β титановых сплавов с (мета) стабильной ОЦК-структурой.

В данной работе композит Ti-15Mo/TiB с весовым содержанием армирующего компонента TiB₂ 5% был получен искровым плазменным спеканием при 1400°C. Микроструктуру и механические свойства композита изучали после неизотермической прокатки образцов, нагретых до 1000°C, до накопленной истинной степени деформации ~0,7. Исходная микроструктура композита состояла из 8,5 об.% волокон TiB, гетерогенно распределенных в β -матрице. Эволюция микроструктуры композита в ходе горячей прокатки связана с динамической рекристаллизацией ОЦК-матрицы титана и укорочением волокон TiB в ~2 раза. Композит Ti-15Mo/TiB после горячей прокатки показал значительное улучшение пластичности без существенной потери прочности и твердости. Горячекатаный образец не разрушался во время испытания на сжатие даже после уменьшения толщины на 45%, тогда как в начальных условиях пластичность при сжатии составляла 22%. Предел текучести для обоих условий был довольно похожим (~1350 МПа). Горячекатаный композит также показал некоторое улучшение пластичности до ~12% удлинения после испытаний на растяжение при повышенной температуре (500°C) по сравнению с исходным состоянием, значение относительного удлинения которого не превышало 2%.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 19-79-30066).

MICROSTRUCTURE EVOLUTION IN A 304L AUSTENITIC STAINLESS STEEL DURING WARM ROLLING

Odnobokova M.^{1*}, Belyakov A.²

¹Institute for Physics of Advanced Materials, Ufa State Aviation Technical University,
Ufa, Russia;

²Belgorod State University, Belgorod, Russia
*odnobokova_marina@mail.ru

The formation of nanocrystalline structure in a 304L austenitic stainless steel during warm plate rolling at 200°C and 300°C was investigated. The evolution of nanocrystalline microstructure is assisted by the development of mechanical twinning and micro-shear banding that result in rapid grain refinement. Additionally, the grain refinement during warm rolling at 200°C was assisted by the development of partial martensitic transformation. The volume fraction of martensite achieved about 0.25 after rolling to a total strain of 3. The warm rolling was accompanied by significant strengthening of the 304L austenitic stainless steel. The yield strength approached 1240 MPa and 1000 MPa after warm rolling at 200°C and 300°C to a total strain of 3, respectively.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-60047.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ УГЛЕРОДОМ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА

Озеров М.С.^{1*}, Клименко Д.Н.¹, Мартынов К.Г.², Жеребцов С.В.¹

¹ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Россия;

²НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт–Петербург, Россия
*ozerov@bsu.edu.ru

Титановые сплавы являются чрезвычайно важными конструкционными материалами, широко используемыми в химии, медицине, автомобиле- и кораблестроении, аэрокосмической индустрии. Титан и сплавы на его основе применяются, прежде всего, в конструкциях, которые требуют сочетания высокой удельной прочности и коррозионной стойкости. Кроме того, высокая биосовместимость и низкий модуль упругости делают титановые сплавы незаменимыми для применения в медицине. Легирование металлов и сплавов является эффективным методом управления их структурой и свойствами. В то же время для сплавов на основе титана легирование существующих промышленных титановых сплавов развито слабее и точно не исчерпало всех возможностей. Изменение химического состава известных промышленных сплавов в сочетании с прогрессивной деформационно-термической обработкой для обеспечения требуемого комплекса механических и технологических свойств является одним из перспективных направлений развития современного материаловедения титановых сплавов.

Одним из перспективных путей повышения прочностных свойств титана и сплавов на его основе является добавление углерода. Было установлено, что углерод значительно увеличивает прочность титана в твердом растворе, но очень мало увеличивает прочность в виде карбидов и что, особенно важно, может приводить к охрупчиванию материала. В связи с этим исследование влияния легирования углеродом на структуру титана, а также на механические свойства является достаточно перспективной научной задачей.

В данной работе легирование титана углеродом осуществляли в трех композициях: Ti-0,05C; Ti-0,1C; Ti-0,2C. Полученные методом вакуумно-дугового переплава сплавы подвергали холодной прокатке и последующим часовым отжигам в интервале температур 600-900°C. Была исследована эволюция микроструктуры и изменение механических свойств сплавов Ti-0,05C; Ti-0,1C; Ti-0,2C до и после деформации и последующих отжигов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант №19-79-30066).

ПОЛУЧЕНИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ИЗ НИЗКО- И СРЕДНЕЭНТРОПИЙНЫХ ПОРОШКОВ

Остовари А.^{1*}, Шабурова Н.А.¹, Зайцева О. В.¹, Самодурова М.Н.¹,
Ульяницкий В.Ю.², Дубенская М.А.³, Сова А. А.³, Трофимов Е.А.¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия;

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН), г. Новосибирск, Россия;

³Национальная Инженерная Школа Сент-Этьена (ENISE), г. Сент-Этьен, Франция
*ostovarim@susu.ru

Общей целью проводимого исследования является теоретическое и экспериментальное изучение физических и химических процессов, протекающих в процессе формирования покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов, формируемых с использованием метода лазерной наплавки, а также исследование свойств образующихся покрытий и того, как сказываются на этих свойствах параметры процесса образования покрытий. Среди задач проводимого исследования: теоретическое и экспериментальное изучение кинетики и термодинамики процессов образования высокоэнтропийных фаз в условиях реализации аддитивных технологий, а также определение состава, формы и размера частиц порошков, обеспечивающих формирование высокоэнтропийного покрытия в условиях лазерной наплавки. Важной частью проводимых работ является изучение структуры и свойств (прочности сцепления с подложкой, механических характеристик, стойкости к коррозии в электролитах и газовой коррозии, жаропрочности) покрытий на основе высокоэнтропийных фаз.

Основной задачей настоящей части исследования стало получение высокоэнтропийных покрытий методом лазерной наплавки из порошков низкоэнтропийных и среднеэнтропийных сплавов. В качестве таких порошков в ходе исследования использовались коммерческие порошки нержавеющей стали (67 мас.% Fe, 17Cr, 14Ni, 2Mo), никельхромового сплава (66,5Ni, 30Cr, 1,1Si, 2,4C), кобальтхромового сплава (67,5Co, 28Cr, 4,5W), а также порошок чистой меди. В ходе работы определены технологические параметры, обеспечивающие получение покрытия, которое характеризуется достаточно высокими уровнями однородности состава и адгезии к покрываемому металлу.

Использование лазерной наплавки позволило получить на покрываемой поверхности покрытие из сплава на основе CoCrCuFeNi. Изучение структуры основы полученного покрытия показало, что она состоит из одного твердого раствора с ГЦК-решеткой. Для всех полученных образцов характерна типичная дендритная микроструктура с некоторой неравномерностью распределения элементов (Co, Fe и Cu, сегрегированны в составе дендритов, а Cr, сегрегированны в междендритных областях). Показано, что полученные образцы покрытия демонстрируют микротвёрдость на уровне порядка 400 HV. Также получены данные об износостойкости покрытия.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00304).

ДИСПЕРСИОННО-УПРОЧНЕННЫЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ТI-Nb-Hf-AL-TA

Панина Е.С.* , Юрченко Н.Ю., Степанов Н.Д., Жеребцов С.В., Салищев Г.А.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия

*panina_e@bsu.edu.ru

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭСы) на основе тугоплавких элементов представляют собой новый класс металлических сплавов с перспективными высокотемпературными свойствами. Основой для таких сплавов выступают однофазные ОЦК или В2 упорядоченные твердые растворы, которые также могут содержать различные вторичные фазы. Однако вторичные фазы в ВЭСах на основе тугоплавких элементов обычно выделяются неконтролируемым образом, что резко снижает пластичность при комнатной температуре. Таким образом, существует необходимость в разработке дисперсионно-упрочненных ВЭСов со сбалансированными механическими свойствами. В этом исследовании мы предложили новые неэквивалентные ВЭСы на основе таких тугоплавких элементов как Ti, Nb, Hf, Ta и легкого Al. Были отобраны сплавы следующих составов: $Ti_{37.5}Nb_{12.5}Hf_{25}Al_{25}$ (ат. %), $Ti_{40}Nb_{30}Hf_{15}Al_{15}$, $Ti_{40}Nb_{20}Ta_{10}Hf_{15}Al_{15}$. Слитки сплавов были получены вакуумно-дуговым переплавом высокочистых (не менее 99,9 вес. %) элементов в среде аргона в водоохлаждаемой медной изложнице. Выявлено, что после высокотемпературного отжига при $T = 1200^{\circ}C$ сплавы имели однофазную В2 структуру и показали хорошую пластичность ($>50\%$) при $T = 22^{\circ}C$, за исключением сплава $Ti_{37.5}Nb_{12.5}Hf_{25}Al_{25}$. Последующий отжиг при $T = 600^{\circ}C$ привел к выделению наночастиц с орторомбической структурой в ОЦК-матрице. Было обнаружено, что отжиг при $T = 600^{\circ}C$ существенно увеличивает прочность некоторых сплавов как при комнатной температуре, сохраняя достаточную пластичность, так и при повышенной температуре. Обсуждаются соотношения состав-структура-свойства и возможности дальнейшего улучшения свойств.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 19-79-30066).

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ОБРАТНОГО МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ

Панов Д.О.* , Жеребцов С.В., Салищев Г.А.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Россия
*panov_d@bsu.edu.ru

Дилатометрия является одним из основных методов исследования фазовых превращений в сплавах железа. Применение математического анализа дилатометрических данных позволяет увеличить точность определения критических точек, выделить стадии превращения и объемную долю различных продуктов превращения [1]. На данный момент такой подход к анализу данных не был апробирован для обратного мартенситного превращения при нагреве холоднодеформированных метастабильных аустенитных сталей. Таким образом, целью работы является описание методических подходов к анализу обратного мартенситного $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения в холоднодеформированной метастабильной аустенитной стали с использованием дилатометрии высокого разрешения.

Для исследования выбрана метастабильная аустенитная сталь AISI 321: Fe-0.07C-18.75Cr-1.12Mn-0.39Si-9.20Ni-0.59Ti (wt.%). Предварительная термическая обработка заключалась в нагреве до температуры 1050 °С, выдержке 30 мин и последующем охлаждении в воде. Далее пруток подвергали радиальной ковке при комнатной температуре до истинной степени 2.14. Образцы для дилатометрии вырезали из сердцевины прутка вдоль оси прутка. После деформации в стали AISI 321 была сформирована ламельная мартенситно-аустенитная структура с содержанием деформационно-индуцированного мартенсита 62.5 ± 0.9 %.

На дилатограмме нагрева стали AISI 321 наблюдается последовательность перегибов, связанных с развитием $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения. Температуры начала и окончания $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения определили по отклонению $d(\Delta L)/dT$ -кривой от линейного участка до и после превращения. Обнаруженное превращение начинается при температуре $A_S=520$ °С и завершается при $A_F=920$ °С. По результатам анализа установлено, что в области $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения наблюдаются три пика. Два пика сопровождаются увеличением длины исследуемых образцов, т.к. ориентированы вверх относительно базовой линии. Эти пики характеризуют стадии $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения, развивающиеся по сдвиговому и по диффузионному механизму соответственно. Третий пик ориентирован вниз относительно базовой линии. Это говорит об уменьшении длины образца, что является признаком процесса рекристаллизации при нагреве.

Таким образом, использованный подход к анализу дилатометрических данных позволяет выделить эффекты от $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения и рекристаллизации, что в дальнейшем дает возможность задавать режимы термической обработки холоднодеформированных метастабильных аустенитных сталей для получения заданного структурного состояния и свойств.

Список литературы:

1. Panov, D.O., Smirnov, A.I. Features of austenite formation in low-carbon steel upon heating intercritical temperature range // *Physics of Metals and Metallography*. 2017. 118(11). P. 1081-1090.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №20-79-10094).

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ АЗОТОМ НА ВОДОРОДНОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ

Панченко М.Ю.^{1*}, Астафурова Е.Г.¹, Мельников Е.В.¹, Москвина В.А.¹,
Астафуров С.В.¹, Реунова К.А.¹, Майер Г.Г.¹, Михно А.С.^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия;

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия

*panchenko.marina4@gmail.com

Были исследованы закономерности водородного охрупчивания высокоэнтропийных ГЦК сплавов с разным содержанием азота. Для исследования были выбраны три высокоэнтропийных сплава: 20Fe-20Cr-20Mn-20Ni-20Co (ВЭС), 20Fe-20Cr-20Mn-20Ni-19Co-1N, (1N-ВЭС) и 20Fe-20Cr-20Mn-20Ni-17Co-3N (ат. %) (3N-ВЭС). Образцы всех сплавов были подвергнуты термомеханической обработке (ТМО) – отжиг при температуре 1200°C в течение 2 ч, холодная прокатка до 80 % и повторный отжиг 1200°C, 2 ч.

Методами рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии было показано, что после ТМО ВЭС, 1N-ВЭС и 3N-ВЭС образцы обладали крупнокристаллической аустенитной структурой, размер зерен составлял 150-200 мкм. До наводороживания все образцы обладали значительным запасом пластичности $\delta=65-70\%$. Предел текучести образцов изменялся в зависимости от содержания азота: $\sigma_{0,2}^{\text{ВЭС}}=175$ МПа, $\sigma_{0,2}^{1\text{N-ВЭС}}=300$ МПа и $\sigma_{0,2}^{3\text{N-ВЭС}}=330$ МПа.

Насыщение водородом (электролитическое наводороживание в 3 % водном растворе NaCl с добавлением NH₄SCN в течение 50 ч при плотности тока 10 мА/см²) привело к изменению механических свойств образцов исследуемых сплавов. Повышение предела текучести $\sigma_{0,2}$, связанное с твердорастворным упрочнением атомами водорода, наблюдалось во всех образцах и было наиболее выражено в 3N-ВЭС сплаве. Коэффициент водородного охрупчивания k_H , который описывает потерю пластичности при наводороживании, увеличивается при увеличении концентрации азота в сплаве. В образцах без азота k_H равен 25 %, в легированных азотом 1N-ВЭС и 3N-ВЭС образцах возрастает до 40–50 %. Это может быть обусловлено различной скоростью диффузии и распределением атомов водорода в сплавах разного состава.

С помощью методов растровой электронной микроскопии было установлено, что после наводороживания и растяжения во всех образцах на поверхности разрушения наблюдается хрупкий поверхностный слой. Широкий индуцированный водородом слой с большой неоднородностью по глубине и со средней толщиной, превышающей 100 мкм, наблюдается в образцах всех исследуемых сплавов. Неоднородность глубины хрупкого водородноиндуцируемого слоя более выражена в сплавах, содержащих азот. Центральная часть всех образцов разрушается вязко транскристаллитно с образованием большого количества ямок излома подобно образцам до наводороживания. В ВЭС, 1N-ВЭС и 3N-ВЭС образцах поверхностный наводороженный слой разрушается хрупко, на поверхности разрушения наблюдаются транскристаллитные и интеркристаллитные элементы. При этом легирование азотом приводит к усилению вклада интеркристаллитного излома.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00261).

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ

Пермяков Г.Л.* , Ольшанская Т.В., Кривоносова Е.А., Трушников Д.Н.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Россия

* gleb.permyakov@yandex.ru

Применение аддитивных дуговых процессов, дающих возможность получения крупногабаритные заготовок с минимальным припуском на механическую обработку и позволяет получить значительную экономию металла и многократно сократить затраты на технологическую подготовку производства. Это в полной мере относится к изготовлению изделий из таких дорогостоящих материалов, как титановые сплавы.

В работе рассматривается одна из технологий аддитивного производства – проволочная вакуумно-дуговая наплавка. Использование дуговой наплавки обеспечивает ряд преимуществ, как с технологической, так и экономической точки зрения. К ним можно отнести высокую производительность при получении изделий, регулирование в широких пределах теплопередачи в основной и наплавляемый материал и, как следствие, управление глубиной и шириной проплавления, структурой, составом и свойствами формируемого материала.

Целью данной работы является исследование основных закономерностей формирования структуры и свойств, а также влияния основных параметров режима на геометрические характеристики наплавляемых валиков из титанового сплава ВТ-20. Для этого были исследованы шлифы поперечного сечения валиков, полученных при различных параметрах режима наплавки.

Структура материалов наплавки дендритного строения, дендриты ориентированы в направлении противоположном теплоотводу. Наблюдается некоторая полосчатость структуры. Пористость в наплавленных слоях отсутствует для всех режимов обработки. Зафиксировано, что при дуговой наплавке в вакууме снижение тока наплавки способствует повышению дисперсности пластин α -фазы до долей микрона, это сопровождается ростом микротвердости. При таком термическом цикле наплавки сплава ВТ-20 создаются условия для формирования благоприятной мелкодисперстной мартенситной структуры с неширокими α -колониями мелких игл α -фазы, обеспечивающими высокую микротвердость на уровне 400HV.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № FSNM-2020-0028), Министерства образования и науки Пермского края (соглашение С-26/787 от 21.12.2017) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 18-08- 01016А).

ВЛИЯНИЕ МЕТОДА ДЕФОРМАЦИИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДНОГО СПЛАВА

Морозова А.И.^{1,2*}, Пилипенко А.², Луговская А. С.², Ткачев М.С.²,
Беляков А.², Кайбышев Р.О.²

¹ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия;

² ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия

*morozova.ai@misis.ru

Исследование было направлено на изучение микроструктуры и механических свойств сплава Cu-0,25% Mg, используемого в электротехнике. Сплав подвергали большой пластической деформации методом равноканального углового прессования (РКУП) по маршруту В_С и волочению при комнатной температуре до истинной деформации 9,2 и 7,2, соответственно. РКУП сопровождалось формированием малоугловых границ (МУГ) после начальной деформации. Разориентировка МУГ росла с увеличением степени деформации, что привело к активной трансформации МУГ в большеугловые границы (БУГ) после общего напряжения 4,8. РКУП до истинной степени 9,2 привело к образованию ультрамелкозернистой равноосной микроструктуры со средним размером зерен 0,5 мкм. Волочение способствовало развитию ленточной микроструктуры с зернами, вытянутыми вдоль оси волочения. Расстояние между БУГ уменьшалось с увеличением напряжения. После истинной деформации 7,2 средний поперечный размер зерен составил 0,6 мкм. Упрочнение наблюдалось после обеих деформационных обработок. Кинетика упрочнения в процессе РКУП была ниже, чем в процессе волочения. Максимальный предел прочности при растяжении 600 МПа был получен в образцах РКУП после истинной деформации 9,2, а предел прочности 750 МПа наблюдался в образцах после волочения до истинной деформации 7,2. Пластичность сплава после РКУП была значительно выше по сравнению с пластичностью после волочения; относительное удлинение составило 19% и 3% после истинной деформации 5, соответственно. Обсуждается влияние деформированной микроструктуры на механические свойства сплава Cu-0,25% Mg.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №19-79-30025.

СИНТЕЗ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ РАЗБАВЛЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА $(Zn_{1-x}Mn_x)_3As_2$

Захвалинский В.С., Никуличева Т.Б., Пилюк Е.А.*, Трубаев А.А.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Россия
*pilyuk@yandex.ru

Соединения типа $(A_{1-x}B_x)_3As_2$ с $A = Zn, Cd$ и $B = Mn$ образуют класс разбавленных магнитных полупроводников (РМП) III_3V_2 [1]. $(Zn_{1-x}Mn_x)_3As_2$ (ZFA) были синтезированы из стехиометрических расплавов Zn_3As_2 и Fe в диапазоне $0.005 < x < 0.04$ с использованием модифицированного метода Бриджмена (медленное охлаждение в присутствии градиента температуры). ZFA были изоморфны чистому Zn_3As_2 ($x = 0.0$), который при комнатной температуре имеет тетрагональную структуру с пространственной группой $I4_1cd$ (так называемая α -фаза Cd_3As_2) [2]. Выращивание кристаллов проводили в кварцевых ампулах с углеродным покрытием с коническим дном, вставленных в герметичные кварцевые ампулы под вакуумом 10^4 Торр. Крупные монокристаллические слитки были получены при скорости охлаждения $2^\circ C/ч$ и градиенте температуры $1-2^\circ C/см$. Порошковые рентгеновские исследования показали, что полученные кристаллы были однородными до $x = 0.015$. Однако на дифрактограммах образцов с $x > 0.02$ был обнаружен рост второй фазы, идентифицированной как Fe_2As .

Магнитные измерения проводились на СКВИД-магнитометре постоянного тока в диапазоне 4-120 К в магнитных полях до 2 кЭ. Примечательными особенностями наших результатов магнитометрии является замораживание магнитных моментов по типу спинового стекла в интервале температур 10-50 К. Значение температуры замерзания уменьшается при увеличении магнитного поля, и в магнитном поле 2 кЭ эффект больше не наблюдается.

Мы полагаем, что наблюдаемые явления замораживания обусловлены кластерной природой магнитных свойств ZFA. Термомагнитная намагниченность свидетельствует о наличии двух типов кластеров в магнитной системе ZFA.

Список литературы:

1. Gaj, J.A., & Kossut, J. (2010) *Introduction to the Physics of Diluted Magnetic Semiconductors*. Springer Series in Materials Science, 483 p.
2. Stutz, Elias.Z., Friedl, M., Burgess T., et al. (2019) *Nanosails Showcasing Zn_3As_2 as an Optoelectronic-Grade Earth Abundant Semiconductor*. R Phys. Status Solidi RRL, 1900.

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА МЕТАЛЛ-МАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА Ti-15%Mo/TiV

Поволяева Е.А.^{1*}, Озеров М.С.¹, Степанов Н.Д.¹, Жеребцов С.В.¹,
Динзе Р.², Кашаев Н.С.²

¹ФГАОУ ВО «Белгородский Государственный Национальный Исследовательский
Университет», г. Белгород, Россия;

²Отдел лазерной обработки и структурной оценки,
Гельмгольц – Центр, Гестахт, Германия
*lizapovolyaeva@gmail.com

Титановые сплавы успешно применяются в различных отраслях промышленности благодаря их высоким механическим свойствам, а также хорошей свариваемости. Многие методы сварки, такие как газовая, дуговая, лучевая, контактная и диффузионная сварка уже разработаны для титановых сплавов. Лазерная сварка является достаточно новой технологией и обладает высокой скоростью и низкой трудоемкостью, что делает ее популярной в авиационной и автомобильной промышленности. Известно применение лазерной сварки при соединении деталей из алюминиевых сплавов, однако лазерная сварка металл-матричных композитов на основе титана почти не изучалась.

Получение металл-матричного композита Ti-15Mo/TiV осуществлялось методом искрового плазменного спекания порошковой смеси в следующем весовом соотношении 80.75 вес.% Ti, 14.25 вес.% Mo, 5 вес.% TiV₂. Для лазерной сварки использовали образцы размером 22×15×2 мм³. Стыковые соединения получены в трехосевой машине Ixion в атмосфере аргона с применением автоматизированного компьютера, управляющего процессом сварки. Сварка велась с использованием волоконного лазера мощностью 8 кВт.

В структуре шва после сварки при комнатной температуре обнаружены трещины и поры, в то время как в структуре швов, полученных с подогревом образцов до 200, 400 и 600°C формировались только поры. Микроструктура основного материала состоит из β-титановой матрицы с распределенными в ней волокнами TiV; в зоне плавления волокна TiV собраны в пучки. Диаметр волокон TiV в зоне плавления снижается ~ в 2 раза по сравнению с основным материалом. Сварка с подогревом до 600°C приводит к увеличению диаметра пучков TiV ~ в 1,5-2 раза.

Повышение температуры подогрева образцов в процессе лазерной сварки привело к снижению микротвердости композита в зоне плавления: с 631±47 HV при комнатной температуре, до 509±27 HV при температуре 600°C. В шве, сваренном при подогреве образцов до температуры 600°C, наблюдается равномерное распределение значений микротвердости, как в зоне основного материала, так и в зоне плавления, по сравнению со швами, полученными при температурах подогрева 20, 200 и 400°C.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант №19-79-30066).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ НА КИНЕТИКУ УПЛОТНЕНИЯ И СТРУКТУРУ АЛЮМООКСИДНОЙ КЕРАМИКИ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

Попов А.А.* , Болдин М.С., Нохрин А.В., Ланцев Е.А., Мурашов А.А.,
Андрев П.В., Сметанина К.Е.

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, Россия
*feel-host@yandex.ru

В работе обсуждается влияние малого количества добавок оксидов магния, титана и циркония на эволюцию зеренной структуры керамики на основе оксида алюминия, полученных методом электроимпульсного плазменного спекания. В качестве параметров рассматривались скорости разогрева и время изотермической выдержки.

В качестве объектов исследования в работе выступали керамические образцы из систем порошков на основе чистого оксида алюминия $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ дисперсностью 200 нм с добавкой 0,5%вес. оксида магния (MgO) дисперсностью <100 нм, оксида титана (TiO_2) дисперсностью <100 нм и оксида циркония (ZrO_2) дисперсностью <100 нм. Электроимпульсное плазменное спекание порошков проводилось на установке Dr. Sinter SPS-625 «SPS SYNTEX, INC.». Скорость нагрева $V_H=50\div 700$ °C/мин, механическое напряжение в процессе спекания $P_{\text{пресс}}= 6\div 70$ МПа. Спекание проводилось в вакууме ~ 5 Па. Температура процесса спекания контролировалась оптическим пирометром, сфокусированным на поверхности графитовой пресс-формы с внутренним диаметром 12 мм. Максимальная температура – температура спекания ($T_{\text{спек}}$) лежала в интервале $1150 \div 1300$ °C. Изотермическая выдержка при $T_{\text{спек}}$ составляла $\tau=0\div 60$ мин.

В работе проведено сравнение влияния введенных добавок на уплотнение керамических компактов в условиях квазистационарного и высокоскоростного разогрева. Анализ кинетики спекания оксидных композитов показал, что частицы оксида магния и циркония не оказывают влияния на кинетику протекания стадии интенсивного уплотнения ($Q(\text{MgO})=30kT_m$, $Q(\text{ZrO}_2)=$ в отличие от оксида титана $Q(\text{TiO}_2)=25kT_m$. Энергия активации зернограничной диффузии на II стадии спекания рассчитывалась на основании данных об уплотнении порошкового компакта при разогреве.

Установлено, что в условиях изотермической выдержки добавка оксида магния и оксида циркония тормозят рост зерен, при этом наблюдается уменьшение среднего размера зерна в ~4 раза по сравнению с чистым Al_2O_3 . Энергия активации зернограничной диффузии на III стадии при введении оксида магния и циркония составляет $Q_b=30 kT_m$.

Введении малого количества добавки оксида титана оказывает ускоряющий эффект на рост зерен, при этом наблюдается увеличение среднего размера зерна в ~ 2 раза по сравнению с чистым Al_2O_3 . Энергия активации зернограничной диффузии $Q_b=25 kT_m$.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Соглашение № 20-73-10113).

ВЛИЯНИЕ ТИТАНА И ХРОМА НА СТРУКТУРУ И ЖАРОПРОЧНОСТЬ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО Nb-СПЛАВА И ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЯ

Прохоров Д. В. *, Коржов В. П.

Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка, Россия

*prohorov@issp.ac.ru

Система Nb–Al рассматривается в качестве одной из альтернатив Ni-суперсплавам, достигших потолка рабочих температур. Жаропрочные (Nb–Al)-сплавы призваны обладать высокими механическими свойствами для работы при температурах выше 1000°C – вплоть до 1400–1500°C. Разработке этих сплавов способствуют и низкие плотности упрочняющих алюминидов ниобия – 6,9 и 7,3 г/см³ соответственно для Nb₂Al и Nb₃Al. Вследствие сочетания высокой прочности и низкой плотности сплавам на основе (Nb–Al)-системы суждено обладать высокой удельной прочностью. И, наконец, Nb и Al являются подходящей парой для твёрдофазного получения композитов со слоистыми структурами.

В работе исследовали композиты, полученные диффузионной сваркой (ДС) пакетов, составленных из фольг Al и Nb-сплавов с Ti, Cr, Zr, Mo, Hf и Si двух составов. Режим ДС: 1500°C, 1 ч под давлением 4,1 МПа + 1700°C, 30 мин при ~30 МПа, но в течение 15 мин. После разных способов плавки из исходной шихты, одинаковой по содержанию элементов, образовались сплавы, различных составов. После плавки во взвешенном состоянии (ПВС) в вакууме с разливкой расплава в массивные Cu-изложницы сплав содержал 7,7Ti–0,8Cr–0,2Zr–3,3Mo–2,5Hf–3,0 ат. %Si. После ПВС и 2-кратной электронно-лучевой переплавки (ЭЛП) в ручьевом Cu-кристаллизаторе наибольшие изменения концентрации претерпели титан, хром и кремний: 0,3Ti–0,01Cr–0,7Zr–5,4Mo–2,8Hf–1,0 ат. %Si.

Структура композитов после ПВС имела многослойный характер из слоёв твёрдого раствора Al и Si в ниобии с включениями HfO₂, наследующих слою Nb-сплава (1), и сформировавшихся упрочняющих трёхслойных диффузионных слоёв (Nb,Me)₃Al / (Nb,Me)₂Al / (Nb,Me)₃Al из интерметаллических соединений на основе Nb с Al (2). После ПВС + ЭЛП композит имел две структурные составляющие с диффузными между собой границами: Nb-твёрдый раствор (~12 ат. %Al) с включениями интерметаллического соединения (Nb,Me)₃Al (1) и (Nb,Me)₃Al с нитевидными или ячеистыми образованиями Nb-твёрдого раствора (2).

Механические испытания. После ПВС предел прочности σ_b композита при комнатной температуре составлял 930 МПа, сохранял высокое значение, равное 850 МПа, при 1100°C и лишь при 1300°C падал до 420 МПа. Композит разрушался по механизму расслоения вдоль границ между слоями двух структурных составляющих. Трещиностойкость композита $K^* = 12,5–13,0 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$.

После ПВС + ЭЛП композит уже при ~20°C имел среднее значением σ_b всего лишь 370 МПа и практически столько же, 375 МПа, при 1300°C. Разрушение происходило с образованием магистральной трещины, проходящей сразу через несколько слоёв. Значения трещиностойкости $K^* = 8,5–9,0 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$.

100-часовая прочность или напряжение, вызывающее 1% деформации за 100 ч, равнялась 8 и 7 МПа при показателе степени $n = 0,42$ и $0,77$ для композитов после ПВС и ПВС + ЭЛП соответственно.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-33-01266 мол_a

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ АЗОТОМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА 20Fe-20Mn-20Cr-20Ni-20Co

Реунова К. А.* , Астафурова Е. Г., Астафуров С. В., Мельников Е. В., Панченко М. Ю.,
Майер Г. Г., Москвина В. А.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

*reunova.ksenya@mail.ru

В настоящей работе было исследовано влияние легирования атомами азота с концентрацией 1 и 3 ат. % на механические свойства высокоэнтропийного сплава FeMnCrNiCo. Из слитков, выплавленных в вакуумной индукционной печи в атмосфере аргона и обладающих химическим составом 20Fe-20Mn-20Cr-20Ni-20Co (ат. %) (ВЭС), 20Fe-20Mn-20Cr-20Ni-19Co-1N (ВЭС-1N) и 20Fe-20Mn-20Cr-20Ni-17Co-3N (ВЭС-3N), были вырезаны образцы в форме двойных лопаток с размером рабочей части: 12×2,6×1,4 мм. Полученные образцы были подвергнуты термомеханической обработке (ТМО), заключающейся в отжиге при температуре 1200°C в течение 2 ч, холодной прокатке до 80 %, и повторном отжиге при 1200°C в течение 2 ч. В результате ТМО были получены образцы с однофазной (аустенитной) крупнокристаллической структурой (150-160 мкм). Механические свойства сплавов изучали при измерении микротвердости и методом одноосного статического растяжения при комнатной температуре и начальной скорости деформации $\sim 10^{-4}$ с⁻¹.

Показано, что легирование азотом способствует увеличению микротвердости высокоэнтропийного сплава FeMnCrNiCo. Так, в случае ВЭС значение микротвердости составляет 1,5 ГПа. Легирование азотом с концентрацией 1 и 3 ат. % приводит к увеличению величины микротвердости до 2,4 ГПа и 2,6 ГПа соответственно. Результаты испытаний на одноосное статическое растяжение показали, что легирование азотом оказывает положительное влияние на механические свойства многокомпонентного сплава FeMnCrNiCo. Показано, что добавление азота с концентрацией 1 ат. % приводит к увеличению предела текучести $\sigma_{0,2}$ от 175 МПа до 300 МПа. А дальнейшее увеличение концентрации азота сопровождается ростом величины $\sigma_{0,2}$ до 330 МПа (ВЭС-3N). Легирование азотом вызывает одновременно и рост предела прочности σ_B : в исходном сплаве он составлял 825 МПа, в то время как добавление азота привело к росту σ_B до 1230 МПа в случае ВЭС-1N и 1300 МПа для ВЭС-3N. Кроме того, для всех исследуемых сплавов характерна высокая пластичность: величина удлинения составляет $\delta=65$ % для ВЭС, $\delta=69$ % для ВЭС-1N и $\delta=71$ % для ВЭС-3N. Легирование азотом также сопровождается изменением закономерностей пластической деформации высокоэнтропийного сплава, с увеличением концентрации азота возрастает коэффициент деформационного упрочнения сплава. Таким образом, легирование высокоэнтропийного сплава 20Fe-20Mn-20Cr-20Ni-20Co атомами азота способствует твердорастворному упрочнению, улучшению прочностных характеристик многокомпонентного сплава при сохранении высокой пластичности.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00261).

СИНТЕЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ АЛЮМИНОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗ МЕТАЛЛОВ IV И V ГРУПП

Русских А.С. *, Красиков С.А., Жилина Е.М.

Институт металлургии УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101

*Russkih_A_S@mail.ru

Первые упоминания о высокоэнтропийном сплаве отмечены в 2004 году. Идея данных сплавов заключалась в их высокой энтропии смешения, что предполагало отход от традиционных методов легирования, подразумевающих один или два основных базовых элемента в сплаве. Новый подход предусматривал переход к концепции многокомпонентных сплавов, где все элементы находятся в эквиатомном соотношении друг к другу. Перспектива развития высокоэнтропийных сплавов направлена на создание так называемых термостойких композиций. Микроструктура высокоэнтропийных сплавов аналогична микроструктуре традиционных сплавов, но твердый раствор состоит из многоэлементной матрицы, в которой могут быть включения упрочняющих фаз в виде интерметаллических соединений.

К наиболее известным методам получения высокоэнтропийных сплавов относят: вакуумно-дуговое плавление [1], механическое сплавление [2] и лазерное плакирование [3]. Перечисленные методы основаны на смешении и сплавлении компонентов с химической чистотой 99.99%, что предполагает большую стоимость получения данных сплавов при промышленном производстве. Для улучшения экономических показателей можно использовать в технологии сплавов стадию алюминотермического восстановления металлов из относительно недорогих оксидов. В настоящей работе такой подход был апробирован при синтезе высокоэнтропийного сплава AlNbTiVZr в печи сопротивления. Химический анализ показал близкий к эквиатомному состав сплава. Рентгенофазовый анализ выявил структуру твердого раствора Zr(Nb,V) с включениями фаз интерметаллидов TiAl, ZrVTi₂ ZrNb₂.

Список литературы:

1. Senkov O. N., Scott J. M., Senkova S. V., Meisenkothen F., Miracle D. B., Woodward C. F. *Microstructure and elevated temperature properties of a refractory TaNbHfZrTi alloy* // *J Mater Sci* 2012, 47, 4062-4074.
2. Murty B.S., Ranganathan S., *Novel materials synthesis via mechanical alloying* // *Int. Mater. Rev.* 1998, 43, 101-141.
3. Qiu X.-W., Zhang Y.-P., He L., Liu C.-G., *Microstructure and corrosion resistance of AlCrFeCuCo high entropy alloy* // *Journal of Alloys and Compounds* 2013, 549, 195-199.

Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН с использованием оборудования ЦКП «Урал-М».

ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЦ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДВОЙНИКОВАНИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ (CoCrFeNi)₉₄Al₄Ti₂ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА

Сараева А.А. *, Победенная З.В., Киреева И.В., Чумляков Ю.И.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия

*anastasia16-05@yandex.ru

На монокристаллах высокоэнтропийного сплава (ВЭС) (CoCrFeNi)₉₄Al₄Ti₂ (ат. %), ориентированных вдоль $[\bar{1}44]$ - направления, исследовано совместное влияние низкотемпературной деформации двойникованием при 77 К и частиц γ' - фазы на температурную зависимость предела текучести $\sigma_{0.1}$, пластичность и разрушение при деформации растяжением.

Установлено, что начало пластического течения в $[\bar{1}44]$ - кристаллах (CoCrFeNi)₉₄Al₄Ti₂ ВЭС связано со скольжением и температурная зависимость $\sigma_{0.1}(T)$ состоит из двух температурных интервалов, характерных для деформации скольжением ГЦК сплавов замещения: при $T < 373$ К наблюдается сильная температурная зависимость $\sigma_{0.1}(T)$, связанная с термоактивируемым взаимодействием дислокаций с атомами замещения, а при $T > 373$ К $\sigma_{0.1}(T)$ слабо зависят от температуры как $G(T)$. Отношение $\sigma_{0.1}(77\text{K}) / \sigma_{0.1}(300\text{K}) = 2.1$. В результате сильной температурной зависимости предела текучести $\sigma_{0.1}(T)$ исходные $[\bar{1}44]$ - кристаллы (CoCrFeNi)₉₄Al₄Ti₂ ВЭС в области низких температур оказываются близкими к высокопрочным материалам ($\sigma_{0.1} \sim G/140 - G/220$, здесь G – модуль сдвига), тогда как в области высоких температур при $T \geq 300$ К они являются низкопрочными ($\sigma_{0.1} > G/360$). К высокопрочным материалам относят материалы с пределом текучести $\sigma_{0.1} \sim G/100$. Двойникование в исходных $[\bar{1}44]$ - кристаллах развивается после 15 % деформации при 77 К.

Старение в течение 4 часов при 923К приводит к выделению частиц γ' - фазы размером $d < 5$ нм. Выделение частиц γ' - фазы повышает $\sigma_{0.1}$ на 50 – 100 МПа в широком температурном интервале $T = 77 - 973$ К относительно исходных кристаллов без частиц, но при этом высокопрочное состояние при $T > 373$ К не достигается. После низкотемпературной деформации 50% при 77 К, при которой вводится высокая плотность двойников, и дополнительного старения в течение 4 часов при 923 К $\sigma_{0.1}$ увеличиваются на 400 – 500 МПа в температурном интервале $T = 77 - 973$ К. В результате $[\bar{1}44]$ - кристаллы (CoCrFeNi)₉₄Al₄Ti₂ ВЭС становятся высокопрочными в широком температурном интервале от 77 К до 973 К, поскольку $\sigma_{0.1} \approx G/100 - G/120$. Деформация высокопрочных $[\bar{1}44]$ - кристаллов реализуется скольжением. Пластичность уменьшается в 7 – 10 раз по сравнению с исходными кристаллами, где пластичность составляла 70 %, но разрушение сохраняется преимущественно вязким.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 19-19-00217.

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ КАРБИДОВ СИСТЕМЫ Hf-Ta-Ti-Nb-Zr-Mo-C

Седегов А.С.*, Сиднов К., Воротыло С., Бобожанов А.Р., Московских Д.О.

НИТУ «МИСиС», НИЦ «Конструкционные керамические наноматериалы»,
Москва, Россия

*sedegov.alex@yandex.ru

Создание новых материалов, отвечающих особым требованиям, способствовало появлению новых направлений в материаловедении. Ярким тому примером являются высокоэнтروпийные материалы. Начиная с 2004 года [1] к исследованию высокоэнтропийных материалов уделяется всё больше внимания.

Целью проводимого исследования было получение высокоэнтропийных карбидных керамик на основе системы Hf-Ta-Ti-Nb-Zr-Mo-C методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), исследование свойств объёмного материала и проведение первопринципных расчётов формирования высокоэнтропийной керамики.

На начальной стадии были проведены расчёты дескриптора формирования высокоэнтропийной керамики, предложенного в работе [2] в рамках теории функционала плотности. Данный дескриптор позволяет с помощью анализа энергетического спектра композиций со случайным распределением атомов в решетке оценить вероятность формирования высокоэнтропийного керамики. Расчёты из первых принципов выполнялись при помощи метода супер-ячеек, с использованием приближения PAW [3] в параметризации PBE [4]. Были сгенерированы [5] все возможные варианты распределения атомов в 10 атомных ячейках и затем, на основе вычисленной приведенной полной энергии рассчитывался энтропийный фактор.

Для исследования объёмных материалов были получены порошки высокоэнтропийных керамик методом синтеза горением. Результаты рентгенофазового анализа показали, что во всех случаях продуктами горения являются твердые растворы с ГЦК структурой решетки. Что подтверждает проведенные расчёты дескриптора формирования высокоэнтропийной керамики.

Список литературы:

1. Yeh J.-W., et.al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Adv. Eng. Mater.* 2004. Vol. 6. P. 299–303.
2. Pranab Sarker, et. al., High-entropy high-hardness metal carbides discovered by entropy descriptors. *NATURE COMMUNICATIONS*, 9 (2018) p. 4980
3. Blöchl, P.E., Projector augmented-wave method, *Phys. Rev. B*, 1994, vol. 50, no. 24, pp. 17953–17979
4. Perdew, J.P., et.al Generalized gradient approximation made simple, *Phys. Rev. Lett.*, 1996, vol. 77, no. 18, pp. 3865–3868.
5. Okhotnikov, K., et.al. (2016). Supercell program: a combinatorial structure-generation approach for the local-level modeling of atomic substitutions and partial occupancies in crystals. *Journal of Cheminformatics*, 8(1), 17.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-33-90124.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ УГЛЕРОДОМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ КРИОГЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА CoCrFeMnNi

Семенюк А. О. *, Климова М. В., Черниченко Р. С., Шайсултанов Д. Г., Степанов Н. Д., Жеребцов С. В., Салищев Г. А.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия

*semenyuk@bsu.edu.ru

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭСы) с гранцентрированной кубической (ГЦК) структурой на основе 3d переходных металлов могут рассматриваться как перспективные конструкционные материалы для криогенной техники, благодаря своим привлекательным механическим свойствам. Сплавы системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni демонстрируют высокую пластичность и вязкость при комнатной и криогенной температурах, однако обладают низкими прочностными характеристиками [1]. Легирование элементами внедрения, в частности углеродом, способствует улучшению механических свойств сплава [2]. Однако равновесная растворимость углерода в ГЦК матрице сильно зависит от количества хрома. Уменьшение содержания хрома в 4 раза по сравнению с эквивалентным составом приводит к практически полному растворению 2 ат. % углерода в твердом растворе. В работе рассмотрено влияние легирования углеродом на структуру и механические свойства сплава CoCr_{0,25}FeNiMn при комнатной и криогенной температурах.

Высокоэнтропийный сплав CoCr_{0,25}FeNiMnC_x (x=0; 2 ат. %), полученный методом вакуумной индукционной плавки, был подвергнут прокатке при комнатной температуре до степени деформации 80% и отожжен при температуре 800°C в течение 1 часа. После деформационно-термической обработки сплав без углерода имеет однофазную полностью рекристаллизованную структуру с размером зерен 6,4 мкм. Добавление углерода приводит к выделению карбидов типа M₂₃C₆, со средним размером около 100 нм. Высокая объемная доля (около 7,5%) и гомогенное распределение позволяют получить ультрамелкозернистую структуру матрицы с размером зерен 1,6 мкм. Присутствие частиц второй фазы приводит к увеличению прочности сплава CoCr_{0,25}FeNiMn. Предел текучести повышается с увеличением концентрации углерода от 313 МПа при x=0 до 636 МПа при x=2 ат. % C, пластичность при этом незначительно падает с 56% до 43%, соответственно. Снижение температуры испытания до -196°C ведет к существенному росту как прочности, так и пластичности сплавов. Сплавы демонстрируют высокие значения ударной вязкости 140 Дж/см² для x=0 и 85 Дж/см² для x=2ат.%. При этом изменение температуры испытания не оказывает заметного влияния на ударную вязкость, в интервале температур от 20 до -196°C перехода из вязкого состояния в хрупкое не наблюдается.

Список литературы:

1. Cantor B. [et. al.] // A. Mater. Sci. Eng. 375–377. (2004). 213-218.
2. Stepanov N. D. [et. al.] // J. Alloys Compd. 687. (2016). 59-71.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00003).

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ФАЗОВОГО СОСТАВА КЕРАМИК НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА

Сметанина К. Е.^{*}, Андреев П. В., Ланцев Е. А., Востоков М. М.

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

^{*} smetanina-ksenia@mail.ru

Твердые сплавы на основе WC обладают высокой твердостью и высокой температурой плавления, что делает их незаменимой основой металлорежущего инструмента. Одним из перспективных методов получения сплавов является метод электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС) порошков [1].

На поверхности частиц α -WC может содержаться адсорбированный кислород, который при нагревании может вступить в реакцию с углеродом в карбидных частицах с образованием CO [2]. Это приведет к нарушению стехиометрии в спекаемом объеме с образованием хрупкой фазы W_2C . В результате диффузии углерода, например, с графитовых деталей пресс-формы этот эффект может уменьшаться в процессе спекания: отсутствие W_2C в поверхностном слое и наличие на некотором расстоянии от поверхности.

Для проверки выдвинутой гипотезы исследовались керамики, полученные методом ЭИПС. Спекание порошка WC со средним размером частиц ~ 3 мкм осуществлялось на установке «Dr. Sinter model SPS-625» (SPS Syntex, Япония) в вакууме ($V=50^\circ\text{C}/\text{мин}$, $P=70$ МПа) при 1690°C . Образец №1 спекался в графитовой пресс-форме, №2 – в пресс-форме, на детали которой напылялся VN для изоляции порошка. Поверхности образцов подвергались последовательной механической шлифовке с помощью алмазных дисков и полировке с помощью алмазных паст.

Рентгенодифракционные эксперименты проводились на дифрактометре «XRD-7000» (Shimadzu, Япония) ($\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) в диапазоне углов $30 - 80^\circ$ («режим широкой щели») с шагом сканирования 0.04° и временем экспозиции 2 с. Количественный фазовый анализ проводился методом корундовых чисел. РФА исходного порошка WC показал, что в нем содержится $2.7 \pm 0.2\%$ масс.

После 1-го этапа обработки поверхности керамик фиксируется малая доля W_2C ($0.8 \pm 0.1\%$ масс.), что говорит о восстановлении W_2C до WC. Последующие слои содержат долю W_2C , совпадающую с долей W_2C в исходном порошке WC.

Наблюдаемый результат косвенно подтверждает предположение о том, что в процессе спекания образцов WC методом ЭИПС происходит диффузия углерода с графитовых деталей пресс-формы, контактирующих с поверхностью спекаемых образцов. Таким образом восполняется дефицит углерода в поверхностных слоях с восстановлением нежелательной фазы W_2C до WC. Толщина слоя, в котором наблюдается неоднородность фазового состава, составляет не менее 100 мкм.

Список литературы:

1. В.С. Панов, А.М. Чувиллин. *Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них.* – М.: МИСиС, 2001. – 428 с.
2. А.С. Курлов, А.И. Гусев. *Физика и химия карбидов вольфрама.* – М.: Физматлит, 2014. – 272 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ в рамках гранта №18-73-10177.

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННОГО NiCrBSiFeC–Cr₃C₂ ПОКРЫТИЯ ПОСЛЕ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Соболева Н. Н.^{1,2*}, Макаров А. В.^{1,2,3}, Николаева Е. П.³,
Скорынина П. А.¹, Малыгина И. Ю.¹

¹Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия;

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия;

³Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
*natashasoboleva@list.ru

NiCrBSiFeC покрытия находят широкое применение для упрочнения новых и восстановления изношенных деталей, эксплуатирующихся в условиях коррозии и износа. Лазерная наплавка, позволяющая получать однородные слои с малым коэффициентом перемешивания наплавляемого порошка с основой, является современным способом нанесения указанных покрытий.

Дальнейшее повышение их свойств возможно за счет введения в состав порошка карбидов, оксидов, боридов и других соединений при наплавке. Особый интерес вызывают композиционные NiCrBSiFeC–Cr₃C₂ покрытия, которые вследствие высокой износостойкости, стойкости к коррозии и окислению при высоких температурах успешно используются в авиационной промышленности.

В качестве финишной операции при подготовке NiCrBSiFeC покрытий перед эксплуатацией возможно использование фрикционной обработки скользящими инденторами [1]. При рационально подобранных технологических параметрах такая обработка обеспечивает упрочнение поверхности и снижение ее шероховатости.

В работе проведена фрикционная обработка поверхности композиционных NiCrBSiFeC–Cr₃C₂ (15% Cr₃C₂) покрытий, сформированных лазерной наплавкой. Обработка проводилась на воздухе инденторами из мелкодисперсного кубического нитрида бора и синтетического алмаза при нагрузке на индентор 500 Н и пятикратном сканировании поверхности индентором.

Фрикционная обработка индентором из алмаза привела к существенному снижению шероховатости покрытия NiCrBSiFeC–Cr₃C₂, несмотря на незначительное упрочнение его поверхности. После фрикционной обработки индентором из кубического нитрида бора наблюдается повышение шероховатости поверхности, однако такая обработка обеспечивает максимальное упрочнение поверхности, определенное по результатам измерения микротвердости и инструментального микроиндентирования.

Список литературы:

1. Патент РФ № 2709550. Н.Н. Соболева, А.В. Макаров, И.Ю. Малыгина. – Оpubл. в БИМП. – 2019. – № 35.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ МК-391.2019.8 и за счет средств, составляющих доход от доверительного управления целевым капиталом на развитие УрФУ, сформированным при участии ООО «УГМК-Холдинг», а также в рамках государственных заданий ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 и ИФМ УрО РАН по темам № АААА-А18-118020190116-6 и АААА-А19-119070490049-8. Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПЛАСТИНЧАТОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ В $(\alpha_2+\gamma)$ -ФАЗОВОЙ ОБЛАСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ЗАКАЛЕННОГО β -ЗАТВЕРДЕВАЮЩЕГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ ГАММА АЛЮМИНИДА ТИТАНА

Соколовский В. С.* , Панов Д.О., Волокитина Е.И., Салищев Г.А.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Россия

*sokolovskiy@bsu.edu.ru

Последние нескольких десятилетий идет активное исследование β -затвердевающих сплавов на основе гамма алюминидов титана [1]. Такие сплавы обладают высоким потенциалом для применения в качестве лопаток газотурбинных двигателей в компрессоре высокого давления и турбине низкого давления. Характерная для таких сплавов низкая пластичность и вязкость разрушения в широком интервале температур вызывают сложности в обработке таких сплавов [1]. Улучшение механических свойств, в частности прочности и пластичности, наблюдается при снижении размеров пластинчатых колоний. Применение деформационно-термической обработки позволяет значительно измельчить исходную структуру. Однако при деформации наблюдаются высокие напряжения течения и сильная локализация пластической деформации [2]. Одним из возможных путей снижения напряжений течения и повышения однородности пластической деформации является предварительная термическая обработка сплава. Протекание фазового превращения и/или трансформации структуры во время деформации может оказать положительное влияние на структуру после деформации. В β -затвердевающих сплавах на основе гамма алюминидов титана возможно получение метастабильной структуры представленной зернами α_2 -фазы при комнатной температуре путем закалки из однофазной α -области. При дальнейшем нагреве под деформацию в $\alpha_2+\gamma$ фазовую область протекает $\alpha_2 \rightarrow \alpha_2+\gamma$ фазовое превращение. Высокие скорости нагрева под деформацию приводят к формированию тонкопластинчатой структуры, которая будет не стабильна при температуре деформации. В β -затвердевающих сплавах с тонкопластинчатой структурой возможно протекание реакции прерывистого роста [3]. В результате чего происходит образование областей со смешанной морфологией частиц γ -фазы с большим межпластинчатым расстоянием. При деформации сплава с таким типом структуры наблюдается активное протекание динамической рекристаллизации и сфероидизации в областях с большим межпластинчатым расстоянием, что приводит к снижению напряжений течения и значительному увеличению рекристаллизованного объема. Применение термической обработки позволяет устранить поверхностные трещины и увеличить однородность структуры по сечению заготовки.

Список литературы:

1. *Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology* / F. Appel – Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Weinheim, 2011. – 745 p.
2. R.M. Imaev, V.M Imaev., M. Oehring, and F. Appel / *Metall. Mater. Trans.*, (2005) 36A, p. 859.
3. G.W. Qin et al. / *Metallurgical And Materials Transactions A. Volume 32a, August 2001, p. 1927*

ВЛИЯНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ НА МИКРОСТРУКТУРУ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ 9%CR СТАЛИ, ЛЕГИРОВАННОЙ ТАНТАЛОМ

Ткачѳв Е. С. *, Борисова Ю. И.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия

*Tkachev_e@bsu.edu.ru

Сопротивление высокотемпературной ползучести является ключевой характеристикой, определяющей эксплуатационные параметры высокохромистых теплотехнических сталей [1].

В качестве материала исследования в работе выступает сталь мартенситного класса Fe-0,1C-9Cr-1,8W-0,6Mo-3Co-Nb-V-0,0012B-0,007N-0,085Ta (масс.%). Термическая обработка стали включала нормализацию при 1050°C и последующий отпуск при 780°C. Анализ фазового состава и исследование тонкой структуры осуществлялись методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием микроскопа Jeol «JEM-2100» при ускоряющем напряжении 200кВ.

Установлено, что жаропрочность исследуемой 9%Cr стали, легированной танталом, при приложенных напряжениях до ~110 МПа выше большинства разработанных к настоящему времени сталей и приближена к жаропрочности мартенситных сталей, упрочненных дисперсными частицами оксидов и недавно разработанных 10%Cr сталей, обладающих сверхвысоким сопротивлением ползучести [2]. Относительно высокое значение показателя $n=17$ в степенном законе ползучести указывает на повышенную устойчивость материала к диффузионно-контролируемому перераспределению дислокаций. Спрогнозированный предел длительной прочности исследуемой стали при температуре 630°C на 100 000 часов составляет $\sigma_{10^5}^{630} = 110$ МПа.

Исследование структуры после ползучести и длительного отжига при 650°C показало, что в дополнение к частицам карбида $M_{23}C_6$ и карбонитридов $M(C,N)$, формирующихся в исследуемой стали при термической обработке, происходит образование фазы $Fe_2(W,Mo)$. Отжиг длительностью 3 738 ч приводит к укрупнению частиц $Fe_2(W,Mo)$ и $M_{23}C_6$ до 239 и 85 нм соответственно. Частицы карбонитридов MX демонстрируют высокую стойкость к укрупнению, их средний размер за 3 738 ч ползучести не превысил 40 нм.

Формирование частиц фазы Лавеса на межфазной поверхности $M_{23}C_6$ /феррит приводит к образованию протяженных цепочек из зернограничных частиц в условиях кратковременной ползучести. Частицы фазы Лавеса содержат Fe, Cr, W и Mo, при этом отношение W/Mo в данных частицах составляет ~2,5, что близко к отношению этих элементов в химическом составе стали.

Таким образом, комплексное легирование, направленное как на стабилизацию карбидов $M_{23}C_6$ так и на дополнительное упрочнение карбонитридами (Nb,Ta)(C,N) является перспективным подходом к разработке новых композиций высокохромистых теплотехнических сталей мартенситного класса, обладающих повышенным сопротивлением ползучести.

Список литературы:

1. F. Abe, *New martensitic steels, in: Mater. Ultra-Supercritical Adv. Ultra-Supercritical Power Plants, 2016: C. 323-374.*
2. R. Mishnev, N. Dudova, R. Kaibyshev, *On the origin of the superior long-term creep resistance of a 10% Cr steel, Mater. Sci. Eng. A. 713 (2018) 161-173.*

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СРЕДНЕМАРГАНЦЕВОЙ СТАЛИ

Торганчук В.И.* , Беляков А.Н., Кайбышев Р.О.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
*torganchuk@bsu.edu.ru

За последние десять лет существенно возросли требования безопасности пассажиров, а также экологической безопасности в автомобильной промышленности. Это вызвало повышенный интерес к высокопрочным автомобильным сталям, что нашло свое отражение на публикационной активности в соответствующей области исследований в мире. На сегодняшний день объектом повышенного внимания являются стали с высоким и средним содержанием марганца. Сбалансированное сочетание прочности и пластичности, наряду с экономно легированным составом, можно получить для сталей с так называемой пластичностью наведенной фазовым превращением («TRIP» стали в англоязычной литературе). Основной вклад в упрочнение и пластичность в таких сталях дает мартенситное превращение в процессе деформации, что препятствует локализации пластического течения.

Стали с высоким содержанием углерода имеют ряд ограничений использования в промышленности, связанных с плохой свариваемостью. Исследуемые в настоящей работе стали лишены данного недостатка, содержание углерода не превышает 0,2 вес.% (Fe-0.2C-10Mn-(0-3)Al). Интересной особенностью исследуемых сталей является то, что в зависимости от деформационной и/или термической обработки удается получить различный комплекс механических свойств. В результате, можно существенно увеличить номенклатуру выпускаемых изделий из разработанных перспективных среднемарганцевых сталей системы Fe-10Mn-0.2C-(0-3)Al. Варьируя фазовый состав (объемное содержание аустенитной и ферритной фазы) за счет термических обработок можно изменить твердость почти на 100 единиц HV. Так, например, для стали Fe-10Mn-0.2C твердость меняется в диапазоне от 370 до 470 HV. Наиболее интересные результаты получились для стали Fe-10Mn-0.2C-3Al после теплой прокатки и последующей термической обработки. Предел текучести составил 605 МПа, предел прочности 1095 МПа, а относительное удлинение до разрушения 55%. При этом, в исходном состоянии для данной стали предел текучести составлял 1020 МПа, предел прочности 1075 МПа, а относительное удлинение до разрушения 25%.

Исследования проводились на оборудовании центра коллективного пользования «Диагностика структуры и свойств наноматериалов» ФГАОУ ВО НИУ «БелГУ».

ЖАРОПРОЧНОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ 10X9МВФБР ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРИСАДОЧНОЙ 9%Сr СТАЛИ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ БОРА

Ткачѐв Е. С.*, Борисова Ю.И.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
*Tkachev_e@bsu.edu.ru

В работе определена длительная прочность и исследована микроструктура сварного соединения стали 10X9МВФБР (P911 по американской классификации ASME) полученного с использованием присадочной проволоки из 9%Cr мартенситной стали с повышенным содержанием бора.

Испытания на длительную прочность были проведены с использованием испытательных машин АТС2330 на воздухе, при температуре 650°C и напряжениях 140, 120 и 100 МПа. Анализ фазового состава и исследование тонкой структуры осуществлялись методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием микроскопа Jeol «JEM-2100» при ускоряющем напряжении 200кВ.

Время до разрушения при температуре 650°C и приложенных напряжениях 140, 120 и 100 МПа составило 26, 120 и 1375 ч. соответственно. Жаропрочность сварного шва несколько уступает жаропрочности стали 10X9МВАФБР, являющейся металлом основы, что объясняется дополнительным разупрочнением, вызванным нагревом околошовной зоны термического влияния при сварке.

Исследование тонкой структуры после ползучести при напряжениях 140, 120 и 100 МПа также показывает, что в процессе ползучести при 650°C как в зоне сплавления, так и в зоне термического влияния происходит дополнительное выделение частиц фазы Лавеса $Fe_2(W,Mo)$ и укрупнение частиц карбида $M_{23}C_6$ и карбонитридов МХ. Речная структура постепенно трансформируется в субзеренную, что особенно проявляется в зоне термического влияния. Количественный анализ структуры показал, что поперечный размер реек и субзерен при ползучести при напряжении 100 МПа увеличивается на ~30% в зоне сплавления, в то время как в зоне термического влияния средний размер субзерен увеличился в 2 раза. Во всех исследуемых зонах наблюдаются строчные выделения карбидов по бывшим границам реек.

Для общей оценки разупрочнения свариваемой стали 11X9МВАФБР и присадочной стали 10X9К3В2НМАФБР была исследована твердость в различных зонах сварного соединения. Результаты исследования микроструктуры позволяют предположить, что повышение твердости в зоне сплавления после краткосрочных испытаний на ползучесть вызвано дополнительным дисперсионным упрочнением от частиц фазы Лавеса. Уменьшение твердости в зоне сплавления и в зоне термического влияния с увеличением времени ползучести связано с процессами деградации микроструктуры, а именно с укрупнением реек/субзерен, коагуляцией частиц вторых фаз и постепенным снижением плотности дислокаций. Следует отметить, что снижение твердости в зоне термического влияния при ползучести происходит более интенсивно, что указывает на ускорение процессов деградации микроструктуры под воздействием высокотемпературной деформации.

ЭВОЛЮЦИЯ РЕЕЧНОЙ СТРУКТУРЫ МАРТЕНСИТА 12%Cr СТАЛЕЙ С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ N И НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ В В ПРОЦЕССЕ ПОЛЗУЧЕСТИ

Федосеева А. Э. *, Никитин И. С., Федосеев А. Э., Кайбышев Р. О.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
*fedoseeva@bsu.edu.ru

12%Cr стали мартенситного класса являются перспективным материалов для изготовления элементов котлов, паропроводов, нагревателей, лопаток паровых турбин энергоблоков угольных электростанций, работающих на суперсверхкритических параметрах пара. Основной недостаток этих сталей заключается в низкой стабильности реечной структуры мартенсита, формирующейся при термической обработке, в процессе ползучести при повышенных температурах. Под воздействием температуры и приложенного напряжения реечная структура мартенсита быстро деградирует, трансформируясь в субзеренную структуру с большим размером субзерна. Это значительно снижает сопротивление ползучести и ограничивает потенциальное применение 12%Cr сталей в теплоэнергетике. Новый подход к легированию 9-12%Cr сталей, заключающийся в добавлении кобальта, снижении содержания азота и увеличении содержания бора, может устранить этот недостаток. Целью настоящего исследования является исследование эволюции реечной структуры мартенсита двух 12%Cr сталей с низким содержанием азота и высоким содержанием бора в процессе ползучести при 650°C в сравнении с 9%Cr сталью, содержащей кобальт и стандартное содержание азота и бора.

Две 12%Cr стали и одна 9%Cr стали были подвергнуты испытаниям на ползучесть при 650°C в диапазоне приложенных напряжений 180-100 МПа с шагом 20МПа. Характеристика структуры после отпуска и ползучести была проведена с использованием просвечивающего электронного микроскопа.

После отпуска при 750-770°C во всех сталях формируется реечная структура мартенсита. Ширина мартенситных реек во всех сталях была приблизительно одинаковая и составила 300-400 нм. Карбиды $M_{23}C_6$ расположены по границам зерен, а частицы карбонитридов MX равномерно распределены по объему матрицы.

Анализ данных с испытаний на ползучесть показал, что обе 12%Cr стали не содержат переломов на кривой длительной прочности, в то время как перелом на кривой длительной прочности появляется для 9%Cr стали после 2000 час ползучести. Добавление тантала, а также снижение содержание азота и повышение содержания бора в 12%Cr стали позитивно влияет на свойства при ползучести.

После ползучести в условиях 650°C/120 МПа реечные структуры мартенсита всех сталей деградируют: в 12%Cr сталях реечная структура только частично трансформировалась в субзеренную структуру, в то время как в 9%Cr стали образуется 100% субзеренная структура. Экспериментальные размеры субзерен и равновесные субзерна, рассчитанные по балансу движущих и тормозящих сил, а также с использованием зависимости размера субзерен от приложенного напряжения во время ползучести, были сопоставлены для оценки вклада вторичных частиц и приложенного напряжения в рост субзерен во время отпуска и ползучести в разных сталях. Мелкие граничные частицы обеспечивают эффективное замедление миграции границы рейки, что предотвращает рост субзерен в сталях с 12%Cr по сравнению со сталью с 9%Cr.

Работа выполнена за счет гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (Конкурс – МК-2019) (соглашение № 075-15-2019-1165).

СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ CoCrFeMnNi ЛЕГИРОВАННОГО Al

Черниченко Р. С.* , Климова М. В., Семенюк А. О., Шайсултанов Д. Г.,
Жеребцов С. В., Степанов Н. Д.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
*chernichenko@bsu.edu.ru

Несмотря на интенсивные исследования последних лет, многие аспекты поведения высокоэнтропийных сплавов остаются малоизученными. В частности, дополнительного изучения заслуживает влияние легирующих элементов на механизмы деформации и возможность выделения дисперсных упрочняющих частиц в сплавах на основе системы Co-Cr-Fe-Ni-Mn. Известно, что добавление Al в высокоэнтропийный сплав системы CoCrFeMnNi может привести к выделению частиц второй фазы типа AlNi.

В данной работе были исследованы механические свойства сплава CoCrFeMnNiAl в температурном интервале 25—1000°C при скоростях деформации 10^{-3} – 10^{-5} с⁻¹. Сплав CoCrFeMnNiAl был получен методом вакуумной индукционной плавки. Литой сплав был подвергнут прокатке при комнатной температуре с обжатием до 80% и отжигу при температуре 900°C в течение 5 часов. Отжиг привел к полной рекристаллизации и формированию мелкозернистой структуры с размером зерна 1,6 мкм. В процессе отжига происходит выделение дисперсных частиц В₂ фазы. Частицы имеют округлую форму. Средний размер частиц составляет 0,8 мкм, а их объемная доля достигает 14%

Исследование механических свойств в результате проведения испытаний на растяжение показало, что с повышением температуры испытаний все прочностные характеристики снижаются, при этом происходит значительное увеличение относительного удлинения. Таким образом, предел прочности снизился с 973МПа до 20 МПа в интервале температур испытания 25-1000С при скорости деформации 10^{-3} с⁻¹. При этом относительное удлинение увеличилось с 30% до 200% соответственно. Уменьшение скорости деформации привело к еще большему увеличению пластичности материала. Так, снижение скорости деформации от 10^{-3} с⁻¹ до 10^{-5} с⁻¹ при 900°C привело к почти двухкратному росту пластичности (от 210% до 390%). По результатам испытаний был определен коэффициент скоростной чувствительности. Обсуждается влияние параметров структуры на механизмы деформации и разрушения сплава.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-19-00003.

ПОДВЕРГНУТЫЕ ИПД ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ $Ti_{18}Zr_{15}Nb$ И $Ti_{10}Mo_8Nb_6Zr$

А.А. Чуракова^{1,2*}, Д.В. Гундеров^{1,2}, С.Д. Прокошкин³, В.А. Шереметьев³, Paulo N. Lisboa Filho⁴, Ana Paula Rosifini Alves Claro⁴

¹Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, г. Уфа, Россия;

²Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет, г. Уфа, Россия;

³НИТУ «МИСиС», г. Москва, Россия;

⁴São Paulo State University, São Paulo, Brazil

*churakovaa_a@mail.ru

β -титановые сплавы с низким модулем упругости представляют большой интерес в качестве материалов для медицинских имплантатов. Новый перспективный сплав $Ti_{18}Zr_{15}Nb$, развиваемый группой НИТУ «МИСиС», обладает эффектами памяти формы. Сплав $Ti_{10}Mo_8Nb_6Zr$ разрабатывается группой из São Paulo State University. Ранее методы ИПД показали свою эффективность для повышения свойств Ti и ряда титановых сплавов медицинского применения, а также $TiNi$ [1-3]. Исследования влияния ИПД на сплавы $Ti_{18}Zr_{15}Nb$ и $Ti_{10}Mo_8Nb_6Zr$ до настоящего времени не проводились.

Образцы сплавов были подвергнуты ИПДК и РКУП по различным режимам. Согласно данным РСА в закаленном состоянии обоих сплавов основной фазой является β -фаза. После ИПДК в сплавах появляются фазы α'' и/или α , но в сплаве $Ti_{18}Zr_{15}Nb$ в заметно меньшем количестве, чем в $Ti_{10}Mo_8Nb_6Zr$. Это объясняется большей стабильностью β -фазы в $Ti_{18}Zr_{15}Nb$ к деформациям. В результате ИПДК и РКУП микротвердость и прочность сплавов повышается на 50 %. Однако прирост прочности и микротвердости сплава $Ti_{18}Zr_{15}Nb$ после аналогичных ИПД ниже, чем у $Ti_{10}Mo_8Nb_6Zr$, так же объясняется малой долей формирующихся в первом сплаве α'' , α и ω -фаз, повышающих прочность β - Ti сплавов. Но большая стабильность β -фазы в $Ti_{18}Zr_{15}Nb$ к деформациям должна обеспечить низкий модуль упругости данного сплава в НС состоянии и сохранения ЭПФ, что эффективно для медицинского применения.

Список литературы:

1. D.V. Gunderov, A.V. Polyakov, A.A. Churakova, I.P. Semenova, G.I. Raab, R.Z. Valiev, E. Emaletdinova, I. Sabirov, J. Segurado, V.D. Sitdikov, I.V. Alexandrov, N.A. Enikeev, R.Z. Valiev *Materials Science & Engineering A* 562 (2013) 128-136.
2. S.A. Gatina, I.P. Semenova, L. Joern, R.Z. Valiev. Gatina, S.A. *Advanced Engineering materials* – 2015. – Vol.17 (12) – P. 1742-1747.
3. Gunderov D., Lukyanov A., Prokofiev E., Kilmametov A., Pushin V., Valiev R. // *Materials Science and Engineering A*. 2009. V.503. P. 75-77.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ-БРИКС_т 19-58-80018 и РНФ 20-69-47029.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ЛИТЫХ И МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ Al-(2.5, 4)%Mg-Sc-Zr

Я.С. Шадрин^{*}, А.В. Нохрин, В.И. Копылов, А.А. Бобров, В.Н. Чувильдеев

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
^{*}janashadr@gmail.com

Целью работы является изучение механизмов распада твердого раствора в литых и микрокристаллических (МК) сплавах Al-Mg-Sc-Zr с различным содержанием магния, скандия и циркония.

В качестве объекта исследования выступали сплавы Al-(2.5, 4%)Mg-Sc-Zr с суммарным содержанием Sc+Zr = 0.32%. Содержание скандия варьировали от 0.10% до 0.22% с интервалом в 0.02%, пропорционально изменяя концентрацию циркония в сплаве. МК структура формировалась методом РКУП при температуре 225 °С, число циклов N=4.

В исходном состоянии литые сплавы характеризуются однородной крупнозернистой макроструктурой, в которой размер зерен и дендритов зависит от соотношения скандия и циркония. В структуре сплавов присутствуют единичные субмикронные частицы $Al_3(Sc,Zr)$, образовавшиеся в процессе кристаллизации сплавов. После РКУП средний размер зерна в сплавах составляет ~0.5 мкм.

Анализ механизмов распада твердого раствора проводился с использованием уравнения Джонсона – Мела – Авраами – Колмогорова, на основании анализа результатов измерения зависимостей удельного электросопротивления (УЭС) от температуры и времени отжига.

Проведенные исследования показали, что процесс распада твердого раствора в литых сплавах имеет двухстадийный характер, обусловленный неоднородным распределением частиц Al_3Sc и Al_3Zr в структуре литых сплавов. Показано, что при более низких температурах отжига сначала выделяются частицы Al_3Sc , которые преимущественно располагаются на границах зерен / дендритов, а затем, при более высоких температурах отжига или больших временах старения, выделяются частицы Al_3Sc в объеме кристаллической решетки. Установлено, что энергия активации процесса выделения частиц в МК сплавах близка к энергии активации диффузии по ядрам решеточных дислокаций и границам зерен, зависит от содержания скандия и циркония. Показано, что в области низких температур и/или малых времен отжига выделение частиц происходит преимущественно на границах зерен, а в области высоких температур и/или больших времен отжига – на ядрах решеточных дислокаций.

Исследовано влияние распада твердого раствора на микротвердость и кинетику процессов рекристаллизации при отжиге. Определены температурно-временные интервалы отжига, обеспечивающие формирование однородной МК структуры с повышенной твердостью.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №18-13-00306.

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА, ДЕФОРМАЦИИ И ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ TRIP СПЛАВОВ

Шайсултанов Д. Г.* , Раимов К. Ш. и Степанов Н. Д.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия

*shaysultanov@bsu.edu.ru

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) в последнее время стали перспективными материалами с привлекательными механическими характеристиками, например сочетанием прочности и пластичности [1]. Отличные свойства сплавов часто являются результатом синергии различных механизмов деформации. Например, Ли и др. представили сплав $Fe_{50}Mn_{30}Co_{10}Cr_{10}$ (в ат.%), состоящий из двух (гранцентрированная кубическая- ГЦК и гексагональная плотноупакованная- ГПУ) фаз, проявляющий TRIP-эффект (transformation-induced plasticity – пластичность, наведенная превращением) [2]. Механические свойства ВЭСов могут быть значительно улучшены добавлением таких элементов внедрения, как углерод или азот, как это было показано в сплаве $Fe_{50}Mn_{30}Co_{10}Cr_{10}C_{0.5}$ [3]. В этом случае сплав дополнительно выигрывал за счет твердорастворного и дисперсионного упрочнения. Однако многие аспекты влияния углерода на структуру и свойства TRIP ВЭСов остаются неясными. Кроме того, не совсем понятно, как структура и свойства таких сплавов меняются в процессе термомеханической обработки. Таким образом, в настоящей работе мы (i) исследовали влияние содержания углерода (0-1 ат.%) на структуру литых сплавов на основе $Fe_{50}Mn_{30}Co_{10}Cr_{10}$ и (ii) изучили влияние термомеханической обработки на структуру и свойства сплава с 1 ат.% С.

Серия сплавов $Fe_{(50-x)}Mn_{30}Co_{10}Cr_{10}C_x$ ($x=0; 0,5; 1,0$ ат.%) была получена методом вакуумно-дуговой плавки. В литом состоянии сплавы имели двухфазную структуру из ГЦК и ГПУ фаз; количество ГПУ-фазы уменьшилось с 46% до 20% при увеличении концентрации углерода от 0 до 1 ат.%. Содержание углерода имеет ограниченное влияние на прочность сплавов, тогда как пластичность, в результате легирования, значительно повышается. Кроме того, сплав с 1 ат.% С подвергался холодной прокатке с обжатием 56% и последующему отжигу при 700-900°C в течение 1 часа. Структура сплава после холодной прокатки почти полностью состояла из ГПУ-фазы. Отжиг привел к 1) превращению ГПУ-фазы, вызванной деформацией, в ГЦК-фазу; (ii) развитию возврата и рекристаллизации; (iii) выделению обогащенных хромом карбидов $M_{23}C_6$. Сплав в холоднокатанном состоянии показал высокую прочность и низкую пластичность. Отжиг вызвал разупрочнение и повышение пластичности. Кратко обсуждаются взаимосвязи между химическим составом, структурой и механическими свойствами сплавов.

Список литературы:

1. *Miracle D B and Senkov O N 2017 A critical review of high entropy alloys and related concepts Acta Mater.* 122 448–511.
2. *Li Z, Pradeep K G, Deng Y, Raabe D and Tasan C C 2016 Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength–ductility trade-off Nature* 534.
3. *Li Z, Tasan C C, Springer H, Gault B and Raabe D 2017 Interstitial atoms enable joint twinning and transformation induced plasticity in strong and ductile high-entropy alloys Sci. Rep.* 7 40704.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10093).

ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ СПЛАВЫ С КОМПОЗИТНОЙ ЭВТЕКТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Al-Cr-Nb-Ti-Zr

Юрченко Н.Ю.* , Панина Е.С., Степанов Н.Д., Салищев Г.А.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
* yurchenko_nikita@bsu.edu.ru

Концепция высокоэнтропийных сплавов (ВЭСов) позволяет создавать материалы с уникальными структурами и свойствами. В частности, так называемые ВЭСы на основе тугоплавких элементов (тугоплавкие ВЭСы) рассматриваются в качестве перспективной замены существующих высокотемпературных материалов. Тугоплавкие ВЭСы зачастую базируются на однофазном ОЦК или В2 упорядоченном твердом растворе с возможным присутствием различных интерметаллидных соединений, как фаза Лавеса, алюминиды циркония или различные силициды. При этом, вследствие огромного числа возможных композиций, остается неясным, какой тип микроструктуры и составляющих фаз обеспечивает наиболее оптимальный комплекс механических свойств. Недавно был предложен многообещающий подход, заключающийся в контролируемом выделении когерентных наночастиц В2 фазы в ОЦК матрице. Такой микроструктурный дизайн хотя и позволяет получить достаточную пластичность при комнатной температуре, но не может обеспечить высокую прочность при $T > 600^{\circ}\text{C}$ вследствие нежелательных фазовых превращений. В свою очередь, в настоящей работе представлен альтернативный способ улучшения свойств тугоплавких ВЭСов за счет создания композитной структуры на основе эвтектической реакции между составными компонентами. Были разработаны относительно легкие (плотность менее 6 г/см^3) неэквивалентные сплавы на основе системы Al-Cr-Nb-Ti-Zr. Сплавы имели как доэвтектическую, так и заэвтектическую структуры с первичными В2 фазой и фазой Лавеса С14 (ГПУ), соответственно. Некоторые сплавы показали привлекательную прочность, в том числе удельную, при $T \leq 800^{\circ}\text{C}$. Обсуждаются соотношения между составом, структурой и свойствами, а также возможности и способы дальнейшей оптимизации новых тугоплавких ВЭСов с композитной эвтектической структурой с использованием термодинамического моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 19-79-30066).

СИНТЕЗ И ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ОКСИДОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦЕРИЯ

Япрынцева М.Н. *, Суджанская И.В.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия
*Yaprintsev@bsu.edu.ru

Идея разработки высокоэнтропийных оксидов была заимствована из накопленного опыта исследований в области проектирования высокоэнтропийных сплавов [1]. В литературе первые работы в данной области встречаются с 2015 года. Впервые был синтезирован энтропийно-стабилизированный (CoCuMgNiZn)O твердый раствор, со структурой Fm-3m [2]. С тех пор был опубликован ряд исследований, посвященных как свойствам данных оксидов [3], так и поиску новых высокоэнтропийных оксидных систем. В результате значительно расширился ряд известных высокоэнтропийных оксидов. Несмотря на очень раннюю стадию своего развития, оксиды с высокой энтропией уже показали большую перспективность в качестве функциональных материалов, демонстрируя, например, колоссальную диэлектрическую проницаемость, высокую ионную проводимость [4] и низкая теплопроводность. Некоторые из высокоэнтропийных оксидов были успешно испытаны в качестве анодных материалов для литий-ионных батарей или катодных материалов для Na-ионных элементов [1-4].

В настоящей работе впервые получены однофазные высокоэнтропийные оксиды состава (CeGdDySmPr)O_{2-δ} и CeGdDyLaPrO_{2-δ}. Оба материала были синтезированы золь-гель методом с последующим холодным одноосным компактированием и свободным спеканием при 1500 °C в воздушной среде. Были проведены комплексные исследования структурных, микроструктурных и электротранспортных свойств. Результаты исследования электротранспортных свойств демонстрируют сходство со свойствами классических систем на основе оксиды церия (Ce_{0,8}Pr_{0,2}O_{2-δ}).

Список литературы:

1. Cantor B. *Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys* / B. Cantor, I.T. Chang, P. Knight, A.J. Vincent // *Mater. Sci. Eng. A-Struct.* – 2004. – V.375-377. – P. 213-218.
2. Rost C.M. *Entropy-stabilized oxides* / C.M. Rost, R. Schaet, T. Borman, A. Moballeggh, E.C. Dickey, D. Hou, J.L. Jones, S. Curtarolo, J.P. Maria // *Nat. Commun.* – 2015. – V.6. – P. 8485.
3. Rost C.M. *Local structure of the Mg_xNi_xCo_xCu_xZn_xO (x=0.2) entropy-stabilized oxide: An EXAFS study* / C.M. Rost, Z. Rak, D.W. Brenner, J.P. Maria // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2017. V.100. – P. 2732-2738.
4. Bérardan D. *Room temperature lithium superionic conductivity in high entropy oxides* / D. Bérardan, S. Franger, A.K. Meena, D. Dragoe // *J. Mater. Chem. A.* – 2016. – V. 4. – P. 9536–9541.

Подписано в печать 09.10.2020. Гарнитура Times New Roman.

Формат 60×84/16. Усл. п. л. 6,28. Тираж 100 экз. Заказ 165.

Оригинал-макет подготовлен и тиражирован в ООО «Эпицентр»
308010, г. Белгород, ул. Б. Хмельницкого, д. 135, офис 40

ISBN 978-5-6045220-0-4



9 785604 522004