

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Юго-Западный государственный университет
Сибирский государственный индустриальный университет



3-я Международная
научно-практическая конференция

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ
РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ,**

посвященная памяти академика А.А. Байкова

Сборник научных статей

15 сентября 2022года

Ответственный редактор Е.В. Агеев

Курск 2022

УДК 620.22
ББК 30.3
С 56 СМП-03

Редакционная коллегия:

Е.В. Агеев, д-р техн. наук, профессор (отв. редактор)
Р.А. Латыпов, д-р техн. наук, профессор
А.Н. Новиков, д-р техн. наук, профессор
В.И. Серебровский, д-р техн. наук, профессор
В.В. Булычев, д-р техн. наук, профессор
В.И. Колмыков, д-р техн. наук, профессор
А.Ю. Алтухов, канд. техн. наук, доцент
А.А. Горохов, канд. техн. наук, доцент
С.А. Утаев, доцент, д.ф.т.н. (PhD), (Узбекистан)
С.В. Пикалов, канд. техн. наук (отв. секретарь)

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ
И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**, посвященная памяти
академика А.А. Байкова: сборник научных статей 3-й Международной научно-
практической конференции (15 сентября 2022 года)/ редкол.: Е.В. Агеев (отв. ред.)
[и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. - 210 с.

ISBN 978-5-907356-18-6

В материалах сборника нашли свое отражение опыт и научные разработки по следующим вопросам: изучение взаимосвязи химического и фазового составов сплавов; теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах; разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов объемной и поверхностной термической, химико-термической, термомеханической и других видов обработок; изучение взаимодействия металлов и сплавов с внешними средами в условиях работы различных технических устройств; исследование работоспособности металлов и сплавов в различных условиях; разработка новых принципов создания сплавов, обладающих заданным комплексом свойств; разработка новых и совершенствование существующих методов фазового, структурного и физико-химического анализа сплавов; определение механизмов влияния различных механических, тепловых, магнитных и других внешних воздействий на структурное состояние металлургических материалов и др.

Предназначен для научно-технических работников, ИТР, специалистов в области металловедения и термической обработки металлов и сплавов, преподавателей, студентов и аспирантов вузов.

Мероприятие организовано и проведено при поддержке гранта Президента РФ (НШ-596.2022.4).

ISBN 978-5-907356-18-6

УДК 620.22
ББК 30.3

© Юго-Западный государственный
университет, 2022
© Авторы статей, 2022

3. Knipling, K.E. Precipitation evolution in Al-0.1Sc, Al-0.1Zr and Al-0.1Sc-0.1Zr (at%) alloys during isochronal aging [Text] / K.E. Knipling, R.A. Karnesky, C.P. Lee, D.C. Dunand, D.N. Seidman // Acta Materiala. – 2010. - №58. - P.5184-5195.

Zorin Igor Alexandrovich¹, student of gr. 1139-220402D, laboratory assistant ONIL-4
(e-mail: zorin.ia@ssau.ru)

Drits Alexander Mikhailovich¹, Candidate of Technical Sciences, leading researcher ONIL-4
(e-mail: alexander.drits@arconic.com)

Aryshenskiy Evgeny Vladimirovich¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, senior researcher ONIL-4

(e-mail: arishenskiy.ev@ssau.ru)

Konovalov Sergey Valerievich^{1,2}, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities of SibGIU, head researcher
(e-mail: konovalov@sibsiu.ru)

¹Samara National Research University, Samara, Russia

²Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

EFFECT OF HAFNIUM ON THE PROPERTIES OF ALLOY SHEETS OF THE Al-Mg-Mn-Sc-Zr SYSTEM

The work is aimed at studying the effect of hafnium doping and various annealing modes on the mechanical properties of the Al-Mg-Mn-Sc-Zr alloy system.

Keywords: Aluminum alloys, hafnium alloying, microstructure, mechanical properties, heat treatment.

УДК 536.425:539.25:539.531:669.017

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА Al-Cr-Fe-Co-Ni

Иванов Юрий Федорович¹, д.ф.-м.н., профессор,

Коновалов Сергей Валерьевич², д.т.н., профессор

Ефимов Михаил Олегович²,

Панченко Ирина Алексеевна², к.т.н., доцент,

Громов Виктор Евгеньевич², д.ф.-м.н., профессор

(e-mail: i.r.i.ss@yandex.ru)

¹Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

²Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия

Проведен анализ дефектной субструктуры, фазового и элементного состава и трибологических свойств поверхностного слоя высокоэнтропийного сплава, сформированного в результате комплексной обработки, сочетающей напыление пленки (B+Cr) и электронно-пучковое облучение в аргонной среде. Установлен режим облучения ($E_s=20$ Дж/см²; $t=200$ мкс; $N=3$ имп.; $\tau=0,3$ с⁻¹), позволяющий повысить микротвердость (почти в 2 раза) и износостойкость (более чем в 5 раз), снизить коэффициент трения в 1,3 раза.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, электронно-ионно-плазменная обработка, система «пленка/подложка», борирование, структура, свойства.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) представляют собой новый класс материалов, состоящих из не менее 5 элементов, находящихся в эквиатомном или близком к эквиатомному соотношении, что обеспечивает им в отличие от традиционных сплавов уникальные свойства [1]. В последнее пятилетие, несмотря на огромное число публикаций по ВЭС и существующие при этом серьезные проблемы, проанализированные в [1-3], наметились два принципиально новых направления в физике высокоэнтропийных сплавов – улучшение свойств поверхности путем создания тонких покрытий и пленок, и модифицирования поверхности ВЭС различными видами обработки. Среди многочисленных методов нанесения пленок или покрытий из ВЭС необходимо остановиться на четырех из них: магнетронное напыление, термическое распыление, лазерное напыление, электроосаждение.

В последние годы разработано много методов поверхностного упрочнения, одним из них, показавшим высокую эффективность является обработка пучками электронов. Воздействие пучками электронов и дальнейшее охлаждение проводятся с достаточно большими скоростями нагрева (до 10⁶ К/с) поверхности металла с дальнейшим ее охлаждением за счет теплоотвода со скоростями 10⁴-10⁹ К/с. Такой сверхбыстрый процесс приводит к формированию в поверхностном слое неравновесных субмикро- и нанокристаллических структурно-фазовых состояний. Ранее в наших работах [4, 5] проведен анализ физических и механических свойств и структурно-фазовых состояний неэквиатомных высокоэнтропийных сплавов CrMnFeCoNi и CoCrFeNiAl, полученных методом проволоочно-дугового аддитивного производства и подвергнутых электронно-пучковой обработке.

Целью настоящего исследования является анализ дефектной структуры и фазового состава поверхностного слоя высокоэнтропийного Al-Cr-Fe-Co-Ni сплава после нанесения пленки (B+Cr) и облучения импульсным электронным пучком.

Материалом, который был использован для проведения исследований, является высокоэнтропийный сплав (ВЭС) элементного состава Al, Cr, Fe, Co, Ni, полученный с помощью проволоочно-дугового аддитивного производства. Исследования фазового и элементного состава, состояния дефектной субструктуры системы «пленка (Cr+B)/(ВЭС) подложка» был выполнен методами сканирующей (микроскоп SEM 515 Philips с микрорентгеноспектральным анализатором EDAX ECON IV) и просвечивающей дифракционной (микроскоп JEM 2100F) электронной микроскопии. Фазовый состав и состояние кристаллической решетки основных фаз поверхностного слоя образцов проводилось при помощи рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD 6000. Микротвердость поверхностного слоя определяли на

микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н. Исследование трибологических характеристик материала проводили на трибометре TRIBOtester.

Часть образцов подвергали модифицированию на установке «КОМПЛЕКС», а именно, напыляли пленку бора толщиной 0,5 мкм, поверхность пленки бора напыляли пленку хрома толщиной 0,5 мкм. Сформированную таким образом систему «пленка (В)+пленка (Cr)/(ВЭС) подложка» облучали импульсным электронным пучком. Формирование пленки бора на поверхности образцов ВЭС осуществляли методом плазменно-ассистированного ВЧ-распыления катода из порошка бора. Облучение системы «пленка/подложка» интенсивным импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛЮ» при следующих параметрах процесса: энергия ускоренных электронов $U = 18$ кэВ, плотность энергии пучка электронов $E_s = (20-40)$ Дж/см², длительность импульса пучка электронов $t = 200$ мкс, количество импульсов $N = 3$, частота следования импульсов $f = 0,3$ с⁻¹.

Высокоэнтропийный сплав, сформированный методом аддитивных технологий, имеет дендритное строение. Дендриты являются поликристаллическими агрегатами. Средний размер зерен 12,3 мкм. Методами микрорентгеноспектрального анализа установлено, что ВЭС сформирован химическими элементами Al, Cr, Fe, Co, Ni в следующем соотношении (ат. %): 33,4Al-8,3Cr-17,1Fe-5,4Co-35,7Ni.

Воздействие на образцы системы «пленка (Cr+В)/(ВЭС) подложка» проводилось с помощью электронно-пучковой обработки при вариации плотности энергии пучка электронов приводит, во-первых, к фрагментации, независимо от величины E_s , поверхностного слоя микротрещинами и, во-вторых, к формированию при $E_s = 20$ Дж/см² структуры типа «пчелиных сотов», а при $E_s = (30$ и $40)$ Дж/см² – структуры островкового типа. При этом размеры и количество островков на единицу длины с увеличением плотности энергии пучка электронов снижаются.

Воздействие импульсным электронным пучком системы «пленка/подложка» сопровождается не только преобразованием структуры пленки (Cr+В), но и структуры поверхностного слоя подложек. Во-первых, выявлено изменение размеров зерен: если в исходных образцах ВЭС средний размер зерен 12,3 мкм, то после облучения при $E_s = 20$ Дж/см² средний размер зерен 2,7 мкм. При больших значениях E_s размер зерен увеличивается и при $E_s = 40$ Дж/см² достигает 19,1 мкм. Во-вторых, высокоскоростная кристаллизация поверхностного слоя приводит к повсеместному формированию субзеренной структуры (структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации) с размером кристаллитов (150-200) нм. При $E_s = 20$ Дж/см² структура ячеистой кристаллизации практически не выявляется; при $E_s = 30$ Дж/см² – ячейки кристаллизации наблюдаются преимущественно в стыках зерен; при $E_s = 40$ Дж/см² ячейки высокоскоростной кристаллизации покрывают всю площадь образца.

Фазовый состав модифицированного электронным пучком поверхностного слоя ВЭС исследовали методами рентгенофазового анализа. Показано, что независимо от величины плотности энергии пучка электронов сплав является однофазным материалом, имеющим простую кубическую кристаллическую решетку. Одновременно с этим обнаруживается изменение параметра кристаллической решетки сплава. Одной из причин изменения параметра кристаллической решетки сплава является легирование образцов атомами бора, концентрация которых в объеме сплава, судя по результатам, полученным методами сканирующей электронной микроскопии, будет увеличиваться с ростом плотности энергии в интервале $E_s = (20-30)$ Дж/см². Следует отметить, что располагаться атомы бора в кристаллической решетке ВЭС будут на позициях внедрения, что и приведет к росту параметра решетки.

Облучение системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком приводит к существенному изменению механических и трибологических свойств образцов ВЭС. Во-первых, существенно (почти в 2 раза) увеличивается микротвердость, достигая максимального значения после облучения системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 20 Дж/см². Во-вторых, повышается (более чем в 5 раз) износостойкость образцов и снижается (в 1,3 раза) коэффициент трения, достигая наилучших значений после облучения системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 20 Дж/см².

Список литературы

1. Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy alloys / Springer. Advanced structured materials. 2021. Vol. 107. 110 p.
2. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121, № 8. Р. 807–841.
3. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. High-Entropy Alloys. Second edition. Amsterdam: Elsevier. 2019. 374 p.
4. Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Shliarova Yu.A., Vorobyov S.V., Semin A.P. Structure and properties of CrMnFeNiCo HEA irradiated with a pulsed electron beam // Journal Mater. Res. And Techn. 2022. Vol.19. P. 4258-4269.
5. Osintsev K.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kononov S.V., Panchenko I.A., Vorobyov S.V. Evolution of structure in AlCoCrFeNi HEA irradiated by pulsed electron beam // Metals. 2021. Vol. 11(8). No. 1228.

Ivanov Yuriy Fedorovich¹, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Kononov Sergey Valerievich², Doctor of Technical Sciences, Professor, Efimov Mikhail
Olegovich², Panchenko Irina Alekseevna², Ph.D., Associate Professor, Gromov Victor
Evgenievich², Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

¹Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, 634055 Russia

²Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, 654007 Russia

INFLUENCE OF ELECTRON-ION-PLASMA PROCESSING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF A HIGH-ENTROPY Al-Cr-Fe-Co-Ni ALLOY

The defect substructure, phase and elemental composition, and tribological properties of the surface layer of a high-entropy alloy formed as a result of a complex treatment combining

film deposition ($B + Cr$) and electron-beam irradiation in an argon medium are analyzed. Irradiation mode ($E_s=20 \text{ J/cm}^2$; $t=200 \text{ }\mu\text{s}$; $N=3 \text{ pulses}$; $\tau=0.3 \text{ s}^{-1}$) is set, which allows to increase microhardness (almost 2 times) and wear resistance (more than 5 times), reduce the coefficient of friction by 1.3 times.

Key words: *high-entropy alloy, electron-ion-plasma processing, film/substrate system, boriding, structure, properties.*

УДК 621

К ВОПРОСУ О СПОСОБЕ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ АГРЕГАТОВ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В КОРРОЗИОННО-АБРАЗИВНОЙ СРЕДЕ

Кончин Владимир Алексеевич, аспирант
(konchin98@mail.ru)

Курская ГСХА, г.Курск, Россия

Серникова Ольга Сергеевна, аспирант
(olga.sernikova@mail.ru)

Курская ГСХА, г.Курск, Россия

Агеев Евгений Викторович, д.т.н. профессор
E-mail: ageev_ev@mail.ru

Юго-Западный государственный университет, г.Курск, Россия

В статье проведен анализ существующих способов для упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных агрегатов, при эксплуатации в условиях коррозионно-абразивного износа. Предложена технология восстановления рабочей поверхности методом наплавки шихты полученной электроэрозийным диспергированием.

Ключевые слова: *отходы твердого сплава Т30К4, Электроэрозийное диспергирование, восстановление рабочей поверхности сельскохозяйственных агрегатов.*

Одной из основных задач в современном сельском хозяйстве является сохранность рабочего ресурса различных орудий для обработки почвы.

Ножи плугов, стрелчатые лапы, эксплуатируемые в условиях абразивной среды, интенсивно изнашиваются. В условиях политики импортозамещения и в целях экономии средств можно повысить рабочий ресурс рассматриваемых агрегатов поверхностным упрочнением.

В настоящее время авторемонтное производство располагает достаточно большим числом проверенных практикой способов ремонта, позволяющих вернуть работоспособность изношенным деталям.

Наплавка, как средство повышения износостойкости новых и восстановления изношенных деталей, приобретает все большее значение в сельском хозяйстве. При восстановлении изношенных поверхностей деталей наплавкой выбор электродов зависит от марки стали наплавляемой детали, необходимой твердости покрытия и износостойкости наплавленного слоя.

Для получения износостойкого покрытия, обладающего достаточно высокой твердостью, необходимо применение электродов, в состав которых входят элементы титано-тантало-вольфрамовой группы. Получить эти элементы возможно технологией электроэрозийного диспергирования. Значительные результаты в исследовании этого процесса достигнуты профессором Агеевым Е.В. и его научной школы [1,2,3].

В работах [4,5] показаны перспективные способы диспергирования широкого класса материалов: электроимпульсный метод (ЭИМ), электроискровой метод (ЭИС) и метод размерной обработки дугой (РОД). К преимуществам представленных способов можно отнести низкую энергоемкость, высокую производительность, а также возможность получения шихты обработкой деталей литых материалов, порошковых изделий и композиций в процессе диспергирования [4].

Шихта, полученная методом электроэрозии, прогнозируемо обладает высокими физико-механическими свойствами, однако широкого применения данный материал в условиях сельского хозяйства не нашел.

Нами предлагается использовать полый графитированный электрод с целью наплавки полученного порошкообразного материала на рабочую поверхность сельскохозяйственных агрегатов для основной обработки почвы. Для реализации поставленной цели планируется электроискровым методом нанести порошкообразный материал из сплава Т30К4 (твердость HRC 53...60), полученный методом электроэрозийного диспергирования. Соотношение твердости основного и нанесенного материала должно варьироваться в пределах 1:1,5...1:3,0.

Достоинствами данного способа можно считать низкие материальные затраты, возможность использования в условиях хозяйства, актуальностью в связи с политикой импортозамещения.

Сельскохозяйственные орудия при выполнении технологической операции подвержены более интенсивному износу с тыльной стороны, на данную поверхность и планируется нанести дополнительный слой порошкообразного материала.

Так же одним из способов повышения ресурса рабочих органов агрегатов является карбо-вибро дуговой универсальный метод (КВДУ). Сущность метода заключается в следующем: на рабочую поверхность сельскохозяйственной машины наносят многокомпонентную пасту, далее происходит процесс сушки, затем пасту расплавляют с использованием вибрирующего угольного электрода на специальной установке.

КВДУ осуществляют при помощи установки ВДГУ-2, которая включает в себя пульт управления и выбора режимов, вибратор для установки и закрепления угольного электрода и сварочный инвертор (источника тока) на 200...250А. При КВДУ используют угольные электроды диаметром 6...10 мм. Упрочнение ведут при горении прямой дуги при использовании следующих рациональных режимов: сила тока $I=50...80\text{A}$, частота вибрации угольного электрода – 25 Гц, амплитуда вибрации угольного электрода –