

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»**

**ПРОБЛЕМЫ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ
В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

*Труды Международной
научно-практической конференции
02 – 03 марта 2021 г.*

Под редакцией профессора В. Е. Громова

Новокузнецк
2021

УДК 539.31.6+669.017:539.4+621.793.74

ББК 22.37+30.37

П 781

Рецензенты:

д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник Института физики
прочности и материаловедения СО РАН

В.И. Данилов;

д. т. н., профессор, зав. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля и
диагностики» ИжГТУ им. М.Т. Калашникова

В.В. Муравьев

Редакционная коллегия:

д-р физ.-мат. наук, профессор В.Е. Громов,

кан. техн. наук, доцент Д.В. Загуляев,

кан. техн. наук, доцент С.А. Невский,

асп. кафедры ЕНД Ю.А. Рубанникова,

асп. кафедры ЕНД А.Н. Гостевская

П 781 Проблемы прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий: сборник трудов Международной научно-практической конференции, 2 – 3 марта 2021 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский государственный индустриальный университет ; под ред. профессора В. Е. Громова. – Новокузнецк ; Издательский центр СибГИУ, 2021. – 140 с. : ил.

Сборник трудов конференции, содержит доклады, посвященные проблемам в области физики конденсированных сред с опорой на научные достижения секций: технологии обработки поверхности, проблемы прочности, пластичности и усталостной долговечности, влияние внешней обработки и воздействий (модификация, наплавка, облучение и т.п.) на структуру и свойства материалов, проблемы эксплуатации материалов в экстремальных условиях. В докладах представлены результаты, полученные экспериментальными методами и теоретическим моделированием. Актуальность выбранных направлений обусловлена проводимыми ежегодно различными международными конференциями, специализированными изданиями, различными международными проектами, посвященными затронутым темам.

Предназначена для специалистов в области проблем прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий и может быть полезна для научно-технических работников, аспирантов, студентов старших курсов.

© Сибирский государственный
Индустриальный университет, 2021

ДИНАМИКА МИКРОТВЕРДОСТИ СПЛАВА АК5М2 ПРИ ДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Ю. А. Рубанникова, Д. В. Загуляев, В. В. Шляров*, В. Е. Громов
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

*E-mail: shlyarov@mail.ru

Исследования посвящены модификации поверхности сплава АК5М2 методом электронно-пучковой обработки. Показано, что величина микротвердости поверхностного слоя сплава АК5М2 зависит от параметров облучения и при длительности импульсов 50 мкс и плотности энергии пучка электронов 50 Дж/см² достигает максимального значения 970 МПа, что превышает микротвердость исходного материала в 1,8 раза.

Ключевые слова: силумин, структура, микротвердость, сканирующая электронная микроскопия, электронный пучок.

Применение энергетических лучевых технологий, таких как лазерный луч, электронный луч, ионный луч и плазменный луч, в области модифицирования металлических материалов привлекает все большее внимание ученых во всем мире. Одной из самых перспективных технологий последних десятилетий является обработка материалов электронным пучком [1-5]. В ходе этого технологического процесса ускоренные электроны взаимодействуют с поверхностью обрабатываемого участка, что приводит к превращению их кинетической энергии в тепло. Скорость протекания процессов нагрева и охлаждения может достигать высоких значений, что приводит к некоторым структурным преобразованиям и увеличению твердости [6, 7]. На сегодняшний день на различных предприятиях, как промышленности, так и в научных центрах число ускорителей электронного пучка, используемых для обработки всевозможных материалов, превышает более 1500 единиц. К особенностям, которые делают электронно-лучевые ускорители привлекательными для промышленного и научного использования, относятся: высокая мощность излучения, безопасная эксплуатация оборудования и удобство контроля качества обрабатываемых изделий [8-10]. Также немаловажным аспектом является всесторонняя заинтересованность научной общественности в использовании электронного пучка для повышения физических, химических и технологических свойств различных материалов, используемым во всех отраслях промышленности, и как следствие это порождает усовершенствование используемого оборудования. Различные финансовые фонды поддерживают фундаментальных и прикладных исследований научно-исследовательских институтов и университетов, работа которых направлена на разработку уникальных и полезных материалов с помощью технологии электронно-пучковой обработки.

Облучение образцов силумина интенсивным импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛО». Параметры пучка электронов: энергия ускоренных электронов 17 кэВ, плотность энергии пучка электронов (10, 20, 30, 40 и 50) Дж/см², длительность импульсов (50 и 200) мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов 0,3 с⁻¹; давление остаточного газа (аргон) в рабочей камере установки 2*10⁻² Па. Исследования состояния структуры проводили методами сканирующей электронной микроскопии (прибор Philips SEM-515 с микроанализатором EDAX ECON IV). Механические свойства характеризовали твердостью, определенной на приборе ПМТ-3М при нагрузке на индентор 1Н (средние значение микротвердости определяли по 10 отпечаткам).

Структуру поверхности образцов сплава АК5М2 в исходном состоянии (состояние перед облучением) и обработанных электронным пучком, анализировали методами сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что исследуемый сплав в исходном состоянии является поликристаллическим агрегатом, сформирован зернами твердого раствора на основе алюминия (рисунок 1, а) и зернами эвтектики Al-Si (рисунок 1, б, зерна эвтектики указаны

стрелками). Как правило, зерна эвтектики располагаются вдоль границ и в стыках границ зерен алюминия. Размер зерен алюминия изменяется в пределах от 30 мкм до 100 мкм; размер зерен эвтектики Al-Si изменяется в пределах от 11 мкм до 26 мкм. Дополнительными фазами исследуемого материала являются интерметаллиды, имеющие форму игольчатую, глобулярную и, существенно реже, осколочную форму (рисунок 1, а, в, г). Продольные размеры частиц игольчатой формы часто превышают размеры зерен (рисунок 1, б, г), что указывает на их формирование до образования зерен алюминия. Частицы глобулярной формы располагаются преимущественно вдоль границ зерен алюминия (рисунок 1, в, г). При механической полировке образцов такие частицы часто выкрашиваются (рисунок 1, а), что может указывать на их плохую связь с границами зерен.

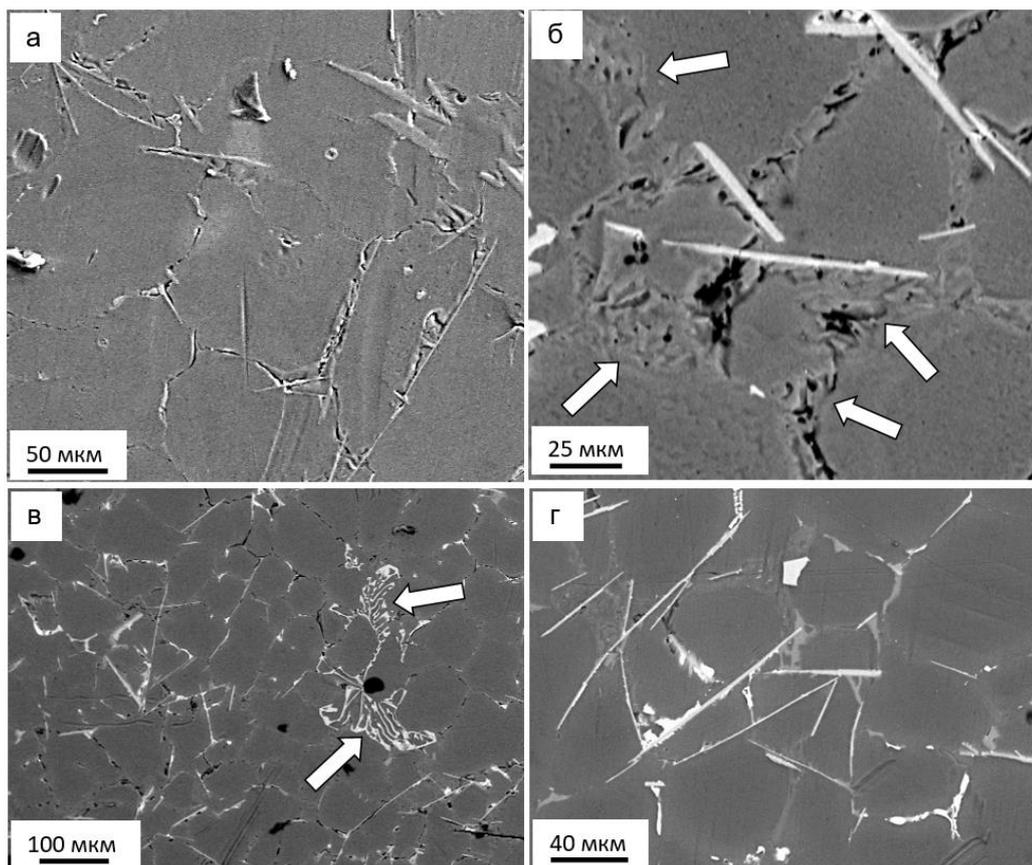


Рисунок 1 – Структура травленной поверхности сплава АК5М2 в исходном (перед облучением импульсным электронным пучком) состоянии. Сканирующая электронная микроскопия.

На рисунке 2 приведены изображения поверхности шлифа с отпечатками индентора. Отчетливо видно, что размеры отпечатков, и, соответственно, микротвердость анализируемой области материала, существенным образом зависят от расстояния до поверхности облучения (на рисунок 1а, поверхность облучения указана стрелкой). А именно, вблизи поверхности облучения размеры отпечатка индентора заметно меньше отпечатков, расположенных на большом (200 мкм, для рисунка 1б) расстоянии от поверхности облучения. Следовательно, облучение силюмина электронным пучком, сопровождается упрочнением поверхностного слоя образца.

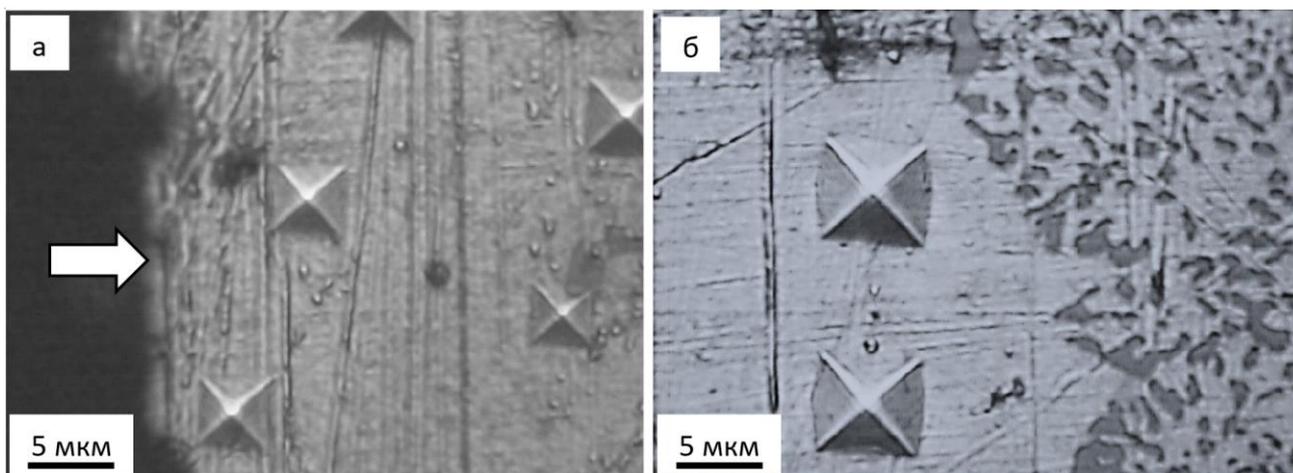


Рисунок 2 – Изображение структуры поперечного шлифа, облученного интенсивным импульсным электронным пучком образца силумина с отпечатками индентора (сканирующая микроскопия); а – структура силумина у поверхности облучения; б – на расстоянии 200 мкм от поверхности; на (а) стрелкой указана поверхность облучения

Результаты измерения микротвердости поверхности облучения сплава АК5М2 приведены на рисунок 3.

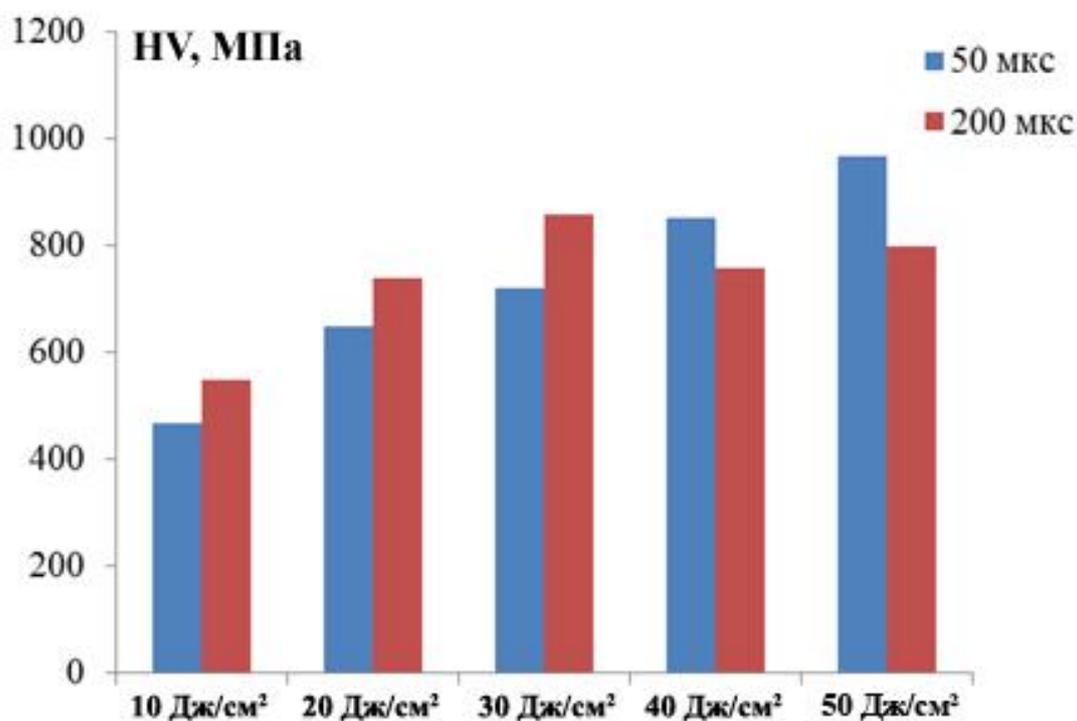


Рисунок 3 – Изменение микротвердости сплава АК5М2 от плотности энергии пучка электронов; синие столбики – 50 мкс; красные столбики – 200 мкс. Микротвердость сплава в исходном состоянии – 527 МПа

Анализируя результаты, представленные на рисунке 2, можно отметить, что величина микротвердости поверхностного слоя сплава зависит от длительности импульсов пучка электронов. При длительности импульсов 50 мкс микротвердость поверхностного слоя увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов, достигая максимального значения 970 МПа, что превышает микротвердость исходного материала в 1,8 раза. При

длительности импульсов пучка электронов 200 мкс микротвердость поверхностного слоя достигает максимального значения при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см² и составляет 860 МПа, что превышает микротвердость исходного материала в ≈1,6 раза.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10059).

ЛИТЕРАТУРА

1. Fu Y. Surface hardening of 30CrMnSiA steel using continuous electron beam / Y. Fu, J. Hu, X. Shen, Y. Wang, W. Zhao // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2017. V. 410. P. 207–214.
2. Kim J. Corrosion inhibition and surface hardening of KP1 and KP4 mold steels using pulsed electron beam treatment / J. Kim, S.S. Park, H.W. Park // Corrosion Science. 2014. V. 89. P. 179–188. Hao S. Producing nano-grained and Al-enriched surface microstructure on AZ91 magnesium alloy by high current pulsed electron beam treatment / S. Hao, M. Li // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2016. V. 375. P. 1–4.
3. Hao S. Producing nano-grained and Al-enriched surface microstructure on AZ91 magnesium alloy by high current pulsed electron beam treatment / S. Hao, M. Li // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2016. V. 375. P. 1–4.
4. Иванов Ю.Ф. Закономерности модифицирования высокохромистой стали интенсивным импульсным электронным пучком / Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова, А.Д. Тересов, О.В. Иванова // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62(11). P. 112–116.
5. А. Д. Тересов Исследование свойств системы цирконий (плёнка)/сталь 12X18Н10Т (подложка), подвергнутой импульсному электронно-пучковому воздействию / А.Д. Тересов, В.В. Шугуров, Ю.Ф. Иванов, Ю.А. Денисова, Е.А. Петрикова, Н.Н. Коваль // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58(9/3). P. 112–116.
6. Kim J. The state of the art in the electron beam manufacturing processes / J. Kim, W.J. Lee, H.W. Park // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2016. – Vol. 17. – P. 1575–1585.
7. Hanguy Y. Effect of beam current on microstructure, phase, grain characteristic and mechanical properties of Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy fabricated by selective electron beam melting/ Y. Hanguy, C. Yuyong, W. Xiaopeng, K. Fantao // Journal of Alloys and Compounds. 2018. – V.750. – P. 617–625.
8. Громов В.Е. Структура и трибологические свойства поверхностного слоя, наплавленного на мартенситную сталь и модифицированного электронно-пучковой обработкой / В.Е. Громов, В. Е. Кормышев, С. В. Коновалов, Ю. Ф. Иванов, А. Д. Тересов, В. А. Батаев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2017. Т. 14(1). P. 28-32.
9. Шулов В.А. Применение сильноточных импульсных электронных пучков для модифицирования поверхности лопаток газотурбинных двигателей / В.А. Шулов, А.Н. Громов, Д.А. Теряев, В. И. Энгелько // Модифицирование поверхности, в том числе пучками заряженных частиц, потоками фотонов и плазмы. 2015. №. 1. С. 38–48.
10. Fu Y. Microstructure modification and corrosion improvement of AISI 1045 steel induced by pseudospark electron beam treatment / Y. Fu, J. Hu, W. Zhao, F. Peng, W. Huo, X. Cao // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2020. Vol. 469. P. 10–18.