



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный
технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

ул. Молодогвардейская, 244,
гл. корпус, г. Самара, 443100
Тел.: (846) 278-43-11, факс (846) 278-44-00
E-mail: rector@samgtu.ru
ОКПО 02068396, ОГРН 1026301167683,
ИНН 6315800040, КПП 631601001

01.11.25 № 01.10.25/3410

На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «СамГТУ»,
доктор технических наук,
доцент
Еремин
Антон Владимирович



« 1 » ноября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Шляровой Юлии Андреевны
по теме «УПРОЧНЕНИЕ ВЫСОКОКРЕМНИСТЫХ СИЛУМИНОВ ПЛАЗМОЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ
ОБРАБОТКОЙ», представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Актуальность темы исследования.

Развитие современной техники требует создания и внедрения в производство принципиально новых технологических методов обработки материалов, которые должны обеспечить значительное увеличение прочности, износостойкости, усталостной долговечности, коррозионной стойкости и других ключевых физико-механических свойств деталей машин и инструментов. Литейные алюминий-кремниевые сплавы (силумины) обладают рядом востребованных технологических и эксплуатационных характеристик (высокая жидкотекучесть, малая склонность к усадке, высокие антифрикционные свойства, хорошая обрабатываемость и др.), которые делают их крайне востребованными в различных отраслях промышленности. Однако увеличение объемов использования алюминиевых сплавов данной системы легирования сдерживается недостаточным уровнем твердости и износостойкости поверхности. Новые перспективы в направленном регулировании свойств сплавов открывает использование комбинированных технологий, использующих сочетание различных воздействий на материал в рамках производственного цикла изготовления изделий.

В рассматриваемой диссертационной работе исследовано влияние на формирование структуры, химического и фазового состава, свойств поверхностного слоя силуминов, с разным содержанием кремния, двухстадийной обработки, включающей проведение двух последовательных обработок –

электровзрывное легирование оксидом иттрия и воздействие высокоимпульсными электронными пучками. Электровзрывное легирование позволяет насыщать поверхность не только простыми металлами, но и сложными соединениями, в том числе оксидами, что позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики обработанного слоя. Последующая обработка высокоинтенсивными импульсными электронными пучками позволяет получить более однородное покрытие с дополнительно улучшенными физико-механическими свойствами за счет проплавления поверхностных слоев материала и последующей высокоскоростной кристаллизацией. В силу вышеуказанного, разработка режимов и выявление особенностей воздействия такой обработки на сплавы алюминий-кремний, широко применяемых в промышленности, выработка рекомендаций для ее использования весьма актуальны.

Новизна полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

В диссертации впервые изучены морфология и элементный состав структурных составляющих, присутствующих в поверхностном слое силуминов, обработанных электровзрывным легированием оксидом иттрия. Установлено, что последующее применение электронно-пучковой обработки приводит к существенному диспергированию структуры и переходу ее в нано- и субмикронное состояния.

Проведен всесторонний количественный и качественный анализ трансформации структурных и фазовых состояний поверхностных слоев силумина (доэвтектического и заэвтектического состава) в процессах электровзрывного легирования оксидом иттрия с последующей электронно-пучковой обработкой.

Установлены рациональные режимы электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработок, обеспечивающие существенное увеличение микротвердости поверхности сплавов.

Сформулированным на основе выполненных исследований выводам и рекомендациям присущи научная новизна и оригинальность; они раскрывают новые закономерности формирования структуры и свойств сплавов алюминий – кремний при перспективных технологических воздействиях и создают основы успешных перспектив их применения в производстве.

Практическая значимость полученных автором результатов диссертационной работы.

В диссертационной работе предложен режим двухэтапной обработки поверхности силумина Al-11%Si: электровзрывное легирование (масса алюминиевой фольги – 58,9 мг, масса порошка Y_2O_3 – 58,9 мг, напряжение разряда – 2,8 кВ) и последующая электронно-пучковая обработка (плотность энергии пучка – 35 Дж/см²), обеспечивающий формирование модифицированного слоя толщиной около 70 мкм. Двухэтапное модифицирование поверхности сплава Al-20%Si приводит к формированию многослойной структуры, включающей поверхностный и промежуточный слои, при этом толщина последнего составляет около 40 мкм. Предлагаемые варианты обработки позволяют сформировать микроструктуру сплавов повышенной дисперсности и существенно повысить микротвердость поверхностного слоя и износостойкость деталей из силуминов.

Разработанные режимы апробированы и использованы при поверхностном упрочнении изделий из сплавов алюминий-кремний на промышленных предприятиях ООО «Ремкомплект» и ООО «Вест 2002», что подтверждено

соответствующими актами о внедрении результатов диссертационной работы Ю.А. Шляровой.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.

Согласно справкам АО «РУСАЛ Новокузнецк» и ООО «СМК54» о промышленном внедрении результатов научно-исследовательской работы Ю.А. Шляровой, эти результаты представляют значительный интерес и их можно рекомендовать для более широкого практического использования на промышленных предприятиях при изготовлении из силуминов таких деталей как поршни дизельных двигателей тяжелых грузовых автомобилей, крышки корпусов, компрессоров и других узлов и агрегатов.

Результаты и выводы диссертационной работы могут быть использованы при дальнейших исследованиях и разработках новых технологий, включающих электровзрывное легирование и электронно-пучковую обработки сплавов. Установленные закономерности формирования структуры исследуемых сплавов перспективно использовать при отработке комбинированных воздействий алюминиевых сплавов других систем легирования. Эти направления исследований можно рекомендовать при подготовке аспирантов по специальностям 1.3.8. Физика конденсированного состояния, 2.6.1 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, 2.6.17 – Материаловедение.

Кроме того, полученные результаты могут быть использованы в вузах при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 16.03.01 и 16.04.01 “Техническая физика”, 22.03.01. и 22.04.01 “Материаловедение и технология новых материалов”, 22.03.02 и 22.04.02 “Металлургия”.

Публикации и апробация основных положений работы.

Основные положения диссертационной работы достаточно полно изложены в 29 научных публикациях, включая: 8 статей в журналах, входящих в Перечень, рекомендованный ВАК для публикации результатов диссертационных исследований; 12 статей, проиндексированных в международных базах данных Web of Science и Scopus; 1 монографию; 3 главы в коллективных монографиях; 5 докладов и тезисов, представленных на конференциях различного уровня и других научных мероприятиях.

Основные положения, выносимые на защиту, прошли апробацию на 13 международных и 3 всероссийских конференциях.

Содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов и приложения, списка литературы из 175 наименований. Диссертационная работа изложена на 146 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков, 12 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, приведена степень разработанности изучаемого научного направления, сформулированы цель и основные задачи исследования, обозначены их новизна, научная и практическая значимость, кратко описаны методы исследования и личный вклад автора, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор статей в зарубежных и российских научных журналах, монографиях и патентов по тематике исследуемой проблемы. Рассмотрены такие виды воздействий как лазерное напыление, электроннолучевая, электродуговая и лазерная наплавка, высокоинтенсивные

электронные и мощные ионные пучки, комбинирование различных методов внешнего энергетического воздействия, а также влияние легирования иттрием на структуру и свойства сплавов. Описаны физические процессы, происходящие при каждом из воздействий и приводящие к изменениям структурно-фазовых состояний и свойств металлических материалов. На основе анализа литературных данных установлена актуальность и необходимость дальнейшего развития данного научного направления.

Во второй главе выполнено обоснование выбора в качестве материалов для исследования сплавов системы Al-Si (доэвтектического и заэвтектического состава). Приводится химический состав исследованных сплавов, рассматриваются методы и методики металлографического анализа, исследования микротвердости (метод Виккерса), анализа тонкой структуры, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии. Описываются методики и режимы двухэтапной обработки поверхности материалов, включающие два последовательно выполняемых этапа. Первый этап заключался в нанесении композиционного покрытия системы Al-Y₂O₃ методом электрического взрыва на аппарате ЭВУ 60/10. Второй этап предполагал модифицирование поверхности сплавов методом электронно-пучковой обработки с использованием установки «СОЛО».

В третьей главе представлены результаты изменения микротвердости сплавов в зависимости от способа и режимов электровзрывного легирования поверхности силуминов оксидом иттрия, а также применения последующей электронно-пучковой обработки. Установлено, что процесс электровзрывного легирования оксидом иттрия приводит к значительному повышению микротвердости сплавов. Для сплава Al-11%Si выявлено увеличение микротвердости более чем в 2,5 раза; для сплава – более чем в 2 раза. По мере удаления от поверхности модифицирования микротвердость сплавов Al-11%Si и Al-20%Si имеет тенденцию постепенно уменьшаться и в конечном итоге приближается к уровням микротвердости исходного материала на глубине около 50 мкм. Кроме того, установлено, что использование двухэтапной обработки с энергией электронного пучка 25 Дж/см², приводит к увеличению микротвердости примерно в 3,1 раза, а при 35 Дж/см² наблюдается резкое увеличение микротвердости примерно в 4,3 раза по сравнению с электровзрывным легированием для сплава Al-11%Si. В случае силумина Al-20%Si, после двухэтапной обработки регистрируется снижение микротвердости независимо от применяемого режима обработки.

В четвертой главе представлены результаты исследования структурно-фазовых состояний силуминов Al-11%Si и Al-20%Si в исходном состоянии и после электровзрывного легирования системой Al-Y₂O₃. По результатам металлографического анализа установлено, что доэвтектический алюминиевый сплав с содержанием кремния 11 % в исходном состоянии преимущественно имеет структуру зерен твердого раствора алюминия. Эвтектические зерна располагаются вдоль границ и в точках пересечения границ этих зерен. Размер зерен алюминия варьируется в широких пределах – от 25 мкм до 100 мкм, тогда как эвтектические зерна имеют размер в диапазоне от 10 мкм до 30 мкм. Металлографическое исследование структуры заэвтектического алюминиевого сплава Al-20%Si в исходном состоянии, показало, что структура имеет грубое игольчатое строение, состоящее из эвтектики (α+Si) и первичных кристаллов кремния. Выявлено наличие пор микронного и субмикронного размера. Установлено, что для силуминов Al-11%Si и Al-20%Si электровзрывное легирование оксидом иттрия приводит к формированию многослойной структуры, которая состоит из высокопористого покрытия, неоднородного по толщине.

Толщина покрытия составляет 17-117 мкм для силумина Al-11%Si и 30-200 мкм для силумина Al-20%Si.

Проведенный структурный анализ силуминов выявил широкий спектр интерметаллических соединений, обладающих различным составом и структурными характеристиками. Кремний и интерметаллические частицы, присутствующие в сплавах, имеют множество геометрических конфигураций (глобулярную, пластинчатую, игольчатую), и это разнообразие морфологии способствует не только повышению механической прочности материала, но и создает потенциальные проблемы, такие как образование микротрещин при эксплуатации изделий.

В пятой главе выполнен послойный анализ структуры и фазового состава поверхности силуминов после двухэтапной обработки. Двухэтапная обработка сплава Al-11%Si по предлагаемому режиму приводит к формированию многоэлементного многофазного слоя толщиной ≈ 80 мкм, имеющего субмикро-и нанокристаллическое строение. В результате обработки формируется поверхность, содержащая микрократеры, микрокапли и пленочные образования. Образующийся поверхностный слой имеет субмикрокристаллическое строение; размеры кристаллитов не превышают 1 мкм. При кристаллизации поверхностного слоя формируется ячеистая структура с размерами ячеек $\sim 0,8-1,3$ мкм, которые разделены прослойками второй фазы размером 50-75 нм. В тройных стыках границ ячеек можно наблюдать включения второй фазы, имеющие ограниченную форму, характеризующиеся либо кубовидной конфигурацией, либо четырехлепестковыми розетками. Размеры этих включений колеблются в диапазоне (0,5-0,7) мкм. Показано что, применение двухэтапной обработки приводит к образованию поверхностного слоя, в котором количество включений второй фазы значительно уменьшается и на несколько порядков меньше, чем в материале в литом состоянии.

Исследованием модифицирования поверхностного слоя заэвтектического сплава Al20%Si, сочетающим электровзрывное легирование системой Al-Y₂O₃ с последующим облучением импульсным электронным пучком, установлено, что независимо от режима модифицирования в поверхностном слое формируется многослойная структура, состоящая из слоев: поверхностный слой и промежуточный слой. Поверхностный слой состоит из сферических частиц, размеры которых колеблются в диапазоне от 10 до 20 нм. Толщина этого слоя составляет около 1 мкм. Переходный слой толщиной до 40 мкм имеет ячеистую структуру, особенно характерную для силумина, подвергнутого обработке импульсным электронным пучком в процессе плавления поверхности. Этот промежуточный слой отличается наличием глобулярных включений, образующихся в результате агрегации наноразмерных округлых частиц. Установлено, что фазовый состав и состояние кристаллической решетки основных фаз (Al, Si, Y₂O₃) существенным образом зависят от режима модифицирования. Основной фазой сплава является твердый раствор на основе алюминия, относительное содержание которого весьма слабо зависит от режима модифицирования сплава. Индицирование микроэлектроннограмм позволило выявить рефлексы фаз YAl₃ и Y₂Si₂O₇. Таким образом, установлено, что поверхностный слой сформировался в результате взаимодействия частиц Y₂O₃ с расплавом сплава Al-20%Si, что привело к образованию набора новых фаз, обнаруженных в данном слое. Ячейки в структуре сформированы твердым раствором на основе алюминия и разделены тонкими прослойками, сформированными наноразмерными частицами. Индицирование микроэлектроннограммы показывает, что данные частицы являются кремнием. Прослойки кремния, располагающиеся вдоль границ и в стыках границ ячеек

кристаллизации, сформированных твердым раствором на основе алюминия, имеют нанокристаллическую структуру с размером кристаллитов, изменяющимся в пределах ~ 10-20 нм.

В заключении изложены основные результаты исследования.

В приложении показана практическая и академическая значимость проведенных исследований и полученных результатов для предприятий и образовательных организаций высшего образования, подтвержденная актами и справками об использовании результатов работы.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений диссертационной работы Щяровой Ю.А. подтверждается большим объемом экспериментальных данных, применением современного исследовательского оборудования, использованием аттестованных методов и методик. Экспериментальные данные согласуются с теоретическими положениями и не противоречат данным других исследователей.

Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертационным работам.

Выполнены все требования, предъявляемые к диссертационным работам. Проведен подробный литературный анализ, правильно определены цель и задачи исследования. Экспериментальные данные представлены четко, как в виде таблиц, номограмм и фотографий структур, так и текста их описывающего. Работа написана ясным языком, хорошо иллюстрирована. Диссертация и автореферат содержат необходимые разделы и соответствуют друг другу.

Замечания по диссертационной работе.

1. В работе не изложена технология получения исходных образцов силуминов. Указаны лишь их химический состав и размеры. Вместе с тем, исследуемая в разделах 4.1 и 4.2 структура сплавов в исходном состоянии и тенденции ее дальнейшей трансформации во многом определяются использованными шихтовыми материалами, режимом плавки, скоростями кристаллизационного и послекристаллизационного охлаждения и другими условиями формирования литых заготовок.
2. Методическая глава работы перегружена информацией о потенциальных возможностях применяемого исследовательского оборудования, которые не использовались при решении задач диссертационной работы. В то же время, не указано, какие конкретно методики количественного анализа микроструктуры были использованы.
3. В работе исследованы два сплава, содержащие 11 и 20 % кремния. При этом в первом имеется существенное содержание меди, магния, никеля и титана, а во втором их содержание незначительно. В такой ситуации при анализе влияния исследуемых вариантов обработки на структурно-фазовое состояние сплавов не представляется возможным разделить вклад в это влияние фактора содержания кремния и фактора легированности другими элементами. Целесообразно было бы варьировать содержание кремния как в простом силумине, так и в легированном.
4. В разделе 3.1 автор утверждает, что участки эвтектики, имеющие более высокую, чем зерна твердого раствора, микротвердость, обладают повышенной прочностью. Высокая микротвердость может свидетельствовать о хрупкости данных участков и, в этом случае, некорректно утверждать, что прочность возрастает.
5. В разделе 3.2 приведены результаты, показывающие, что после второго этапа обработки силумина Al-20%Si микротвердость поверхности снижается до уровня

исходного силумина. Автор объясняет это тем, что во время обработки электронным пучком часть иттрия испаряется с поверхности, а другая часть проникает глубже в материал. В то же время, для сплава Al-11%Si при реализации второго этапа микротвердость дополнительно существенно возрастает. Разве в этом случае испарения иттрия и его проникновения в глубь нет?

6. По результатам микрорентгеноспектрального анализа на поверхности сплава Al-11%Si (стр.76) в исходном состоянии не установлено присутствие магния, тогда как содержание его в сплаве весьма существенно (0,58%). Учитывая содержание других элементов, следует ожидать присутствие магния не только в твердом растворе, но и в сложной интерметаллической фазе $W(Al_xMg_5Cu_4Si_4)$.

7. В табл.4.2 приведены результаты рентгеноструктурного анализа сплава Al-11%Si после электровзрывного легирования. Представленные сведения не поясняют о каких "различных зонах образца" идет речь.

8. В работе в качестве эксплуатационных свойств сплавов выполнена оценка только микротвердости. Поскольку автор прогнозирует повышение сопротивления поверхности износу, то желательно было бы проведение испытаний образцов после предлагаемой обработки на износостойкость.

Заключение.

Однако отмеченные недостатки не снижают существенно теоретической и практической значимости исследований, выполненных на высоком научном уровне, а результаты, полученные в диссертации, соответствуют поставленной цели. В целом диссертационная работа Шляровой Ю.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи по разработке основ упрочнения алюминиево-кремнистых сплавов при комбинированной технологии поверхностной обработки, включающей электровзрывное легирование оксидом иттрия и воздействие высокоимпульсными электронными пучками, имеющей важное значение режимов для развития физики конденсированного состояния. По объему полученных результатов, научной и практической значимости диссертационная работа Шляровой Ю.А. удовлетворяет всем требованиям, в том числе п.9 " Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния (технические науки) по пунктам 3 и 6, а ее автор, Шлярова Юлия Андреевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Отзыв составлен на основании анализа диссертации, автореферата и публикаций Шляровой Ю.А. на заседании кафедры "Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы "(МПМН) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Самарский государственный технический университет (протокол № 3 от 28.10.2025 г.).

Составители отзыва дают согласие на обработку своих персональных данных.

Заведующий кафедрой «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», профессор, доктор физико-математических наук

(01.04.17. Химическая физика, в том числе

Амосов
Александр Петрович

физика горения и взрыва)
Телефон: (846)242-28-89. E-mail:
egundor@yandex.ru

Ученый секретарь кафедры «Металловедение,
порошковая металлургия, наноматериалы»,
доцент, кандидат технических наук
(01.04.07. Физика твердого тела)
Телефон: (846)242-28-89.
E-mail: e.morozova2012@mail.ru



Морозова
Елена Александровна

Подписи А.П. Амосова и Е.А. Морозовой
заверяю.

Ученый секретарь ФГБОУ ВО «СамГТУ»
доктор технических наук



Малиновская
Юлия Александровна

« 1 » ноября 2025 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»).

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, главный корпус.

Тел.: 8 (846) 278-43-11, Факс: (846) 278-44-00, E-mail: rector@samgru.ru,
официальный сайт: <https://samgtu.ru/>