

Д. А. Дунаев, С. С. Жаткин, К. В. Никитин

**ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОГО КОМПЛЕКСА
«ОБЪЕМНАЯ ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ НАПЛАВКА + ПОВЕРХНОСТНОЕ
ЭЛЕКТРОДУГОВОЕ УПРОЧНЕНИЕ»
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК5**

Самарский государственный технический университет (СамГТУ)

e-mail: dimjkee830@gmail.com, sergejat@mail.ru, kvn-6411@mail.ru

В работе рассматривается применение гибридного технологического комплекса, сочетающего объемную электродуговую наплавку и поверхностное термоупрочнение неплавящимся электродом, с целью улучшения эксплуатационных характеристик алюминиевого сплава АК5. Анализируются особенности данного метода в сравнении с традиционными технологиями упрочнения и восстановления поверхностей, включая лазерную наплавку, плазменное напыление и химико-термическую обработку. Показано, что использование комбинированного подхода позволяет формировать более плотную и однородную структуру наплавленного слоя, повышая его адгезию, прочность, износостойкость и коррозионную стойкость. Показано влияние скоростного теплоотвода и баланса полярности дуги от неплавящегося электрода на изменение микроструктуры и размеров зерен α -фазы и эвтектики наплавленного по WAAM-технологии сплава АК5. Результаты исследования демонстрируют перспективность данного подхода для повышения долговечности и эксплуатационной надежности изделий из алюминиевого сплава АК5 в различных отраслях промышленности. Отмечается перспективность применения данной гибридной технологии для улучшения структуры и свойств изделий из алюминиевых сплавов, полученных по WAAM-технологии.

Ключевые слова: аддитивные технологии; WAAM-наплавка; неплавящийся электрод; микроструктура; импульсная наплавка; гибридные технологии; алюминиевые сплавы

D. A. Dunaev, S. S. Zhatkin, K. V. Nikitin

**APPLICATION OF HYBRID TECHNOLOGY "VOLUMETRIC ELECTRIC
ARC SURFACING + SURFACE ELECTRIC ARC HARDENING"
TO IMPROVE THE CHARACTERISTICS OF AK5 ALUMINUM ALLOY**

Samara State Technical University (SamSTU)

The paper considers the use of a hybrid technological complex combining volumetric electric arc surfacing and surface thermal hardening with a non-melting electrode in order to improve the performance characteristics of the AK5 aluminum alloy. The features of this method are analyzed in comparison with traditional technologies of surface hardening and restoration, including laser surfacing, plasma spraying and chemical-thermal treatment. It is shown that using a combined approach makes it possible to form a more dense and homogeneous structure of the deposited layer, increasing its adhesion, strength, wear resistance and corrosion resistance. The effect of high-speed heat dissipation and the balance of arc polarity from a non-melting electrode on changes in the microstructure and grain sizes of the phase and eutectic of the AK5 alloy deposited using WAAM technology is shown. The results of the study demonstrate the prospects of this approach for increasing the durability and operational reliability of AK5 aluminum alloy products in various industries. The prospects of using this hybrid technology to improve the structure and properties of aluminum alloy products obtained using WAAM technology are noted.

Keywords: additive technologies; WAAM-surfacing; non-melting electrode; microstructure; pulse surfacing; hybrid technologies; aluminum alloys

Введение

В настоящее время существует целый ряд разнообразных способов повышения долговечности изделий из алюминиевых сплавов.

Наряду с традиционными методами поверхностного упрочнения, такими как термическая, химико-термическая наплавка, напыление, все более широкое распространение находят технологии с использованием концентрированных источников энергии, такие как упрочнение поверхности неплавящимся электродом.

Для изменения структуры и свойств поверхностных слоев изделий современное материаловедение использует два пути: поиск новых эффективных составов и совершенствование методов упрочняющей технологии существующих сплавов.

Процессы, протекающие в металлических изделиях под воздействием источников КПЭ весьма многообразны, но цель их сводится к созданию в поверхностных слоях метастабильного структурного состояния, обладающего нетривиальными механическими, физическими и другими свойствами, в результате скоростного нагрева и охлаждения.

С помощью локальных источников энергии можно нагревать материалы со скоростями на несколько порядков, превышающими скорости нагрева при всех ранее известных видах обработки, обрабатывать очень малые поверхности. Это дает возможность обрабатывать миниатюрные детали, наружные и внутренние поверхности деталей, создавать отверстия с упрочненной поверхностью и т. д. [1].

Анализ состояния современных методов упрочнения поверхности алюминиевых изде-

лий показывает, что одним из наиболее перспективных является метод упрочнения локальными источниками энергии. Это обусловлено тем, что в последнее время основным направлением развития новых методов обработки является стремление повысить скорости нагрева, охлаждения. Это позволяет снизить концентрацию дефектов кристаллической решетки в упрочненных материалах, изменить их распределение в материале и в результате улучшить их механические и другие важные для техники свойства материалов.

Применение гибридного технологического комплекса, включающего объемную электродуговую наплавку и поверхностное термоупрочнение неплавящимся электродом, является перспективным направлением для повышения эксплуатационных характеристик алюминиевого сплава АК5. Данный подход обусловлен необходимостью улучшения механических и функциональных свойств материала, что критично для его широкого использования в различных отраслях промышленности, включая машиностроение, авиационную и автомобильную сферы.

Алюминиевые сплавы, в том числе АК5, обладают рядом преимуществ, таких как высокая удельная прочность, низкая плотность и хорошая коррозионная стойкость. Однако их недостаточная твердость и износостойкость существенно ограничивают эксплуатационный ресурс изделий, особенно в условиях значительных механических и термических нагрузок. В этой связи комбинированное воздействие наплавки и термоупрочнения позволяет модифицировать структуру материала на макро- и микроуровне, создавая упрочненный поверх-

ностный слой с оптимизированными механическими характеристиками.

Объемная электродуговая наплавка обеспечивает формирование прочного и износостойкого покрытия, обладающего высокой адгезией к основному металлу. Этот процесс позволяет варьировать химический состав наплавленного слоя, добиваясь заданных эксплуатационных свойств. Дополнительное поверхностное термоупрочнение неплавящимся электродом приводит к изменению структуры верхнего слоя за счет термомеханического воздействия, что способствует увеличению твердости, повышению сопротивляемости к абразивному износу и улучшению усталостной прочности.

Применение данной технологии не только повышает надежность и долговечность алюминиевых деталей, но и обеспечивает экономическую эффективность за счет снижения затрат на изготовление новых компонентов и уменьшения объема ремонтных работ. Кроме того, возможность локального упрочнения функциональных зон деталей, позволяет целенаправленно улучшать их эксплуатационные свойства без существенного увеличения массы конструкции, что особенно важно для авиационной и транспортной отраслей [2].

Гибридный технологический комплекс, сочетающий объемную электродуговую наплавку и поверхностное термоупрочнение неплавящимся электродом, обладает рядом преимуществ перед традиционными методами обработки алюминиевых сплавов, в том числе сплава АК5. В отличие от классической электродуговой наплавки, которая характеризуется высокой пористостью наплавленного слоя и риском образования трещин, комбинированный метод обеспечивает более плотную и однородную структуру покрытия за счет термомеханического воздействия. Это позволяет значительно улучшить адгезию наплавленного слоя к основному металлу и повысить его эксплуатационные характеристики.

По сравнению с лазерной наплавкой, данный метод отличается экономической эффективностью, так как не требует дорогостоящего оборудования и сложных систем контроля. Несмотря на высокую точность лазерных технологий, их применение ограничено глубиной проплавления и толщиной наплавляемого слоя, что снижает эффективность упрочнения. Гибридный комплекс, в свою очередь, позволяет формировать более износостойкие покрытия, сохраняя технологическую гибкость и доступность [3].

Альтернативные методы, такие как плазменное напыление, обеспечивают высокую твердость покрытия, однако обладают недостаточной механической прочностью и адгезией, что приводит к отслаиванию при эксплуатации. В отличие от них, комбинированный метод не только формирует прочный поверхностный слой, но и изменяет структуру материала на микроуровне, повышая его износостойкость и усталостную прочность.

Сравнение размеров зерен до и после TIG обработки показывает их измельчение в зоне плавления. В наших исследованиях по модифицированию алюминиевого сплава АК7ч было установлено, что после TIG обработанная зона характеризуется более мелкой структурой. Это связано не только с воздействием самого процесса сварки, но и с улучшенными условиями теплоотвода, что способствует ускоренной кристаллизации.

Установлено существенное изменение морфологии зерен твердого раствора (α -фазы), а также уменьшение размеров эвтектики по сравнению с исходной литой структурой сплава АК7ч [4].

Следует отметить, что гибридные технологии становятся актуальными в аддитивном производстве и особенно при WAAM-наплавке алюминиевых сплавов [4-8], так как в процессе аддитивного производства заготовок из них часто формируется структура с выраженной пористостью, а также наблюдается снижение пластичности и прочности наплавленных слоев.

Материалы и методика исследований

Для исследований использовались образцы, выращенные при токе дуги 100 А по WAAM-технологии. Для наплавки использовалась алюминиевая проволока марки Св-АК5 (ГОСТ 7871–2019) (ER4043), химический состав которой приведен в табл. 1. Наплавка проводилась на подложку в виде плиты толщиной 10 мм из сплава АМг5. Для исследований были выращены образцы размерами 50×11×16 мм.

Наплавка проводилась на роботизированном комплексе, включающем в себя коллаборативный робот-манипулятор DOBOT CR10 (Китай) и сварочный инверторный полуавтомат EWM Titan 350 XQ puls D (Германия) при токе дуги 100 А, напряжении 19 В, скорости подачи проволоки 6,2 м/мин, и скорости печати 600 мм/мин. Расход аргона составлял 15 л/мин. Был реализован импульсный режим наплавки.

Таблица 1

Химический состав присадочной проволоки Св-АК5 (ГОСТ 7871–2019)

Основные легирующие, %		Примеси, %, не более			Al
Si	Ti	Mn	Zn	Fe	
4,5–6,0	0,1–0,2	0,01	0,01	0,2	Основа

Поверхностное термоупрочнение было реализовано на промышленном роботе манипуляторе Kuka Kr 200 (Германия) и сварочном аппарате Сварог TIG 200 Р AC/DC.

Обработка проводилась на переменном токе, что позволяло регулировать на аппарате баланс полярности дуги. Режимы обработки указаны в табл. 2.

Таблица 2

Режимы поверхностной термообработки

№ образца	Ток дуги, А	Скорость движения робота, мм/мин	Расход газа, л/мин	Баланс полярности, %
1	80	600	20	50
2				30
3				70

Анализ микроструктуры зон упрочнения изучали на микроскопе МЕТАМ ЛВ 34 в программном комплексе СИАМС 800. Измерения микротвердости полученных образцов производили на микротвердомере ПМТ-3.

Результаты исследований и их обсуждение

Микроструктура исходной проволоки представлена на рис. 1, WAAM-наплавки без термоупрочнения – на рис. 2, тестовых образцов, полученных по гибридной технологии, приведена на рис. 3.

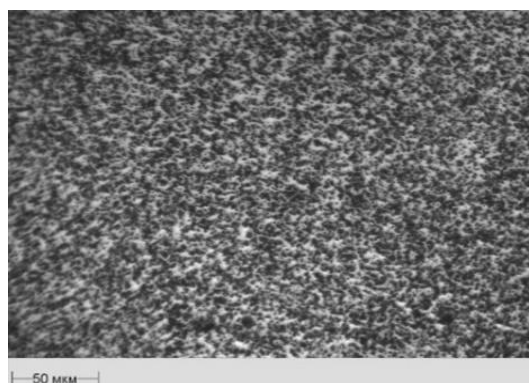
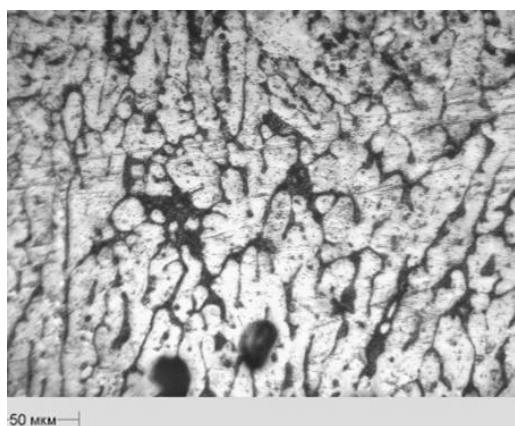
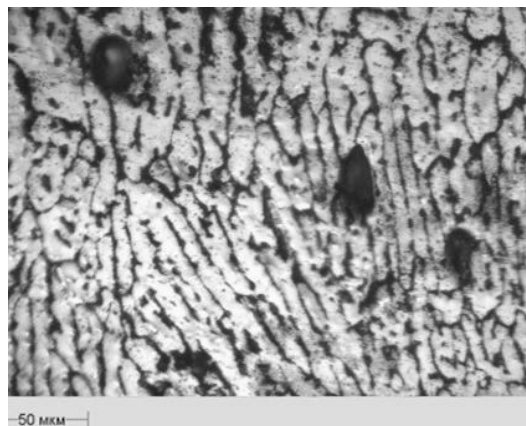


Рис. 1. Микроструктура исходной проволоки



а



б

Рис. 2. Микроструктура сплава АК5 после наплавки:
а – структура верхних слоев наплавки; б – структура нижних слоев наплавки

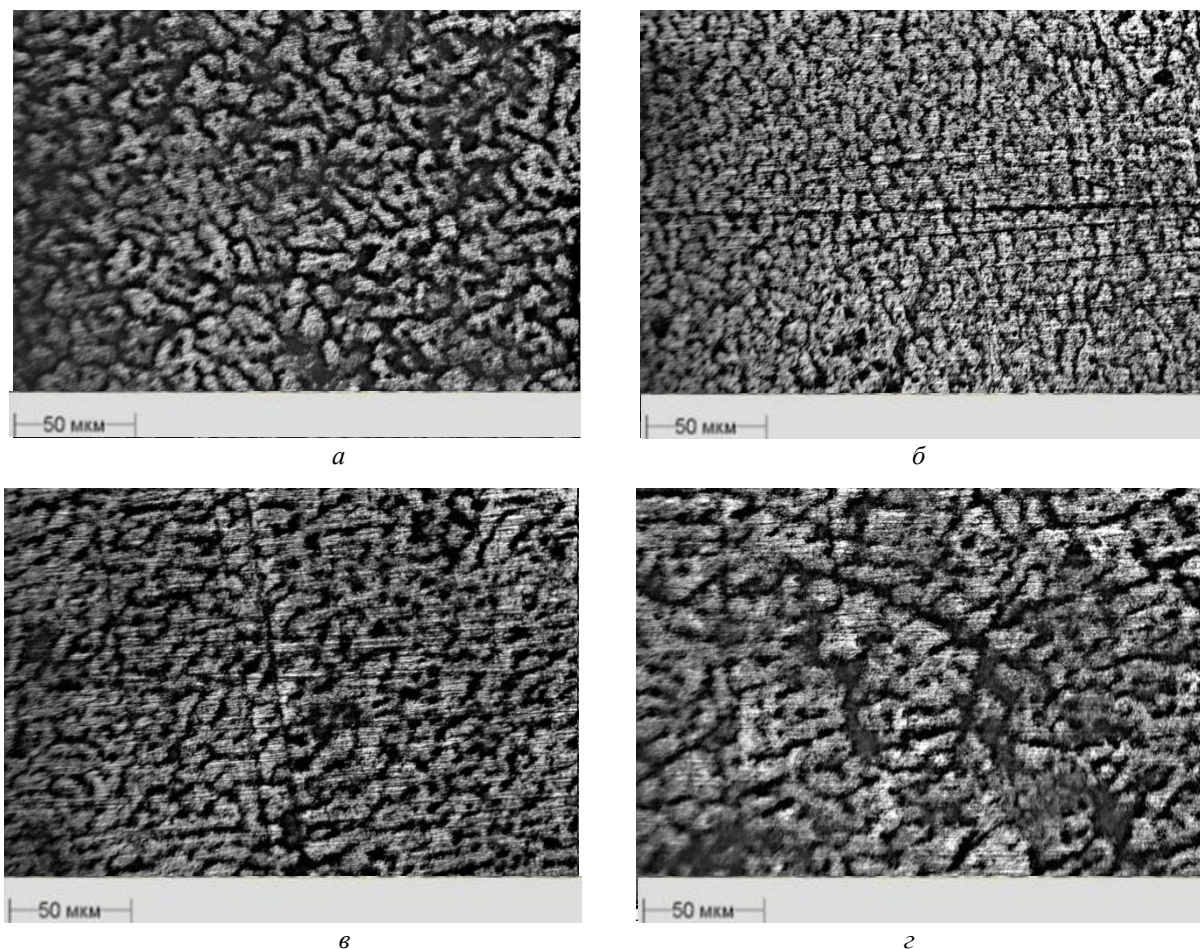


Рис. 3. Микроструктура сплава АК5 после термоупрочнения:
а-в – верхняя часть зоны наплавки после поверхностного термоупрочнения; *а* – при балансе полярности 50 %, *б* – при балансе полярности 30 %, *в* – при балансе полярности 70 %, *г* – нижняя часть зоны наплавки после поверхностного термоупрочнения

Анализ микроструктуры зон упрочнения (рис. 3) свидетельствует о формировании равномерной и стабильной двухфазной структуры, характерной для доэвтектического алюминиевого сплава. В процессе термоповерхностного упрочнения наблюдается значительное измельчение структурных составляющих, что обусловлено ускоренной кристаллизацией и увеличением числа центров зародышеобразования. Дисперсность фаз возрастает, что приводит к равномерному распределению эвтектических областей и дендритов алюминиевой матрицы, ограничивает их рост и способствует повышению однородности структуры.

Дополнительным следствием упрочняющей обработки становится снижение пористости, что подтверждается сравнением зон без обработки и с упрочнением (рис. 2, 3). В результате изменения условий кристаллизации увеличивается плотность структуры, уменьшается объем междендритных пустот, что повышает общую

целостность материала. Уменьшение размеров зерна, сопровождающееся снижением пористости, указывает на интенсификацию процессов рекристаллизации и перераспределение легирующих компонентов в объеме металла.

Наибольшие изменения микроструктуры наблюдаются на образце 2 (рис. 3, б), обработанном при балансе полярности дуги 30 %. Это указывает на высокую чувствительность сплава к данному параметру, что приводит к значительному изменению морфологии фазовых включений и уменьшению междендритных промежутков. Структурные изменения наблюдаются также и при балансе полярности 50 и 70 %, но в меньшей степени (рис. 3, а, в). В нижних слоях зон наплавки после поверхностного упрочнения структурные изменения слабо выражены из-за незначительного теплового воздействия на нижние слои (рис. 3, г).

Микроструктура исходной проволоки (рис. 1) демонстрирует однородное строение, которое

подвергается трансформации в процессе наплавки под влиянием условий теплоотвода. Образцы после наплавки (рис. 2) имеют выраженную столбчатую структуру, обусловленную градиентом температур в процессе затвердевания. Верхние слои наплавки (рис. 2, а), характеризуются более укрупненной структурой вследствие снижения скорости охлаждения в нижние прогретые слои. В нижних слоях (рис. 2, б), где теплоотвод идет в подложку и максимален, формируется более выраженная столбчатая структура. Кроме того, здесь наблюдаются более крупные газовые поры, чем в верхних слоях, поскольку из-за ускоренного теплоотвода выделяющийся газ не успевает подняться вверх.

Таким образом, анализ структуры показывает, что поверхностное термоупрочнение оказывает существенное влияние на морфологию и размеры структурных составляющих сплава АК5, приводя к формированию мелкозернистой структуры с высокой степенью равномерности. Снижение пористости и измельчение зерна в зонах упрочнения подтверждают эффективность данного метода обработки, что потенциально способствует повышению механических свойств и эксплуатационной надежности материала.

Результаты измерения микротвердости (МПа) полученных образцов представлены на рис. 4.

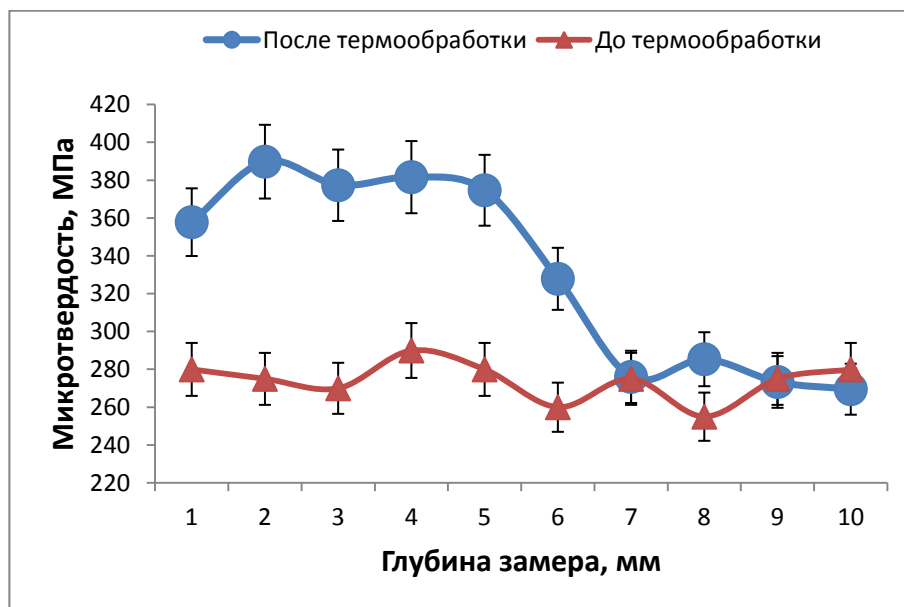


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине образцов

График демонстрирует характер изменения микротвердости в зависимости от глубины замера. Видно, что в поверхностных слоях (зона термоупрочнения) материал обладает повышенной микротвердостью, значения которой составляют около 380–400 МПа. По глубине микротвердость сохраняется на достаточно высоком уровне до 3–4 мм, после чего начинается ее постепенное снижение до 280–300 МПа. Это снижение обусловлено уменьшением степени термического воздействия на более глубокие слои материала, что приводит к менее выраженному измельчению микроструктуры и снижению концентрации твердых включений эвтектического кремния.

Таким образом, установлено, что термоповерхностное упрочнение наплавленного АК5 при приведенных выше режимах обеспечивает выраженное повышение микротвердости на глубине до 3 мм. Однако на глубине свыше 4–5 мм эффект упрочнения снижается, что необходимо учитывать при проектировании режимов обработки для достижения равномерного распределения механических свойств по сечению материала.

На рис. 5 представлена зависимость среднего размера зерен фаз α -Al и эвтектики α -Al+Si от условий обработки, отражающая различия в морфологии микроструктуры между зонами термоупрочнения и необработанным состоянием.

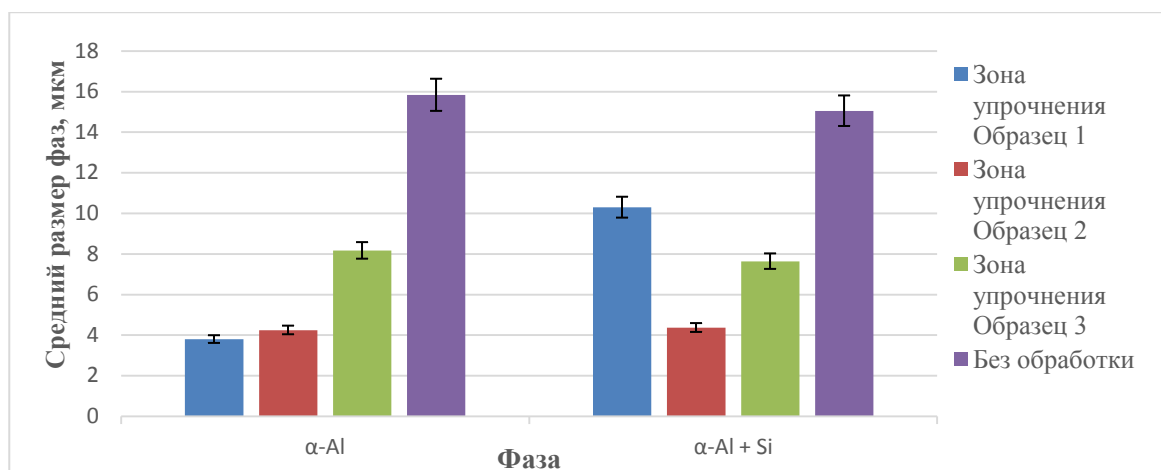


Рис. 5. Фазовый анализ сплава АК5 в зоне упрочнения и без обработки

Поверхностная термообработка приводит к выраженному измельчению зерна, наиболее значительному в матричной фазе. Величина зерна в зоне упрочнения существенно ниже, чем в необработанном состоянии, что указывает на активное влияние дисперсионного упрочнения и процессов рекристаллизации. В результате обработки границы зерен становятся более стабильными, ограничивая их рост, что приводит к значительному уменьшению их среднего размера.

В эвтектической смеси изменение структуры выражено менее интенсивно, что свидетельствует о меньшей подвижности границ зерен и большей устойчивости эвтектической фазы к измельчению. Это может быть связано с особенностями распределения кремния в алюминиевой матрице, создающими дополнительные барьеры для коагуляции зерен. В целом упрочняющая обработка оказывает заметное влияние на микроструктуру, формируя более равномерное и мелкозернистое строение, что потенциально может привести к изменению механических характеристик.

Полученные данные свидетельствуют о том, что изменение параметров термоповерхностного упрочнения позволяет целенаправленно регулировать структуру и свойства материала. Выявленные закономерности формирования микроструктуры могут быть использованы для оптимизации технологических режимов упрочняющей обработки, обеспечивая повышение эксплуатационных свойств материала в зависимости от требований к конечному изделию.

Таким образом, установленные изменения микроструктуры в зоне упрочнения подтверждают эффективность термоповерхностной об-

работки для модификации структуры доэвтектического сплава.

Заключение

1. Анализ микроструктуры сплава АК5, полученного с использованием гибридной технологии упрочнения, показал, что в зоне термоупрочнения формируется мелкодисперсная стабильная двухфазная структура, состоящая из дендритов α -Al и эвтектики. Образование более дисперсной структуры в результате обработки свидетельствует о ее положительном влиянии на механические свойства материала.

2. Наибольшие изменения структуры наблюдаются при балансе полярности 30%, что подчеркивает важность этого параметра для изменения процессов кристаллизации и перераспределения фаз. Это дает возможность управлять структурой и свойствами материала путем изменения условий термоповерхностного упрочнения.

3. Измерения микротвердости сплава АК5 после поверхностного термоупрочнения в указанных выше режимах показали повышение ее значений в поверхностных слоях (до 3 мм).

4. Данная гибридная технология «объемная электродуговая наплавка + поверхностное термоупрочнение неплавящимся электродом» может быть адаптирована для процессов аддитивного производства методом WAAM, что открывает новые возможности для управления структурой и свойствами наплавленного металла. В условиях WAAM-технологии, характеризующейся послойным формированием изделия и циклическим термическим воздействием, применение термоповерхностного упрочнения позволит снизить пористость, повысить одно-

родность структуры и механических характеристик наплавленных слоев.

5. Требуется дополнительные исследования с целью повышения эффективности гибридной технологии «объемная электродуговая наплавка + поверхностное термоупрочнение неплавящимся электродом» на алюминиевых сплавах других систем.

В целом, результаты исследования на сплаве АК5 подтверждают эффективность термоповерхностного упрочнения для улучшения структуры и свойств алюминиевых сплавов, что открывает возможности их использования в ответственных и высоконагруженных областях.

Авторы благодарят компанию ООО «Велдинг-Групп Самара» за поддержку и предоставленное оборудование для проведения исследований по гибридной технологии поверхностного термоупрочнения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ельцов, В. В.* Ремонтная сварка и наплавка деталей машин и механизмов / В. В. Ельцов. – Тольятти : Издательство ТГУ, 2012.
2. *Ельцов, В. В.* Восстановление и упрочнение деталей

машин / В. В. Ельцов. – Тольятти : Издательство ТГУ, 2015. – С. 236–238.

3. Патент РФ 2708715. Способ гибридной лазерной-дуговой наплавки изделия из металла / Киреев Р. Ю., Сухочев А. С. ; заявл. 22.11.2018 ; опубл. 11.12.2019.

4. *Никитин, К. В.* Гибридизации технологии объемной электродуговой наплавки для получения заготовок из алюминиевых сплавов системы Al-Si / К. В. Никитин, С. С. Жаткин, Д. А. Дунаев, Д. Г. Черников // Труды XII Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии». – М. : МИСИС, 2024. – С. 210–217.

5. *Zhang H., Qian Y., Wang G., Zheng Q.* The characteristics of arc beam shaping in hybrid plasma and laser deposition manufacturing. *Science in China, Series E: Technological Sciences*. 2006. Vol. 49, Iss. 2. P. 238-247.

6. *Colegrove P. A., Donoghue J., Martina F., Gu J., Prangnell P., Hönnige J.* Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components. *ScriptaMaterialia*. 2017. V. 135. P. 111-118.

7. *Bamberg J., Hess T., Hessert R., Satzger W.* Verfahren-zumherstellen, repariere noderaustauscheneinesbauteilsmitverfestigenmittelsdruckbeaufschlagung. German Patent Application WO 2012152259 A1, 2012.

8. *Никитин, К. В.* Применение магнитно-импульсной обработки при электродуговой сварке сплава АД1Н / К. В. Никитин, С. С. Жаткин, Д. Г. Черников, А. К. Скороумов, Д. А. Дунаев, В. А. Новиков // Литье и металлургия. – 2023. – № 4. – С. 101–108.