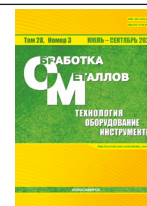




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Влияние высокочастотного электромагнитного поля на эволюцию микроструктуры, перераспределение легирующих элементов и твердость поверхностных слоев компактного графитового чугуна EN-GJV-400, полученных TIG-модификацией

*Фархад Магамед оглы Ширзадов^{а, *}*

Азербайджанский технический университет, проспект Г. Джавида, 25, Баку, AZ1073, Азербайджан

^а  <https://orcid.org/0009-0006-9378-9865>,  farhad.shirzadov@aztu.edu.az

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.43.038.6:669.268

История статьи:

Поступила: 07 июля 2026

Рецензирование: 15 июля 2026

Принята к печати: 17 июля 2026

Доступно онлайн: 15 сентября 2026

Ключевые слова:

EN-GJV-400

TIG-оплавление поверхности

Высокочастотное электромагнитное поле

Закономерности затвердевания

Инженерия поверхности

Благодарности

Автор выражает признательность за то, что часть экспериментальных исследований была выполнена в Техническом университете Берлина (Германия) в рамках научного сотрудничества и исследовательской деятельности, связанной с технологиями поверхностной инженерии. Текущая институциональная принадлежность автора – Азербайджанский технический университет, где исследовательская работа была продолжена, развита и подготовлена к публикации. Автор выражает благодарность за предоставленные экспериментальные возможности и научную поддержку, оказанные во время исследовательского пребывания в Техническом университете Берлина.

АННОТАЦИЯ

Введение. Компактный графитизированный чугун EN-GJV-400 широко применяется для изготовления высоконагруженных автомобильных и машиностроительных компонентов благодаря сочетанию прочности, теплопроводности, демпфирующей способности и технологичности. Однако ограниченные значения твердости и износостойкости поверхностного слоя снижают его эксплуатационные характеристики в условиях интенсивного контактного нагружения. Применение высокочастотного электромагнитного поля (ВЧЭМП) является перспективным методом управления процессами тепло- и массопереноса при поверхностной обработке, однако его влияние на формирование структуры EN-GJV-400 изучено недостаточно. **Методы исследования.** Проведено сравнительное исследование традиционной и ВЧЭМП-ассистированной TIG-модификации поверхности EN-GJV-400. Исследованы TIG-оплавление, поверхностное легирование фольгами Ni78Si8B14 и CuSn-4, а также наплавка проволокой UTP A DUR 600 с применением электромагнитного поля частотой 200 кГц. Формирование поверхностных слоев исследовали методами оптической и сканирующей электронной микроскопии с EDS-анализом, а также измерением микротвердости по Виккерсу. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что ВЧЭМП изменяет условия тепло- и массопереноса в расплавленной зоне, способствуя повышению структурной однородности и равномерности распределения легирующих элементов. TIG-оплавление повысило твердость поверхности с 375 до 765 HV0.1 за счет растворения графита, перераспределения углерода и формирования ледебуритных структур с цементитсодержащими фазами. ВЧЭМП-оплавление обеспечило сопоставимую твердость (~760 HV0.1), но с более однородной структурой. Для наплавки UTP A DUR 600 применение ВЧЭМП повысило твердость с 771 до 800 HV0.1 вследствие более равномерного распределения хромсодержащих твердых фаз. **Заключение.** ВЧЭМП-ассистированная TIG-модификация EN-GJV-400 является эффективным инструментом управления формированием поверхностных слоев. Основное влияние ВЧЭМП заключается не в прямом упрочнении, а в регулировании процессов перераспределения элементов, формирования фаз и в повышении структурной однородности модифицированных слоев.

Для цитирования: Ширзадов Ф.М. Влияние высокочастотного электромагнитного поля на эволюцию микроструктуры, перераспределение легирующих элементов и твердость поверхностных слоев компактного графитового чугуна EN-GJV-400, полученных TIG-модификацией // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 3. – С. 83–111. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.3-83-111.

*Адрес для переписки

Ширзадов Фархад Магамед оглы, доцент,
Азербайджанский технический университет,
проспект Г. Джавида, 25,
AZ1073, г. Баку, Азербайджан;
Тел.: +994559029446, e-mail: farhad.shirzadov@aztu.edu.az

Введение

Технологии инженерии поверхности играют ключевую роль в повышении эксплуатационных характеристик и увеличении срока службы деталей машин, работающих в условиях интенсивных механических, тепловых и трибологических нагрузок. В отличие от полной замены

компонентов, методы поверхностной модификации позволяют избирательно улучшать свойства поверхностного слоя при сохранении исходных преимуществ объемного материала основы. В связи с этим такие процессы, как поверхностное оплавление, легирование и наплавка, широко применяются в автомобильной промышленности, энергетике, горнодобывающей отрасли и тяжелом машиностроении для восстановления деталей, увеличения их ресурса и повышения эксплуатационной надежности [1–5].

Компактный графитовый чугун (CGI), в частности марка EN-GJV-400, привлекает значительное внимание благодаря благоприятному сочетанию механической прочности, теплопроводности, демпфирующей способности и литейных характеристик. Вермикулярная форма графита обеспечивает промежуточные свойства между серым и высокопрочным чугуном, что позволяет использовать данный материал для изготовления высоконагруженных автомобильных компонентов, таких как распределительные валы, блоки цилиндров и головки цилиндров. Особенности морфологии графита в CGI также делают этот материал перспективной модельной системой для исследования взаимодействия процессов термической обработки, перераспределения углерода и электромагнитного воздействия на расплавленные области. При TIG-поверхностной обработке локальное плавление сопровождается растворением графита, перераспределением углерода и быстрым неравновесным затвердеванием, что приводит к существенным структурным преобразованиям. Однако, несмотря на высокие объемные характеристики, эксплуатационная надежность деталей из CGI часто ограничивается процессами разрушения поверхностного слоя, включая адгезионный и абразивный износ, циклическое термическое воздействие и контактную усталость, что связано с относительно ограниченной твердостью и износостойкостью приповерхностной зоны [1–6].

Для повышения функциональных характеристик чугунных компонентов разработан широкий спектр технологий поверхностной модификации, включая лазерное оплавление, плазменную наплавку (РТА), лазерную наплавку, газотермическое напыление и обработку методом TIG. Данные процессы основаны на

локальном плавлении материала с последующим быстрым затвердеванием, что приводит к формированию новых структурных состояний, включая растворение графита, перераспределение углерода, образование ледебуритных эвтектических составляющих, выделение карбидных фаз и, в зависимости от химического состава модифицированной области, формирование мартенситных структур. Такие микроструктурные изменения способны значительно повысить твердость и сопротивление изнашиванию поверхностных слоев. Несмотря на то что лазерные технологии обеспечивают высокую плотность энергии и точный контроль теплового воздействия, их промышленное применение, особенно для крупногабаритных деталей, может быть ограничено высокой стоимостью оборудования и сложностью технологической реализации. В сравнении с ними TIG-модификация поверхности сохраняет привлекательность благодаря относительно простой конструкции оборудования, технологической гибкости и возможности обработки и ремонта крупногабаритных инженерных деталей [7–10].

Тем не менее традиционная TIG-обработка обладает ограниченными возможностями управления динамикой сварочной ванны в процессе плавления и затвердевания. Формирование расплавленной области определяется главным образом тепловым воздействием дуги, конвекцией Марангони, силами плавучести и гравитационными эффектами. Совместное влияние указанных факторов может приводить к неоднородному переносу материала, локальной химической неоднородности, различиям в условиях кристаллизации и неравномерному распределению структурных составляющих. Поэтому повышение управляемости процессов переноса массы и тепла при TIG-поверхностной инженерии остается актуальной научной задачей, особенно для CGI, где растворение графита и перераспределение углерода оказывают определяющее влияние на формирование конечной микроструктуры.

В последние годы применение внешних физических полей рассматривается как перспективный подход для управления процессами тепло- и массопереноса при сварке и поверхностной модификации материалов. Среди различных методов обработка с использованием электромагнитных полей вызывает повышенный интерес

благодаря способности воздействовать на поведение электропроводных металлических расплавов. При взаимодействии электропроводной жидкой фазы с внешним магнитным полем в расплаве возникают индуцированные электрические токи. Взаимодействие плотности тока и магнитной индукции приводит к возникновению электромагнитных сил, описываемых через силу Лоренца, которые способны изменять движение жидкой фазы, перенос растворенных элементов и условия затвердевания. Эффективность данного воздействия определяется параметрами электромагнитного поля, электрической проводимостью материала, распределением магнитного поля и геометрией сварочной ванны [11–15].

Технологии электромагнитного воздействия исследовались при литье, сварке, аддитивном производстве и поверхностной модификации как железных, так и цветных сплавов. Предыдущие исследования показали, что электромагнитное перемешивание может способствовать повышению химической однородности, снижению ликвации, изменению морфологии затвердевания и измельчению структурных составляющих. Однако конечный эффект электромагнитного воздействия существенно зависит от частоты возбуждения, интенсивности магнитного поля, объема взаимодействия, свойств материала и технологических параметров процесса [16–19].

По сравнению с традиционными низкочастотными системами электромагнитного перемешивания высокочастотные электромагнитные поля (ВЧЭМП) обеспечивают локализованное воздействие на электропроводные расплавленные области вследствие ограниченной глубины проникновения электромагнитного поля. Данная особенность особенно важна для процессов поверхностной модификации, где объем расплава относительно мал, но требуется точное управление процессами переноса в сварочной ванне. Таким образом, применение ВЧЭМП представляет собой перспективный способ регулирования процессов затвердевания приповерхностного слоя без существенного изменения свойств основного материала детали.

Несмотря на значительный прогресс в области электромагнитной обработки материалов, большинство предыдущих исследований посвящено алюминиевым сплавам, сталям, литейным процессам и сварочным технологиям соединения

материалов. В то же время применение ВЧЭМП при TIG-поверхностной модификации компактного графитового чугуна остается недостаточно изученным. В частности, взаимосвязь между электромагнитным воздействием, поведением сварочной ванны, перераспределением легирующих элементов, эволюцией микроструктуры и изменением твердости поверхностных слоев CGI до настоящего времени систематически не установлена [20–22].

Кроме того, влияние ВЧЭМП на различные варианты TIG-модификации поверхности, включая непосредственное оплавление, легирование дополнительными элементами и нанесение твердых наплавочных материалов с карбидообразующими элементами, требует дальнейшего исследования. Предполагается, что вклад электромагнитного воздействия определяется химическим составом модифицированного слоя и преобладающими механизмами упрочнения. В системах, где твердость преимущественно определяется быстрым затвердеванием материала основы, ВЧЭМП может главным образом способствовать повышению структурной однородности. В легированных и наплавленных слоях, содержащих карбидообразующие элементы, электромагнитное перераспределение компонентов может влиять на формирование и пространственное расположение упрочняющих фаз.

Таким образом, *целью настоящего исследования* является установление влияния TIG-обработки поверхности EN-GJV-400 компактного графитового чугуна в условиях воздействия ВЧЭМП на эволюцию микроструктуры, перераспределение элементов и изменение твердости. Особое внимание уделено определению роли ВЧЭМП как дополнительного параметра управления процессом формирования поверхностного слоя, распределения фаз и структурной однородности при различных режимах TIG-модификации.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие *задачи исследования*.

1. Исследовать влияние ВЧЭМП частотой 200 кГц на формирование поверхностного слоя и структурную однородность при TIG-обработке компактного графитового чугуна EN-GJV-400.

2. Оценить влияние TIG-обработки с применением ВЧЭМП на эволюцию микроструктуры

и пространственное распределение структурных составляющих, формирующихся в условиях быстрого затвердевания.

3. Исследовать перераспределение и гомогенизацию легирующих элементов при TIG-легировании с использованием фольг Ni78Si8B14 и CuSn-4, а также при наплавке хромосодержащей проволокой UTP A DUR 600 с применением SEM/EDS-анализа.

4. Установить взаимосвязь между воздействием ВЧЭМП, перераспределением элементов, формированием микроструктуры и изменением твердости модифицированных поверхностных слоев.

Материалы и методы исследования

Материалы

В качестве материала основы для проведения экспериментов по TIG-модификации поверхности и обработке с применением ВЧЭМП был выбран компактный графитовый чугун (CGI) марки EN-GJV-400. Данный материал широко используется для изготовления автомобильных компонентов, включая распределительные валы, благодаря сочетанию высокой механической прочности, теплопроводности, демпфирующей способности и хорошим литейным характеристикам. Однако относительно ограниченные значения твердости и износостойкости приповерхностной области снижают эксплуатационные характеристики материала в условиях интенсивного контактного нагружения.

Исследуемые образцы были изготовлены из серийных распределительных валов из чугуна EN-GJV-400. Геометрические размеры и форма экспериментальных образцов представлены на рис. 1.

Исходная микроструктура чугуна EN-GJV-400 представляет собой феррито-перлитную металлическую матрицу с равномерно распределенными включениями вермикулярного графита. Химический состав материала подложки приведен в табл. 1.

Для проведения экспериментов по TIG-наплавке была выбрана хромосодержащая наплавочная проволока UTP A DUR 600. Данный присадочный материал содержит около 9,5 масс. % Cr и был выбран благодаря его способности к формированию карбидсодержащих упрочняющих фаз в условиях быстрого затвердевания расплавленной зоны. Образование и равномерное распределение хромосодержащих твердых фаз способствует повышению твердости и улучшению износостойкости сформированного поверхностного слоя. Номинальный химический состав и твердость наплавочной проволоки представлены в табл. 2.

Для исследования влияния контролируемого легирования на формирование структуры и функциональные свойства модифицированных поверхностных слоев EN-GJV-400 использовали две легирующие фольги: Ni78Si8B14 и CuSn-4.

Сплав Ni78Si8B14 был выбран вследствие способности никеля, кремния и бора изменять процессы фазообразования и повышать прокаливаемость расплавленной зоны при быстром охлаждении. Введение данных элементов способствует формированию упрочняющих структурных составляющих, включая мартенситные компоненты, ледебуритные эвтектические образования и карбидсодержащие фазы. Кроме того, никелевое легирование исследовалось с учетом его влияния на взаимодействие расплавленного металла с графитовой фазой, что может спо-

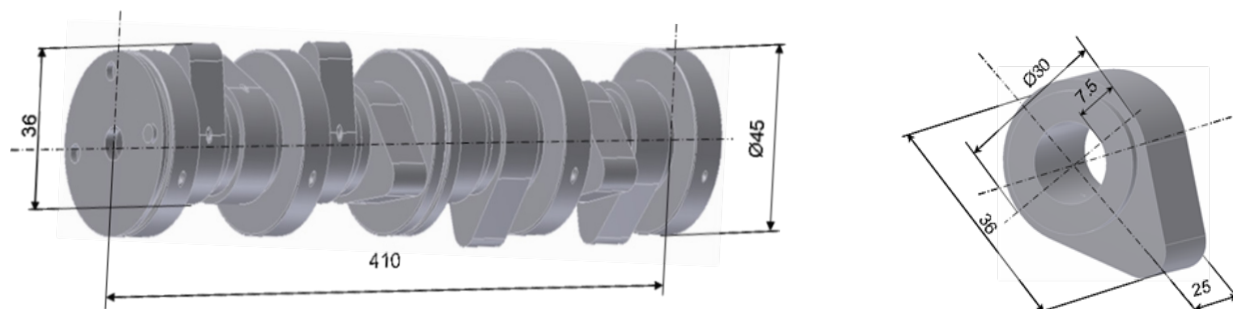


Рис. 1. Геометрия экспериментального образца распределительного вала из компактного графитового чугуна EN-GJV-400

Fig. 1. Geometry of the EN-GJV-400 compacted graphite iron camshaft specime

Таблица 1

Table 1

Химический состав компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400, использованного в качестве материала подложки

Chemical composition of EN-GJV-400 compacted graphite iron used as the substrate material

Материал подложки / Substrate material	C	Si	Al	Mn	Cr	Cu	Ni
EN-GJV-400	2,7...3,8	0,5...2,9	< 0,1	0,2...0,6	< 0,1	0,6...1,0	0,2...0,6

Таблица 2

Table 2

Химический состав и номинальная твердость наплавочной проволоки UTP A DUR 600, использованной при TIG-наплавке

Chemical composition and nominal hardness of UTP A DUR 600 filler wire used for TIG hardfacing

Наплавочная проволока / Filler wire	C	Si	Mn	Cr	Основа / Balance	Номинальная твердость / Nominal hardness
UTP A DUR 600	0,5	3,0	0,5	9,5	Fe	610 HV

способствовать сохранению отдельных графитсо-держающих областей. Такие области могут быть благоприятны с точки зрения трибологических характеристик, поскольку графит способен выполнять функцию твердой смазки при контактном скольжении.

Фольга CuSn-4 использовалась для введения медьсодержащих областей в состав модифицированного поверхностного слоя. В отличие от хромсодержащей наплавки, целью медного легирования являлось не максимальное увеличение твердости, а изменение трибологического поведения поверхности. Известно, что медьсодержащие области могут способствовать формированию переносных пленок при контактном скольжении и снижать интенсивность непосредственного металлического взаимодействия. В рамках настоящей работы этот эффект рассматривается только как предполагаемый механизм, основанный на ожидаемой роли медьсодержащих областей, поскольку трибологические испытания для данных образцов не проводились.

Химический состав и предполагаемое функциональное назначение легирующих фольг представлены в табл. 3.

Методика проведения экспериментов

Эксперименты по модификации поверхности проводили с использованием источника питания для TIG-сварки TIG 200 AC/DC, сопряженного

с высокочастотной индукционной системой нагрева TTH15 мощностью 15 кВт, способной создавать высокочастотное электромагнитное поле (ВЧЭМП) с частотой до 450 кГц. Для формирования переменного электромагнитного поля в зоне TIG-обработки применяли водоохлаждаемый медный индуктор катушечного типа. Индуктор представлял собой многovitkovую медную катушку, расположенную концентрически относительно области обработки, что обеспечивало электромагнитное взаимодействие между приложенным магнитным полем и электропроводной жидкометаллической ванной. Расстояние между индуктором и зоной плавления регулировали таким образом, чтобы обеспечить эффективное взаимодействие электромагнитных сил с расплавом при сохранении стабильного горения TIG-дуги.

В настоящем исследовании при обработке с применением ВЧЭМП использовали постоянную частоту электромагнитного поля 200 кГц. Прямое измерение магнитной индукции непосредственно в процессе TIG-обработки не проводилось, а управляемым параметром электромагнитного воздействия была мощность индукционного нагрева. Значение мощности изменяли в диапазоне 25...100 % в зависимости от исследуемого режима модификации поверхности для регулирования интенсивности электромагнитного перемешивания расплава при сохранении стабильности процесса TIG.

Таблица 3

Table 3

Химический состав и функциональное назначение легирующих фольг Ni78Si8B14 и CuSn-4, использованных при TIG-легировании поверхности EN-GJV-400

Chemical composition and functional role of Ni78Si8B14 and CuSn-4 alloying foils used for TIG surface alloying of EN-GJV-400

Легирующая фольга / Alloying foil	Ni, масс. % / Ni (wt.%)	Si, масс. % / Si (wt.%)	B, масс. % / B (wt.%)	Cu, масс. % / Cu (wt.%)	Sn, масс. % / Sn (wt.%)	Предполагаемое функциональное назначение / Proposed functional role
Ni78Si8B14	78	8	14	–	–	Изменение процессов фазообразования, повышение прокаливаемости, формирование мартенситных и карбидсодержащих структурных составляющих, сохранение преимуществ графитовой фазы с точки зрения трибологических свойств / Modification of phase formation processes, increased hardenability, formation of martensitic and carbide-containing structural constituents, retention of graphite phase benefits for tribological properties
CuSn-4	–	–	–	95...97	3...5	Формирование медьсодержащих областей, модификация фрикционного поведения поверхности, возможное образование переносных пленок при изнашивании / Formation of copper-containing regions, modification of surface friction behavior, possible formation of transfer films during wear

Экспериментальная программа включала в себя три типа обработки поверхности:

- 1) TIG-оплавление чугуна EN-GJV-400 без дополнительного присадочного материала;
- 2) TIG-наплавку с использованием хромсодержащей наплавочной проволоки UTP A DUR 600;
- 3) TIG-легирование поверхности с применением фольг CuSn-4 и Ni78Si8B14.

В качестве исходного эталонного состояния использовали традиционное TIG-оплавление без воздействия электромагнитного поля.

Для всех экспериментов с применением ВЧЭМП сварочный ток корректировали в соответствии с выбранным режимом обработки, тогда как параметры электромагнитной системы поддерживали постоянными для обеспечения сопоставимости условий эксперимента. Частота 200 кГц была выбрана на основании предварительных исследований, которые показали устойчивое горение TIG-дуги и эффективное электромагнитное взаимодействие между приложенным полем и электропроводной расплавленной зоной.

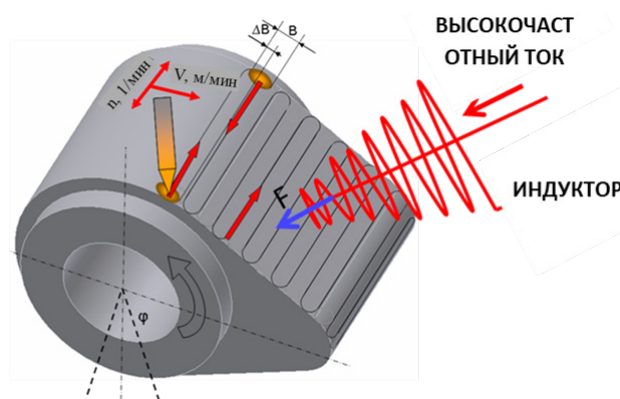
В качестве неплавящегося электрода использовали вольфрамовый электрод диаметром

2,4 мм. Во всех процессах обработки применяли высокочистый аргон в качестве защитного газа для предотвращения окисления и загрязнения расплавленной зоны атмосферными примесями.

Схематическая конфигурация экспериментальной установки TIG-ВЧЭМП представлена на рис. 2. Основные технологические параметры, использованные при проведении экспериментов по наплавке, оплавлению и легированию поверхности, приведены в табл. 4–6.

С целью проведения сравнительного анализа технологические параметры TIG-обработки поддерживали одинаковыми для традиционного режима и режима с применением ВЧЭМП.

Легирование поверхности кулачка распределительного вала с применением ВЧЭМП выполняли в соответствии со схемой, представленной на рис. 3. В процессе обработки взаимодействие между тепловым воздействием TIG-дуги и электромагнитной индукцией приводит к возникновению электромагнитных сил, вызывающих движение расплава в сварочной ванне. Данное взаимодействие определяет процессы переноса легирующих элементов, спо-

**Геометрические параметры**

- Размеры сварочной ванны
- Перекрытие сварочных валиков
- Угол наклона электрода и расстояние от поверхности (вынос электрода)
- Геометрия поверхностного слоя

Режимные (технологические) параметры

- Скорость сварки
- Сварочный ток
- Напряжение дуги
- Частота электромагнитного поля
- Интенсивность (напряженность) электромагнитного поля

Рис. 2. Схема экспериментальной установки TIG-ВЧЭМП для модификации поверхности чугуна EN-GJV-400 с применением высокочастотного электромагнитного воздействия

Fig. 2. Schematic configuration of the TIG-HFEMF experimental system for surface modification of EN-GJV-400 compacted graphite iron

Таблица 4

Table 4

Технологические параметры TIG-наплавки с использованием присадочной проволоки UTP A DUR 600 при воздействии ВЧЭМП

Treatment parameters used for TIG cladding with UTP A DUR 600 filler wire under HFEMF-assisted conditions

Параметр / Parameter	Значение / Value
Сварочный ток / Welding current	30...130 А / 30...130 А
Высота наплавленного валика / Bead height	< 3 мм / < 3 mm
Скорость перемещения / Travel speed	50...130 мм/мин / 50...130 mm/min
Частота колебаний электрода / Electrode oscillation frequency	20...40 мин ⁻¹ / 20...40 min ⁻¹
Вылет электрода / Electrode stick-out	2,0...2,5 мм / 2.0...2.5 mm
Ширина наплавленного валика / Bead width	5...6 мм / 5...6 mm
Диаметр присадочной проволоки / Filler wire diameter	3,2 мм / 3.2 mm
Мощность индукционного воздействия / Induction power	25...100 % / 25...100 %
Частота электромагнитного поля / Electromagnetic field frequency	200 кГц / 200 kHz
Расход аргона / Argon flow rate	8 л/мин / 8 L/min

способствует выравниванию химического состава расплавленной зоны и стабилизации фронта кристаллизации, обеспечивая управляемое формирование модифицированного поверхностного слоя.

Необходимое количество легирующего материала, вводимого в расплавленную зону, рассчитывали до начала обработки для обеспечения контролируемого изменения химического состава поверхностного слоя. Расчет выполняли с учетом толщины обрабатываемой поверхностной зоны (h_R), толщины легирующей фольги (h_F) и концентрации легирующего элемента в составе легирующей фольги (E_L):

$$h_R(\text{мм}) + h_F(\text{мм}) \rightarrow 100\%;$$

$$E_V = \frac{h_F}{h_R + h_F} 100\% \left(\frac{E_L\%}{100\%} \right); \quad (1)$$

$$h_f(\text{м}) \rightarrow E_V\%;$$

$$E_V = \frac{E_L h_F}{h_R - h_F},$$

где E_V – требуемое количество легирующих элементов на обрабатываемой поверхности; h_R – толщина нанесенного (наплавленного) слоя; h_F – толщина легирующей фольги; E_L –

Таблица 5

Table 5

Технологические параметры TIG-оплавления поверхности компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400 при воздействии ВЧЭМП

Treatment parameters used for TIG remelting of EN-GJV-400 compacted graphite iron under HFEMF-assisted conditions

Параметр / Parameter	Значение / Value
Сварочный ток / Welding current	40...140 А / 40...140 А
Глубина проплавления / Penetration depth	< 2,5 мм / < 2.5 mm
Скорость перемещения / Travel speed	90...150 мм/мин / 90...150 mm/min
Частота колебаний электрода / Electrode oscillation frequency	40...90 мин ⁻¹ / 40...90 min ⁻¹
Вылет электрода / Electrode stick-out	2,0...2,5 мм / 2.0...2.5 mm
Ширина расплавленной зоны / Melted zone width	4...6 мм / 4...6 mm
Мощность индукционного воздействия / Induction power	25...100 % / 25...100 %
Частота электромагнитного поля / Electromagnetic field frequency	200 кГц / 200 kHz
Расход аргона / Argon flow rate	8 л/мин / 8 L/min

Таблица 6

Table 6

Технологические параметры TIG-легирования поверхности компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400 при воздействии ВЧЭМП

Processing parameters used for TIG surface alloying of EN-GJV-400 compacted graphite iron under HFEMF-assisted conditions

Параметр / Parameter	Значение / Value
Сварочный ток / Welding current	80...145 А / 80...145 А
Глубина проплавления / Penetration depth	< 3,5 мм / < 3.5 mm
Скорость перемещения / Travel speed	40...70 мм/мин / 40...70 mm/min
Частота колебаний электрода / Electrode oscillation frequency	20...70 мин ⁻¹ / 20...70 min ⁻¹
Вылет электрода / Electrode stick-out	2,0...3,5 мм / 2.0...3.5 mm
Ширина расплавленной зоны / Melted zone width	5...7 мм / 5...7 mm
Мощность индукционного воздействия / Induction power	25...100 % / 25...100 %
Частота электромагнитного поля / Electromagnetic field frequency	200 кГц / 200 kHz
Расход аргона / Argon flow rate	6 л/мин / 6 L/min

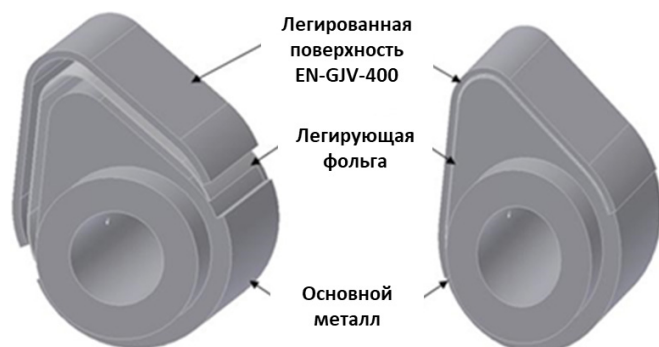


Рис. 3. Схема процесса TIG-легирования поверхности чугуна EN-GJV-400 с применением ВЧЭМП и легирующих фольг Ni78Si8B14 и CuSn-4

Fig. 3. Schematic illustration of HFEMF-assisted TIG surface alloying of EN-GJV-400 using Ni78Si8B14 and CuSn-4 alloying foils

концентрация (массовая доля) легирующего элемента в фольге.

Когда количество элемента в расплавленной зоне известно, толщина необходимой фольги определяется по следующему выражению:

$$h_F = \frac{h_R E_V}{E_L - E_V}. \quad (2)$$

Методы металлографических исследований, SEM/EDS-анализа и измерения микротвердости

После проведения TIG-оплавления, TIG-легирования и TIG-наплавки образцы разрезали в поперечном направлении относительно модифицированных дорожек для исследования структуры и химического состава сформированных поверхностных слоев. Поперечные шлифы изготавливали с использованием стандартных металлографических процедур, включающих в себя последовательное шлифование и полирование. Заключительный этап подготовки поверхности выполняли с применением тонкодисперсных полировальных материалов, обеспечивающих шероховатость поверхности менее 3 мкм, что гарантировало получение качественных изображений при проведении оптических и электронно-микроскопических исследований.

Для выявления микроструктуры подготовленные шлифы подвергали химическому травлению с использованием металлографических реактивов, соответствующих исследуемому материалу и типу модифицированного поверхностного слоя. Применяемое травление обеспечивало контрастное выявление морфологии графитовой фазы, структурных составляющих металлической матрицы, карбидсодержащих областей, а также особенностей структуры, сформировавшейся в процессе кристаллизации расплавленной зоны.

Исследование микроструктуры проводили с использованием оптического микроскопа Leica. Анализ выполняли на поперечных шлифах исходного материала, зон TIG-оплавления, поверхностных слоев, полученных с применением ВЧЭМП, легированных областей и наплавленных покрытий. Особое внимание уделяли геометрии зоны переплава, строению переходной области между модифицированным слоем и материалом подложки, а также распределению вновь образованных структурных составляющих.

Изучение распределения химических элементов в модифицированных поверхностных слоях осуществляли методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) в сочетании с энергодисперсионным рентгеноспектральным анализом (EDS). Элементный анализ выполняли на электронно-зондовой микроаналитической системе CAMEBAX MICROBEAM (CAMECA, Франция), оснащенной кремниевым полупроводниковым детектором и системой аналого-цифровой обработки сигналов. Исследования проводили в выбранных областях модифицированных слоев с целью оценки перераспределения и степени гомогенизации легирующих элементов под воздействием электромагнитного перемешивания расплава, индуцированного высокочастотным электромагнитным полем.

Следует отметить, что метод EDS обеспечивает полуколичественное определение элементов со средними и высокими атомными номерами. В связи с низкой энергией характеристического рентгеновского излучения бора и ограниченной чувствительностью метода к легким элементам содержание бора, введенного сплавом Ni78Si8B14, количественно не определяли. Аналогично измеренные значения содержания углерода не использовали для количественной интерпретации результатов вследствие возможных погрешностей, обусловленных морфологией графитовой фазы, объемом взаимодействия электронного пучка с материалом и особенностями подготовки поверхности. Поэтому результаты EDS-анализа в настоящей работе использовали преимущественно для оценки перераспределения элементов Ni, Cu и Cr, тогда как влияние бора и углерода на процессы фазообразования интерпретировали на основании номинального химического состава легирующих материалов, наблюдаемой микроструктуры и результатов измерения микротвердости.

При проведении EDS-анализа регистрировали характеристическое рентгеновское излучение, возникающее при взаимодействии электронного пучка с исследуемым образцом, после чего выполняли идентификацию и полуколичественный анализ химических элементов. Измерения проводили в характерных областях легированных и наплавленных слоев, включая поверхностную часть, центральную область модифицированного слоя и зону перехода к ма-

териалу подложки EN-GJV-400. Такой подход позволил оценить влияние электромагнитного перемешивания расплава на характер распределения легирующих элементов.

Измерение микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3. Для всех исследуемых образцов были установлены одинаковые параметры нагружения и идентичные условия испытаний, что обеспечивало корректность сравнительного анализа полученных результатов.

Комплексное использование методов оптической металлографии, сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным микроанализом (SEM/EDS) и измерения микротвердости позволило установить взаимосвязь между условиями TIG-модификации поверхности с применением ВЧЭМП, перераспределением легирующих элементов, особенностями формирования микроструктуры и механическими характеристиками модифицированных поверхностных слоев из компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400.

Экспериментальная матрица

Для систематической оценки влияния TIG-модификации поверхности с использованием ВЧЭМП на формирование модифицированных слоев компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400 была разработана экспериментальная матрица, включающая в себя как традиционную TIG-обработку, так и обработку с электромагнитным воздействием.

В программу исследований были включены следующие варианты модификации поверхности: (i) традиционная TIG-переплавка; (ii) TIG-переплавка с применением ВЧЭМП; (iii) TIG-легирование поверхности фольгами Ni78Si8B14 и CuSn-4 как без использования ВЧЭМП, так и с его применением; (iv) TIG-наплавка хромосодержащей присадочной проволокой UTP A DUR 600 в традиционном режиме и с воздействием ВЧЭМП.

Во всех экспериментах с электромагнитным воздействием частота ВЧЭМП поддерживалась постоянной и составляла 200 кГц. Мощность индуктора изменялась в зависимости от режима обработки таким образом, чтобы обеспечить устойчивое электромагнитное перемешивание расплава без нарушения стабильности TIG-дуги. Традиционная TIG-обработка без электромаг-

нитного воздействия использовалась в качестве базового (контрольного) варианта для оценки непосредственного вклада ВЧЭМП в формирование структуры модифицированных поверхностных слоев.

Экспериментальная схема была разработана таким образом, чтобы разделить следующие факторы:

- влияние электромагнитного перемешивания на динамику сварочной ванны и структурную однородность модифицированного слоя;
- влияние легирующих элементов на фазообразование и формирование твердости;
- взаимодействие ВЧЭМП с карбидообразующими легирующими системами.

Необработанный компактный графитизированный чугун EN-GJV-400 использовался в качестве исходного материала сравнения. TIG-переплавка применялась для оценки влияния быстрого термического цикла и самозакалки на растворение графита, перераспределение углерода и формирование упрочненной ледебуритной структуры. Легирование сплавом Ni78Si8B14 использовалось для исследования образования мартенситных и карбидсодержащих структурных составляющих вследствие повышения прокаливаемости расплавленной зоны. Легирование фольгой CuSn-4 проводилось с целью изменения функциональных свойств поверхности при сохранении положительного влияния графитовой фазы. Наплавка проволокой UTP A DUR 600 была выбрана для исследования влияния ВЧЭМП на формирование и распределение хромосодержащих карбидных фаз, а также на твердость наплавленного слоя.

Полная экспериментальная матрица представлена в табл. 7.

Результаты и их обсуждение

Морфология поверхности

Морфология поверхности образцов из компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400 после TIG-модификации была исследована с целью оценки влияния ВЧЭМП на устойчивость сварочной ванны и формирование поверхностного слоя. Для сравнительного анализа были рассмотрены результаты традиционной TIG-переплавки и TIG-переплавки с применением ВЧЭМП. Внешний вид обработанной

Экспериментальная матрица исследованных вариантов модификации поверхности компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400 и цели каждого режима обработки

Experimental matrix of the investigated EN-GJV-400 surface modification conditions and the objectives of each treatment

Образец / Sample	Вид обработки поверхности / Surface treatment type	ВЧЭМП / <i>HFEMF</i>	Частота / Frequency	Основная цель исследования / Main research objective
S0	Исходный чугун EN-GJV-400 / Cast iron <i>EN-GJV-400</i>	Нет / No	–	Исходная микроструктура и начальная микротвердость / Initial microstructure and initial microhardness
S1	Традиционная TIG-переплавка / Conventional <i>TIG</i> remelting	Нет / No	–	Исследование растворения графита, перераспределения углерода и формирования ледебуритной структуры / Investigation of graphite dissolution, carbon redistribution and formation of ledeburitic structure
S2	TIG-переплавка + ВЧЭМП / <i>TIG</i> remelting + <i>HFEMF</i>	Да / Yes	200 кГц / 200 kHz	Оценка влияния ВЧЭМП на структурную однородность и особенности кристаллизации / Evaluation of <i>HFEMF</i> effect on structural homogeneity and solidification characteristics
S3	TIG-легирование Ni78Si8B14 / <i>TIG</i> alloying with <i>Ni78Si8B14</i>	Нет / No	–	Исследование влияния легирования Ni-Si-B на фазообразование и формирование мартенситных и карбидсодержащих структур / Investigation of <i>Ni-Si-B</i> alloying effect on phase formation and formation of martensitic and carbide-containing structures
S4	TIG-легирование Ni78Si8B14 + ВЧЭМП / <i>TIG</i> alloying with <i>Ni78Si8B14</i> + <i>HFEMF</i>	Да / Yes	200 кГц / 200 kHz	Исследование влияния ВЧЭМП на перераспределение легирующих элементов и однородность фазового состава / Investigation of <i>HFEMF</i> effect on alloying element redistribution and phase composition homogeneity
S5	TIG-легирование CuSn-4 / <i>TIG</i> alloying with <i>CuSn-4</i>	Нет / No	–	Исследование влияния медного легирования и сохранения функциональных свойств графитовой фазы / Investigation of copper alloying effect and retention of graphite phase functional properties
S6	TIG-легирование CuSn-4 + ВЧЭМП / <i>TIG</i> alloying with <i>CuSn-4</i> + <i>HFEMF</i>	Да / Yes	200 кГц / 200 kHz	Исследование перераспределения меди и структурной однородности при электромагнитном перемешивании / Investigation of copper redistribution and structural homogeneity under electromagnetic stirring
S7	TIG-наплавка UTP A DUR 600 / <i>TIG</i> cladding with <i>UTP A DUR 600</i>	Нет / No	–	Исследование формирования структуры хромсодержащей наплавки и карбидных фаз / Investigation of chromium-containing cladding structure and carbide phase formation
S8	TIG-наплавка UTP A DUR 600 + ВЧЭМП / <i>TIG</i> cladding with <i>UTP A DUR 600</i> + <i>HFEMF</i>	Да / Yes	200 кГц / 200 kHz	Определение влияния ВЧЭМП на распределение карбидов хрома и повышение твердости / Determination of <i>HFEMF</i> effect on chromium carbide distribution and hardness enhancement

поверхности после полирования представлен на рис. 4 и 5.

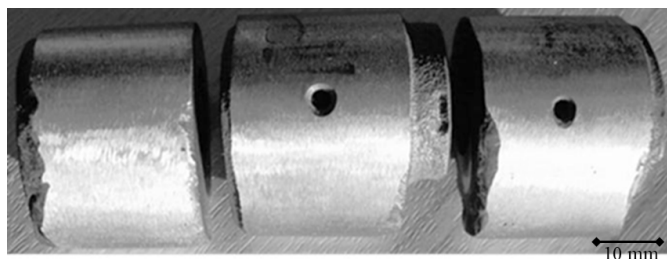


Рис. 4. Морфология поверхности кулачка из компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400 после традиционной TIG-переплавки

Fig. 4. Surface morphology of EN-GJV-400 camshaft after conventional TIG remelting

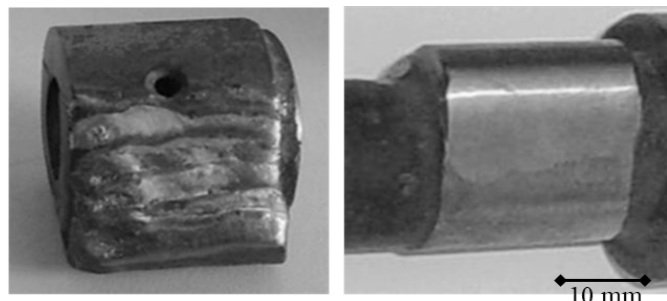


Рис. 5. Морфология поверхности кулачка из компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400 после TIG-переплавки с применением ВЧЭМП

Fig. 5. Surface morphology of EN-GJV-400 camshaft after HFEMF-assisted TIG remelting

На рис. 4 показана поверхность, полученная после традиционной TIG-переплавки. Несмотря на формирование непрерывной переплавленной дорожки, наблюдаются заметные геометрические неоднородности и локальные отклонения вдоль профиля кулачка. Наличие подобных дефектов свидетельствует о неравномерном перераспределении расплавленного металла в процессе обработки. При традиционной TIG-переплавке динамика сварочной ванны определяется главным образом распределением тепловложения дуги, капиллярными силами, обусловленными градиентами поверхностного натяжения (конвекцией Марангони), а также действием силы тяжести. Отсутствие внешнего воздействия на движение расплава приводит к асимметричному переносу жидкого металла, особенно при обработке горизонтально ориентированной поверхности кулачка, когда гравитационные силы способствуют

смещению расплава в нижнюю часть сварочной ванны.

Неконтролируемое перераспределение расплавленного металла вызывает изменение геометрии переплавленного слоя, проявляющееся в локальном накоплении металла и отклонении восстановленной поверхности от исходного профиля детали. Подобные геометрические неоднородности могут отрицательно сказываться на точности восстановления профиля кулачка и, как следствие, ухудшать условия контактного взаимодействия в процессе эксплуатации.

Иная картина наблюдается при использовании TIG-переплавки с высокочастотным электромагнитным воздействием (рис. 5). Применение ВЧЭМП обеспечивает более равномерное формирование поверхности, что может быть связано с изменением условий тепло- и массопереноса в жидкой сварочной ванне. По сравнению с традиционной обработкой образцы, модифицированные с использованием ВЧЭМП, характеризуются более гладким профилем поверхности, уменьшением деформации по краям переплавленного слоя и лучшим соответствием восстановленной поверхности исходной геометрии кулачка.

Повышение однородности поверхности можно объяснить взаимодействием индуцированных в расплаве электрических токов с внешним переменным магнитным полем. Такое взаимодействие приводит к возникновению электромагнитных (лоренцевых) сил, действующих на электропроводящий расплав и изменяющих характер течения жидкой фазы. В результате создаются более сбалансированные условия тепло- и массопереноса, способствующие повышению устойчивости сварочной ванны и более контролируемому процессу затвердевания.

Следует отметить, что положительное влияние ВЧЭМП усиливалось с увеличением мощности индуктора. При более высоком уровне электромагнитного воздействия наблюдалось дальнейшее повышение равномерности поверхности, что свидетельствует об усилении электромагнитного перемешивания расплава и более эффективном регулировании процессов переноса в сварочной ванне. Полученные результаты подтверждают, что использование ВЧЭМП может рассматриваться как дополнительный технологический инструмент управления ги-

дродинамикой расплава и формирования более однородного поверхностного слоя при TIG-модификации компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400.

Эволюция микроструктуры

Эволюция микроструктуры компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400 после TIG-переплавки, поверхностного легирования и наплавки была исследована с целью выяснения роли ВЧЭМП в процессах фазообразования, перераспределения легирующих элементов и структурной гомогенизации модифицированных поверхностных слоев. Анализ проводился с использованием оптической и сканирующей электронной микроскопии на поперечных шлифах, изготовленных из обработанных участков.

На рис. 6 представлена исходная микроструктура компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400 в состоянии поставки. Основной металл характеризуется феррито-перлитной матрицей с равномерно распределенными включениями вермикулярного графита, что является типичной структурой для данного класса чугунов, широко применяемых при изготовлении высоконагруженных деталей автомобильной техники.

Морфология и распределение графитовой фазы оказывают определяющее влияние на последующие структурные превращения, происходящие при TIG-обработке. В процессе интенсивного локального нагрева часть графитовых

включений растворяется в жидкой металлической ванне, что приводит к увеличению локальной концентрации углерода в расплаве. Последующее быстрое охлаждение в условиях неравновесной кристаллизации способствует формированию упрочняющих структурных составляющих, включая ледебуритные эвтектические образования и другие высокотвердые фазы, определяющие эксплуатационные свойства модифицированного поверхностного слоя.

На рис. 7 приведено сравнение микроструктуры поверхностных слоев, сформированных при традиционной TIG-переплавке и TIG-переплавке с использованием ВЧЭМП компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400.

После традиционной TIG-переплавки исходная феррито-перлитная структура трансформируется в упрочненный поверхностный слой, состоящий преимущественно из ледебуритных эвтектических структур с цементитсодержащими фазами, формирующимися в условиях интенсивного охлаждения. Образование данных упрочняющих структурных составляющих обусловлено растворением графитовых включений, повышением концентрации углерода в расплавленной зоне и последующей неравновесной кристаллизацией.

Поверхностный слой, сформированный при традиционной TIG-переплавке, характеризуется неоднородной морфологией, обусловленной неравномерным теплообменом и ограничен-

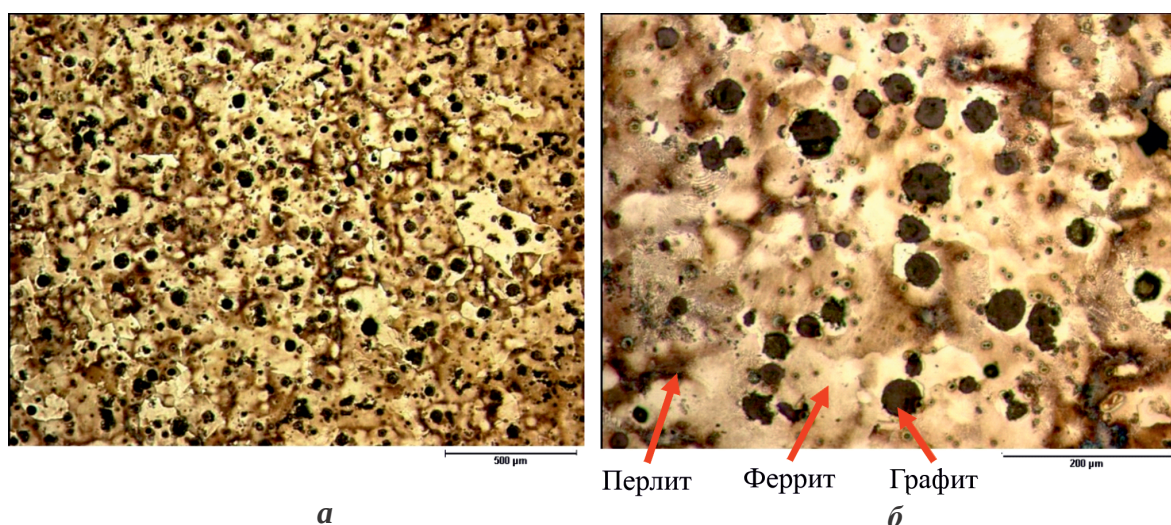


Рис. 6. Исходная микроструктура компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400 в состоянии поставки: травление 2%-м раствором нитала; увеличение $\times 100$ (а) и $\times 200$ (б); масштабные линейки – 500 и 200 мкм

Fig. 6. Initial microstructure of the as-received EN-GJV-400 CGI substrate. Etched with 2% nital; magnification $\times 100$ (a) and $\times 200$ (b); scale bars: 500 μm and 200 μm

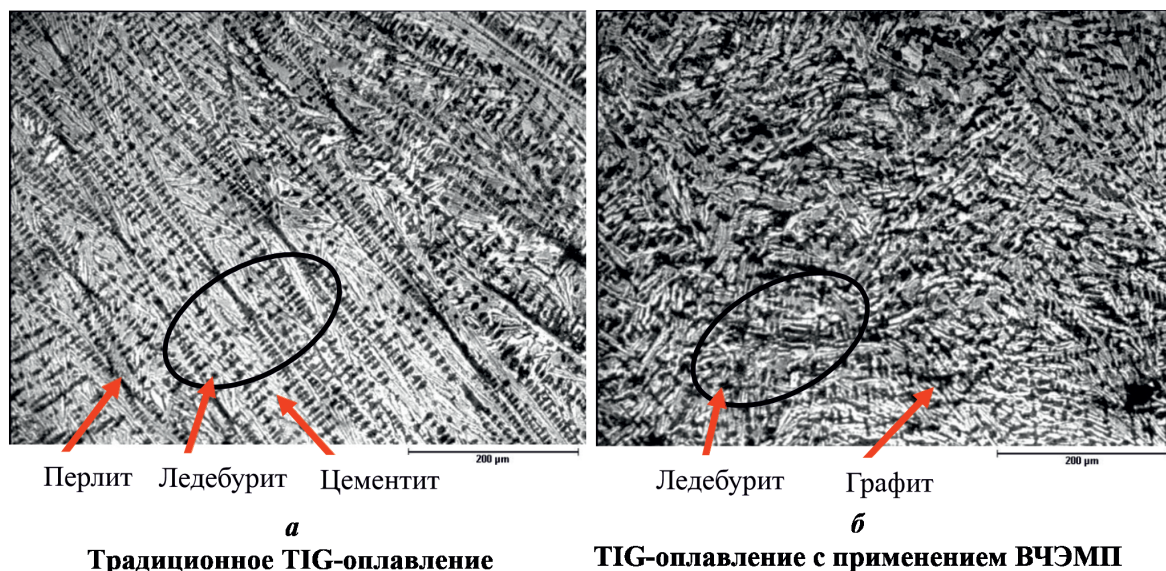


Рис. 7. Микроструктура поверхностных слоев EN-GJV-400 после традиционной TIG-переплавки (а) и TIG-переплавки с применением ВЧЭМП (б): травление 3%-м раствором нитала; увеличение $\times 200$; масштабная линейка – 200 мкм

Fig. 7. Microstructural comparison of EN-GJV-400 surface layers after conventional TIG remelting (a) and HFEMF-assisted TIG remelting (b). Etched with 3% nital; magnification $\times 200$; scale bar: 200 μm

ной циркуляцией расплава в сварочной ванне. Локальные различия в распределении углерода и скорости затвердевания приводят к пространственной неоднородности морфологии и распределения ледебуритных эвтектических составляющих.

При TIG-переплавке с применением ВЧЭМП общий механизм формирования структуры сохраняется. Вместе с тем морфология и пространственное распределение структурных составляющих становятся более однородными. Это связано с тем, что воздействие ВЧЭМП вызывает возникновение в электропроводящем расплаве конвективных потоков, обусловленных действием сил Лоренца, что способствует интенсификации процессов тепло- и массопереноса в сварочной ванне.

Таким образом, применение ВЧЭМП не приводит к принципиальному изменению механизма фазообразования при TIG-переплавке чугуна EN-GJV-400. Основной эффект электромагнитного воздействия заключается в повышении структурной однородности ледебуритной эвтектики и более равномерном распределении обогащенных углеродом областей в пределах модифицированного поверхностного слоя.

На рис. 8 представлены микроструктуры наплавленных слоев, сформированных с использо-

ванием присадочной проволоки UTP A DUR 600, полученные при традиционной TIG-наплавке и TIG-наплавке с применением ВЧЭМП.

Наплавленный слой UTP A DUR 600 характеризуется наличием хромосодержащих упрочняющих фаз, сформированных в процессе быстрого затвердевания. Благодаря повышенному содержанию хрома в присадочной проволоке в расплавленной ванне протекают карбидообразующие реакции, приводящие к формированию обогащенных хромом карбидных составляющих, распределенных в железной матрице.

Слой, полученный при традиционной TIG-наплавке, характеризуется относительно неоднородным распределением карбидсодержащих областей, что связано с недостаточной степенью перемешивания хрома и углерода в процессе кристаллизации. В отличие от этого, применение ВЧЭМП способствует интенсификации конвективного движения расплава, что приводит к улучшению перераспределения хромосодержащих структурных составляющих и формированию более равномерной морфологии карбидных фаз.

Таким образом, повышение твердости, наблюдаемое после TIG-наплавки UTP A DUR 600 с применением ВЧЭМП, связано не с образованием принципиально нового фазового состава,

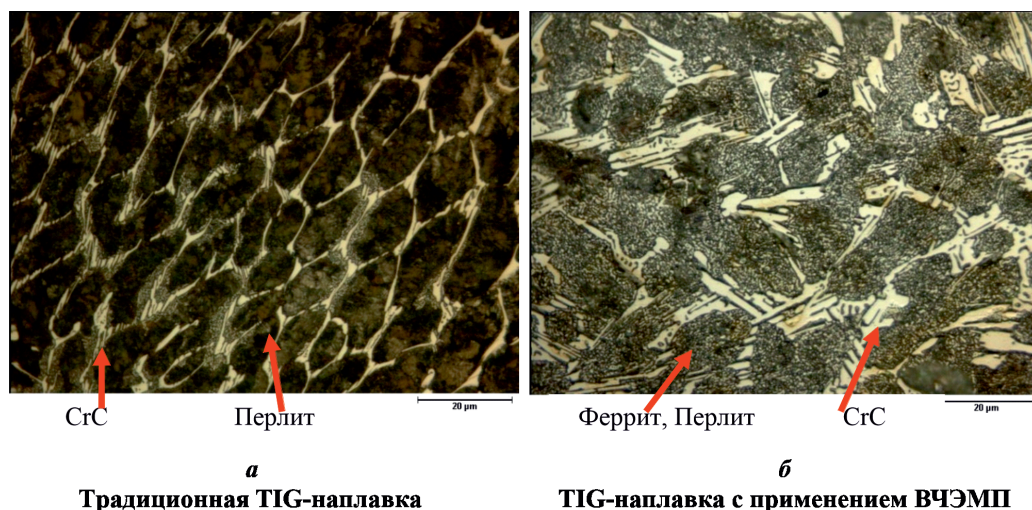


Рис. 8. Микроструктура наплавленных слоев, сформированных с использованием присадочной проволоки UTP A DUR 600, после традиционной ТИГ-наплавки (а) и ТИГ-наплавки с применением ВЧЭМП (б): травление 3%-м раствором пикрала; увеличение $\times 1000$; масштабная линейка – 20 мкм

Fig. 8. Microstructure of UTP A DUR 600 hardfaced layers obtained after conventional TIG cladding (a) and HFEMF-assisted TIG cladding (б). Etched with 3% picral; magnification $\times 1,000$; scale bar: 20 μm

а преимущественно с более благоприятным распределением и формированием хромосодержащих карбидных фаз в процессе затвердевания.

На рис. 9 представлены микроструктуры поверхностных слоев чугуна EN-GJV-400, легированных сплавом Ni78Si8B14, которые получены соответственно без применения и с применением ВЧЭМП.

Введение Ni, Si и B изменяет химический состав расплавленной зоны и повышает ее прокаливаемость. При быстром охлаждении легированный слой может содержать продукты мартенситного превращения наряду с ледебуритными эвтектическими составляющими и карбидсодержащими структурными областями.

Легированный слой, полученный при традиционной ТИГ-обработке, характеризуется локальными различиями в морфологии фаз, обусловленными неоднородным распределением легирующих элементов. Применение ВЧЭМП способствует интенсификации перемешивания жидкой фазы и обеспечивает более равномерное распределение областей, обогащенных никелем, кремнием и бором.

Таким образом, роль ВЧЭМП при легировании никелем заключается преимущественно в повышении химической однородности расплавленной зоны и стабилизации формирующейся

микроструктуры, а не в непосредственном образовании дополнительных упрочняющих фаз.

На рис. 10 представлены микроструктуры поверхностных слоев, полученных после легирования сплавом CuSn-4 без применения и с применением ВЧЭМП.

Введение меди оказывает влияние на процессы затвердевания модифицированного слоя и способствует изменению его функциональных поверхностных свойств. В отличие от хромосодержащих наплавочных материалов, легирование медью не направлено преимущественно на повышение твердости. Основная цель введения Cu связана с изменением трибологических характеристик поверхности, включая возможность формирования медьсодержащих переносных пленок при контактом скольжении и сохранение положительного влияния графитовой фазы, выполняющей функцию твердой смазки.

Слой, полученный при традиционном ТИГ-легировании, характеризуется локальными различиями в распределении медьсодержащих областей вследствие ограниченной степени гомогенизации расплава. Применение ВЧЭМП способствует более эффективному перераспределению меди в расплавленной зоне, что приводит к формированию более однородной микроструктуры.

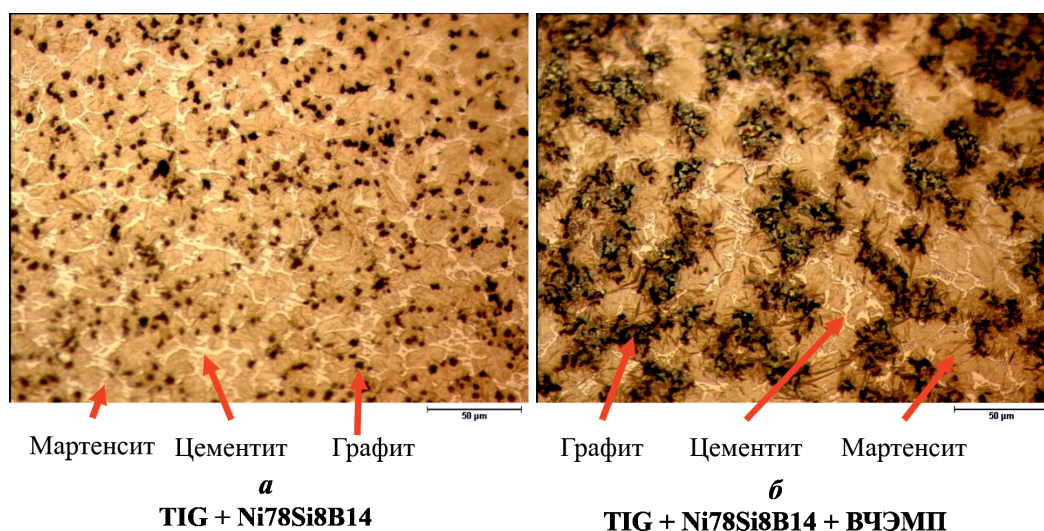


Рис. 9. Микроструктура поверхностных слоев чугуна EN-GJV-400, легированных сплавом Ni78Si8B14, которые получены после традиционной TIG-обработки (а) и TIG-обработки с применением ВЧЭМП (б): травление 4%-м раствором нитала; увеличение $\times 500$; масштабная линейка – 50 мкм

Fig. 9. Microstructure of Ni78Si8B14-alloyed EN-GJV-400 surface layers obtained after conventional TIG treatment (a) and HFEMF-assisted TIG treatment (б). Etched with 4% nital; magnification $\times 500$; scale bar: 50 μm

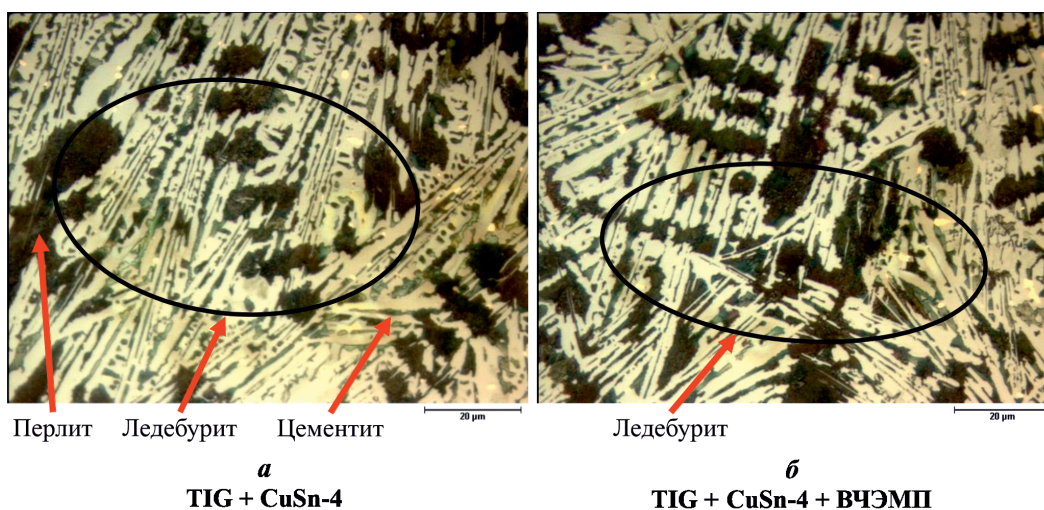


Рис. 10. Микроструктура поверхностных слоев чугуна EN-GJV-400, легированных сплавом CuSn-4, которые получены после традиционной TIG-обработки (а) и TIG-обработки с применением ВЧЭМП (б): травление 3%-м раствором нитала; увеличение $\times 1000$; масштабная линейка – 20 мкм

Fig. 10. Microstructure of CuSn-4-alloyed EN-GJV-400 surface layers obtained after conventional TIG treatment (a) and HFEMF-assisted TIG treatment (б). Etched with 3% nital; magnification $\times 1000$; scale bar: 20 μm

В целом полученные результаты показывают, что ВЧЭМП преимущественно выполняет функцию механизма управления поведением расплавленной ванны. Электромагнитное перемешивание изменяет условия тепло- и массопереноса, снижает локальную неоднородность

химического состава и повышает структурную однородность модифицированного слоя. При этом характер сформировавшейся микроструктуры в значительной степени определяется химическим составом поверхностного слоя: при ремелтировании и легировании доминирующим

эффектом является повышение гомогенности структуры, тогда как при хромсодержащей наплавке определяющим фактором становится перераспределение карбидных фаз.

Химический состав и перераспределение элементов (EDS-анализ)

Энергодисперсионный рентгеновский анализ (EDS) был выполнен для оценки внедрения и перераспределения легирующих элементов в поверхностных слоях, сформированных при TIG-модификации, а также для определения влияния ВЧЭМП на химическую однородность расплавленной зоны в процессе плавления и последующего затвердевания.

Полученные концентрации элементов анализировали в сравнении с исходным химическим составом подложки EN-GJV-400, представленным в табл. 1. Основными элементами исходного материала являются Fe, C, Si, Mn, Cu и Ni, при этом содержание хрома находится на низком уровне. После проведения поверхностной

обработки наблюдались дополнительные изменения концентраций Ni, Cu и Cr, зависящие от выбранного технологического режима модификации.

Результаты EDS подтвердили наличие характерных элементов матрицы EN-GJV-400 и продемонстрировали успешное введение легирующих компонентов, поступающих в поверхностный слой в процессе обработки. Измеренные распределения элементов в различных областях модифицированных слоев представлены в табл. 8. Сравнение данных для приповерхностной зоны, центральной части слоя и зоны сплавления показывает, что применение ВЧЭМП оказывает влияние на пространственное распределение легирующих элементов за счет изменения условий конвективного перемешивания расплава в процессе плавления и кристаллизации.

При традиционном TIG-ремелтинге EN-GJV-400 введение внешних легирующих элементов не осуществлялось. Поэтому наблюдаемые структурные изменения связаны преимущественно

Таблица 8

Table 8

Представительное распределение элементов, определенное методом EDS, в выбранных поверхностных слоях EN-GJV-400 после TIG-модификации

Representative EDS-measured elemental distribution in selected TIG-modified EN-GJV-400 surface layers

Материал / Material	Положение в слое / Position in layer	Sn (%)	Al (%)	Si (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cu (%)	Cr (%)	Fe (%)
EN-GJV-400 (основной материал) / EN-GJV-400 (base material)	—	—	0,09 / 0.09	2,41 / 2.41	0,49 / 0.49	0,26 / 0.26	0,67 / 0.67	0,09 / 0.09	Основа / Balance
Легирующее на основе Cu (CuSn-4) / Cu-based alloying (CuSn-4)	Зона сплавления / Fusion zone	0,06 / 0.06	0,07 / 0.07	2,15 / 2.15	0,45 / 0.45	0,29 / 0.29	7,15 / 7.15	0,05 / 0.05	Основа / Balance
	Центральная часть модифицированного слоя / Central part of modified layer	0,05 / 0.05	0,04 / 0.04	2,17 / 2.17	0,43 / 0.43	0,41 / 0.41	8,57 / 8.57	0,06 / 0.06	Основа / Balance
	Поверхность / Surface	0,08 / 0.08	0,09 / 0.09	2,41 / 2.41	0,49 / 0.49	0,32 / 0.32	9,10 / 9.10	0,07 / 0.07	Основа / Balance
Легирующее на основе Ni (Ni78Si8B14) / Ni-based alloying (Ni78Si8B14)	Зона сплавления / Fusion zone	—	0,07 / 0.07	2,56 / 2.56	0,40 / 0.40	8,23 / 8.23	0,61 / 0.61	0,07 / 0.07	Основа / Balance
	Центральная часть модифицированного слоя / Central part of modified layer	—	0,08 / 0.08	2,43 / 2.43	0,44 / 0.44	9,11 / 9.11	0,72 / 0.72	0,06 / 0.06	Основа / Balance
	Поверхность / Surface	—	0,10 / 0.10	2,34 / 2.34	0,49 / 0.49	9,32 / 9.32	0,68 / 0.68	0,09 / 0.09	Основа / Balance

с растворением графитовых включений, перераспределением углерода и быстрым неравномерным затвердеванием. Согласно данным EDS, применение ВЧЭМП не приводит к существенному изменению общего химического состава модифицированной зоны; однако электромагнитное перемешивание способствует более равномерному распределению растворенных элементов внутри слоя после переплава. Такое поведение согласуется с наблюдаемой гомогенизацией ледебуритной структуры, формирующейся при быстром охлаждении.

В слоях, легированных сплавом Ni78Si8B14, результаты EDS показали значительное увеличение содержания никеля по сравнению с исходным составом EN-GJV-400 (табл. 1). Распределение никеля в пределах модифицированного слоя характеризуется относительно высокой равномерностью, что свидетельствует об улучшенном переносе легирующих элементов при воздействии ВЧЭМП. Анализ EDS также подтвердил достаточно однородное перераспределение Ni и Si по объему легированного слоя.

Следует отметить, что бор не может быть достоверно количественно определен методом стандартного EDS-анализа вследствие его малого атомного номера и низкой интенсивности характеристического рентгеновского излучения. Поэтому наличие и влияние бора оценивались на основании номинального состава сплава Ni78Si8B14, а также с учетом выявленных микроструктурных особенностей и изменения твердости. Наблюдаемые мартенситоподобные структурные составляющие и карбидсодержащие области соответствуют повышенной прокаливаемости, ожидаемой для системы Ni-Si-B. Однако конкретный вклад бора в формирование фаз не может быть непосредственно подтвержден проведенным EDS-анализом.

При легировании фольгой CuSn-4 результаты EDS подтвердили эффективное введение и перераспределение меди в модифицированном поверхностном слое. В отличие от хром- и никельсодержащих систем, целью введения меди являлось не максимальное повышение твердости, а изменение функциональных характеристик поверхности при сохранении положительного влияния графитсодержащих областей. Сохранение участков с графитом

потенциально может быть благоприятным для последующих трибологических характеристик, поскольку графит известен как твердая смазка в чугунах. Однако в рамках настоящего исследования трибологические испытания не проводились, поэтому возможное улучшение характеристик трения и износа следует рассматривать только как предположение, основанное на наблюдаемой микроструктуре, а не как экспериментально подтвержденный результат. Применение ВЧЭМП способствовало более равномерному распределению медьсодержащих областей вследствие повышения интенсивности перемешивания расплава.

EDS-анализ наплавленных слоев UTP A DUR 600 выявил значительное увеличение содержания хрома по сравнению с исходной подложкой EN-GJV-400 (табл. 1). Хром является основным карбидообразующим элементом, обеспечивающим формирование износостойких упрочняющих фаз в данном наплавленном слое. При традиционной TIG-наплавке возможно возникновение неоднородности распределения хрома вследствие ограниченной циркуляции расплава и локальных различий в условиях затвердевания. Применение ВЧЭМП улучшило перераспределение хрома в расплавленной зоне, обеспечив более равномерное распределение областей, обогащенных данным элементом.

Более равномерное распределение хрома при электромагнитном перемешивании создает благоприятные условия для формирования и пространственного распределения хромсодержащих карбидных фаз, выявленных при микроструктурном анализе. Именно этот эффект объясняет увеличение средней твердости с 771 HV0.1 для традиционной наплавки UTP A DUR 600 до 800 HV0.1 при применении ВЧЭМП.

В целом результаты EDS показывают, что ВЧЭМП не изменяет химический состав материала за счет введения новых элементов. Его основная роль заключается в управлении условиями переноса вещества внутри расплавленной ванны, повышении эффективности перераспределения легирующих элементов, снижении локальной химической неоднородности и обеспечении более равномерного формирования упрочняющих фаз в системах, содержащих карбидообразующие элементы.

Распределение микротвердости и структурная гомогенизация

Измерения микротвердости были выполнены для оценки механической характеристики модифицированных поверхностных слоев и определения влияния применения ВЧЭМП на изменение твердости и структурную однородность сформированных зон. Измерения проводились с использованием микротвердомера Виккерса РМТ-3 при нагрузке 0,98 Н (HV0.1) и времени выдержки 15 с. Для каждого технологического режима выполнялось десять измерений в различных областях модифицированного слоя, включая приповерхностную область, центральную часть зоны переплава или наплавленного слоя, а также переходную область между модифицированным слоем и основной структурой EN-GJV-400. Представленные значения соответствуют среднему значению микротвердости, при этом стандартное отклонение рассчитывалось на основе результатов всех отдельных измерений для каждого режима обработки.

Средние значения микротвердости исследованных вариантов поверхностной модификации, включая соответствующие значения стандартного отклонения, представлены на рис. 11. Изменение микротвердости по глубине поперечного сечения характерных модифицированных слоев приведено на рис. 12, что позволяет оценить пространственное распределение твердости и

влияние ВЧЭМП на структурную однородность поверхностных зон.

Исходная структура EN-GJV-400 характеризовалась средней твердостью около 375 HV0.1, что соответствует феррито-перлитной матрице с вермикулярными включениями графита. После проведения TIG-модификации все исследованные варианты обработки показали существенное повышение твердости вследствие локального плавления, частичного растворения графитовой фазы, перераспределения углерода и последующего неравновесного затвердевания модифицированной области.

Как показано на рис. 11, традиционный TIG-ремелтинг увеличил среднюю твердость поверхности EN-GJV-400 примерно с 375 HV0.1 до 765 HV0.1. Данное повышение связано главным образом с превращением исходной феррито-перлитной структуры в упрочненный слой переплава, содержащий ледебуритные эвтектические составляющие с цементитсодержащими фазами. При быстром охлаждении углерод, высвобождающийся в результате частичного растворения графитовых включений, повышает содержание углерода в расплавленной зоне, что способствует формированию твердых карбидсодержащих структур, обеспечивающих увеличение микротвердости.

Применение ВЧЭМП при TIG-ремелтинге привело к сопоставимому уровню твердо-

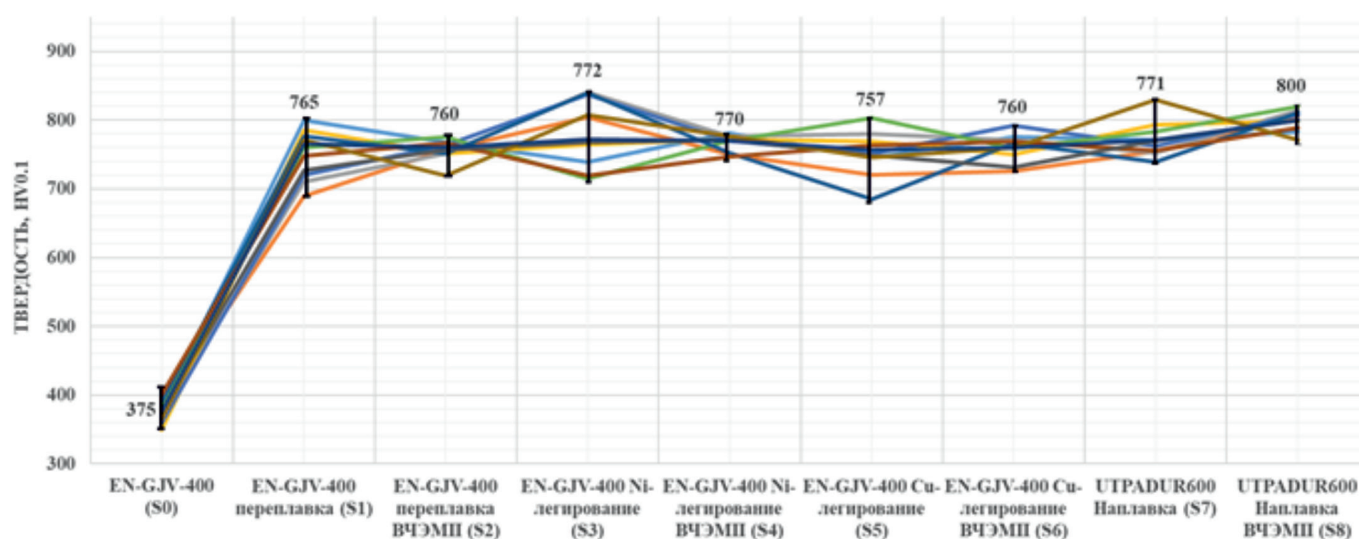


Рис. 11. Средние значения микротвердости по Виккерсу с указанием стандартного отклонения для поверхностных слоев EN-GJV-400 после традиционной и ВЧЭМП-ассистированной TIG-модификации

Fig. 11. Average Vickers microhardness values with standard deviation error bars for EN-GJV-400 surface layers after conventional and HFEMF-assisted TIG surface modification treatments

сти – около 760 HV0.1. Отсутствие существенной разницы между традиционным и ВЧЭМП-ассистированным переплавом свидетельствует о том, что электромагнитное воздействие не является самостоятельным механизмом упрочнения. Основной вклад ВЧЭМП связан с изменением условий переноса вещества в расплавленной ванне, улучшением процессов тепло- и массопереноса и обеспечением более равномерного распределения продуктов затвердевания.

Распределение микротвердости по сечению, представленное на рис. 12, дополнительно подтверждает данный вывод. Несмотря на то что оба варианта переплава формируют упрочненную поверхностную область, слой, полученный с применением ВЧЭМП, характеризуется более равномерным профилем твердости по всей толщине модифицированной зоны. Снижение локальных колебаний твердости связано с улучшением гомогенизации расплава и более равномерным распределением углеродсодержащих эвтектических составляющих при затвердевании. Таким образом, при TIG-ремелтинге основное влияние ВЧЭМП заключается не в повышении абсолютного значения твердости, а в стабилизации структуры.

Слой, легированный сплавом Ni78Si8B14, характеризовался средней твердостью около 772 HV0.1, тогда как при применении ВЧЭМП данное значение составило около 770 HV0.1 (рис. 11). Полученный уровень твердости обусловлен совместным влиянием никеля, кремния

и бора, которые изменяют химический состав расплавленной зоны и повышают ее прокаливаемость, способствуя формированию мартенситоподобных продуктов превращения совместно с ледебуритными эвтектическими и карбидсодержащими составляющими при быстром охлаждении. Незначительное различие между традиционным и ВЧЭМП-ассистированным режимами подтверждает, что электромагнитное перемешивание в данном случае влияет преимущественно на пространственное распределение и равномерность формирования фаз, а не на сам механизм их образования.

Профили распределения твердости по сечению Ni78Si8B14-легированных слоев (рис. 12) показывают, что применение ВЧЭМП снижает локальные колебания микротвердости внутри модифицированной зоны. Это согласуется с результатами SEM/EDS-анализа, свидетельствующими об улучшенном перераспределении легирующих элементов и более однородном формировании упрочняющих структурных составляющих.

Слой, легированный CuSn-4, показал значения микротвердости около 757 HV0.1 без ВЧЭМП и 760 HV0.1 при электромагнитном воздействии. В отличие от никель- и хромсодержащих систем, введение меди не оказывает существенного влияния на повышение твердости, поскольку основная цель медного легирования связана не с формированием твердых фаз, а с изменением функциональных характеристик

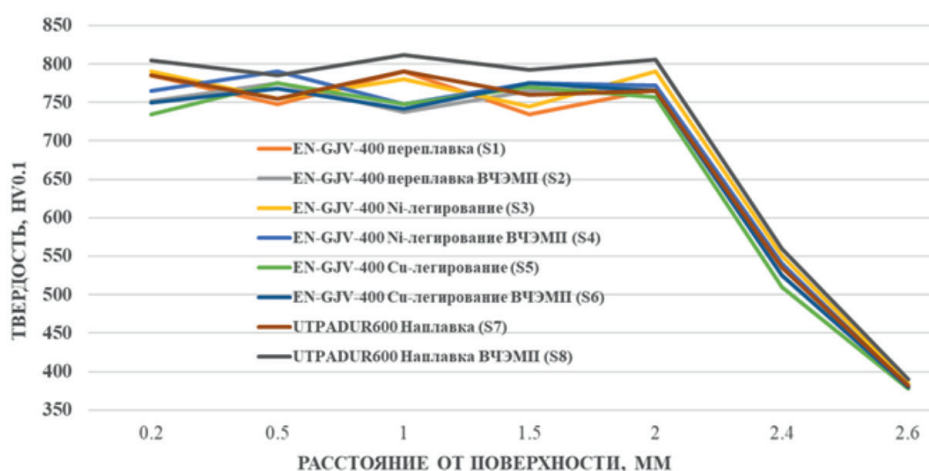


Рис. 12. Изменение микротвердости по поперечному сечению поверхность-модифицированного компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400

Fig. 12. Microhardness variation across the cross-section of surface-modified EN-GJV-400 compacted graphite iron

поверхности. Наличие медьсодержащих областей совместно с сохраненными графитсодержащими участками может создавать благоприятные условия для улучшения трибологических свойств; однако данное предположение требует подтверждения специальными испытаниями на трение и износ.

Слои, полученные наплавкой UTP A DUR 600, продемонстрировали иной характер влияния ВЧЭМП. Согласно рис. 11, при традиционной TIG-наплавке средняя твердость составляла около 771 HV0.1, тогда как при применении ВЧЭМП она увеличилась до 800 HV0.1. Данное повышение связано с улучшенным перераспределением и более равномерным формированием хромсодержащих упрочняющих фаз в процессе затвердевания. Несмотря на содержание около 9,5 масс. % Cr в присадочной проволоке, электромагнитное перемешивание расплава способствует более равномерному переносу хрома внутри ванны расплава, создавая более благоприятные условия для образования карбидсодержащих структур.

Профили микротвердости, представленные на рис. 12, подтверждают, что слой UTP A DUR 600, сформированный при воздействии ВЧЭМП, характеризуется более стабильным распределением твердости по сравнению с традиционной наплавкой. Снижение разброса значений по толщине наплавленного слоя указывает на более равномерное распределение хромсодержащих упрочняющих фаз, что соответствует результатам SEM/EDS-исследований.

Сравнение всех исследованных вариантов обработки показывает, что влияние ВЧЭМП на твердость существенно зависит от химического состава модифицированного слоя и преобладающего механизма упрочнения. При прямом TIG-ремелтинге и легировании Ni/Cu электромагнитное воздействие преимущественно обеспечивает структурную гомогенизацию и снижение локальных неоднородностей твердости без значительного изменения среднего значения. В случае хромсодержащей наплавки UTP A DUR 600 ВЧЭМП одновременно способствует структурной стабилизации и повышению твердости за счет более равномерного распределения карбидной фазы.

Таким образом, основная роль ВЧЭМП заключается не в универсальном повышении твер-

дости, а в управляемом изменении динамики расплавленной ванны, перераспределении элементов и обеспечении однородности фазового состава. Совместный анализ средних значений микротвердости (рис. 11) и профилей ее распределения по сечению (рис. 12) подтверждает, что ВЧЭМП является дополнительным технологическим параметром управления, позволяющим стабилизировать взаимосвязь «структура – свойства» поверхностных слоев EN-GJV-400, полученных методом TIG-модификации.

Роль ВЧЭМП в формировании структуры при TIG-модификации поверхности и практическое значение результатов

При традиционной TIG-модификации поверхности компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400 формирование модифицированного поверхностного слоя определяется совместным воздействием теплового ввода дуги, кинетики плавления и затвердевания, конвекции, обусловленной градиентами поверхностного натяжения (эффект Марангони), подъемных сил и гравитационных эффектов. Эти процессы определяют геометрию расплавленной зоны, характер температурных градиентов, перераспределение растворенных элементов и морфологию продуктов кристаллизации. Однако при традиционной TIG-обработке перенос вещества в жидкой фазе регулируется преимущественно естественными конвекционными механизмами, что может приводить к локальным различиям химического состава и неоднородному распределению структурных составляющих, особенно при обработке деталей со сложной геометрией, таких как поверхности распределительных валов.

Применение ВЧЭМП вводит дополнительное физическое взаимодействие между внешним магнитным полем и электропроводной расплавленной областью. Согласно принципам магнитогидродинамики, электрические токи, индуцированные в жидком металле, взаимодействуют с приложенным магнитным полем, формируя электромагнитные силы, которые способны изменять процессы переноса в жидкой фазе. Данное взаимодействие может влиять на перемешивание расплава, перераспределение растворенных элементов и условия последующего затвердевания.

Следует отметить, что в рамках настоящего исследования не проводились прямые измерения поля скоростей расплавленной ванны, локального распределения электромагнитных сил или динамических характеристик течения металла. Поэтому влияние ВЧЭМП оценивалось косвенным методом на основе экспериментально полученных данных о морфологии поверхности, особенностях микроструктуры, распределении химических элементов и изменении микротвердости.

Полученные результаты показывают, что применение ВЧЭМП не изменяет принципиально механизмы фазообразования, протекающие при TIG-обработке EN-GJV-400. Основное влияние электромагнитного воздействия связано не с формированием новых фаз, а с изменением условий, при которых происходят плавление, перемешивание расплава и затвердевание. Эффективность применения ВЧЭМП определяется химическим составом модифицированного слоя и преобладающим механизмом его упрочнения.

При традиционном TIG-ремелтинге EN-GJV-400 исходная феррито-перлитная структура с вермикулярным графитом преобразуется в упрочненный поверхностный слой, содержащий преимущественно ледебуритные эвтектические составляющие с цементитсодержащими фазами. Данное превращение связано с частичным растворением графита, перераспределением углерода в расплавленной зоне и последующим быстрым неравновесным затвердеванием. Средняя твердость увеличилась примерно с 375 HV0.1 для исходного материала до 765 HV0.1 после традиционного TIG-ремелтинга.

Применение ВЧЭМП при переплаве обеспечило сопоставимое значение твердости – около 760 HV0.1. Отсутствие существенной разницы между двумя режимами подтверждает, что электромагнитное воздействие не является самостоятельным механизмом повышения твердости. Вместе с тем выявленные микроструктурные различия свидетельствуют о том, что основная роль ВЧЭМП заключается в повышении равномерности распределения продуктов затвердевания внутри модифицированного слоя.

Аналогичная тенденция наблюдалась при поверхностном легировании сплавом Ni78Si8B14. Введение Ni, Si и B изменяет химический состав расплавленной зоны и повышает ее прокаливаемость, способствуя формированию

упрочненных продуктов превращения совместно с ледебуритными и карбидсодержащими составляющими при быстром охлаждении. Близкие значения твердости для традиционного и ВЧЭМП-ассистированного легирования (около 772 и 770 HV0.1 соответственно) показывают, что электромагнитное воздействие не изменяет основной механизм упрочнения.

В данном случае основное влияние ВЧЭМП связано с улучшением перераспределения и гомогенизации легирующих элементов внутри расплавленной зоны. Поскольку бор не может быть достоверно определен методом стандартного EDS-анализа вследствие низкого атомного номера, его влияние на формирование фаз рассматривается качественно на основе номинального состава Ni78Si8B14, результатов микроструктурного анализа и данных по микротвердости.

При легировании CuSn-4 влияние ВЧЭМП проявилось преимущественно в характере распределения медьсодержащих областей внутри модифицированного слоя. В отличие от хромсодержащих наплавочных систем, введение меди не было направлено на максимальное повышение твердости, а предназначалось для изменения функциональных характеристик поверхности. Полученные результаты показывают, что применение ВЧЭМП способствует более равномерному распределению меди в легированной зоне.

Однако предполагаемое влияние Cu-содержащих областей и сохраненных графитовых включений на трибологические характеристики поверхности остается гипотезой и требует подтверждения специальными исследованиями трения и износа.

Иной характер влияния ВЧЭМП наблюдался при наплавке UTP A DUR 600. В данном случае химический состав наплавленного слоя оказывает определяющее влияние на формирование твердости благодаря наличию хрома как активного карбидообразующего элемента. Средняя твердость слоя, сформированного традиционной TIG-наплавкой, составляла около 771 HV0.1, тогда как при использовании ВЧЭМП она увеличилась до 800 HV0.1.

Данное повышение связано с более равномерным распределением хромсодержащих твердых фаз внутри наплавленного слоя. Полученные результаты показывают, что ВЧЭМП не создает новый механизм упрочнения, а изме-

няет условия перераспределения легирующих элементов и затвердевания, обеспечивая более равномерное формирование карбидсодержащих составляющих.

Сравнение всех исследованных вариантов поверхностной модификации показывает, что эффективность ВЧЭМП определяется взаимодействием электромагнитного воздействия с химическими особенностями формируемого слоя. В случаях, когда механизм упрочнения в основном определяется быстрым затвердеванием материала подложки, как при TIG-ремелтинге, ВЧЭМП преимущественно обеспечивает структурную гомогенизацию. При введении элементов с высокой фазообразующей способностью электромагнитное воздействие влияет на их пространственное перераспределение и равномерность формирования упрочняющих фаз.

Основные различия между исследованными технологическими режимами представлены в табл. 9.

Сравнение, приведенное в табл. 9, подтверждает, что ВЧЭМП-ассистированную TIG-модификацию следует рассматривать прежде всего как метод управления технологическим процессом, а не как прямой способ повышения твердости. Основной эффект электромагнитного воздействия связан с изменением условий переноса вещества при плавлении и затвердевании, что способствует повышению однородности распределения элементов и морфологии фаз. Влияние на механические свойства определяется преобладающим механизмом упрочнения конкретного поверхностного слоя.

С точки зрения технологии поверхностного упрочнения основным преимуществом TIG-обработки с ВЧЭМП является возможность управления формированием поверхностного слоя без изменения объемного химического состава детали. Повышенная структурная однородность, наблюдаемая после электромагнитного воздействия, может способствовать получению более стабильных и воспроизводимых свойств поверхности.

Для автомобильных и тяжело нагруженных деталей из компактного графитизированного чугуна, включая поверхности распределительных валов, применение ВЧЭМП-ассистированной TIG-модификации предоставляет дополнительный технологический параметр управления про-

цессом формирования функциональных поверхностных слоев.

Вместе с тем для количественного установления взаимосвязи между параметрами электромагнитного поля, характеристиками течения расплавленной ванны и конечными эксплуатационными свойствами необходимы дальнейшие исследования, включающие прямое наблюдение поведения расплава, численное моделирование магнитогидродинамических процессов и систематические трибологические испытания.

Выводы

На основании проведенных экспериментальных исследований традиционной и TIG-модификации поверхности чугуна с компактным графитом EN-GJV-400 с применением ВЧЭМП можно сделать следующие выводы.

1. Применение ВЧЭМП с частотой 200 кГц в процессе TIG-модификации поверхности обеспечивает дополнительный параметр управления процессом, позволяющий влиять на формирование поверхностного слоя и развитие его структуры в чугуне EN-GJV-400 с компактным графитом. Влияние ВЧЭМП было установлено по изменениям морфологии поверхности, степени однородности микроструктуры, распределения химических элементов и характеристик твердости. Поскольку прямые измерения скорости движения расплава в сварочной ванне и действующих электромагнитных сил не проводились, то воздействие ВЧЭМП оценивалось косвенно на основе характеристик сформированных после затвердевания поверхностных слоев.

2. TIG-переплав существенно изменяет исходную феррито-перлитную структуру чугуна EN-GJV-400, содержащую вермикулярный графит. Растворение графита, перераспределение углерода и быстрое неравновесное затвердевание приводят к формированию упрочненных ледебуритных структур с цементитсодержащими составляющими. Применение ВЧЭМП при TIG-переплаве не изменяет принципиальный механизм формирования фаз, однако способствует более равномерному распределению продуктов затвердевания в объеме модифицированного поверхностного слоя.

3. Влияние ВЧЭМП на легированные и наплавленные слои определяется химическим со-

Сравнение традиционной и ВЧЭМП-ассистированной TIG-модификации поверхности компактного графитизированного чугуна EN-GJV-400

Comparison of conventional and HFEMF-assisted TIG surface modification of EN-GJV-400 compacted graphite iron

Условия обработки / Treatment condition	Основные управляющие факторы / Key governing factors	Наблюдаемое влияние HFEMF / Observed effect of HFEMF	Полученный отклик материала / Obtained material response
Традиционный TIG-ремелтинг / Conventional TIG remelting	Термический цикл, растворение графита, перераспределение углерода и естественный перенос расплава / Thermal cycle, graphite dissolution, carbon redistribution, and natural melt transfer	Эталонное состояние без внешнего управления переносом в жидкой фазе / Reference state without external control of liquid-phase transfer	Формирование упрочненного ледебуритного слоя с цементитсодержащими фазами; твердость ≈ 765 HV0.1 / Formation of a hardened ledeburite layer with cementite-containing phases; hardness ≈ 765 HV0.1
TIG-ремелтинг + HFEMF / TIG remelting + HFEMF	Тепловое воздействие совместно с электромагнитным взаимодействием в электропроводной расплавленной зоне / Thermal effect combined with electromagnetic interaction in the electrically conductive molten zone	Повышение однородности структурных составляющих и снижение локальных различий при затвердевании / Improvement of structural constituent uniformity and reduction of local solidification differences	Сопоставимый уровень твердости (≈ 760 HV0.1), что указывает преимущественно на структурную гомогенизацию / Comparable hardness level (≈ 760 HV0.1), indicating primarily structural homogenization
Ni78Si8B14 + HFEMF / Ni78Si8B14 + HFEMF	Формирование фаз под действием легирования совместно с электромагнитным перераспределением элементов / Phase formation under alloying combined with electromagnetic redistribution of elements	Более равномерное распределение Ni-Si-содержащих областей и продуктов превращения / More uniform distribution of Ni-Si-containing regions and transformation products	Сопоставимая твердость (≈ 770 HV0.1); повышение структурной однородности / Comparable hardness (≈ 770 HV0.1); enhanced structural uniformity
CuSn-4 + HFEMF / CuSn-4 + HFEMF	Введение меди, особенности затвердевания и влияние графитсодержащих областей / Copper introduction, solidification characteristics, and influence of graphite-containing regions	Более равномерное распределение Cu-содержащих областей / More uniform distribution of Cu-containing regions	Сопоставимая твердость (≈ 760 HV0.1); возможное влияние на трибологию требует дополнительной проверки / Comparable hardness (≈ 760 HV0.1); possible influence on tribology requires further verification
UTP A DUR 600 + HFEMF / UTP A DUR 600 + HFEMF	Формирование хромсодержащих фаз и карбидное упрочнение / Formation of chromium-containing phases and carbide strengthening	Улучшение пространственного распределения хромсодержащих твердых фаз / Improved spatial distribution of chromium-containing hard phases	Повышение твердости ($\approx 771 \rightarrow 800$ HV0.1) вследствие более равномерного распределения упрочняющих фаз / Hardness increase ($\approx 771 \rightarrow 800$ HV0.1) due to more uniform distribution of strengthening phases



ставом модифицированной области и преобладающим механизмом упрочнения. Легирование сплавом Ni78Si8B14 способствует формированию упрочненных продуктов превращения совместно с ледебуритными и карбидсодержащими структурными составляющими, тогда как основное влияние ВЧЭМП заключается в улучшении пространственного распределения легирующих элементов. Легирование сплавом CuSn-4 приводит к формированию медьсодержащих областей, при этом возможное улучшение трибологических характеристик требует подтверждения специальными испытаниями на трение и износ. При использовании наплавочной проволоки UTP A DUR 600 применение ВЧЭМП способствует более равномерному распределению хромсодержащих твердых фаз.

4. Анализ SEM/EDS показал, что ВЧЭМП не приводит к введению дополнительных легирующих элементов в модифицированный поверхностный слой. Вместо этого электромагнитное воздействие влияет на перераспределение уже введенных элементов в процессе плавления и последующего затвердевания. Повышенная однородность распределения областей, содержащих Ni, Cu и Cr, свидетельствует о снижении локальной химической неоднородности и более стабильном формировании поверхностных структур.

5. Измерения микротвердости показали, что все исследованные методы TIG-модификации поверхности существенно повышают твердость чугуна EN-GJV-400 с компактным графитом. Исходная подложка имела среднее значение твердости около 375 HV0.1, тогда как сформированные модифицированные слои характеризовались значениями в диапазоне 757...800 HV0.1. Традиционный TIG-переплав обеспечил твердость около 765 HV0.1, тогда как при переплаве с применением ВЧЭМП было получено сопоставимое значение около 760 HV0.1, что подтверждает преимущественное влияние электромагнитного воздействия на однородность структуры, а не на непосредственное повышение твердости. Максимальное значение твердости около 800 HV0.1 было достигнуто при TIG-наплавке UTP A DUR 600 с применением ВЧЭМП благодаря улучшенному перераспределению и более равномерному формированию хромсодержащих карбидных твердых фаз.

6. Установленная взаимосвязь «процесс – структура – свойства» подтверждает, что TIG-обработка с применением ВЧЭМП может использоваться как дополнительный метод поверхностной инженерии для управления однородностью микроструктуры и распределением фаз в чугуне EN-GJV-400 с компактным графитом. Положительный эффект ВЧЭМП наиболее выражен в легированных системах, где электромагнитно-индуцированное перераспределение элементов влияет на формирование и пространственное расположение упрочняющих фаз. В то же время при непосредственном TIG-переплаве основным вкладом ВЧЭМП является повышение структурной однородности модифицированного слоя.

Список литературы

1. König M. Literature review of microstructure formation in compacted graphite iron // *International Journal of Cast Metals Research*. – 2010. – Vol. 23 (3). – P. 185–192. – DOI: 10.1179/136404609X12535244328378.
2. Patel M., Dave K. An insight of compacted graphite iron (CGI) characteristics and its production: A review // *Recent Advances in Manufacturing Processes and Systems*. – Singapore: Springer, 2022. – P. 131–148. – ISBN 978-981-16-7787-8. – DOI: 10.1007/978-981-16-7787-8_10.
3. Dawson S., Guesser W.L. Castability, product design and production of compacted graphite irons // *ASM Handbook*. Vol. 1A: Cast Iron Science and Technology. – Materials Park, Ohio: ASM International, 2017. – ISBN 978-1-62708-168-3. – DOI: 10.31399/asm.hb.v01a.a0006328.
4. Effect of laser surface remelting on microstructure, mechanical properties and tribological properties of metals and alloys: A review / S.M.A. Bukhari, N. Husnain, F.A. Siddiqui, M.T. Anwar, A.A. Khosa, M. Imran, T.H. Qureshi, R. Ahmad // *Optics and Laser Technology*. – 2023. – Vol. 165. – P. 109588. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109588.
5. Wollmann D., Pintaude G. Tribological performance of high-strength cast iron in lubricated contact containing carbon black // *Wear*. – 2021. – Vol. 496–497. – P. 203743. – DOI: 10.1016/j.wear.2021.203743.
6. Gregorutti R.W., Grau J.E. Mechanical properties of compacted graphite cast iron with different microstructures // *International Journal of Cast Metals Research*. – 2014. – Vol. 27 (5). – P. 275–281. – DOI: 10.1179/1743133614Y.0000000118.
7. Damage mechanism and fatigue strength prediction of compacted graphite iron with different microstructures / Y. Chen, J.C. Pang, S.X. Li, C.L. Zou,

- Z.F. Zhang // International Journal of Fatigue. – 2022. – Vol. 164. – P. 107126. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107126.
8. Ray J., Acharyya S.K., Misra D. Surface modification of engineering materials using TIG cladding technique: A review // Recent Advances in Manufacturing Engineering. – Singapore: Springer, 2025. – P. 173–183. – ISBN 978-981-96-9767-0. – DOI: 10.1007/978-981-96-9768-7_14.
9. Cavitation erosion improvement following TIG surface-remelting of gray cast iron / I. Mitelea, I. Bordeas, E. Riemschneider, I.D. Utu, C.M. Crăciunescu // Wear. – 2022. – Vol. 496–497. – P. 204282. – DOI: 10.1016/j.wear.2022.204282.
10. Formation and wear property of broad-beam laser clad Fe-based coatings / B. Sun, J. Cheng, Z. Cai, H. Zhao, Z. Zhang, H. Qu, Q. Zhang, S. Hong, X. Liang // Surface and Coatings Technology. – 2021. – Vol. 405. – P. 126598. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126598.
11. Rakhmonov J.U., Weiss D., Dunand D.C. Comparing evolution of precipitates and strength upon aging of cast and laser-remelted Al–8Ce–0.2Sc–0.1Zr alloys // Materials Science and Engineering: A. – 2022. – Vol. 840. – P. 142990. – DOI: 10.1016/j.msea.2022.142990.
12. Effects of electric and magnetic treatments on microstructures of solid metals: A review / Y. Song, W. Wu, Y. Yu, L. Hua // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2023. – Vol. 36. – P. 139. – DOI: 10.1186/s10033-023-00961-y.
13. Effect of magnetic stirring on grain structure refinement. Part 1: Autogenous nickel alloy welds / Y.C. Lim, X. Yu, J.H. Cho, J. Sosa, D.F. Farson, S.S. Babu, S. McCracken, B. Flesner // Science and Technology of Welding and Joining. – 2010. – Vol. 15 (7). – P. 583–589. – DOI: 10.1179/136217110X12720264008277.
14. Numerical study on weld pool behaviors and keyhole dynamics in magnetic-field-assisted laser-arc hybrid welding of aluminum alloy / C. Tan, Y. Dong, H. Sun, F. Liu, X. Han, Q. Dong, B. Chen, X. Song // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 26. – P. 6446–6461. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.09.030.
15. Effects of magnetic fields in arc welding, laser welding and resistance spot welding: A review / W. Xu, Y. Shi, Y. Cui, Z. Liang // Advanced Engineering Materials. – 2022. – P. 2200682. – DOI: 10.1002/adem.202200682.
16. Effect of Lorentz force distribution on solidified microstructure and segregation of magnesium alloys under pulsed electromagnetic field / Q. Bai, T. Liu, Y. Tian, K. Zhang, Y. Liu, J. Zhang, B. Wang // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – Vol. 1039. – P. 183014. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.183014.
17. Experimental and numerical assessment of weld pool behavior and final microstructure in wire feed laser beam welding with electromagnetic stirring / X. Meng, M. Bachmann, A. Artinov, M. Rethmeier // Journal of Manufacturing Processes. – 2019. – Vol. 45. – P. 408–418. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.07.021.
18. Numerical modeling of electromagnetic field influences on fluid thermodynamic behavior and grain growth during solidification of 316L stainless steel laser-welded plates / Z. Zhang, X. Xu, P. Ge, K. Li // Metals. – 2025. – Vol. 15 (6). – P. 609. – DOI: 10.3390/met15060609.
19. The influence of magnetic field orientation on metal mixing in electromagnetic stirring enhanced wire feed laser beam welding / X. Meng, M. Bachmann, A. Artinov, M. Rethmeier // Journal of Materials Processing Technology. – 2021. – Vol. 294. – P. 117135. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117135.
20. A review of the origin of equiaxed grains during solidification under mechanical stirring, vibration, electromagnetic, electric-current and ultrasonic treatments / N. Balasubramani, J. Venezuela, D. StJohn, G. Wang, M. Dargusch // Journal of Materials Science & Technology. – 2023. – Vol. 144. – P. 243–265. – DOI: 10.1016/j.jmst.2022.09.067.
21. Dendrite fragmentation mechanism under forced convection condition by rotating magnetic field during unidirectional solidification of AlSi7 alloy / H. Zhang, M. Wu, C.M.G. Rodrigues, A. Ludwig, A. Kharicha, A. Rónaföldi, A. Roósz, Z. Veres, M. Svéda // Acta Materialia. – 2022. – Vol. 241. – P. 118391. – DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118391.
22. Microstructural refinement and mechanical enhancement of Hastelloy X welds via electromagnetic vibration-assisted GTAW / A. Adelian, K. Ranjbar, M. Reihanian, R. Dehmlaei // Journal of Materials Research and Technology. – 2025. – Vol. 37. – P. 2750–2763. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.06.213.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 Автор. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Influence of high-frequency electromagnetic field-assisted TIG surface modification on microstructural evolution, elemental redistribution and hardness of EN-GJV-400 compacted graphite iron

Farhad Mahammad oglu Shirzadov^{a, *}

Azerbaijan Technical University, 25 H. Javid Avenue, Baku, AZ1073, Azerbaijan

^a  <https://orcid.org/0009-0006-9378-9865>,  farhad.shirzadov@aztu.edu.az

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 07 July 2026

Revised: 15 July 2026

Accepted: 17 July 2026

Available online: 15 September 2026

Keywords:

EN-GJV-400

TIG remelting

High-frequency electromagnetic field

Solidification behavior

Surface engineering

Acknowledgments

The author acknowledges that part of the experimental investigations was conducted at the Technical University of Berlin (Germany) within the framework of scientific cooperation and research activities related to surface engineering technologies. The authors' current institutional affiliation is Azerbaijan Technical University, where the research work was further developed and prepared for publication. The experimental facilities and scientific support provided during the research stay at TU Berlin are gratefully acknowledged.

ABSTRACT

Introduction. Compacted graphite iron (EN-GJV-400) is widely used for highly loaded automotive and engineering components due to its favourable combination of strength, thermal conductivity, damping capacity and castability. However, the relatively moderate hardness and wear resistance of its surface region may limit its application under severe contact conditions. High-frequency electromagnetic field (HFEMF)-assisted treatment represents a potential approach for modifying solidification conditions and improving structural uniformity during surface engineering. Nevertheless, the influence of HFEMF-assisted TIG treatment on the microstructural evolution, elemental redistribution and hardness response of compacted graphite iron remains insufficiently understood. **Materials and methods.** In this study, conventional and HFEMF-assisted TIG surface modification of EN-GJV-400 compacted graphite iron was investigated. The experimental program included TIG remelting, TIG surface alloying using Ni78Si8B14 and CuSn-4 foils, and TIG hardfacing using UTP A DUR 600 chromium-containing filler wire, performed with and without electromagnetic assistance. A high-frequency electromagnetic field with a frequency of 200 kHz was applied during treatment. The modified surface layers were characterized using optical microscopy, scanning electron microscopy combined with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM/EDS) and Vickers microhardness measurements. **Results and discussion.** The obtained results indicate that HFEMF-assisted processing influences the structural development of TIG-modified layers by affecting the conditions of heat and mass transfer during melting and solidification. The influence of HFEMF was evaluated indirectly through surface morphology, microstructural characteristics, elemental distribution and hardness response. Conventional TIG remelting increased the surface hardness of EN-GJV-400 from approximately 375 HV0.1 to 765 HV0.1 due to graphite dissolution, carbon redistribution and formation of ledeburitic structures containing cementite-rich constituents. HFEMF-assisted remelting produced a comparable hardness level of approximately 760 HV0.1, indicating that electromagnetic assistance does not act as an independent strengthening mechanism but mainly contributes to structural homogenization. Ni78Si8B14 alloying resulted in hardened transformation products together with ledeburitic and carbide-containing constituents, while HFEMF primarily improved the uniformity of alloy-element distribution. For UTP A DUR 600 hardfacing, HFEMF-assisted treatment increased the average hardness from approximately 771 HV0.1 to 800 HV0.1, which is attributed to improved redistribution and more uniform formation of chromium-containing hard phases. **Conclusion.** The results demonstrate that HFEMF-assisted TIG treatment provides an additional process-control parameter for surface modification of EN-GJV-400 compacted graphite iron. The effectiveness of electromagnetic assistance depends on the chemical composition of the modified layer and the dominant strengthening mechanism. HFEMF should therefore be considered primarily as a method for improving structural uniformity, elemental redistribution and phase distribution rather than as a universal hardness-enhancement technique. Further studies involving direct molten-pool observation and numerical modelling are required to quantitatively establish the relationship between electromagnetic parameters and melt-pool behaviour.

For citation: Shirzadov F.M. Influence of high-frequency electromagnetic field-assisted TIG surface modification on microstructural evolution, elemental redistribution and hardness of EN-GJV-400 compacted graphite iron. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 3, pp. 83–111. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.3-83-111. (In Russian).

* Corresponding author

Shirzadov Farhad Mahammad oglu, Ph.D (Engineering),

Associate Professor

Azerbaijan Technical University,

25 H. Javid Avenue,

AZ1073, Baku, Azerbaijan

Tel.: +994559029446, e-mail: farhad.shirzadov@aztu.edu.az

References

1. König M. Literature review of microstructure formation in compacted graphite iron. *International Journal of Cast Metals Research*, 2010, vol. 23 (3), pp. 185–192. DOI: 10.1179/136404609X12535244328378.
2. Patel M., Dave K. An insight of compacted graphite iron (CGI) characteristics and its production: A review. *Recent Advances in Manufacturing Processes and Systems*. Singapore, Springer, 2022, pp. 131–148. ISBN 978-981-16-7787-8. DOI: 10.1007/978-981-16-7787-8_10.
3. Dawson S., Guesser W.L. Castability, product design and production of compacted graphite irons. *ASM Handbook*. Vol. 1A: *Cast Iron Science and Technology*. Materials Park, Ohio, ASM International, 2017. ISBN 978-1-62708-168-3. DOI: 10.31399/asm.hb.v01a.a0006328.
4. Bukhari S.M.A., Husnain N., Siddiqui F.A., Anwar M.T., Khosa A.A., Imran M., Qureshi T.H., Ahmad R. Effect of laser surface remelting on microstructure, mechanical properties and tribological properties of metals and alloys: A review. *Optics and Laser Technology*, 2023, vol. 165, p. 109588. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109588.
5. Wollmann D., Pintaude G. Tribological performance of high-strength cast iron in lubricated contact containing carbon black. *Wear*, 2021, vol. 496–497, p. 203743. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203743.
6. Gregorutti R.W., Grau J.E. Mechanical properties of compacted graphite cast iron with different microstructures. *International Journal of Cast Metals Research*, 2014, vol. 27 (5), pp. 275–281. DOI: 10.1179/1743133614Y.0000000118.
7. Chen Y., Pang J.C., Li S.X., Zou C.L., Zhang Z.F. Damage mechanism and fatigue strength prediction of compacted graphite iron with different microstructures. *International Journal of Fatigue*, 2022, vol. 164, p. 107126. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107126.
8. Ray J., Acharyya S.K., Misra D. Surface modification of engineering materials using TIG cladding technique: A review. *Recent Advances in Manufacturing Engineering*. Singapore, Springer, 2025, pp. 173–183. ISBN 978-981-96-9767-0. DOI: 10.1007/978-981-96-9767-0_14.
9. Mitelea I., Bordeasă I., Riemschneider E., Uțu I.D., Crăciunescu C.M. Cavitation erosion improvement following TIG surface-remelting of gray cast iron. *Wear*, 2022, vol. 496–497, p. 204282. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204282.
10. Sun B., Cheng J., Cai Z., Zhao H., Zhang Z., Qu H., Zhang Q., Hong S., Liang X. Formation and wear property of broad-beam laser clad Fe-based coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 405, p. 126598. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126598.
11. Rakhmonov J.U., Weiss D., Dunand D.C. Comparing evolution of precipitates and strength upon aging of cast and laser-remelted Al–8Ce–0.2Sc–0.1Zr alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, vol. 840, p. 142990. DOI: 10.1016/j.msea.2022.142990.
12. Song Y., Wu W., Yu Y., Hua L. Effects of electric and magnetic treatments on microstructures of solid metals: A review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2023, vol. 36, p. 139. DOI: 10.1186/s10033-023-00961-y.
13. Lim Y.C., Yu X., Cho J.H., Sosa J., Farson D.F., Babu S.S., McCracken S., Flesner B. Effect of magnetic stirring on grain structure refinement. Part 1: Autogenous nickel alloy welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, vol. 15 (7), pp. 583–589. DOI: 10.1179/136217110X12720264008277.
14. Tan C., Chen B., Liu F., Zhang X., Chen S., Song X. Numerical study on weld pool behaviors and keyhole dynamics in magnetic-field-assisted laser-arc hybrid welding of aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 26, pp. 6446–6461. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.09.030.
15. Xu W., Shi Y., Cui Y., Liang Z. Effects of magnetic fields in arc welding, laser welding and resistance spot welding: A review. *Advanced Engineering Materials*, 2022, p. 2200682. DOI: 10.1002/adem.202200682.
16. Bai Q., Zhang K., Tian Y., Zhang J., Liu T., Liu Y., Wang B. Effect of Lorentz force distribution on solidified microstructure and segregation of magnesium alloys under pulsed electromagnetic field. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, vol. 1039, p. 183014. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.183014.
17. Meng X., Bachmann M., Artinov A., Rethmeier M. Experimental and numerical assessment of weld pool behavior and final microstructure in wire feed laser beam welding with electromagnetic stirring. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 45, pp. 408–418. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.07.021.
18. Zhang Z., Xu X., Ge P., Li K. Numerical modeling of electromagnetic field influences on fluid thermodynamic behavior and grain growth during solidification of 316L stainless steel laser-welded plates. *Metals*, 2025, vol. 15 (6), p. 609. DOI: 10.3390/met15060609.
19. Meng X., Bachmann M., Artinov A., Rethmeier M. The influence of magnetic field orientation on metal mixing in electromagnetic stirring enhanced wire feed laser beam welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, vol. 294, p. 117135. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117135.



20. Balasubramani N., Venezuela J., StJohn D., Wang G., Dargusch M.A. A review of the origin of equiaxed grains during solidification under mechanical stirring, vibration, electromagnetic, electric-current and ultrasonic treatments. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, vol. 144, pp. 243–265. DOI: 10.1016/j.jmst.2022.09.067.

21. Zhang H., Wu M., Rodrigues C.M.G., Ludwig A., Kharicha A., Rónaföldi A., Roósz A., Veres Z., Svéda M. Dendrite fragmentation mechanism under forced convection condition by rotating magnetic field during unidirectional solidification of AlSi7 alloy. *Acta Materialia*, 2022, vol. 241, p. 118391. DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118391.

22. Adelian A., Ranjbar K., Reihanian M., Dehmolaei R. Microstructural refinement and mechanical enhancement of Hastelloy X welds via electromagnetic vibration-assisted GTAW. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, vol. 37, pp. 2750–2763. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.06.213.

Conflicts of Interest

The author declares no conflict of interest.

© 2026 The Author. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).