



Научная статья
05.16.09 – Материаловедение (по отраслям) (технические науки)
УДК 621.794
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.035

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Пурэвдорж Батхуу ¹, Галаа Омонцоо ², Бурьял Дондокович Лыгденов ³,
Алексей Михайлович Гурьев ⁴

^{1,2} Монгольский государственный университет науки и технологии, Улан-Батор, Монголия

^{3,4} Уханьский текстильный университет, Ухань, Китай

³ Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия

⁴ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ batpuje@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3922-2589>

² galaaoom@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0001-6938-8486>

³ lygdenov59@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3580-6165>

⁴ gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

Аннотация. Абразивное и коррозионное воздействие шлама и быстрые изменения рабочей скорости интенсивно влияют на процесс износа элементов насоса, особенно рабочего колеса. Подсчитано, что срок службы насоса составляет от 212 до 248 часов. Всего за один год примерно 400 насосов снимаются с линии для ремонта на ремонтном заводе. Большинство из них вышли из строя из-за износа только крыльчатки. Например, согласно нашему исследованию, 80 процентов из 400 насосов вышли из строя только из-за износа рабочего колеса. Затраты на производство спирали, крыльчатки и защитной пластины составляют 10,5; 5,1 и 1,5 миллиона тугриков (единица монгольской валюты, равная примерно 2000 долларам США к 2015 году) соответственно. Всего один восстановленный насос стоит около 20 миллионов тугриков (10 тысяч долларов США). В этом исследовании анализировалось влияние лазерной обработки, такие как сварка, наплавка и поверхностная обработка расплавом, на микроструктуру, твердость и износостойкость высокохромистого белого чугуна, который используется для изготовления больших шламовых насосов. Износостойкий высокохромистый белый чугун – это материал высокой твердости и абразивной износостойкости. Любое ремонтное действие для износостойкого белого железа должно обеспечивать твердость более 50 HRC и равную или большую износостойкость, чем у базового чугуна. Лазерная наплавка только металл-керамического (по составу близкого к ИНКО-702) порошка могла бы удовлетворить вышеуказанное требование, но она дает чугуну поры и трещины. Исследования были направлены на снижение образования трещин и пор в процессе обработки.

Износостойкий белый чугун может быть сварен лазером с предварительным нагревом. Тонкие срезы высокохромистого белого чугуна, сваренные с образцами чугуна и стали, не имеют дефектов в зоне сварки. Поверхностная обработка расплавом, вероятно, менее эффективна для высокохромистого белого чугуна из-за низких механических свойств расплавленной поверхности. Кроме того, высокая скорость охлаждения в процессе лазерного поверхностного плавления не позволяет аустенитной фазе трансформироваться и не обеспечивает термические условия, необходимые для желаемого образования вторичных карбидных осадков или мартенситных превращений.

Ключевые слова: сварка, наплавка, лазерная обработка, аустенит, износостойкость, твердость, закалка, фаза.

Для цитирования: Восстановление и упрочнение поверхности деталей из высокохромистого чугуна лазерной обработкой / П. Батхуу [и др.] // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 246–257. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.035.

Original article

RESTORATION AND STRENGTHENING OF THE SURFACE OF HIGH-CHROMIUM CAST IRON PARTS BY LASER TREATMENT

Purevdorzh Batkhoo¹, Galaa Omontsoo², Buryal D. Lygdenov³,
Alexey M. Guryev⁴

^{1,2} Mongolian State University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

^{3,4} Wuhan Textile University, Wuhan, China

³ East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

⁴ Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ batpuje@gmail.com, [https://orcid.org/\[0000-0002-3922-2589](https://orcid.org/[0000-0002-3922-2589)

² galaaom@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0001-6938-8486>

³ lygdenov59@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3580-6165>

⁴ gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

Abstract. *The abrasive and corrosive effects of the sludge and the rapid changes in the working speed intensively affect the wear process of the pump elements, especially the impeller. It is estimated that the service life of the pump is from 212 to 248 hours. In just one year, approximately 400 pumps are removed from the line for repair at the repair plant. Most of them failed due to the wear of the impeller only. For example, according to our study, 80 percent of the 400 pumps failed just because of impeller wear. The production costs of the helix, impeller, and protective plate are 10.5, 5.1, and 1.5 million tugriks (a unit of Mongolian currency equal to approximately 2000 US dollars by 2015), respectively. Only one restored pump costs about 20 million tugriks (10 thousand US dollars). This study analyzed the effects of laser processing, such as welding, surfacing, and surface melt treatment, on the microstructure, hardness, and wear resistance of high-chromium white cast iron, which is used to make large slurry pumps. Wear-resistant high-chromium white cast iron is a material of high hardness and abrasive wear resistance. Any repair action for wear-resistant white iron must provide a hardness of more than 50 HRC and equal or greater wear resistance than that of the base cast iron. Laser surfacing of only a metal-ceramic powder (similar in composition to INCO-702) could satisfy the above requirement, but it gives the cast iron pores and cracks. The research was aimed at reducing the formation of cracks and pores during the processing process. Wear-resistant white cast iron can be laser-welded with preheating. Thin sections of high-chromium white cast iron, welded with samples of cast iron and steel, have no defects in the welding zone. Surface melt treatment is probably less effective for high-chromium white cast iron due to the low mechanical properties of the molten surface. In addition, the high cooling rate during laser surface melting does not allow the austenitic phase to transform and does not provide the thermal conditions necessary for the desired formation of secondary carbide precipitates or martensitic transformations.*

Keywords: *welding, surfacing, laser processing, austenite, wear resistance, hardness, quenching, phase.*

For citation: Batkhoo, P., Omontsoo, G., Lygdenov, B. D. & Guryev, A. M. (2021). Restoration and strengthening of the surface of high-chromium cast iron parts by laser treatment. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 246-257. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.035.

ВВЕДЕНИЕ

Ремонтный завод Erdenet Mining Company (EMC) крупнейшей медедобывающей компании Монголии производит шламовые насосы из износостойкого высокохромистого белого чугуна (HCrWI) и износостойкие футеровки для рудных мельниц из износостойкой высокомарганцевой аустенитной стали (HMnAS). HCrWI, отлитый в EMC, имеет 27–30 мас. % Cr и 1,5–3 мас. % Mn, 2,7–3 мас. % C

и используется для изготовления крыльчатки, спирали, корпуса и защитной пластины, основных компонентов больших шламовых насосов, используемых на рудоперерабатывающем заводе. Все виды шламовых насосов используются для работы в очень тяжелых условиях. Абразивное и коррозионное воздействие шлама и быстрые изменения рабочей скорости интенсивно влияют на процесс износа элементов насоса, особенно рабочего колеса. Подсчитано, что срок службы насоса составляет от 212 до 248 часов. Всего за один год,

примерно 400 насосов снимаются с линии для ремонта на ремонтном заводе [9]. Большинство из них вышли из строя из-за износа только крыльчатки. Например, согласно нашему исследованию, 80 процентов из 400 насосов вышли из строя только из-за износа рабочего колеса. Затраты на производство спирали, крыльчатки и защитной пластины составляют 10,5; 5,1 и 1,5 миллиона тугриков (единица монгольской валюты, равная примерно 2000 долларам США к 2015 году) соответственно. Всего один восстановленный насос стоит около 20 миллионов тугриков (10 тысяч долларов США) [9]. Очевидно, что очень важно увеличить срок службы насоса за счет внедрения нового способа производства или технологии ремонта. В настоящее время широко распространена практика, когда изношенные детали насоса весом от 250 до 750 кг отправляются в литейный цех на переработку без каких-либо попыток ремонта.

Использование лазера для ремонта этих деталей может привести к значительной экономии затрат, поскольку альтернативой является расплав и литье деталей насоса с последующими механической и термической обработками. Лазерная обработка поверхностей изношенных материалов может обеспечить значительную экономию по сравнению с текущей процедурой переработки. Это исследование было направлено на то, чтобы определить, можно ли использовать обработку, такую как лазерная наплавка, для поддержания или улучшения твердости и износостойких свойств HCrWI. Лазерная сварка может быть использована для соединения твердого облицовочного покрытия из высокохромистого белого чугуна со стальными или железными подложками, потому что твердость и износостойкость HCrWI были рассмотрены в качестве основных критериев его ремонтной обработки. Твердость, превышающая 50 HRC, делает HCrWI отличным износостойким материалом для оборудования горнодобывающей промышленности.

На практике не так много попыток применения, как лазерной сварки, так и наплавки HCrWI, потому что считается, что HCrWI становится непригодным для использования из-за свойств зоны термического влияния (ЗТВ). Несколько исследований, связанных с лазерной сваркой только для серых чугунов, были найдены в литературе [5, 8]. Некоторые автомобильные компании, такие как BMW, использовали лазерную сварку для соединения закаленной стальной кольцевой передачи с корпусом дифференциала, отлитым из серого чугуна в шестерне заднего моста автомобиля [1]. Позже эта работа была более глубоко изучена

в Южной Корее [2]. Сверхвысокопрочная хромистая сталь с мартенситной микроструктурой сварена лазером и исследована [5]. Процесс лазерной наплавки используется на некоторых инструментальных сталях [11].

Доэвтектические чугуны, содержащие 16 и 26 мас. % Cr с отдельными добавками Ni, Cu, Mo и V, а также без добавления, были изучены на предмет изменений микротвердости матрицы при термообработке [10].

Несмотря на то, что белый чугун трудно сваривается, в работе была предпринята попытка возможности лазерной сварки, при этом достигая удовлетворительной твердости сварной оболочки на изношенной подложке HCrWI. Для этого необходим тщательный контроль обработки в процессе сварки, чтобы определить, может ли быть достигнут удовлетворительный ремонт.

На практике содержание хрома во всех HCrWI находится в пределах 12 мас. %, 18–22 мас. % и 27–30 мас. % в зависимости от типа чугуна [13]. HCrWI с 18–22 мас. % наиболее популярен благодаря своей превосходной износостойкости. Но он имеет более низкую прочность, чем другие чугуны. Наиболее благоприятное сочетание износостойкости, коррозионной стойкости и ударной вязкости достигается в чугуне с 27–30 мас. % Cr, что делает его хорошим материалом для шламовых насосов. HCrWI отличается высоким содержанием хрома, внедренного в виде твердой эвтектики хрома и вторичных карбидов в мартенситную матрицу после закалки [12, 13]. Незакаленный HCrWI состоит из аустенитных дендритов и эвтектических карбидов. Механические свойства и износостойкость такого чугуна зависят от типа, твердости, морфологии, распределения, объемной доли и ориентации этих карбидов [13]. Механические свойства HCrWI широко изменяются при термической обработке. Имеется достаточное количество публикаций, связанных с микроструктурной модификацией не только чистых HCrWI, но и сплавов с другими карбидообразующими элементами, такими как титан, ванадий и вольфрам, полученных термической обработкой [10]. В литом состоянии HCrWI с 28 мас. % Cr состоит из первичных аустенитных дендритов и эвтектических карбидов M_7C_3 . Частично эвтектический аустенит вокруг эвтектического карбида может превратиться в мартенсит. Твердость в литом состоянии составляет около 450 HB. Термическая обработка, названная процессом дестабилизации, вносит большие изменения в микроструктуру HCrWI. Дестабилизация аустенита в течение 1–6 часов позволяет осаждать вторичные карбиды в матрице аустенита, вызывая снижение содержания хрома и углерода в аустените.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ

При быстром охлаждении до комнатной температуры аустенит с меньшим содержанием Cr и C превращается в мартенсит. Осаждение вторичного карбида и мартенситное превращение аустенита повышают твердость до 700 НВ [12, 13]. Абразивно-эрозионные износостойкие свойства HCWI изучались в ряде литературных источников [12, 6, 3]. Эрозионная износостойкость связана с объемной твердостью. Объемная твердость необработанных белых чугунов зависит от объемной доли карбида. Потеря износа HCWI представляет собой комбинацию потери веса из-за удаления матрицы и карбида. Матрица из аустенита показала большие потери на износ, чем мартенситная матрица с вторичными карбидами.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Образцы прямоугольной формы с размерами 30 x 35 x 30 мм из HCWI и высокомарганцевой стали были получены методом литья в песчаную форму (рисунок 1).

Образцы HCWI нагревали до температуры 900 °С и после выдержки в течение 1 часа охлаждали на воздухе в течение 24 часов. Затем химический состав и твердость измеряли спектрометрическим методом и твердомером Бринеля. Химическое содержание HCWI составляло: 2,72 % С, 30,9 % Cr, 1,42 % Ni, 1,06 % Mn и 65,1 % Fe.

Твердость образцов железа составляла 480–550 НВ. Образцы высокомарганцевой аустенитной стали использовались для лазерной сварки с образцами HCWI, чтобы определить свариваемость. Химическое содержание стали: 13,6 % Mn, 0,72 % Cr, 0,36 % Ni и 84,6 % Fe.

Затем образцы были подготовлены для экспериментов по лазерной обработке, включая сварку, наплавку и обработку поверхности.

Система лазерного осаждения, использо-

ванная в исследовании, представляла собой лазерный источник Nd : YAG мощностью 3 кВт с диаметром пучка 2,85 мм. Скорость лазерной обработки была установлена на уровне 254 мм/мин. После лазерной сварки, лазерной наплавки и лазерной обработки поверхности все образцы были испытаны на абразивный износ и металлографический анализ микроструктуры с помощью оптического микроскопа и СЭМ-изображений.

Химический анализ и испытание на абразивный износ были проведены для всех образцов, обработанных лазером.

Лазерная сварка. В экспериментах по лазерной сварке железо и сталь сваривались при 700 Вт в двух конфигурациях: 1) чугун–чугун, состоящее из двух пар свариваемых образцов; 2) чугун–сталь, состоящее из трех пар свариваемых образцов. Перед сваркой образцы предварительно нагревали до 600 °С лазерным лучом с низкой энергии. На рисунке 2 показаны ориентации сварных швов. Технические характеристики сварки были следующими:

Чугун – к – чугуну:

1. Образцы сечением 10 x 12 мм приваривают к чугунному куску с длинной стороны 35 мм.

2. Образцы сечением 1, 5 x 3 мм привариваются к чугунному куску фланцевым соединением.

Чугун – сталь:

1. Образцы сечением 11 x 15 мм привариваются к стальному куску с его стороны длиной 30 мм.

2. Образцы сечением 1,5 x 3 мм свариваются на стальной заготовке фланцевым соединением.

3. Образцы шириной 2 мм свариваются на большом стальном куске Т-образным соединением.



Рисунок 1 – Предварительные образцы HCWI и HMS
(I и S используются для обозначения чугуна и стали соответственно)

Figure 1 - Preliminary samples of HCWI and HMS
(I and S are used to denote cast iron and steel, respectively)

Лазерная наплавка. Подготовленные образцы износостойкого высокохромистого белого чугуна были покрыты тремя видами порошковых материалов: металллокерамическими, износостойкими материалами стеллит-21 и стеллит-1 с одно- и многослойными покрытиями. Металлокерамический порошок предназначен для создания износостойкого покрытия методом TIG или плазменной дуговой сварки. Для оценки наплавки HCrWI в

сравнении с металллокерамической наплавкой использовали порошок стеллит-21 и стеллит-1. Перед наплавкой образцы предварительно нагревали до 600 °С низкоэнергетическим лазерным лучом. Во время наплавки мощность лазера была установлена на 1300 Вт. Порошковые материалы вдуваются инертным газом аргона в зону расплава со скоростью подачи 3,4 г/мин. Каждый из порошков осаждался в виде отдельных шариков и в 1–5 слоев.

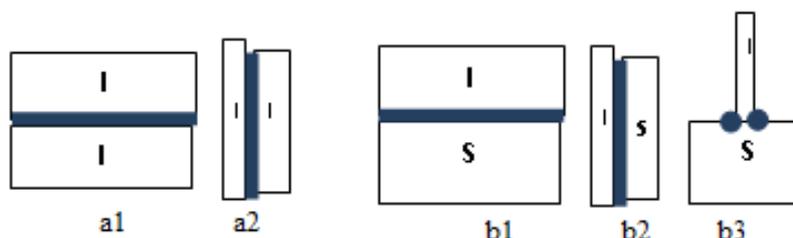


Рисунок 2 – Конфигурация сварки:
a1, a2 – два сварных шва железо-железо, b1, b2, b3 – три сварных шва чугун – сталь

Figure 2 - Welding configuration:
a1, a2 - two welds iron-iron, b1, b2, b3 - three welds cast iron – steel

Единичные шарики из металллокерамических и стеллит-21 материалов были изготовлены для сравнения их технологической способности с помощью анализа поведения разбавления.

Лазерная наплавка или лазерная обработка поверхности расплавом. Предпринята попытка оценить изменение поверхностных свойств HCrWI, автором выполнена лазерная обработка плавлением с быстрым охлаждением. Для поверхностного плавления использовали образец HCrWI размером 28 x 40 x 12 мм мощностью 1000 Вт с перекрытием пучка 30 % между последующими проходами.

Микроструктура. Для металлографического анализа все сварные, плакированные и обработанные лазерным расплавом образцы были отполированы и вытравлены стандартным методом. В процессе полировки последовательно использовались бумаги из карбида кремния с зернистостью 240, 400, 600 и 1200. Затем для окончательной полировки использовали коллоидные суспензии алмазных частиц размером 9, 6 и 3 мкм. После полировки образцы травили 2 % Нитала (2 % азотной кислоты и метанола). Для некоторых сварных образцов использовали безводный Каллин (50 мл HCl, 25 мл CuCl₂ и 50 мл этанола), чтобы выявить интересующие фазы. Для исследования микроструктур использовали металлографический оптический микроскоп AXIO Cam MRc5. Для химического и микроструктурного

анализа использовались рентгеновский тестер и SEM-анализатор.

Механические свойства, такие как твердость и абразивная износостойкость сваренных лазером, плакированных и обработанных расплавом поверхностей, оценивались по единице HRC и значениям потерь на абразивный износ. Базовый чугун и базовая сталь также были включены в испытания и измерения механических свойств.

Для испытаний на износ используются машина для испытания на сухое истирание ASTM G65 и абразивный материал из карбида кремния. Испытательная машина была настроена на скорость вращения 200 об / мин, с 30 фунтами контактного усилия и 10 минутами времени тестирования.

РЕЗУЛЬТАТ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА

При ограниченной информации в литературе относительно лазерной сварки высокохромистого белого чугуна наблюдались уникальные морфологии в микроструктуре. Пример лазерной сварки серого чугуна со сталями был найден при производстве дифференциалов для автомобильной промышленности [4, 2]. В этих исследованиях уменьшение трещин и улучшение механических свойств были достигнуты за счет использования присадочного металла на основе Ni. Использование терморегулируемой предварительной и окончательной

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ

термической обработки помогает смягчить проблемы свариваемости, при сплавлении высокоуглеродистых сплавов. В этом исследовании вредные изменения механических свойств и микроструктуры для сварки плавлением HCrWI

были уменьшены в результате минимального теплового эффекта, минимальной зоны плавления и быстрого затвердевания при лазерной обработке. Образцы лазерной сварки показаны на рисунке 3.



Рисунок 3 – Лазерная сварка образцов чугуна–чугун и чугуна–сталь

Picture 3 - Laser welding of samples of cast iron-cast iron and cast iron-steel

На рисунке 4 показаны микроструктуры сварного шва чугуна со сталью и чугуна с чугуном. Никаких явных дефектов или проблем в зоне сварки этих сварных швов обнаружено не было.

Микроструктуры показывают, что сварное

соединение лазером прочно удерживает не только один и тот же, но и другой вид образцов, которые достаточно прочны в целом с образцом HCrWI.



Рисунок 4 – Сварка (а) Т-образного соединения чугуна со сталью и (б) фланцевого соединения чугуна с чугуном

Figure 4 - Welding (a) a T-shaped joint of cast iron to steel and (b) a flange joint of cast iron to cast iron

Детальное исследование размера зоны сварки в образце HCrWI / HMS было показано на рисунке 5. Толщина зоны сварки составляла около 0,6 мм, а толщина зоны термического воздействия (ЗТВ) – 0,3 мм. Подложка (а) имела аустенитные дендриты с некоторыми мартенситными и эвтектическими карбидами. В ЗТВ (б) по мере приближения к расплавленной области наблюдалось огрубление аустенитных дендритов. В промежуточной переходной зоне (с) между сварным швом и ЗТВ крупные аустенитные дендриты окружены сверху вновь затвердевшими материалами.

Зона сварки (d) над ЗТВ состоит из металлической матрицы и эвтектических карбидов. Зона сварки также представляет собой смесь высокохромистого белого железа и высокомарганцевой аустенитной стали, обработанной лазерным лучом.

Химически HCrWI имеет: 2,72 % С, 30,9 % Cr, 1,42 % Ni, 1,06 % Mn и 65,1 % Fe, в то время как высокомарганцевая аустенитная сталь: 13,6 % Mn, 0,72 % Cr, 0,36 % Ni и 84,6 % Fe.

После лазерной сварки химический состав свариваемой зоны должен быть не таким, как в базовом сплаве. Например, содержание

хрома, никеля и углерода уменьшается почти вдвое, тогда как содержание марганца и железа увеличивается. Мы предполагаем, что объем сварной зоны может содержать около 15 % мас. Cr, 6 % мас. Mn, 75 % мас. Fe, 0,8 % мас. Ni и 2 % мас. C соответственно. Уменьшение содержания хрома и углерода и увеличение содержания железа дают сварной зоне

больше возможности на образование твердых цементитных и мартенситных фаз. В металлической матрице увеличивалось количество мартенситной фазы. В результате твердость была увеличена до 55 HRC. Это может привести к вредному воздействию на сварной шов. В этом исследовании трещин не наблюдалось.



Рисунок 5 – Изменения микроструктуры при лазерной сварке чугуна со сталью:
а – чугунная подложка; б – ЗТВ; в – переходная зона; г – сварная зона

Figure 5 - Changes in the microstructure during laser welding of cast iron with steel:
a - cast iron substrate, b - HAZ, c - transition zone, d - welded zone

2. ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА

Целью лазерной наплавки является улучшение износостойкости, ударопрочности и коррозионной стойкости поверхностей путем создания защитного покрытия на подложке с более низкими эксплуатационными характеристиками. Качество процесса лазерной наплавки на высокохромистом белом чугуне зависит не только от факторов, связанных с лазерным процессом, но и от химических и структурных свойств подложки.

Традиционно высокохромистый белый чугун не сваривается плавлением, потому что возникают термические напряжения и происходит микроструктурная деградация. Автору не удалось найти никакой литературы, сообщающей об использовании лазерной наплавки на белом чугуне на момент этой публикации. Данное исследование было направлено на выявление возможных методов поддержания или повышения твердости и абразивной износостойкости HCrWI.

Для лазерной плакировки образцов железа использовали три типа порошковых материалов: металлокерамический (по составу близкий к ИНКО-702), стеллит-21 и стеллит-1 и исследовали твердость и абразивную износостойкость.

На рисунке 6 показаны микроструктуры одиночных шариков stellite-21 и металлокерамического лазера. Микрофотография поперечного сечения stellite-21 ® свидетельствует о хорошей связи между шариком и подложкой без разбавления. В металлокерамическом шарике имеется ряд больших и малых отверстий. Диаметр самых больших пор достигает 0,6 мм. Это может быть вызвано некоторыми видами флюсовых материалов в порошке. Хуже было при многослойном осаждении с хрупким режимом. Действительно, покрытие было сломано, когда его разрезали. Многослойный осажденный материал stellite-21 ® образовал хорошее покрытие без видимой пористости или трещин.

На рисунке 6 показаны микроструктуры поперечного сечения валика лазерной наплавки при применении порошка стеллит-21 и металлокерамики. Микроструктура поперечного сечения валика свидетельствует о хорошей адгезии между валиком и основным металлом без смешивания. В металлокерамическом покрытии обнаружены ряд больших и маленьких пор. Диаметр самых больших пор достигает 0,6 мм. Это может быть вызвано наличием в порошке некоторых флюсовых частиц, что может повысить

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ

хрупкость при многослойной наплавке вплоть до разрушения валика. При многослойной наплавке с применением стеллит-21 образуется

хорошее покрытие без видимой пористости или трещин.

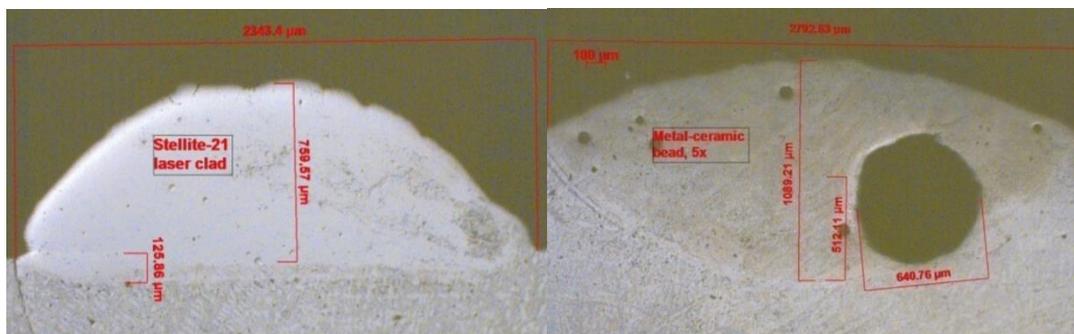


Рисунок 6 – Поперечное сечение валика при наплавке из порошка (а) стеллита-21 и (б) металлокерамических порошков

Figure 6 - Cross-section of the bead when surfacing from powder (a) Stellite-21 and (b) metal-ceramic powders

Металлокерамическое покрытие не дает необходимой твердой поверхности, но один слой покрытия увеличивает износостойкость по сравнению с литым HCWI.

На рисунке 7 показано, что металлокера-

мическое покрытие, содержащее обилие частиц карбида хрома, распределенных в мартенситной и аустенитной фазах, обладает повышенной абразивной износостойкостью почти в два раза по сравнению с базовым чугуном.

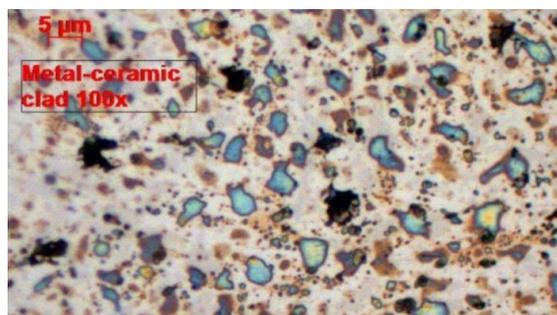


Рисунок 7 – Микроструктура металлокерамического покрытия (1000 x mag)

Picture 7 - Microstructure of cermet coating (1000 x mag)

На рисунке 8 показаны микроструктуры многослойной лазерной наплавки из порошка стеллит-21 и стеллит-1. В данном случае не

обнаружено трещин или пор ни в одностороннем, ни в многослойном покрытиях.

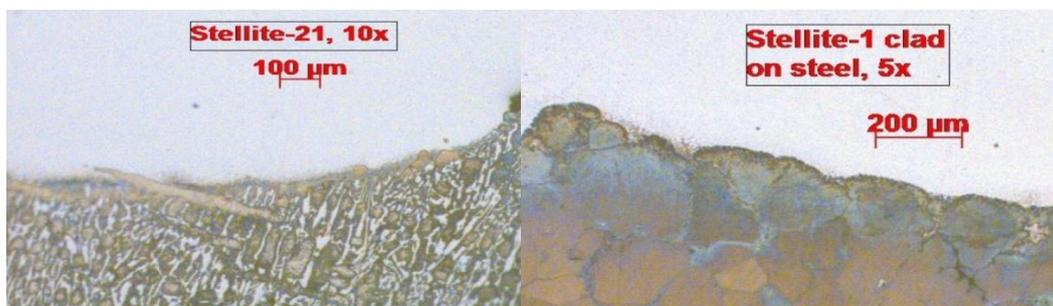


Рисунок 8 – Покрытия из порошка стеллит-21 (100x) и стеллит-1 (50x) на подложках HCWI и HMS

Figure 8 - Coatings of stellite-21 (100x) and stellite-1 (50x) powder on HCWI and HMS substrates
POLZUNOVSKIY VESTNIK № 2 2021

Металлокерамическое покрытие содержит 19 мас. % хрома и 46 мас. % никеля. Уменьшение содержания хрома с 30 до 19 мас. % и увеличение количества никеля стабилизируют превращение аустенита в мартенсит. Обилие карбидов хрома, эвтектического цементита и мартенситной фазы в удерживаемом аустените придает покрытию более твердость и устойчивость к абразивному износу, чем базовый чугун. Порошковые покрытия стеллит-21 и стеллит-1 содержат примерно 60 мас. % кобальта и 27 мас. % хрома.

Твердость и потеря износа основных материалов и их лазерно-плакированных поверхностей с тремя выбранными материалами покрытия показаны на рисунках 10 и 11. Базовый чугунный материал имеет твердость 55 HRC. Металлокерамическое покрытие имеет твердость 54,4 HRC. Наименьшую твердость имеет сталь с высоким содержанием марганца.

Несмотря на то, что марганцевая сталь имеет низкую твердость по сравнению с другими испытанными материалами, износостойкость в два раза выше, чем стеллит-1 и лазерная расплавленная поверхность, оцененная в этом исследовании.

3. ЛАЗЕРНОЕ ОСТЕКЛЕНИЕ

Лазерная глазурованная поверхность HCrWI с ранее отмеченной глубиной проникновения 0,5 мм была дополнительно оценена и различные микроструктурные морфологии приведены на рисунке 9. В заключительные моменты затвердевания высокохромистого белого чугуна первичной фазой являются аустенитные дендриты, а орторомбический карбид M_7C_3 не осаждается в результате быстрого затвердевания и низкой теплоемкости, характерной для лазерной обработки материала.

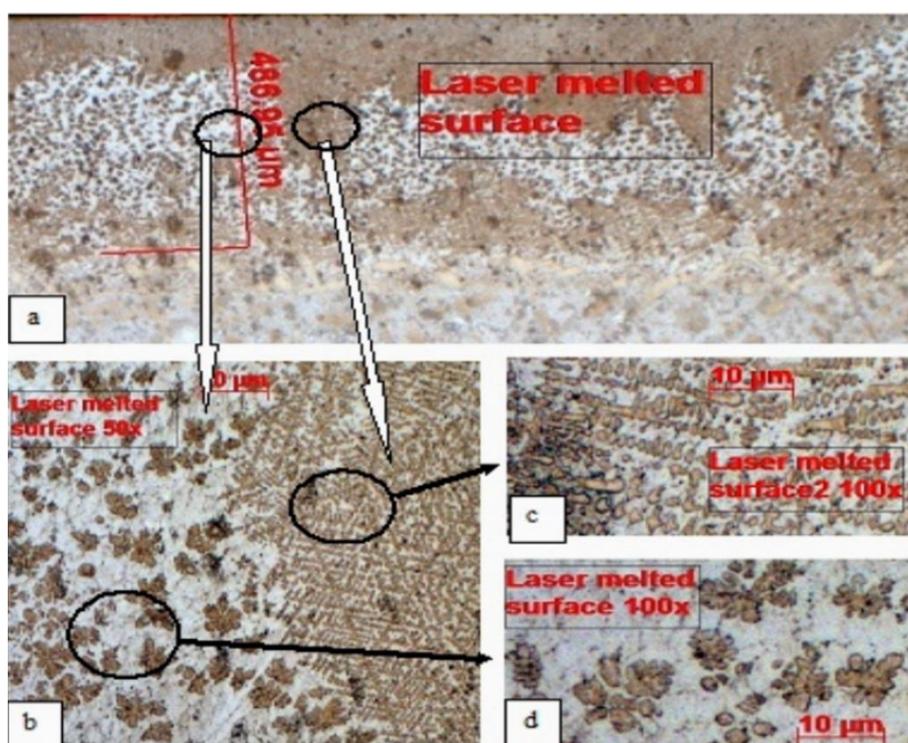


Рисунок 9 – Комбинированная микроструктура обработанной лазерным расплавом поверхности

Figure 9 - Combined microstructure of laser-treated surface

HCrWI в различных увеличениях: а – толщина обработанной поверхности (100 х); б – смесь тонких и грубых дендритов аустенита (500 х); в – мелкие дендриты; д – грубые дендриты (1000 х).

Такое быстрое охлаждение не обеспечивает достаточно времени для диффузионного процесса, необходимого для осаждения вторичных карбидов из аустенитной матрицы. В этом

исследовании лазерная расплавленная поверхность HCrWI показывает три различные микроструктурные зоны, которые были сформированы. Верхний и нижний слои имеют тонкие дендриты аустенита и эвтектические карбиды. Средний слой имеет крупные не плотноупакованные сфероидные дендриты аустенита с мор-

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ

фологией лепестка цветка в пластинках эвтектической структуры.

На границе между дендритами аустенита и эвтектических карбидов происходит некоторое превращение аустенита в более мартенситные морфологии. В аустените не осаждаются вторичные карбиды. Вся расплавленная поверхность имеет ограниченное количество мартенситной фазы.

Установлено, что твердость и абразивная износостойкость обработанной лазерным расплавом поверхности HCrWI значительно ниже, чем у основного железа. Это объясняется тем, что при быстром охлаждении поверхности лазерного расплава недостаточно времени для осадения вторичных карбидов диффузионным процессом и последующего мартенситного пре-

вращения. После лазерной обработки поверхности плавлением твердость HCrWI была снижена с 55 до 42 HRC. Это объясняется отсутствием вторичного карбидного осаждения и мартенситного превращения аустенита. Износостойкость расплавленного лазером HCrWI составляет почти одну пятую от исходного HCrWI.

Наиболее износостойким материалом является металллокерамическое покрытие. Он в 1,9 раза устойчивее базового чугуна. В результате было определено, что металллокерамический порошок является наиболее привлекательным материалом для лазерного ремонта HCrWI. На рисунке 10 показана сравнительная твердость покрытий. Все испытанные на абразивный износ образцы с номерами индикации скорости износа показаны на рисунке 11.

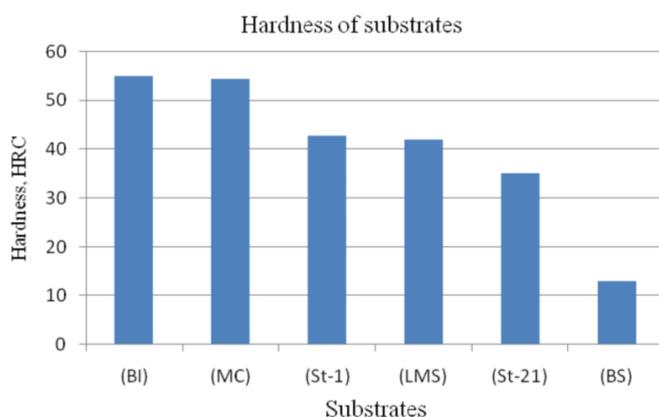


Рисунок 10 – Твердость базовых материалов и лазерно-плакированных поверхностей

Figure 10 - Hardness of base materials and laser-clad surfaces

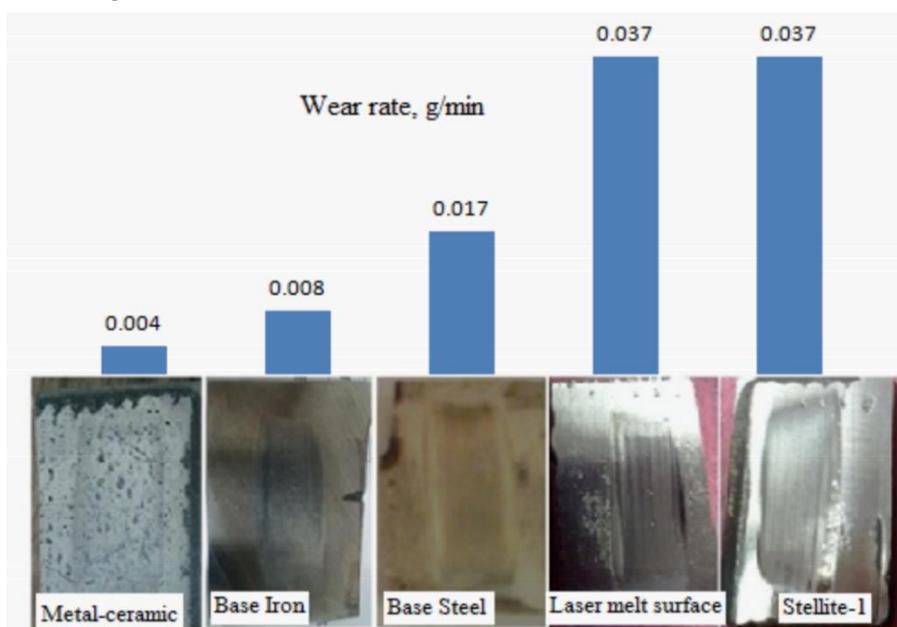


Рисунок 11 – Отметка абразивного износа и скорость износа на каждом образце

Figure 11 - Mark of abrasive wear and wear rate on each sample

Оценка изменений химических и механических свойств. Химический состав основного чугуна и стали и лазерно-осажденных порошков на

железной подложке приведены в таблице 1, а твердость базовых и лазерно-обработанных поверхностей образцов в таблице 2.

Таблица 1 – Химическое содержание основных материалов и лазерных покрытий, мас. %

Table 1 - Chemical content of basic materials and laser coatings, wt. %

Chemical elements	Base materials and laser coatings				
	Base materials		Coatings		
	HCWI	HMS	Metal-ceramic	Stellite-21	Stellite-1
Fe	65,1	84,6	31,9	3,0	2,12
Cr	30,9	0,72	19,6	27	27,8
Mn	1,06	13,6	0,50	1,23	
Ni	1,42	0,36	46,6	2,59	0,48
Co	0,08	–	0,6	59,4	63,1
Mo	–	–	–	5,3	–
W	–	–	–	–	5,5
V	0,23	0,14	–	–	–
Cu	–	0,09	0,5	–	–

Таблица 2 – Твердость базовых и лазерно-обработанных поверхностей образцов HCWI и HMS

Table 2 - Hardness of base and laser-treated surfaces of HCWI and HMS specimens

Coated surfaces	Hardness, HRC	Wear loss, G	Wear resistance	Rank by wear resistance
Base Iron (BI)	55	0,08	1	2
Metal-ceramic coating (MC)	54,4	0,042	1,9	1
Stellite-1 coating (St-1)	42,8	0,375	0,2	4
Laser glazed iron surface (LMS)	42	0,375	0,2	5
Stellite-21 coating (St-21)	35,2	0,42	0,19	6
Base steel (BS)	13	0,17	0,47	3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом исследовании анализировалось влияние лазерной обработки, такой как сварка, наплавка и поверхностная обработка расплавом, на микроструктуру, твердость и износостойкость высокохромистого белого чугуна, который используется для изготовления больших шламовых насосов в Монгольской горнодобывающей компании Erdenet. Основные выводы представлены следующим образом:

1) износостойкий высокохромистый белый чугун – это материал высокой твердости и абразивной износостойкости. Любое ремонтное действие для износостойкого белого железа должно обеспечивать твердость более 50 HRC и равную

или большую износостойкость, чем у базового чугуна. Лазерная наплавка только металлокерамического (по составу близкого к ИНКО-702) порошка могла бы удовлетворить вышеуказанное требование, но она дает чугуну поры и трещины. Дальнейшие исследования должны быть направлены на снижение образования трещин и пор в процессе обработки без влияния на перспективные износостойкие свойства металлокерамического покрытия;

2) износостойкий белый чугун может быть сварен лазером с предварительным нагревом. Тонкие срезы высокохромистого белого чугуна, сваренные с образцами чугуна и стали, не имеют дефектов в зоне сварки. Это позволило бы сде-

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ

лать наплавочную подложку для стального корпуса методом лазерной сварки.

3) Поверхностная обработка расплавом, вероятно, менее эффективна для высокохромистого белого чугуна из-за низких механических свойств расплавленной поверхности. Кроме того, высокая скорость охлаждения в процессе лазерного поверхностного плавления не позволяет аустенитной фазе трансформироваться и не обеспечивает термические условия, необходимые для желаемого образования вторичных карбидных осадков или мартенситных превращений.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

Эта работа была поддержана проектом «L2766-MON: Реформа высшего образования», финансируемым Азиатским банком развития и выполняемым Министерством образования, культуры, науки и спорта Монголии.

Информация об авторах

П. Батхуу – преподаватель кафедры «Машиностроение» Монгольского государственного университета науки и технологии.

Г. Омонцоо – к.т.н., зав. кафедрой «Машиностроение» Монгольского государственного университета науки и технологии.

Б. Д. Лыгденов – д.т.н., профессор Уханьского текстильного университета.

А. М. Гурьев – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Начертательная геометрия и графика» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Mahmoud, E.R.I. & El-Labban, H.F. (2014). Microstructure and Wear Behavior of TiC Coating Deposited on Spheroidized Graphite Cast Iron Using Laser Surfacing. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 4(5), 696-701.
2. Jiyoung, Yu, Taikmin, Jung, Sulae, Kim & Sehun, Rhee. (2011). Laser welding of cast iron and carburized steel for differential gear. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25 (11). 2887-2893.
3. Karantzalis, A.E., Lekatou, A. & Mavros., H. (2009). Microstructural modifications of as-cast high-chromium white iron by heat treatment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18(2), 174-181. DOI:10.1007/s12206-011-0809-x.
4. Laser welding cast iron and steel. Retrieved from <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-23/issue-5/departments/update/laser-welding-cast-iron-and-steel.html>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 01.05.2021; одобрена после рецензирования 24.05.2021; принята к публикации 28.05.2021.

The article was submitted to the editorial board on 01 May 21; approved after review on 24 May 21; accepted for publication on 28 May 21.

5. Dahmen, Martin, Janzen, Vitalij, Lindner, Stefan & Wagener, Rainer. (2014). Laser beam welding of ultra-high strength chromium steel with martensitic microstructure. *Conference: 8th International Conference on Photonic Technologies LANE*, (56), 525-534.

6. Nelson, G.D, Powell, G.L.F & Linton, V.M. (2006). Investigation of the Wear Resistance of High Chromium White Irons. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/267792427_Investigation_of_the_Wear_Resistance_of_High_Chromium_White_Irons.

7. Ocelík, V., Oliveira, U., Boer, M., & J.Th.M. de Hosson. (2007). Thick Co-based coating on cast iron by side laser cladding: Analysis of processing conditions and coating properties. *Surface & Coatings Technology*. 5875-5883.

8. Peng, Yi., Pengyun, Xu., Changfeng, Fan., Guanghui, Yang., Dan, Liu. & Yongjun, Shi. (2014). Microstructure Formation and Fracturing Characteristics of Grey Cast Iron Repaired Using Laser. *Scientific World Journal*, (16), 541569, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/541569>.

9. Purevdorj, B. (2011). Study of slurry pumps use in Erdenet Mining Company. *ICKI 2011. Proceeding of International Conference on Knowledge Based Industry*. Ulaanbaatar. July 6-8. 473-477. Retrieved from <http://mustinkor.wordpress.com/2011/05/13/icki2011-call-for-papers>.

10. Sudsakorn, Inthidech & Yasuhiro, Matsubara. (2008). Effect of Alloying Elements on Variation of Micro-Hardness during Heat Treatment of Hypoeutectic High Chromium Cast Iron. *Materials Transactions*, 49(10), 2322-2330. The Japan Institute of Metals.

11. Vilar, R., Colaco, R. & Almeida, A. (1995). Laser surface treatment of tool steels. *Optical and Quantum Electronics*, 27(12), 1273-1289. DOI:10.1007/BF00326481.

12. Wiengmoon, A., Pearce, J.T.H. & Chairuangri, T. (2011). Relationship between microstructure, hardness and corrosion resistance in 20 wt. % Cr, 27 wt. % Cr and 36 wt. % Cr high chromium cast irons. *Materials Chemistry and Physics*, (125), 739-748.

13. Wiengmoon, A. (2011). Carbides in High Chromium Cast Irons. DOI:10.14456/nuej.2011.6.

Information about the authors

P. Batkhuu – Lecturer at the Department of Mechanical Engineering, Mongolian State University of Science and Technology.

G. Omonzoo – Ph.D., Head, Department of "Machine-building", Mongolian State University of Science and Technology.

B. D. Lygdenov – Doctor of Technical Sciences, Professor of Wuhan Textile University.

A. M. Guryev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Descriptive Geometry and Graphics, Polzunov Altai State Technical University.