

УДК: 536.331, 673.1, 621.373.8, 621.9.048.7

ОТРАБОТКА РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО ОПЛАВЛЕНИЯ ГАЗО-ТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

© 2024 г. И. С. Бахтеев^{1,*}, К. И. Олейник², А. В. Шак¹,
Е. Л. Фурман¹, Р. М. Валиев¹, А. А. Вопнерук³

¹Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³АО «НПП «Машпром», Екатеринбург, Россия

*e-mail:igor.bakhteev@urfu.ru

Поступила в редакцию 01.07.2023

После доработки 12.07.2024

Принята к публикации 19.07.2024

Применение меди и ее сплавов для создания деталей металлургического оборудования сопряжено с увеличением абразивного износа и высокотемпературной коррозии. В связи с этим возникает необходимость нанесения защитного покрытия. В частности, для предотвращения износа и преждевременного выкрашивания металла медных фурм производят упрочнение поверхности покрытием из диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия методом газотермического напыления в атмосфере воздуха. Из-за разницы коэффициента термического расширения меди (при $T = 300$ К: 16.7 мкм/м °С и при $T = 750$ К: 19.7 мкм/м °С и ее низкой стойкости против газовой коррозии нанесение оксида циркония (производится по предварительно нанесенному промежуточному слою, играющему согласующую по коэффициенту термического расширения (КТР) роль между медной основой и керамическим покрытием. Кроме того, промежуточный слой защищает медь от газовой коррозии. При этом в качестве промежуточных слоев используются сплавы на основе никеля. Использование никеля в качестве основы промежуточных слоев обусловлено тем, что медь и никель образуют непрерывный ряд твердых растворов, таких как мельхиор или монель-металлподобные структуры. Это, в свою очередь, предполагает плавный переход теплофизических свойств от меди к никелевому сплаву. Для обеспечения повышенной адгезии переходного слоя с медью за счет увеличения площади взаимного контакта между медью и подслоем (кинжальное проплавление) и существенного повышения однородности материала промежуточного слоя из никелевого сплава применялось лазерное оплавление промежуточного подслоя (система Ni—В—Si) на лазерном комплексе на основе лазера ЛС-5 мощностью 5 кВт с роботом КУКА KR-60HA в атмосфере аргона. Для отработки режимов были проведены эксперименты на медных образцах плоской формы и тела вращения. Оптимальными параметрами процесса оплавления плоских образцов являлись: скорость обработки 33 мм/с, мощность от 400 до 3900 Вт, фокусное расстояние от 200 до 230 мм, шаг между треками: 0.25, 0.5 и 1 мм. Оптимальными параметрами процесса являлись:

мощность лазерного излучения 400—450 Вт, шаг обработки 0.125; 0.5, фокусное расстояние от 200 до 210 мм.

Ключевые слова: медные фурмы, технология нанесения покрытий, наплавка, плазменное напыление, лазерное легирование.

DOI: 10.31857/S0235010624040092

ВВЕДЕНИЕ

Медь и её сплавы широко применяются в качестве конструкционных материалов для изготовления узлов и деталей металлургического оборудования при производстве чугуна, стали и различных сплавов. В доменном производстве деталина основе меди подвержены воздействию высокой температуры, абразивному износу и высокотемпературной коррозии. Это приводит к длительному простоя металлургического оборудования металлургических комбинатов из-за недостаточной жаростойкости доменных фурм. [1–3]. Для предотвращения износа детали из защищают различными покрытиями в зависимости от условий их эксплуатации [4]. Эффективным решением задачи улучшения поверхностных свойств и, как следствие, увеличения долговечности деталей является нанесение защитных покрытий газо-термическими методами [5].

Одной из актуальных является задача нанесения качественных покрытий на поверхность фурмы доменной, внешний вид которой представлен на рис. 1.

Одним из материалов для решения этой задачи является диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия, который выступает в качестве теплозащитного(термобарьерного) слоя [5], защищающего также от воздействия агрессивной среды доменной печи с температурой, достигающей 2000°C, брызг металла и шлака.

Из-за разницы коэффициента термического расширения меди (при $T = 300 \text{ K}$: $16.7 \text{ мкм/м } ^\circ\text{C}$ и при $T = 750 \text{ K}$: $19.7 \text{ мкм/м } ^\circ\text{C}$ [6]) и диоксида циркония ($11.5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ [7]) и ее низкой стойкости против газовой коррозии нанесение оксида циркония (производится по преимуществу нанесением промежуточному слою или слоям, играющим согласующую по коэффициенту термического расширения (КТР) роль между медной основой и керамическим покрытием. Кроме того, промежуточные слои защищают медь от газовой коррозии вследствие проникновения через слой пористого теплозащитного керамического покрытия коррозионных агентов, включая кислород. В настоящее время для защиты рабочей поверхности фурм доменных часто применяют алитирование [6], осуществляемое методом термодиффузионного насыщения поверхностного слоя меди алюминием с получением на поверхности слоя из интерметаллидов, а именно, алюминидов меди,обладающего относительно высокими характеристиками стойкости против газовой коррозии. В данной работе, для защиты рабочей поверхности доменных фурм, предлагается значительно более эффективное газо-плазменное покрытие на основе стабилизированного диоксида циркония. При этом, в качестве промежуточных слоев используются сплавы на основе никеля. Одним из материалов для решения этой задачи является диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия, который выступает в качестве теплозащитного (термобарьерного) слоя [5], защищающего также

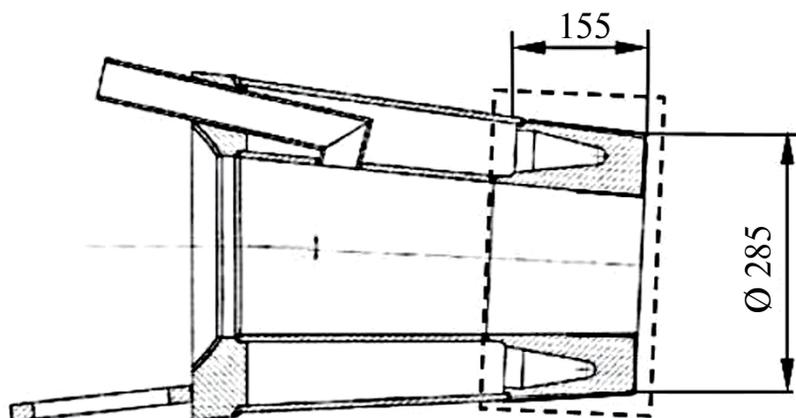


Рис. 1. Внешний вид фурмы доменной и зоны напыления.

от воздействия агрессивной среды доменной печи с температурой, достигающей 2000 °С, брызг металла и шлака.

Из-за разницы коэффициента термического расширения меди (при $t = 300 \text{ K}$: $16.7 \text{ мкм/м} \cdot \text{°C}$ и при $t = 750 \text{ K}$: $19.7 \text{ мкм/м} \cdot \text{°C}$ [7]) и диоксида циркония ($11.5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ [8]) и её низкой стойкости против газовой коррозии нанесение оксида циркония (производится по предварительно нанесенному промежуточному слою или слоям, играющим согласующую по коэффициенту термического расширения (КТР) роль между медной основой и керамическим покрытием. Кроме того, промежуточные слои защищают медь от газовой коррозии вследствие проникновения через слой пористого теплозащитного керамического покрытия коррозионных агентов, включая кислород.

Использование никеля в качестве основы промежуточных слоев обусловлено тем, что медь и никель образуют соединения, такие как мельхиор или монель-металл. Что позволяет получить химическое соединение разнородных материалов. Это, в свою очередь, предполагает плавный переход теплофизических свойств от слоя к слою. [9, 10]

Покрытия и технология их нанесения, предлагаемые для защиты рабочей поверхности фурм доменных, должны удовлетворять определенным требованиям по ряду характеристик:

Жаростойкостью

Покрытие должно обладать высокой стойкостью против газовой коррозии и термостабильностью, т.е. способностью сохранять свой состав и свойства в течение длительного времени.

Термостойкостью и жаропрочностью

Покрытие не должно растрескиваться при термоциклировании, а также иметь удовлетворительную механическую прочность при высоких температурах эксплуатации, что, кроме всего прочего, обеспечит высокую износостойкость покрытия в абразивных газовых потоках.

Технология нанесения покрытия

Как показали производственные испытания, покрытие разрушалось по согласующему подслою, по границе между медной основой и промежуточным жаростойким подслоем. Это, в свою очередь, является следствием низкой адгезии согласующего подслоя к медной основе, а также отсутствия заметной диффузии материала подслоя в медь. Очевидно, что технология нанесения должна обеспечивать надежное механическое сцепление нанесенного покрытия с медной основой.

При прочих равных условиях, например, соблюдении требования качественной предварительной подготовки медной основы перед нанесением жаростойкого подслоя, необходимо предпринять меры по радикальному улучшению состояния границы между медной основой и подслоем, а именно наличием на границе между медью и подслоем металлической химической связи и взаимной диффузии между основой и подслоем.

Нами предложено оплавливать промежуточный подслоя на никелевой основе (система Ni–B–Si) лазерным излучением вследствие ряда преимуществ: высокая стабильность и точность места нагрева, «кинжального» эффекта проплавления; низкого термического воздействия на обрабатываемую поверхность; минимального размера зоны термического влияния; низкой деформации обрабатываемых деталей.

При таких свойствах лазерного излучения оплавление переходного (согласующего) слоя может обеспечить очень высокую адгезию переходного слоя с медью также и за счет увеличения площади взаимного контакта между медью и подслоем (кинжальное проплавление) и существенного повышения однородности материала промежуточного слоя из никелевого сплава.

Для отработки режимов лазерного оплавления использовался комплекс на основе лазера IPG IPЭ-Полус ЛС-5 мощностью 5 кВт с роботом КУКА KR-60НА. Максимальная мощность лазера 5 кВт, длина волны 1070 ± 5 нм, модуляция лазерного излучения составляет 5 кГц, диаметр выходного оптического волокна 50 мкм, расходимость лазерного излучения $BPP < 2.5$ мм×мрад, фокусное расстояние лазерной головы 200 мм.

ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ И МАТЕРИАЛЫ.

Для нанесения как промежуточных слоев, так и керамического основного слоя из стабилизированного оксида циркония использовался метод газо-плазменного напыления. При плазменном напылении высокая температура плазменной струи позволяет производить напыление практически любых материалов, в том числе тугоплавких, таких как оксид циркония. Характеристики плазменной струи, в том числе и температуру, можно изменять в широком диапазоне [11]. Частицы порошка подаются в плазменную струю, где происходит их нагрев и ускорение. Далее частицы при ударе о поверхность обрабатываемой детали формируют на ней покрытие заданной толщины, представляющее собой наложение растекшихся или расплюсцившихся частиц. Некоторые характеристики напыления представлены в табл. 1

При напылении частицы плавятся, или переходят в пластичное состояние. При этом имеют место процессы испарения напыляемого материала, а также

Таблица 1. Режимы плазменного напыления

Используемый газ, соотношение	Ar = 30%, N ₂ = 70%
Рабочий ток, I _д	400 А
Напряжение дуги, U _д	65–70 В
Напряжение холостого хода, U _{х.х.}	130–140 В
Производительность	4–5 кг/час
Дистанция напыления для подслоя	100–120 мм
Диаметр плазменного пятна	10–15 мм

химического взаимодействия с нагретым газом и окружающей средой. Удар и деформация частиц приводят к их чрезвычайно быстрой кристаллизации и охлаждению со скоростями, достигающими 106–108 К/с [11]. Процесс плазменнонапыления проводился при режимах, отраженных в табл. 2.

Для отработки режимов используются образцы из меди М0, ГОСТ 859-2014. Для наплавки плоских образцов используется медные пластины, размером 120×30×8 мм, напыление деталей вращения – медный стержень, диаметром 30 мм и длиной 150 мм.

Для напыления используется порошок из самофлюсующегося сплава системы Ni–В–Si. Основой материала является Ni. Остальные элементы, такие как В, Si снижают температуру плавления, измельчают зерновую структуру и улучшают текучесть Ni [12–15].

ОПЛАВЛЕНИЕ ПОКРЫТИЯ НА МЕДНОМ СТЕРЖНЕ

Для отработки процесса оплавления и выявления возможных дефектов был выбран медный стержень с нанесенным покрытием. Для обработки покрытия на медном стержне была выбрана стратегия движения детали по спирали. Изменяемыми параметрами процесса являются мощность лазерного излучения, шаг обработки, изменения фокусного расстояния и количество проходов. Скорость обработки составляет 21 об/мин (33 мм/с). Для оплавления были выбраны режимы обработки образцов, представленные в табл. 2.

Ограничивающим параметром процесса является скорость вращения детали, являющегося ограничением комплекса лазерной обработки. Параметры процессаварьировались: по мощности лазерного излучения: 400–450 Вт; шаг обработки: 0.125 и 0.5; фокусное расстояние изменялось от 200 до 210 мм.

Из рисунков 3–5 (микрошлифы) видно, что при недостаточной мощности лазерного излучения покрытие оплавляется частично, образуя несплошности. Привысокой мощности появляется эффект кинжального проплавления и значительно повышается вероятность образования пор.

Лимитирующим параметром данного эксперимента является скорость вращения детали, ограниченная вращателем. Так же, при недостаточной мощности лазерного излучения появляются зоны не сплавления в покрытии и пористость. При увеличении мощности следует учитывать и увеличение фокусного расстояния для компенсации ширины трека за счет глубины проплавления.

Таблица.2. Номера образцов и режимы обработки

№ образца	Мощность лазерного излучения, Вт	Шаг обработки, мм	Проход	Фокусное расстояние $f=200$, мм	Скорость обработки, об/мин
1	400	0.5	1	0	
2	450	0.5	1	0	
3	450	0.5	1	0	
			2	+10 (210)	
4	400	0.5	1	0	21
			2	+10 (210)	
5	310	0.5	1	0	
6	350	0.5	1	0	
7	380	0.5	1	0	
8	310	0.125	1	0	

ОПЛАВЛЕНИЕ МЕДНЫХ ПЛАСТИН

Оплавление медного стержня характеризовалось не проплавлением, пористостью и большой глубиной трека. Решением данных проблем является переход от образцов стержневого типа на плоские из-за отсутствия лимитирующих скоростей движения робота (скорость вращения медного стержня).

Для оплавления покрытия на медных пластинах была выбрана линейная стратегия обработки (рис. 6, 7). Изменяемыми параметрами обработки являются: скорость, шаг между треками и фокусное расстояние. Скорость обработки лазерным излучением составляет 0.033 м/с (33 мм/с). Толщина покрытия составляет 0,2 – 0.3 мм. Зона образца была поделена на две части разных режимов обработки. Лазерное оплавление образца происходило линейно, построчно.

На рабочем ходу происходила обработка покрытия лазером справа налево создавая трек. После обработки система перемещения с отключенным лазером перемещалась вверх на величину расстояния между треками.

Удовлетворительное качество оплавленных покрытий имело место на скорости 33 мм/с. Варьирование мощности составляло от 400 до 3900 Вт, фокусное расстояние находилось в пределах от 200 до 230 мм. Так же был установлен различный шаг между треками: 0.25; 0.5 и 1 мм.

Очевидно, что процесс оплавления покрытия приводит к созданию структур, компонентами которых являются соединения, входящие в состав как основы, так и покрытия. Напыляемый газотермическим методом материал согласующего с медью подслоя на основе никеля повышает коррозионную стойкость материалов и их жаропрочность [16]. Как следствие, крайне вероятно образование твердых растворов, интерметаллидных структур и сплавов на основе меди, таких как сплав меди и никеля (монель металл подобная структура), интерметаллиды Cu_3V_2/Ni_3V_2 , $Cu_{23}C_6/Ni_{23}C_6$ [17]. Независимыми параметрами процесса, которые определяют микроструктуру и однородность плакирующего слоя являются мощность лазерного луча и скорость процесса, отражательная



Рис. 2. Стратегия обработки медного стержня по спиральной траектории.

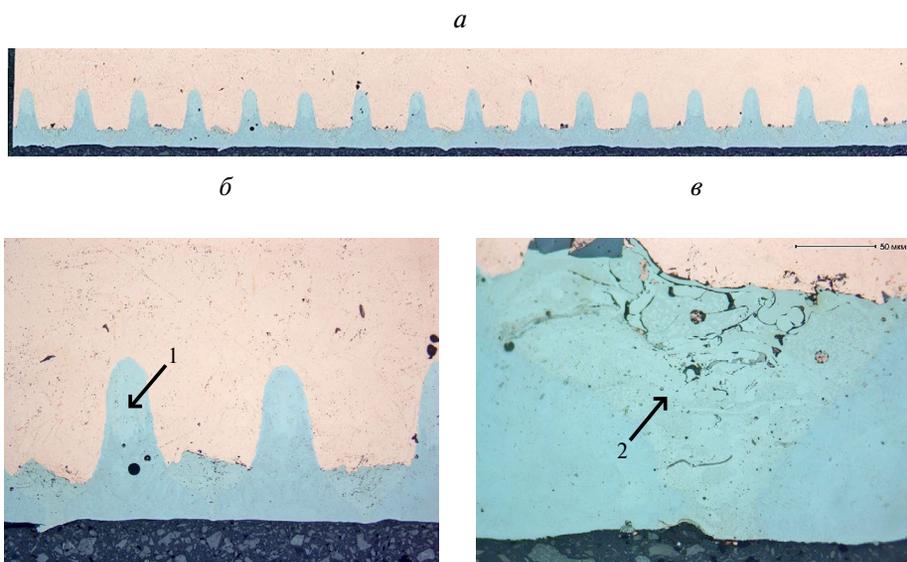


Рис. 3. Микрошлиф образца, режим 1. *а* – панорамный снимок; *б*, *в* – дефекты покрытия; *1* – пористость внутри зоны сплавления, *2* – неоплавленное покрытие.

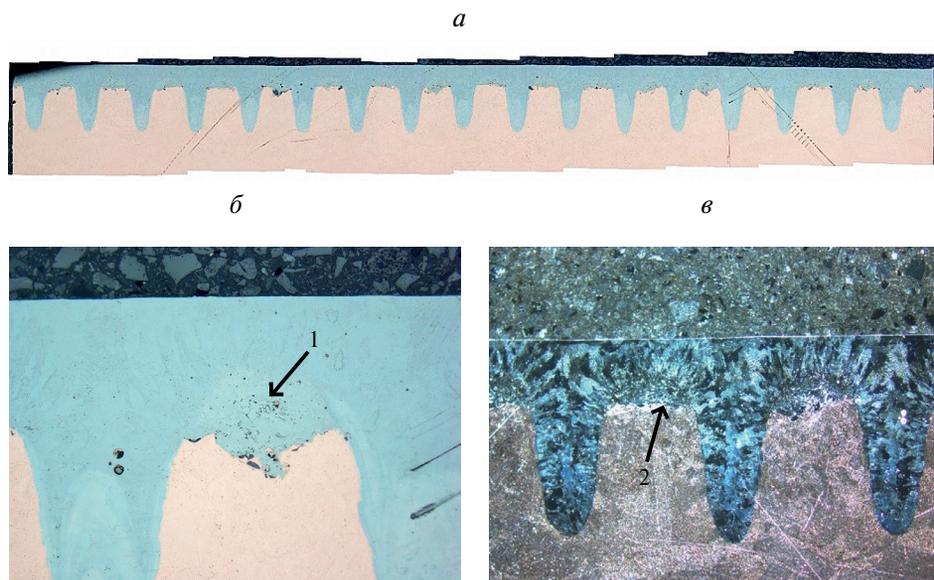


Рис. 4. Микрошлиф образца, режим 1. *a* – панорамный снимок; *б* – дефекты покрытия; *в* – снимок в режиме косого света; 1 – пористость внутри зоны сплавления, 2 – не оплавленное покрытие.

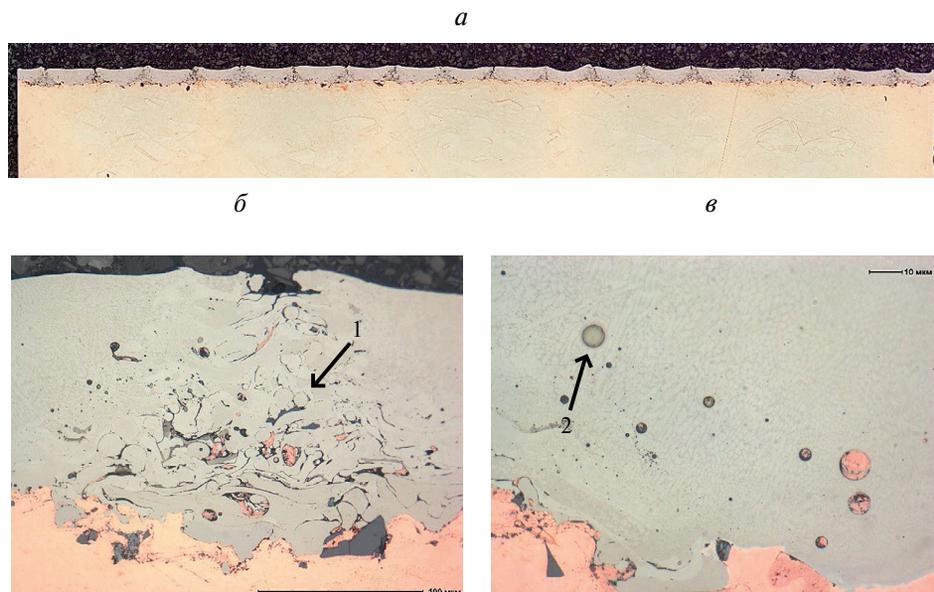


Рис. 5. Микрошлиф образца, режим 5. *a* – панорамный снимок; *б*, *в* – дефекты покрытия. 1 – не оплавленное покрытие, 2 – пористость оплавленного слоя.

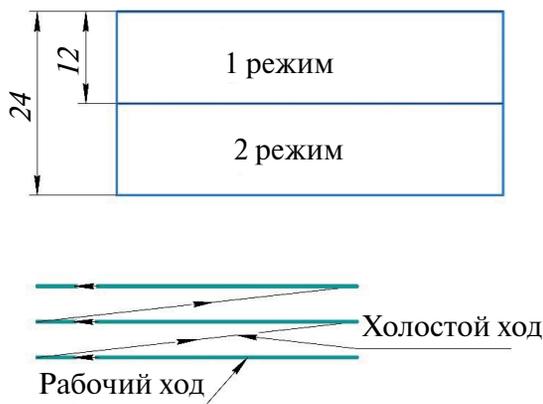


Рис. 6. Размеры обрабатываемой области и стратегия обработки.



Рис. 7. Модель обработки.

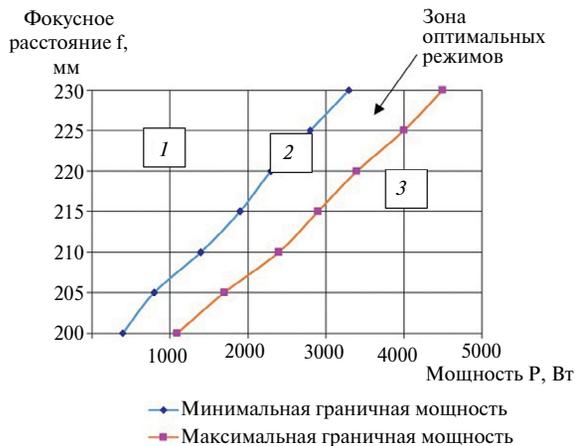


Рис. 8. Показательная диаграмма технологических параметров для оплавления самофлюсующегося покрытия системы Ni–В–Si.

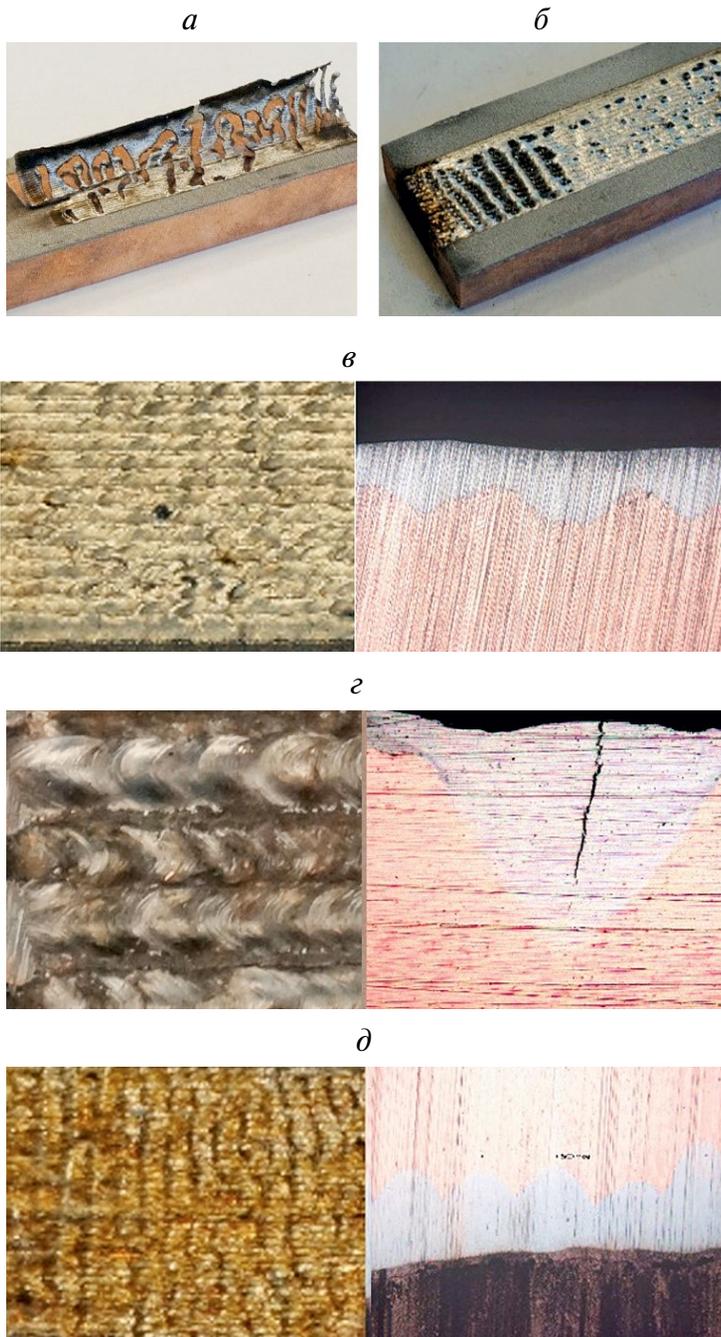


Рис. 9. Внешний вид образцов: а, б – зона 1; в, г – зона 2; д, е – зона 3.

Таблица 3. Характеристика образцов

Зона 1 Рис. 4а	При недостаточной мощности лазерного излучения верхний слой покрытия оплавляється. Верхние слои предыдущих треков оплавляются с последующими. Под воздействие термических напряжений покрытие отслаивается от основы.
Зона 1. Рис. 4б	При увеличении фокусного расстояния и недостаточной мощности оплавление происходит не полностью, оставляя несплошность оплавленного слоя и поры.
Зона 2 Рис. 4в	Равномерное распределение валиков без пористости и отслоений.
Зона 3 Рис. 4г	При взаимодействии лазерного излучения с покрытием происходит активное перемешивание и взаимодействие компонентов покрытия с основой, с последующим упрочнением и вследствие этого появлением трещин.
Зона 3 Рис. 4д	При критическом увеличении мощности происходит активное взаимодействие компонентов покрытия с основой с образованием интерметаллидов и боридов меди. Из-за внутренних дефектов покрытия (пористости) оно обретает волнистую структуру.

способность поверхности, метод его нанесения и температурные свойства основы так и плакирующего слоя [18].

Диаграмма, демонстрирующая влияние параметров лазерной обработки на качество полученного покрытия приведена на рис 8.

Данную диаграмму можно разделить на три зоны. Для зоны 1 имеет место отслаивание покрытия от подложки вследствие неполного проплавления покрытия неудовлетворительного смачивания расплавом материала покрытия поверхностимеди и, как следствие, недостаточного развития химической металлургической связи между материалом покрытия и основы. К такому результату приводит недостаточная мощность лазерного излучения или её плотность. Зона 2 – оптимальные режимы обработки, без серьёзного взаимодействия никеля (и компонентов покрытия) с медной основой. Зона 3 характеризуется смешиванием меди с никелем и, вероятно, образованием подобной монель металлу или мельхиороструктуры, а также образованием интерметаллидов что приводит к упрочнению материала и появлению трещин в зоне оплавления, появлению «волн» на поверхности из-за дефектов в покрытии (пористости). Внешний вид образцов представлен на рис. 9, а описание их дефектов представлено в табл. 3.

Для качественного оплавления необходимо выполнения таких факторов как оптимальная мощность, фокусное расстояние и величина шагов треков. Недостаточная мощность лазерного излучения так и увеличение фокусного расстояния неминуемо ведет к дефектам, таким как несплошность оплавленного слоя и отрыв покрытия от основы. Так же негативно влияет и критическое увеличение мощности, и увеличение фокусного расстояния, приводящее к упрочнению оплавленного слоя и появлению трещин, а также увеличению волнистости поверхности, что может создать проблемы для последующих слоев напыления. Так же значительный вклад в бездефектное оплавление вносит шаг между треками, который может приводить к появлению не оплавленных частей покрытия.

ВЫВОДЫ

Разработан технологический процесс нанесения защитного покрытия для медных фурм, применяемых в доменном производстве.

Доказана необходимость лазерного оплавления промежуточного слоя (система Ni-B-Si), обеспечивающего повышенную (в сравнении с покрытиями, полученными без процесса оплавления) адгезию переходного слоя с медью за счет увеличения площади взаимного контакта между медью и подслоем (кинжальное проплавление) и существенного повышения однородности материала промежуточного слоя из никелевого сплава, образование твердых растворов, интерметаллидных структур и сплавов на основе меди, таких как сплав меди и никеля (монель-металлоподобная структура), интерметаллиды Cu_3B_2/Ni_3B_2 , $Cu_{23}C_6/Ni_{23}C_6$.

Определены оптимальные параметры процесса оплавления плоских образцов: скорость обработки 33 мм/с, мощность от 400 до 3900 Вт, фокусное расстояние от 200 до 230 мм, шаг между треками: 0.25, 0.5 и 1 мм.

Определены оптимальные параметры процесса оплавления вращающихся образцов: мощность лазерного излучения 400–450 Вт, шаг обработки 0.125; 0.5, фокусное расстояние от 200 до 210 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жук В.И. Анализ тепловой работы воздушных фурм доменной печи // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2002. № 12. С. 25–30.
2. Li G., Huang P., Cheng P., Wu W., Zhang Y., Pang Zh., Xu Q., Zhu K., Zou X., Li R. // Engineering Failure Analysis. 2023. 153. 107537 <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.1075373>.
3. Chai Y.-F., Zhang J., Ning X.-J., Wei G.-Y., Chen Y.-T. // High Temperature Materials and Processes. 2015. № 4. <https://doi.org/10.1515/htmp-2014-0149>
4. Олейник К.И., Бахтеев И.С., Русских А.С., Осинкина Т.В., Жилина Е.М. Наплавление многокомпонентных сплавов, содержащих тугоплавкие металлы // Расплавы. 2024. № 1. С. 106–113.
5. Маншилин А.Г., Складановский Е.Н., Нецветов В.И., Туник О.А. Дутьевая фурма доменной печи и способ нанесения защитного покрытия на дутьевую фурму доменной печи. Патент РФ №2235789 РФ. Заяв. 04.11.2002. Опубл. 27.05.2004.
6. Самедов Э.М. Повышение износостойкости воздушных фурм доменных печей путем создания защитного алюминиевого газотермического покрытия. Дисс...канд. техн. наук: 05.02.2013. Москва, 2007.
7. Материалы в машиностроении. Машиностроение: Энциклопедия / Под ред. Фролова К.В. М.: Машиностроение, 1994.
8. Комоликов Ю.И., Кашеев И.Д., Хрустов В.Р. // Новые огнеупоры. 2016. № 9. С. 59–62. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2016-9-59-62>
9. Huang, Hongshou & Singh, Surinder & Juhasz, Albert & Roccisano, Anthony & Ang, Andrew & Stanford, Nikki. (2023). Influence of Copper Distribution in Thermally Sprayed Cu-Bearing Coatings on Corrosion and Microbial Activity. 10.2139/ssrn.4613064.
10. Hu, Dengwen & Yan, Liu & Chen, Hui & Liu, Jin & Mengchao, Wang & Deng, Lin. (2021). Microstructure and properties of Ta-reinforced NiCuBSi + WC composite coating

- deposited on 5Cr5MoSiV1 steel substrate by laser cladding. *Optics & Laser Technology*. 142. 107210.10.1016/j.optlastec.2021.107210.
11. Павлов, А. Ю. Основы газотермического напыления защитных покрытий : учебное пособие / А. Ю. Павлов, В. В. Овчинников, А. Д. Шляпин. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. - 300 с. - ISBN 978-5-9729-0500-3.
 12. Gu, D & Meiners, Wilhelm & Wissenbach, K & Poprawe, Reinhart. (2012). Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*. 57. 133-164. 10.1179/1743280411Y.0000000014.
 13. Kefeni K., Msagati T., Alfred M., Mamba B. Ferrite nanoparticles: Synthesis, characterisation and applications in electronic device // *Materials Science and Engineering: B*. 2017. 215. P. 37–55.
 14. Wang T., Zhang J., Zhang Y., Chen S., Luo Z., Wu J., Zhu L., Lei J. Improving wear and corrosion resistance of LDEDed CrFeNi MEA through addition of B and Si // *J. Alloy. Compd*. 2023. 968. 172223.
 15. Lyu Y., Sun Y., Yang Y. Non-vacuum sintering process of WC/W2C reinforced Nibased coating on steel // *Metals and Materials International*. 2016. 22. P. 311–318.
 16. Kılıçay K., Buytoz S., Ulutan M. Microstructural and tribological properties of induction clad NiCrBSi/WC composite coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2020. 397. 125974.
 17. Логинов Ю.Н. Медь и деформируемые медные сплавы: Учеб. пособие. УПИ. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004.
 18. Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Лаппо С.И. Борсодержащие стали и сплавы. М.: Металлургия, 1986.
 19. О. Г. Девойно. Технология формирования износостойких покрытий на железной основе методами лазерной обработки. Минск: БНТУ, 2020.

DEVELOPMENT OF LASER FELLING MODES OF GAS-THERMAL COATING

**Bakhteev I. S.^{1,*}, Oleinik K.I.², Shak A. V.¹, Furman E. L.¹, Valiev R. M.¹,
Vopneruk A. A.³**

¹*Ural Federal University named after the B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia*

²*Institute of Metallurgy, Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia*

³*NPP «Mashprom», Russia, 620143, Yekaterinburg, Russia*

**e-mail:igor.bakhteev@urfu.ru*

The use of copper and its alloys to create parts for metallurgical equipment is associated with an increase in abrasive wear and high-temperature corrosion. In this regard, there is a need to apply a protective coating. In particular, to prevent wear and premature chipping of the metal of copper tuyeres, the surface is hardened with a coating of zirconium dioxide stabilized with yttria oxide by thermal spraying in an air atmosphere. Due to the difference in the coefficient of thermal expansion of copper (at $T = 300$ K: $16.7 \mu\text{m}/\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}$ and at $T = 750$ K: $19.7 \mu\text{m}/\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}$) and its low resistance to gas corrosion, the application of zirconium oxide (produced by a preapplied intermediate layer that plays a role in matching the coefficient of thermal expansion (CTE) between the copper base and the ceramic coating. In addition, the intermediate layer protects copper from gas corrosion. In this case,

The use of copper and its alloys to create parts for metallurgical equipment is associated with an increase in abrasive wear and high-temperature corrosion. In this regard, there is a need to apply a protective coating. In particular, to prevent wear and premature chipping of the metal of copper tuyeres, the surface is hardened with a coating of zirconium dioxide stabilized with yttria oxide by thermal spraying in an air atmosphere. Due to the difference in the coefficient of thermal expansion of copper (at $T = 300$ K: $16.7 \text{ pm/m } ^\circ\text{G}$ and at $T = 750$ K: $19.7 \text{ pm/m } ^\circ\text{G}$) and its low resistance to gas corrosion, the application of zirconium oxide (produced by a pre-applied intermediate layer that plays a role in matching the coefficient of thermal expansion (CTE) between the copper base and the ceramic coating. In addition, the intermediate layer protects copper from gas corrosion. In this case, nickel-based alloys were used as intermediate layers. The use of nickel as the basis of intermediate layers is due to the fact that copper and nickel form a continuous series of solid solutions, such as cupronickel or monel metal-like structures. This, in turn, assumes a smooth transition of thermophysical properties from copper to nickel alloy. To ensure increased adhesion of the transition layer to copper by increasing the area of mutual contact between copper and the sublayer (dagger penetration) and significantly increasing the homogeneity of the material of the intermediate layer made of a nickel alloy, laser melting of the intermediate sublayer (Ni–B–Si system) was used on a laser complex based on laser LS-5 with a power of 5 kW with a KUKA KR-60HA robot in an argon atmosphere. To test the modes, experiments were carried out on copper samples of a flat shape and a body of rotation. The optimal parameters for the process of melting flat samples were: processing speed 33 mm/s, power from 400 to 3900 W, focal length from 200 to 230 mm, pitch between tracks: 0.25, 0.5 and 1 mm. The optimal parameters for the process of melting rotating samples were: laser radiation power 400–450 W, processing step 0.125; 0.5, focal length from 200 to 210 mm.

Keywords: copper tuyeres, coating technology, cladding, plasma spraying, laser doping, laser infusion.

REFERENCES

1. Zhuk V.I. Analiz teplovoy raboty vozdukhnykh furn domennoy pechi [Analysis of thermal performance of blast furnace air tuyeres] // Vestnik priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2002. № 12. P. 25–30. [In Russian].
2. Li G., Huang P., Cheng P., Wu W., Zhang Y., Pang Zh., Xu Q., Zhu K., Zou X., Li R. // Engineering Failure Analysis. 2023. **153**. 107537
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107537>
3. Chai Y.-F., Zhang J., Ning X.-J., Wei G.-Y., Chen Y.-T. // High Temperature Materials and Processes. 2015. № 4.
<https://doi.org/10.1515/htmp-2014-0149>
4. Oleynik K.I., Bakhteyev I.S., Russkikh A.S., Osinkina T.V., Zhilina Ye.M. Naplavlennyye mnogo- komponentnykh splavov, soderzhashchikh tugoplavkiye metally [Surfacing of multicomponent alloys containing refractory metals] // Rasplavy. 2024. № 1. P 106–113. [In Russian].
5. Manshilin A.G., Skladanovskiy Ye.N., Netsvetov V.I., Tunik O.A. Dut'yevaya furma domennoy pechi i sposob naneseniya zashitnogo pokrytiya na dut'yevuyu furmu domennoy pechi [Blast furnace tuyere and method for applying a protective coating to a blast

- furnace tuyere]. Patent RF №2235789. Applied 04.11.2002. Published 27.05.2004. [In Russian].
6. Materialy v mashinostroyeni. Mashinostroyeniye. Entsiklopediya [Materials in mechanical engineering. Mechanical engineering. Encyclopedia] / Ed. Frolov K.V. / M.: Mashinostroyeniye, 1994. [In Russian].
 7. Komolikov Yu.I., Kashcheyev I.D., Khrustov V.R. // *Novyye ognepury*. 2016. № 9. P. 59–62. [In Russian].
<https://doi.org/10.17073/1683-4518-2016-9-59-62>
 8. Samedov E.M. Povyseniye iznosostoykosti vozdushnykh furn domennykh pechey putem sozdaniya zashchitnogo aluminiovogo gazotermicheskogo pokrytiya [Increasing the wear resistance of blast furnace air tuyeres by creating a protective aluminum thermal coating]. Dissertation of a candidate of technical sciences. 05.02.2013. Moscow, 2007. [In Russian].
 9. Huang H., Singh S., Juhasz A., Roccisano A., Ang A., Stanford N. // SSRN. 2023. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4613064>
 10. Hu D., Yan L., Chen H., Liu J., Mengchao W., Deng L. // *Optics & Laser Technology*. 2021. **142**. 107210.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107210>.
 11. Pavlov A.Yu., Ovchinnikov V.V., Shlyapin A.D. *Osnovy gazotermicheskogo napyleniya zashchitnykh pokrytiy: ucheb. Posobiye* [Fundamentals of thermal spraying of protective coatings: textbook. Manual.]. Moskva; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2020. [In Russian].
 12. Gu D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanism // *International Materials Reviews*. 2012. **57**. P. 133–164.
 13. Kefeni K., Msagati T., Alfred M., Mamba B. Ferrite nanoparticles: Synthesis, characterisation and applications in electronic device // *Materials Science and Engineering: B*. 2017. **215**. P. 37–55.
 14. Wang T., Zhang J., Zhang Y., Chen S., Luo Z., Wu J., Zhu L., Lei J. Improving wear and corrosion resistance of LDEDed CrFeNi MEA through addition of B and Si // *J. Alloy. Compd.* 2023. 968. 172223.
 15. Lyu Y., Sun Y., Yang Y. Non-vacuum sintering process of WC/W2C reinforced Ni-based coating on steel // *Metals and Materials International*. 2016. **22**. P. 311–318.
 16. Krlrgay K., Buytoz S., Ulutan M. Microstructural and tribological properties of induction clad NiCrBSi/WC composite coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2020. **397**. 125974.
 17. Loginov Yu.N. *Med' i deformiruyemye mednyye splavy: ucheb. posobiye*. [Copper and wrought copper alloys: study guide]. UPI. Yekaterinburg: UGTU-UPI, 2004. [In Russian].
 18. Lyakishev N.P., Pliner Yu.L., Lappo S.I. *Borsoderzhashchiye stali i splavy* [Boron-containing steels and alloys]. M.: Metallurgiya, 1986. [In Russian].
 19. Devoyno O.G. *Tekhnologiya formirovaniya iznosostoykikh pokrytiy na zheleznoy osnove metodami lazernoy obrabotki* [Technology of formation of wear-resistant coatings on an iron base by laser processing methods]. Minsk: BNTU, 2020. [In Russian].