

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-109-118

¹Макаров А.В., ²Кудряшов А.Е., ³Невежин С.В., ³Герасимов А.С., ^{1,*}Владимиров А.А.,
¹Авдеева Н.Е.¹Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»²НУЦ СВС МИСиС-ИСМАН Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»,³ООО «ВВСТ»

*E-mail: vladimirov.al.an@yandex.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РОЛИКОВ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Аннотация. В статье рассмотрена возможность применения технологии лазерной наплавки для восстановления роликов машин непрерывного литья заготовок. Кратко представлены эффективные методы восстановительной наплавки роликов машин непрерывного литья заготовок. Представлено описание процесса формирования покрытий для роликов методами восстановления лазерной и электродуговой наплавками. Описано лабораторное оборудование для подготовки экспериментальных образцов для металлографических исследований. Описана методика подготовки лабораторных образцов покрытий, полученных лазерной и электродуговой наплавками. Электродуговую наплавку образцов из стали 20X13 осуществляли порошковой проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС. Лазерную наплавку образцов из стали 20X13 осуществляли экономнолегированным порошком на основе железа Fe-Co-Cr-Mo. Исследованы структура и состав наплавленных покрытий методами электродуговой и лазерной наплавки для роликов машин непрерывного литья заготовок. Изучены механические свойства нанесенных покрытий для роликов. Исследованы трибологические характеристики, нанесенных методами электродуговой и лазерной наплавки покрытий. Для оценки свойств покрытий выполнен структурный и фазовый анализ, определены коэффициенты трения и интенсивность изнашивания. Представлены графические изображения структур наплавленных слоев. Представлены зависимости коэффициента трения наплавленных слоев и проанализировано их различие для каждого из методов наплавки. Предложено объяснение различий в свойствах покрытий, основанное на анализе условий их формирования. Произведена оценка эффективности применения метода лазерной наплавки для восстановления деталей металлургического оборудования.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, ролики, износ, восстановление, лазерная наплавка, электродуговая наплавка, износостойкость.

Введение. Прогресс в сталеплавильном производстве тесно связан с внедрением машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Планируется в 2020 году увеличить долю разливки стали на МНЛЗ до 98–99 % [1].

Важными элементами криволинейных МНЛЗ являются роликовые проводки.

Ролики МНЛЗ подвержены воздействию следующих основных факторов: термической усталости металла, вызванной высокотемпературным термоциклированием; механическому воздействию со стороны литой заготовки, обусловленному ее весом и нагрузкой от действия ферростатического давления; высокотемпературному окислению и коррозии.

Для изготовления роликов МНЛЗ в отечественном машиностроении, как правило, используют стали жаропрочных марок, такие как 20X13, 25X1M1Ф, 40XГНМ, 24ХМ1Ф [2, 3].

В связи с чем, работы по увеличению стойкости роликов являются актуальными.

Одним из эффективных направлений повышения стойкости роликов является применение восстановительной наплавки. Наиболее распространенной является метод электродуговой наплавки под флюсом.

Для осуществления восстановительной наплавки роликов МНЛЗ применяются сплошные и порошковые проволоки (ленты), такие как Св-20X13, ПП-Нп-25Х5ФМС, ASM 4603SA, Велтек Н470С и др. [4–10]. На сегодняшний день нет единого решения вопроса о выборе системы легирования проволок для восстановительной наплавки [11]. Условия производства, как правило, уникальны для каждого конкретного предприятия и определяются наличием того или иного оборудования в ремонтных цехах, условиями эксплуатации восстановленных изделий, опытом и квалификацией производственного персонала.

Для металлургических предприятий актуальной задачей является не только восстановле-

ние геометрических параметров изношенных поверхностей роликов, но и создание таких эксплуатационных характеристик поверхностного слоя, которые позволят существенно повысить межремонтный интервал указанных деталей при сохранении экономической целесообразности их восстановления.

В последние годы металлургическими предприятиями проводятся исследования возможности применения для восстановления роликов новых эффективных технологий и материалов, например, плазменно-порошковой наплавки, лазерной наплавки, высокоскоростного напыления, напыления с последующим оплавлением, опыт использования которых описан в работах [12–17].

В 2014 г. компаниями Precitec и Laser Line совместно с Swansea University по заказу сталелитейной компании Tata Steel Strip Products UK были исследованы возможности лазерной наплавки для восстановления и упрочнения узлов металлургического и вспомогательного оборудования. Осуществленные комплексные исследования структуры, физико-механических и служебных свойств покрытий, а также результаты промышленных испытаний роликов МНЛЗ,

восстановленных по технологии лазерной наплавки порошковым материалом, разработанным Swansea University, показали существенное увеличение их стойкости по сравнению с базовой технологией восстановления – электродуговой наплавкой под флюсом. Стойкость роликов, наплавленных под флюсом, составила 63000 т стали, в то время как для роликов, наплавленных лазером, она составила 118000...148000 т [18].

НИТУ «МИСиС» совместно с компанией ООО «ВВСТ» был проведен комплекс исследований, направленных на изучение возможности восстановления роликов МНЛЗ (рис. 1), изготовленных из стали 20Х13 с лазерной наплавкой из экономнолегированного порошкового материала на основе железа. В настоящее время изношенные поверхности данных роликов восстанавливаются методом электродуговой наплавки проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС. Перед авторами ставится задача повысить износостойкость наплавленных поверхностей ролика в два раза и более при сохранении экономической целесообразности.

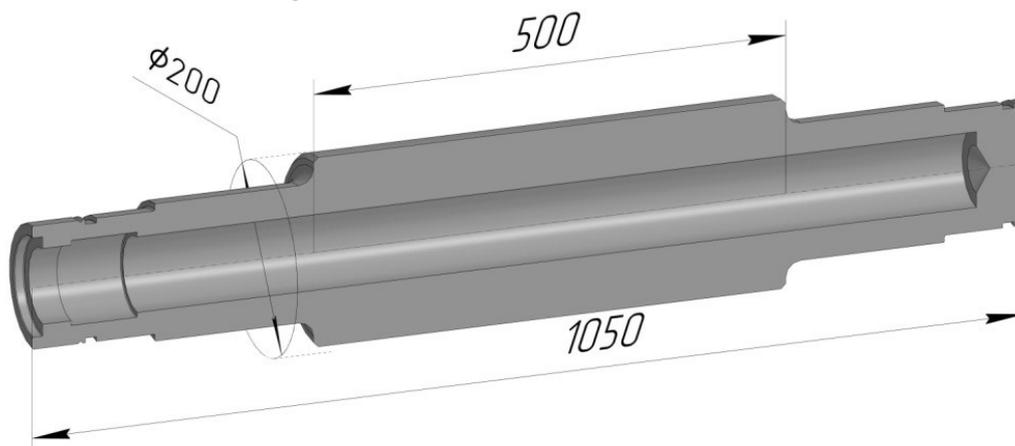


Рис. 1. Ролик третьей секции МНЛЗ №2 АО «Оскольский электрометаллургический комбинат»

Целью данной работы являлось изучение структуры, состава и свойств слоев, полученных по технологиям лазерной и электродуговой наплавки, а также оценка эффективности лазерной наплавки.

Материалы и методы. Лабораторные исследования проводились на образцах (подложках) для наплавки из стали 20Х13 в состоянии поставки. Размер образцов – $\text{Ø}60 \times 60$ мм.

Методом электродуговой наплавки в 3 слоя под флюсом марки АН-20С на образцы наплавливали порошковую проволоку ПП-Нп-25Х5ФМС. Наплавка производилась на установке УСН 60-550/1400 SAW. Отпуск образцов для снятия остаточных напряжений производился в муфельной электрической печи ЭКПС-10 при температуре

400 °С в течение 3 часов с последующим охлаждением вместе с печью.

На образцы методом лазерной наплавки наносился порошок экономнолегированный (ПЭл1) на основе железа с системой легирования Fe-Co-Cr-Mo. Последующая термическая обработка не проводилась.

Образцы разрезали на многофункциональном отрезном станке LC-250. Резка осуществлялась отрезным диском из абразива Al_2O_3 марки Struers 50A30. Размер образцов для исследований $21 \times 21 \times 5$ мм.

Шлифы готовили на полировальной машине Struers Roto Pol-21 в автоматическом режиме. При шлифовании применялись последовательно шлифовальные бумаги Struers с зернистостью

карбида кремния (SiC) 120, 220, 500, 800, 1200, 4000.

Полирование образцов проводили с помощью суспензии из коллоидного оксида кремния O-PS для финишной полировки с размером зерна 0,04 мкм.

Твердость образцов с наплавленными слоями измерялась согласно ГОСТ 9013-59 на твердомере ТР 5006.

Микроструктура наплавленных слоев исследовалась на оптическом микроскопе Neophot-32 и сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N, оснащенный рентгеновским энергодисперсионным спектрометром NORAN.

Рентгеноструктурный фазовый анализ образцов с наплавленными слоями проводился на дифрактометре ДРОН-4 с использованием монокроматического Co-K α излучения (длина волны 1.79021 Å) и Cu-K α излучения (длина волны 1.54178 Å). Съемка проводилась в режиме шагового сканирования в интервале углов $2\Theta = 10^\circ \dots 130^\circ$, шаг съемки составлял $0,1^\circ$, экспозиция – 2...4 с.

Обработка спектров проводилась при помощи программ качественного PHAN и количественного анализа PHAN%, разработанных в НИТУ «МИСиС».

Трибологические свойства образцов с наплавленными слоями оценивали в соответствии с международными стандартами ASTM G

99-959 и DIN 50324 на высокотемпературной машине трения High temperature Tribometer CSM Instruments по схеме pin-on-disk. В качестве контртела применяли шарик из Al₂O₃ диаметром 6 мм. Линейная скорость скольжения образцов выбрана равной 10 см/с, нагрузка – 5 Н. Зависимость коэффициента трения трущейся пары от длины пробега контртела, равной 500 м, строилась на компьютере с помощью программного обеспечения InstrumX.

Температура трибологических испытаний составляет 500 °С, что соответствует температуре на поверхности роликов МНЛЗ №2 АО «ОЭМК», измеренной тепловизором SDS Hot Find-DXT [2].

Профиль дорожки износа исследовали на оптическом профилометре Veeco Wyco NT 1100.

Скорость износа определяли по формуле:

$$W = s \cdot L / (H \cdot l) \quad (1)$$

где W – скорость износа, мм³·Н⁻¹·м⁻¹; L – длина окружности, мм; s – площадь сечения износа канавки, мм²; H – нагрузка, Н; l – путь трения, м.

Результаты и обсуждение. Установлено, что твердость наплавленных слоев составила 43 HRC при лазерной наплавке материала ПЭл1 и 50 HRC – при электродуговой наплавке под флюсом материала ПП-Нп-25Х5ФМС.

Структура наплавленного слоя после лазерной наплавки приведена на рис. 2а, состав представлен в табл. 1.

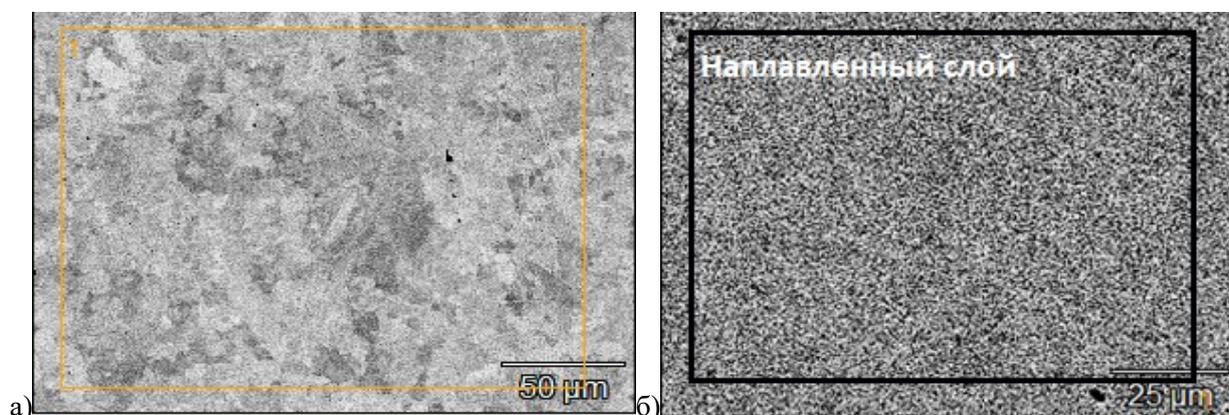


Рис. 2. Структура наплавленного слоя: микрорентгеновый спектральный анализ: а – лазерная наплавка материала ПЭл 1; б – электродуговая наплавка под флюсом ПП-Нп-25Х5ФМС

Таблица 1

Элементный состав слоя наплавленного лазером слоя ПЭл1 (рис. 2а)

Область	C-K	O-K	Cr-K	Fe-K	Co-K	Mo-L
1	1,8	14,1	13,1	67,9	2,2	0,9

На рис. 2б приведена структура наплавленного слоя ПП-Нп-25Х5ФМС, а в табл. 2 приведен его элементный состав.

Фазовый состав наплавленных слоев приведен в табл. 3. Выявлено, что наплавленные слои состоят из двух фаз, основной фазой в образцах α -Fe (мартенсит).

Таблица 2

Элементный состав слоя наплавленного ПП-Нп-25Х5ФМС (рис. 2б)

Область	O-K	Cr-K	Mn-K	Fe-K
1	27,8	0,9	0,5	70,7

Фазовый состав наплавленных слоев

Наплавленный материал	Фаза	Структурный тип	Символ Пирсона	Весовая доля, %	Периоды, Å
ПЭл1	α -Fe	type A2	cI2/1	82	a = 2.880
	γ -Fe	type A1	cF4/1	18	a = 3.593
ПП-Нп-25Х5ФМС	α -Fe	type A2	cI2	98	a= 2.872
	γ -Fe	type A1	cF4	2	a= 3.587

Коэффициент трения $K_{тр}$ в паре образец наплавленный лазером материал ПЭл1 – контртело после 500 м испытаний составляет 0,59 (рис. 3а), в паре образец 25Х5ФМС – контртело – 0,5 (рис. 3б), при этом для покрытия, наплавленного лазером, не наблюдается скачкообразных изменений коэффициента трения, фиксируемых для образца, полученного при помощи дуговой наплавки. Вероятно, больший коэффициент трения для покрытия, наплавленного лазером, обусловлен образованием на его поверхности более

тонкой пленки оксидов хрома при повышенной температуре. В то же время, на поверхности покрытия, полученного при помощи дуговой наплавки, при повышенной температуре вероятнее всего образуется толстая пленка оксидов железа (вюстит, магнетит, гематит), что обусловлено различиями в системе легирования наплавляемых материалов. Толстые оксидные пленки могут выступать в роли твердой смазки и непосредственно влиять на величину коэффициента трения.

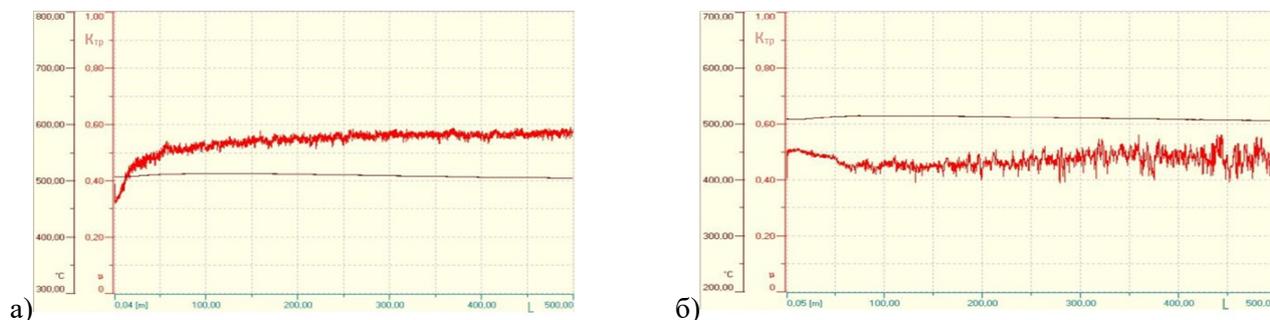


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения наплавленных слоев от длины пробега контртела: а – лазерная наплавка материала ПЭл1; б – электродуговая наплавка 25Х5ФМС

Профиль дорожки износа образца из ПЭл1 и ее трехмерное изображение приведены на рис. 4. Скорость износа образца составляет $58,9 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

наплавленным слоем составляет $292,5 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Профиль дорожки износа образца образца 25Х5ФМС и ее трехмерное изображение приведены на рис. 5. Скорость износа образца с

Как видно, образец с лазерной наплавкой материала ПЭл 1, характеризуются более низкой в 4,95 раза скоростью износа по сравнению с образцом с наплавленным слоем порошковой проволокой 25Х5ФМС.

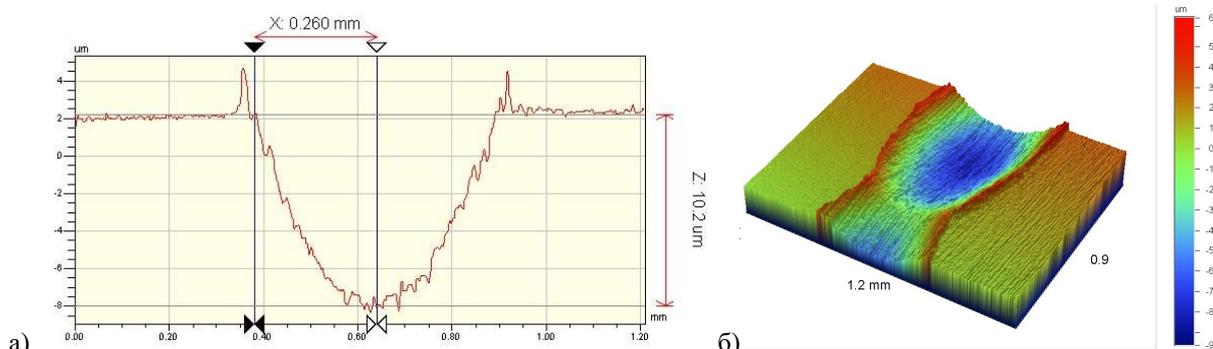


Рис. 4. Профиль дорожки износа образца с наплавленным слоем ПЭл1 (а) и ее трехмерное изображение (б)

Вероятно, более низкая скорость износа покрытий обусловлена особенностями лазерной

наплавки. Так, точная дозировка энергии лазерного излучения позволяет обеспечить степень пе-

ремешивания наплавляемого материала с основным не более 3...7 % при величине зоны термического влияния не более 500 мкм, а также обеспечить сверхвысокие скорости охлаждения и

кристаллизации наплавляемого металла, более 103...104 °C/с.

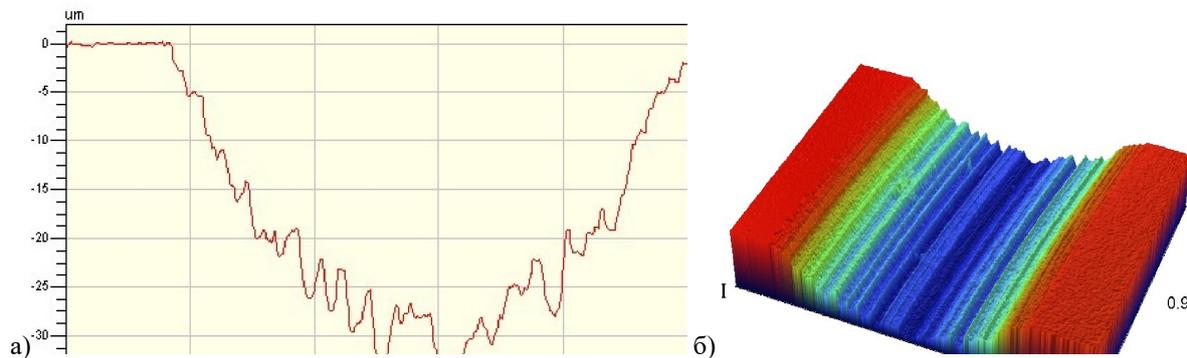


Рис. 5. Профиль дорожки износа образца с наплавленным слоем ПП-Нп-25Х5ФМС (а) и ее трехмерное изображение (б)

Скорость кристаллизации наплавляемого металла определяет его фазовый и структурный состав, а, следовательно, и стойкость к износу, как структурно-чувствительную характеристику. В частности, более высокие скорости кристаллизации обуславливают повышение дисперсности образующихся упрочняющих фаз, определяющих износостойкость покрытий.

Локальное поле напряжений, существующее вокруг частиц упрочняющих фаз, затрудняет движение дислокаций при пластической деформации, предшествующей разрушению металлической матрицы твердого раствора, тем самым затрудняя ее изнашивание [19]. Предположительно, более высокая дисперсность упрочняющих фаз, образующихся при лазерной наплавке покрытий, позволяет им лучше выполнять функции барьеров и противостоять износу.

Кроме того, для разработанного экономно-легированного порошка на основе железа реализован эффект, полученный в работе [20] для дорогостоящих порошков на основе никеля. В частности, за счет легирования порошка кобальтом увеличена стойкость получаемых покрытий к высоко-температурному износу и механизм износа изменен с абразивного, наблюдаемого для образца, наплавленного под флюсом, на адгезионный для образца наплавленного лазером (см. профиль дорожки износа образца на рис. 5 и 6 соответственно).

По результатам лабораторных исследований было принято решение восстановить опытную партию роликов третьей секции МНЛЗ №2 АО «ОЭМК» методом лазерной наплавки материала ПЭЛ1 на оборудовании и по технологии, разработанной ООО «ВВСТ».

При помощи лазерной наплавки с использованием волоконного лазера и шестиосевого промышленного робота в автоматизированном режиме были получены покрытия толщиной ~3,5 мм (рис. 6), последующая термическая обработка не проводилась. Вследствие малой шероховатости покрытия припуск на обработку составил 0,5 мм (при наплавке под флюсом 3...6 мм), шероховатость поверхности после механической обработки $Ra = 3,2$ мкм, трещин и отслоений не обнаружено.

За счет снижения времени на термическую и механическую обработку технология лазерной наплавки позволяет, в сравнении с базовым вариантом наплавки под флюсом, снизить затраты на ремонт роликов МНЛЗ примерно на 50 % при возможности выполнения многократного ремонта.

В настоящее время ролики МНЛЗ восстановленные методом лазерной наплавки материала ПЭЛ1 готовятся к промышленным испытаниям на третьей секции МНЛЗ №2 АО «Оскольский электрометаллургический комбинат».

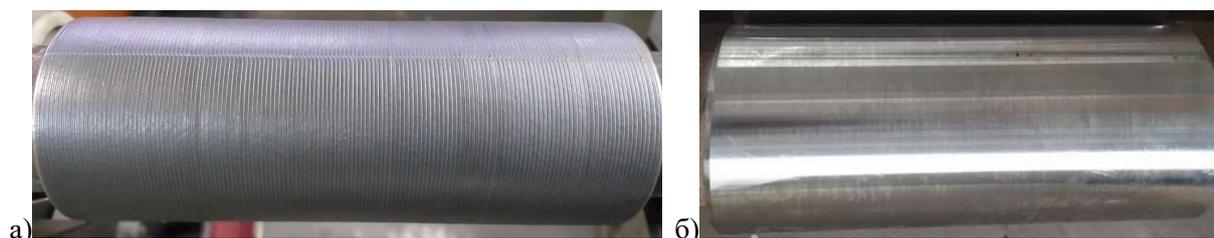


Рис. 6. Ролик третьей секции МНЛЗ №2 АО «ОЭМК», восстановленные методом лазерной наплавки материала ПЭЛ1: а – после наплавки, б – после механической обработки

Выводы.

1. Установлено, что образцы покрытий, полученные при помощи дуговой и лазерной наплавки, имеют различные коэффициенты трения при повышенной температуре (500 °С) и сопоставимых нагрузках (5 Н) и скоростях скольжения (10 см/с) – 0,5 и 0,59 соответственно. Вероятно, это обусловлено различиями в системе легирования наплавляемых материалов. Толстые оксидные пленки железа, образующиеся на поверхности покрытия, наплавленного дугой и порошковой проволокой 25Х5ФМС, могут выступать в роли твердой смазки и непосредственно влиять на величину коэффициента трения, в то время как более тонкие оксидные пленки хрома, образующиеся на поверхности покрытия, наплавленного лазером из порошка ПЭл1 (Fe-Co-Cr-Mo) – нет.

2. Образец с лазерной наплавкой из материала ПЭл1, характеризуется более низкой в 4,95 раза скоростью износа по сравнению с образцом с наплавленным порошковой проволокой 25Х5ФМС покрытием. По-видимому, это обусловлено сверхвысокими скоростями охлаждения и кристаллизации металла, наплавляемого лазером и повышением дисперсности образующихся упрочняющих фаз, определяющих износостойкость покрытий.

3. За счет легирования порошка кобальтом увеличена стойкость получаемых покрытий к высокотемпературному износу и механизм износа изменен с абразивного, наблюдаемого для образца, наплавленного под флюсом, на адгезионный для образца, наплавленного лазером, о чем свидетельствует профиль дорожки износа образцов.

4. При помощи волоконного лазера и 6-осевого промышленного робота в автоматизированном режиме были получены покрытия толщиной ~3,5 мм на сторону без последующей термической обработки. Вследствие малой шероховатости покрытия припуск на обработку составил 0,5 мм (при наплавке под флюсом 3...6 мм), шероховатость поверхности после механической обработки $Ra = 3,2$ мкм. Было установлено, что за счет снижения времени на термическую и механическую обработку технология лазерной наплавки позволяет, в сравнении с базовым вариантом наплавки под флюсом, существенно сократить затраты на ремонт роликов МНЛЗ при возможности выполнения многократного ремонта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегия развития черной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года (утв. приказом Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г. № 839).

2. Репников Н.И., Макаров А.В., Кудряшов А.Е., Бойко П.Ф., Мамкин В.А. Определение перспективных наплавочных материалов для восстановления роликов вторичного охлаждения МНЛЗ с использованием структурных и трибологических методов исследований // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы тринадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Т. 1. 2016. С. 280–284.

3. Кирчу И.Ф., Степанова Т.В., Супрун М.В. Опыт применения роликов из стали 25Х2Г1АФ на слябовой МНЛЗ // Сталь. 2015. № 1. С. 68–72.

4. Красильников С.Г., Окунев Ю.В., Пантелеймонов В.А., Шаповалов К.П., Орлов Л.Н., Голякевич А.А. Применение порошковой проволоки ООО «ТМ ВЕЛТЕК» в производстве металлоконструкций ЗАО «НКМЗ» // Сварщик. 2007. № 1 (53). С. 6–9.

5. Березовский А.В. Наплавочные материалы для упрочнения роликов МНЛЗ // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы I международной интерактивной научно-практической конференции. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. Ч. 1. С. 34–37.

6. Мазур Н.В., Подосян А.А., Огарков Н.Н. Исследования свойств материалов роликов МНЛЗ // Процессы и оборудование металлургического производства: Межрегион. Сб. науч. тр. / Под ред. Железкова О.С. Вып. 7. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». 2006. С. 48–53.

7. Огарков Н.Н., Мазур Н.В., Завьялова Н.В. Определение срока службы роликов МНЛЗ // Процессы и оборудование металлургического производства: Межрегион. Сб. науч. тр. / Под ред. Железкова О.С. Вып. 7. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». 2006. С. 53–57.

8. Огарков Н.Н., Суфьянов Д.В., Мазур Н.В. Исследование качества наплавленного слоя после электроконтактной обработки // Современные технологии обработки металлов с применением инструментов из сверхтвердых материалов – новые технологии и направления. Труды 5-го Международного семинара: Сб. науч. тр. Вып. 1. Магнитогорск ГОУ ВПО «МГТУ». 2007. С. 53–58.

9. Макаров А.В., Кудряшов А.Е., Владимиров А.А., Титова А.П. Применение наплавочных материалов, модифицированных тугоплавкими компонентами, для восстановления роликов машин непрерывного литья заготовок // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 8 (81). С. 41–48.

10. Коротков В.А., Михайлов И.Д., Бабайлов Д.С. Исследование наплавленного слоя опорных

роликов машин непрерывного литья заготовок // Сварочное производство. 2007. № 1. С. 30–33.

11. Якушин Б.Ф., Цирков П.А. Особенности технологии дуговой наплавки роликов для установок непрерывной разливки сталей // Сварка и диагностика. 2009. № 5. С. 35–40.

12. Ибатов М.К., Кривцова О.Н., Жунусов Ж.А. Выбор эффективного способа поверхностной обработки упрочнения роликов ролганга // Вестник Карагандинского государственного индустриального университета. 2015. № 4. С. 25–29.

13. Filatov S.V., Dagman A.I., Karavaev V.N. et al. The NLMK's Experience of Operating Slab CCM Molds with Improved Wall Design. Metallurgist 62. 2018. Pp. 58–61.

14. Kadoshnikov V.I., Platov S.I., Terent'ev V.D. et al. Improving the durability of the initial sections of continuous casters Nos. 2 and 3 at the Magnitogorsk Metallurgical Combine. Metallurgist 51. 2007. Pp. 216–219.

15. Kudryashov A.E., Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Kiryukhantsev-Korneev F.V., Sheveiko A.N., Shvyndina N.V. Application of electrospark deposi-

tion and modified SHS electrode materials to improve the endurance of hot mill rolls. Part 2. Structure and properties of the formed coatings. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2019. № 55. Pp. 502–513.

16. Sanz A. New coatings for continuous casting rolls. Surface and Coatings Technology. 2004. № 177–178. Pp. 1–11.

17. Lester S., Longfield N., Griffiths J., Cocker J., Staudenmaier C., Broadhead G. New Systems for Laser Cladding. Laser Technik Journal. 2013. 10. 10.1002/latj.201390037.

18. Ray A. et al. Laser cladding of continuous caster lateral rolls: Microstructure, wear and corrosion characterisation and on-field performance evaluation. Journal of Materials Processing Technology. 2014. № 214. Pp. 1566–1575.

19. Крагельский И.В. Трение и износ. Беларусь: Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого, 2008. 224 с.

20. Wang K. et al. Effect of Cobalt on Microstructure and Wear Resistance of Ni-Based Alloy Coating Fabricated by Laser Cladding. Metals 7. 2017. № 551. Pp. 1–12.

Информация об авторах

Макаров Алексей Владимирович, кандидат технических наук. Заведующий кафедрой технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта. E-mail: makarov.av@mail.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Россия, 309516 г. Старый Оскол, Белгородская обл. м-н Макаренко 42.

Кудряшов Александр Евгеньевич, кандидат технических наук. Ведущий научный сотрудник НУЦ СВБ МИСиС-ИСМАН. E-mail: aekudr@yandex.ru. Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». Россия, 119049, г. Москва, Ленинский проспект, 4.

Невежин Станислав Владимирович, кандидат технических наук. Заместитель генерального директора. E-mail: snevezhin@gmail.com. ООО «ВВСТ». Россия, 142108, г. Подольск, Бородинский бульвар, 2.

Герасимов Андрей Сергеевич, Генеральный директор. E-mail: vvstmsk@mail.ru. ООО «ВВСТ». Россия, 142108, г. Подольск, Бородинский бульвар, 2.

Владимиров Александр Андреевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта. E-mail: vladimirov.al.an@yandex.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Россия, 309516 г. Старый Оскол, Белгородская обл. м-н Макаренко 42.

Авдеева Нелли Егоровна, аспирант кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта. E-mail: nelli_avdeeva@mail.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Россия, 309516 г. Старый Оскол, Белгородская обл. м-н Макаренко 42.

Поступила 27.05.2020

© Макаров А.В., Кудряшов А.Е., Невежин С.В., Герасимов А.С., Владимиров А.А., Авдеева Н.Е., 2020

¹Makarov A.V., ²Kudryashov A.E., ³Nevezhin S.V., ³Gerasimov A.S., ^{1,*}Vladimirov A.A.,
¹Avdeeva N.E.

¹Star Oskol Technological Institute. A.A. Ugarova (branch) of the National Research Technological University "MISiS" Russia

²NUTS SHS MISiS-ISMAN National Research Technological University "MISiS"

³LLC "VVST",

*E-mail: vladimirov.al.an@yandex.ru

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF LASER SURFACE TECHNOLOGY FOR RESTORING ROLLERS OF CONTINUOUS CASTING MACHINES

Abstract. The article considers the possibility of applying laser cladding technology to restore the rollers of continuous casting machines. Effective methods of restorative surfacing of rollers of continuous casting machines are briefly presented. The paper describes the process of forming coatings for rollers using laser and electric arc surfacing methods. Laboratory equipment for preparing experimental samples for metallographic studies is described. The method of preparation of laboratory samples of coatings obtained by laser and electric arc surfacing is described. Electric arc surfacing of 20X13 steel samples is performed with PP-NP-25X5FMS powder wire. Laser surfacing of samples made of 20X13 steel is performed with an economically alloyed powder based on Fe-Co-Cr-Mo iron. The structure and composition of surfaced coatings by electric arc and laser surfacing methods for rollers of continuous casting machines are studied. The mechanical properties of the applied coatings for the rollers are studied. Tribological characteristics of coatings applied by electric arc and laser surfacing methods are investigated. To evaluate the properties of coatings, a structural and phase analysis is performed, and the friction coefficients and wear rate are determined. Graphic images of the deposited layer structures are presented. The dependences of the friction coefficient of the deposited layers are presented and their differences for each of the surfacing methods are analyzed. An explanation of the differences in the properties of coatings based on the analysis of their formation conditions is offered. The efficiency of using the laser surfacing method for restoring parts of metallurgical equipment is evaluated.

Keywords: continuous casting machine, rollers, wear, recovery, laser surfacing, electric arc surfacing, wear resistance.

REFERENCES

1. The development strategy of ferrous metallurgy in Russia for 2014–2020 and for the long term until 2030 (approved by order of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation dated May 5, 2014 No. 839) [Strategija razvitiya chernoj metallurgii Rossii na 2014–2020 gody i na perspektivu do 2030 goda (utv. prikazom Ministerstva promyshlennosti i trgovli RF ot 5 maja 2014 g. №839)]. (rus)

2. Repnikov N.I., Makarov A.V., Kudryashov A.E., Boyko P.F., Mamkin V.A. Identification of promising surfacing materials for the restoration of secondary cooling rollers for continuous casting machines using structural and tribological research methods [Opredelenie perspektivnykh naplavochnykh materialov dlja vosstanovleniya rolikov vtorichnogo ohlazhdeniya MNLZ s ispol'zovaniem strukturnykh i tribologicheskikh metodov issledovanij]. Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo: materialy trinadcatoj Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. 2016. Vol. 1. Pp. 280–284. (rus)

3. Kirchu I.F., Stepanova T.V., Suprun M.V. The experience of using rollers from steel

25Cr2Mn1NW on slab caster [Opyt primeneniya rolikov iz stali 25H2G1AF na sljabovoj MNLZ]. Steel. 2015. No. 1. Pp. 68–72. (rus)

4. Krasilnikov S.G., Okunev Yu.V., Panteleimonov V.A., Shapovalov K.P., Orlov L.N., Golyakovich A.A. The use of flux-cored wire of TM VELTEK LLC in the production of metal structures of NKMZ CJSC [Primenenie poroshkovoj provoloki OOO «TM VELTEK» v proizvodstve metallokonstrukcij ZAO «NKMZ»]. Welder. 2007. No. 1 (53). Pp. 6–9. (rus)

5. Berezovsky A.V. Surfacing materials for hardening castors CCM [Naplavochnye materialy dlja uprochneniya rolikov MNLZ]. Innovacii v materialovedenii i metallurgii: materialy I mezhdunarodnoj interaktivnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta. 2012. Vol. 1. Pp. 34–37. (rus)

6. Mazur N.V., Podosyan A.A., Ogarkov N.N. Researches of material properties of CCM rollers [Issledovaniya svoystv materialov rolikov MNLZ]. Processy i oborudovanie metallurgicheskogo proizvodstva: Mezhhregion. Sb. nauch. tr. Pod red. Zhelezkova O.S. Vyp. 7. Magnitogorsk: GOU VPO «MGU». 2006. Pp. 48–53. (rus)

7. Ogarkov N.N., Mazur N.V., Zavyalova N.V. Determination of the service life of CCM rollers

[Opredelenie sroka sluzhby rolikov MNLZ]. Processy i oborudovanie metallurgicheskogo proizvodstva: Mezhtregion. Sb. nauch. tr. Pod red. Zhelezkova O.S. Vyp. 7. Magnitogorsk: GOU VPO «MGU» 2006. Pp. 53–57. (rus)

8. Ogarkov N.N., Sufyanov D.V., Mazur N.V. Investigation of the quality of the deposited layer after electrical contact processing [Issledovanie kachestva naplavlennogo sloja posle jelektrokontaktoj obrabotki]. *Sovremennye tehnologii obrabotki metallov s primeneniem instrumentov iz sverhtverdykh materialov – novye tehnologii i napravleniya*. Trudy 5-go Mezhdunarodnogo seminar: Sb. nauch. tr. Vyp. 1. Magnitogorsk GOU VPO «MGU». 2007. Pp. 53–58. (rus)

9. Makarov A.V., Kudryashov A.E., Vladimirov A.A., Titova A.P. The use of surfacing materials modified by refractory components for the restoration of rollers of continuous casting machines [Primenenie naplavochnykh materialov, modifitsirovannykh tugoplavkimi komponentami, dlja vostanovleniya rolikov mashin nepreryvnogo lit'ja zagotovok]. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*. 2019. No. 8 (81). Pp. 41–48. (rus)

10. Korotkov V.A., Mikhailov I.D., Babaylov D.S. Investigation of the deposited layer of the support rollers of continuous casting machines [Issledovanie naplavlennogo sloja opornykh rolikov mashin nepreryvnogo lit'ja zagotovok]. *Welding production*. 2007. No. 1. Pp. 30–33. (rus)

11. Yakushin B.F., Tsirkov P.A. Features of technology for arc surfacing of rollers for continuous casting plants [Osobennosti tehnologii dugovoj naplavki rolikov dlja ustanovok nepreryvnoy razlivki staley]. *Welding and diagnostics*. 2009. No. 5. Pp. 35–40. (rus)

12. Ibatov M.K., Krivtsova O.N., Zhunusov Zh.A. The choice of an effective method of surface treatment of hardening rollers roller table [Vybor jeffektivnogo sposoba poverhnostnoj obrabotki up-

rochnenija rolikov rol'ganga]. *Bulletin of the Karaganda State Industrial University*. 2015. No. 4. Pp. 25–29. (rus)

13. Filatov S.V., Dagman A.I., Karavaev V.N. et al. The NLMK's Experience of Operating Slab CCM Molds with Improved Wall Design. *Metallurgist* 62. 2018. Pp. 58–61.

14. Kadoshnikov V.I., Platov S.I., Terent'ev V.D. et al. Improving the durability of the initial sections of continuous casters Nos. 2 and 3 at the Magnitogorsk Metallurgical Combine. *Metallurgist* 51. 2007. Pp. 216–219.

15. Kudryashov A.E., Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Kiryukhantsev-Korneev F.V., Sheveiko A.N., Shvyndina N.V. Application of electrospark deposition and modified SHS electrode materials to improve the endurance of hot mill rolls. Part 2. Structure and properties of the formed coatings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2019. No. 55. Pp. 502–513.

16. Sanz A. New coatings for continuous casting rolls. *Surface and Coatings Technology*. 2004. No. 177–178. Pp. 1–11.

17. Lester S., Longfield N., Griffiths J., Cocker J., Staudenmaier C., Broadhead G. New Systems for Laser Cladding. *Laser Technik Journal*. 2013. 10. 10.1002/latj.201390037.

18. Ray A. et al. Laser cladding of continuous caster lateral rolls: Microstructure, wear and corrosion characterisation and on-field performance evaluation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. No. 214. Pp. 1566–1575.

19. Kragelsky I.V. Friction and wear. [Trenie i iznos]. Belarus: Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems named after V.A. White, 2008. 224 p. (rus)

20. Wang K. et al. Effect of Cobalt on Microstructure and Wear Resistance of Ni-Based Alloy Coating Fabricated by Laser Cladding. *Metals* 7. 2017. No. 551. Pp. 1–12.

Information about the authors

Makarov, Alexey V. PhD. Head of the Department of Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering V.B. Crash. E-mail: makarov.av@mail.ru. Starooskolsky Technological Institute. A.A. Ugarova (branch) of the National Research Technological University "MISiS" Russia, 309516 Stary Oskol, Belgorod Region. m. Makarenko, 42.

Kudryashov, Alexandr E. PhD. Leading Researcher, Scientific and Research Center of the Internal Intelligence Service of MISiS-ISMAN. E-mail: aekudr@yandex.ru. National Research Technological University "MISiS". Russia, 119049, Moscow, Leninsky Prospekt, 4.

Nevezhin, Stanislav V. PhD. Deputy CEO. Email: snevezhin@gmail.com. LLC "VVST", Russia, 142108, Podolsk, Borodinsky Boulevard, 2.

Gerasimov, Andrey S. General Director. E-mail: vvstmsk@mail.ru. LLC "VVST", Russia, 142108, Podolsk, Borodinsky Boulevard, 2.

Vladimirov, Alexandr A. PhD, Assistant. E-mail: vladimirov.al.an@yandex.ru. Starooskolsky Technological Institute. A.A. Ugarova (branch) of the National Research Technological University "MISiS" Russia, 309516 Stary Oskol, Belgorod Region. m. Makarenko, 42.

Avdeeva, Nelly E. Postgraduate student. E-mail: nelli_avdeeva@mail.ru. Starooskolsky Technological Institute. A.A. Ugarova (branch) of the National Research Technological University "MISIS" Russia, 309516 Stary Oskol, Belgorod Region. m. Makarenko, 42.

Received 27.05.2020

Для цитирования:

Макаров А.В., Кудряшов А.Е., Небезин С.В., Герасимов А.С., Владимиров А.А., Авдеева Н.Е. Перспективы применения технологии лазерной наплавки для восстановления роликов машин непрерывного литья заготовок // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 7. С. 109–118. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-109-118

For citation:

Makarov A.V., Kudryashov A.E., Nevezhin S.V., Gerasimov A.S., Vladimirov A.A., Avdeeva N.E. Prospects for the application of laser surface technology for restoring rollers of continuous casting machines. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 7. Pp.109–118. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-109-118