

УДК 621.793

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2024-164-4-8-14>

КОМБИНИРОВАННОЕ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ С ЛАЗЕРНЫМ ОПЛАВЛЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ ПАЛЬЦА ГИДРОЦИЛИНДРА ОПРЫСКИВАТЕЛЯ БЛ-3000

В.С. Голубев,*ведущ. науч. сотр. отдела индукционных технологий и термической обработки ФТИ НАН Беларуси,
канд. ф.-м. наук***И.И. Вегера,***зав. отделом индукционных технологий и термической обработки ФТИ НАН Беларуси, канд. техн. наук***Л.М. Акулович,***профессор каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор***В.Г. Мисько,***ст. преподаватель каф. технологий и организации технического сервиса БГАТУ*

В статье приведены результаты экспериментальных исследований технологии комбинированного упрочнения поверхности пальца гидроцилиндра штангового опрыскивателя БЛ-3000. На рабочую поверхность пальца из стали 45 магнитно-электрическим способом наносили покрытие из порошка на основе железа Fe-Ti, которое оплавливали в среде аргона с использованием иттербиевого волоконного лазера ЛС-2 с выходной мощностью 2 кВт. В зоне оплавления наблюдалась сплошная мелкодисперсная структура, переходящая в зоне закалки в мелкоигольчатую мартенситно-аустенитную. Микротвердость у поверхности покрытия составила 7500 МПа, а на глубине 500 мкм – 4500 МПа. После лазерной обработки уменьшаются разнотолщинность покрытия и шероховатость поверхности.

Ключевые слова: лазерная обработка, магнитно-электрический способ, покрытие, поверхностный слой, микроструктура, микротвердость.

The paper presents the results of experimental studies of the technology of combined surface hardening of the hydraulic cylinder pin of the boom sprayer BL-3000. A coating of Fe-Ti iron-based powder was applied magnetically to the working surface of a finger made of 45 steel, which was melted in an argon medium using an LS-2 ytterbium fiber laser with an output power of 2 kW. A continuous fine-dispersed structure was observed in the melting zone, turning into a fine-needle martensitic-austenitic one in the quenching zone. The microhardness at the coating surface was 7,500 MPa, and at a depth of 500 microns – 4,500 MPa. After laser processing, coating thickness variation and surface roughness are decreased.

Key words: laser treatment, magnetic-electric method, coating, surface layer, microstructure, microhardness.

Введение

Большинство деталей посевных и уборочных машин, а также почвообрабатывающих агрегатов (диски сошников сеялок, зубья бороны и т.п.) в процессе работы подвержены воздействию агрессивных сред. При этом многие из таких деталей работают без смазки и (или) в контакте с материалами, содержащими абразивные частицы. Потеря работоспособности узлов с такими деталями происходит преимущественно (около 80 %) в связи с изнашиванием контактирующих поверхностей [1-2], которые первыми воспринимают эксплуатационную нагрузку (давление, нагрев, химические воздействия и т.п.). Восстановление изношенных поверхностей таких деталей экономически оправдано за счет их повторного использо-

вания [3]. При восстановлении поверхностей с применением упрочняющих технологий ресурс деталей увеличивается в 1,2÷2,5 раза. Поэтому актуальным является не только восстановление изношенных поверхностей деталей машин, но и их упрочнение при изготовлении.

Машиностроение располагает разнообразными технологиями поверхностного упрочнения, основанными на нанесении покрытий и (или) изменении состояния (модификации) поверхности. Для восстановления изношенных поверхностей деталей наиболее востребованными являются технологии нанесения покрытий, поскольку они позволяют обеспечивать требуемые размеры и геометрическую форму поверхностей, а также соответствие физико-механических свойств поверхностных слоев эксплуа-

тационным требованиям путем осаждения на них материалов, отличающихся от свойств основы. Вместе с тем ни один из известных способов нанесения покрытий не может претендовать на универсальность, что вызвано многообразием условий работы машин и соответствующих им видов изнашивания. Поэтому перспективными являются технологии, основанные на сочетании различных видов высокоэнергетических и механических воздействий на упрочняемую поверхность [4, 5]. Такое комплексное сочетание нескольких функциональных воздействий при нанесении покрытий и упрочнении позволяет усилить тот или иной показатель качества поверхности.

Современные технологии восстановления и упрочнения металлов основаны на использовании концентрированных в пространстве и во времени потоков энергии лучевых и электрофизических полей. Кратковременный нагрев локальных участков поверхностных слоев исключает коробление деталей, вызванное температурными деформациями. Наиболее перспективными являются технологии восстановления и упрочнения, основанные на использовании энергии света (лазерное упрочнение) и магнитного поля (магнитно-электрическое упрочнение), которые являются естественным неисчерпаемым источником. Эти технологии развиваются быстрыми темпами в силу универсальности используемых энергоносителей, простоты управления, наличия задела по еще нереализованным возможностям.

Для расширения технологических возможностей методов восстановления и упрочнения разрабатывают технологии, основанные на совмещении различных способов при формировании физико-механических свойств поверхностей деталей. Критерием оценки эффективности таких технологий является их универсальность по созданию на рабочих поверхностях деталей функциональных покрытий, отвечающих по основным физико-механическим свойствам эксплуатационным требованиям, с сохранением физико-механических свойств основы.

В настоящее время в технологиях нанесения покрытий наиболее востребованы способы с использованием концентрированных потоков энергии и характеризующиеся минимальным тепловложением, что практически исключает коробление деталей, вызванное температурными деформациями. В таких способах особое место отводится импульсному воздействию электромагнитными и лучевыми потоками энергии, что приводит к модификации уже сформированного упрочненного слоя [6-8].

Магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) применяют для упрочнения и восстановления поверхностей деталей, износ которых не превышает 0,3 мм [4-6]. Сущность МЭУ (рис. 1а) состоит в том, что упрочняемую поверхность детали 1 и полюсный наконечник 3 электромагнита располагают между собой с определенным зазором и подключают их к источнику технологического тока 5 с помощью скользящего контакта (рис. 1а). В зазор из бункера-дозатора 6 непрерывно подают ферромагнитный порошок (ФМП), частицы которого

выстраиваются в токопроводящие «цепочки» и замыкают контакты источника технологического тока. В результате электрического разряда происходит плавление частиц ФМП в местах их контакта с поверхностью заготовки, что приводит к формированию на поверхности покрытий в виде сочетания множества точечных вкраплений округлой формы (рис. 1б).

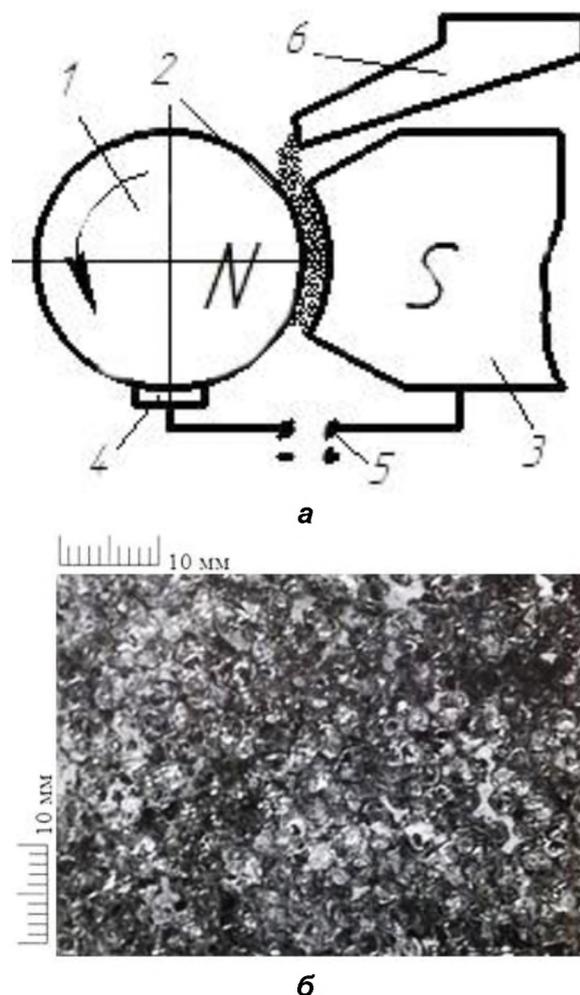


Рисунок 1. Принципиальная схема МЭУ поверхностей деталей типа тела вращения (а) и фотография поверхности после МЭУ (б); 1 – деталь; 2 – ферромагнитный порошок; 3 – полюсный наконечник электромагнита; 4 – скользящий контакт; 5 – источник технологического тока; 6 – бункер-дозатор

По физической сущности механизма формирования покрытия МЭУ и электронское легирование являются весьма близкими способами. Главное их отличие состоит в том, что при МЭУ нанесение покрытий осуществляется за счет многоэлектродного воздействия электрических разрядов [6, 7], повышающего производительность процесса. Кроме того, при МЭУ импульсное магнитное поле оказывает модифицирующее воздействие на материал поверхностного слоя.

Достоинствами МЭУ являются отсутствие необходимости в предварительной специальной подготовке поверхности детали, высокая прочность сцепления покрытия с основой, незначительная зона термического влияния. Для технологии нанесения покрытий способом МЭУ присуща неравномерность распределения по упрочняемой поверхности отдельных вкраплений материала ФМП, вызванная спонтанным формированием токопроводящих цепочек из зерен ФМП и, как следствие, местом возникновения электрических разрядов. Это приводит как к снижению сплошности наносимого покрытия, так и к увеличению шероховатости поверхности $Ra \geq 12,5$ мкм. Детали с такой топографией рабочей поверхности (рис. 1б) могут хорошо противостоять абразивному изнашиванию в условиях контакта с открытым грунтом, когда поверхность с точечными вкраплениями шаржируется абразивными частицами грунта. Однако детали с данной топографией поверхности не могут работать в парах трения. Поэтому после МЭУ требуется производить последующую финишную обработку, например, шлифованием и (или) поверхностным пластическим деформированием (ППД) [9]. Проблема последующей обработки состоит в том, что при шлифовании удаляется до 50 % нанесенного покрытия, а при обработке ППД – высока вероятность образования микротрещин в поверхностном слое.

Одним из вариантов решения существующей проблемы может быть последующее лазерное оплавление покрытий после МЭУ. Критерием синтеза комбинированной обработки на основе этих способов является плотность мощности потоков энергии от источников: в локализованных зонах воздействия множества электрических разрядов при МЭУ – $(5 \cdot 10^6 \dots 10^8)$ Вт/см²; в сфокусированной зоне непрерывного лазера – $(5 \cdot 10^3 \dots 10^4)$ Вт/см². Концентрированное энергетическое воздействие на материал поверхностного слоя, как при МЭУ, так и при лазерном упрочнении, проявляется в модифицирующем эффекте. Близость по обобщенным критериям совместности [10] представляется в сравнении основных параметров кинематики процессов, а также в подобию физико-химических механизмов совмещаемых способов нанесения покрытий и модифицирования поверхностного слоя.

Проблемам упрочнения и восстановления поверхностей деталей машин посвящены работы – Хейфеца М.Л., Чижика С.А., Черновола М.И., Акуловича Л.М., Миклуша В.П., Толочко Н.К., Сайганова А.С. и других.

Цель данной статьи – изучить результаты упрочнения поверхностей деталей из конструкционной стали 45 комбинированным методом, включающим формирование покрытия магнитно-электрическим упрочнением и последующую его обработку излучением мощного волоконного лазера.

Основная часть

Технологические процессы лазерной обработки, в основу которых положен поверхностный нагрев обраба-

тываемого материала излучением лазера, с каждым годом становятся все более востребованными в промышленности. Локальность и бесконтактность воздействия, простота управления лазерным пучком, возможность плавного изменения мощности или энергии в широких диапазонах, кратковременность теплового воздействия лазерной энергией на материал, высокие скорости нагрева и охлаждения, минимальные зоны термического влияния обеспечивают варьирование дисперсностью структуры металла, уровнем остаточных напряжений, степенью коробления детали.

В последние годы в производстве стали применять мощные волоконные лазеры для процессов резки и сварки материалов, которые обладают рядом преимуществ перед другими видами лазеров по энергетическим, оптическим и технологическим характеристикам. Длина волны излучения у волоконного лазера составляет порядка 1,0 мкм, что обеспечивает волоконному лазеру определенный ряд существенных преимуществ. В частности, металлические поверхности обладают большими коэффициентами поглощения на этой длине волны по сравнению с излучением CO₂ – лазера с длиной волны 10,6 мкм. Однако следует отметить, что в настоящее время имеется очень мало информации относительно применения излучения волоконных лазеров к таким процессам обработки поверхностей деталей с изменением ее химического состава, как лазерное легирование, модифицирование и наплавка.

Для устранения дефектов поверхностного слоя стали 45, образованных при МЭУ, были проведены исследования по изучению особенностей последующей обработки этих покрытий излучением мощного волоконного лазера.

Методики исследований, оборудование и материалы

Эксперименты проводили при упрочнении цилиндрической поверхности детали «палец» поворота самоходного штангового опрыскивателя БЛ-3000 из стали 45. Деталь предварительно подвергалась нормализации.

На поверхность деталей методом МЭУ наносили покрытия из легированного двухкомпонентного порошка на основе железа Fe-Ti (ГОСТ 9849-86) с использованием установки модели УМЭУ-1. Толщина нанесенных слоев составляла от 200 до 1200 мкм. Последующая лазерная обработка деталей проводилась на базе модуля поверхностной локальной термообработки МЛ35-ПО, в котором используется иттербиевый волоконный лазер ЛС-2, с максимальной выходной мощностью 2 кВт. Режимы обработки подбирались в зависимости от плотности мощности лазерного излучения установки, диаметра пятна его фокусировки и линейных скоростей перемещения лазерного луча. В качестве защитного газа использовался аргон. Микроструктура покрытий изучалась методом оптической металлографии поперечных шлифов с использованием светового микроскопа «Mef-3» фирмы «Reichert-Jung» (Австрия) и цифрового фотоаппарата «HP photosmart 715 digital camera». Исследование элементного состава, морфологии поверхности про-

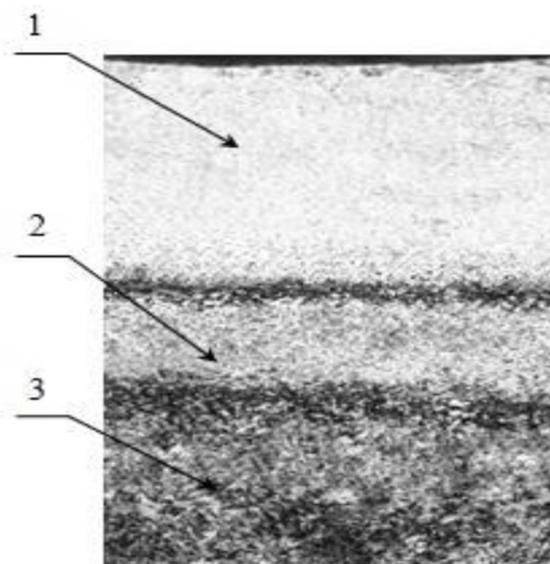
водилось на аттестованном сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) с микрорентгено-спектральным анализатором «INCA Energy 350» фирмы «Oxford Instruments Analytical» (Великобритания). Погрешность метода составляла 3-5 относительных процентов.

Рентгенофазовый анализ проводился на рентгеновском дифрактометре «Ultima IV» (Rigaku). Микротвердость измеряли на приборе «Microtest-II» при величине статической нагрузки на индентор $P \sim 0,49 \text{ Н}$ (50 г). Толщину покрытий определяли по распределению микротвердости в поперечном сечении образцов при помощи окулярной вставки с увеличением в 200 раз. Разнотолщинность покрытий определялась по разности минимальной и максимальной местной толщины покрытий образца. Пористость покрытий оценивалась по фотографиям микроструктуры.

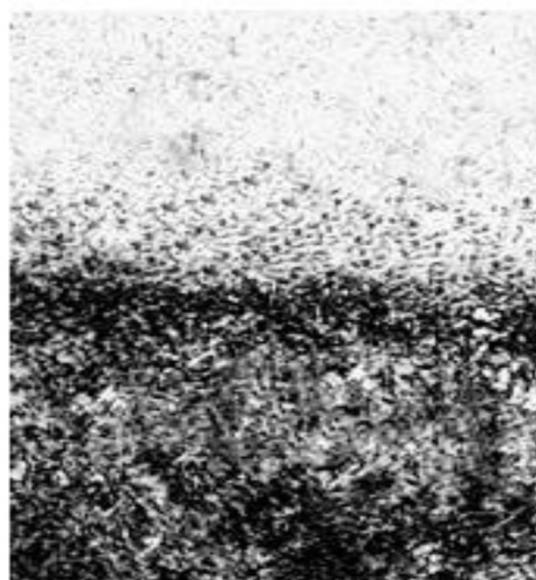
Анализ топографии поверхности детали «палец» после МЭУ (рис. 2а) позволяет сделать вывод о неравномерном распределении по упрочняемой поверхности отдельных точечных вкраплений ФМП, вызванном спонтанным формированием токопроводящих цепочек из зерен ФМП, что приводит к снижению сплошности нанесенного покрытия и его разнотолщинности. Отмечена также высокая шероховатость поверхности. Перечисленные дефекты покрытий способом МЭУ ограничивают область его применения.

Микроструктура упрочненного слоя после МЭУ, обеспечивающая его физико-механические свойства, зависит от химического состава ФМП и материала основы. Общим в структурном строении упрочненного слоя после МЭУ является то, что в нем можно выделить три зоны: наплавленную, диффузионную и термического влияния (рис. 2б, в).

Для устранения некоторых дефектов качества покрытий, сформированных МЭУ, были проведены исследования по обработке поверхности излучением



б



в



а

Рисунок 2. Внешний вид упрочняемой поверхности детали «палец» поворота самоходного штангового опрыскивателя БЛ-3000: а – с нанесенным покрытием МЭУ; б- в – микроструктуры поверхностного слоя после МЭУ ФМП Fe-Ti, увеличенные в 200 и 500 раз соответственно; 1 – покрытие; 2 – зона термического влияния; 3 – основной металл

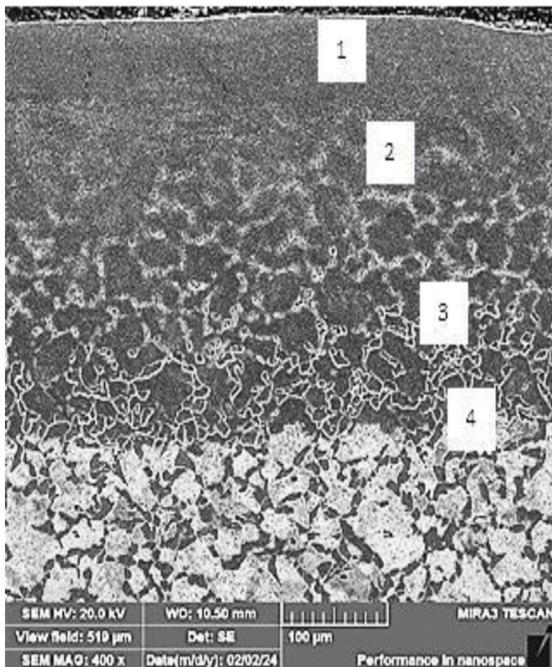
мощного волоконного лазера. Эксперименты проводились при максимальной мощности – 2 кВт, диаметре пятна фокусировки $\sim 2,5 \text{ мм}$ и скорости сканирования лазерного луча $\sim 1 \text{ м/мин}$. Плотность мощности при этом находилась на уровне $\sim 5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$.

Необходимо отметить, что титан является хорошим раскислителем, он повышает плотность и прочность стали, способствует измельчению зерна, улучшает обрабатываемость и сопротивление коррозии. Ферротитан

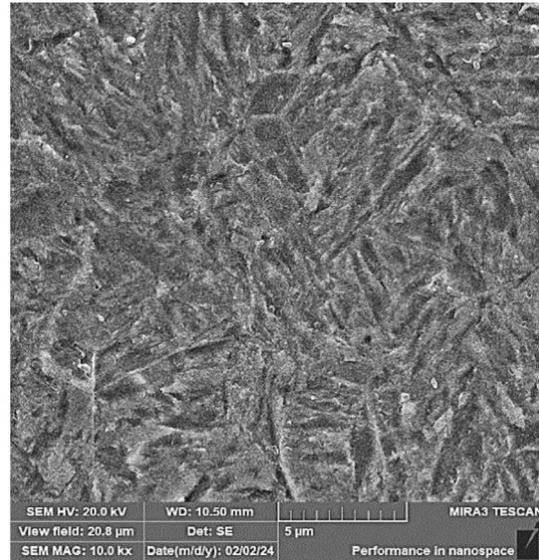
обладает высокой реакционной способностью в отношении углерода, кислорода, азота и серы, образуя нерастворимые соединения и изолируя их в шлаке.

Установлено, что средняя концентрация Ti в оплавленном слое находится на уровне 0,5-1,0 % с флуктуациями до 3-5 %. Это говорит о неплохой гомогенизации материала в зоне расплава при данном режиме обработки. Причем со снижением интенсивности лазерного излучения уменьшается глубина зоны проплавления и наблюдается более значительная неоднородность ванны расплава. Так, например, при мощности 1 кВт и такой же скорости сканирования лазерного луча флуктуация концентрации титана в закристаллизовавшейся ванне расплава была на уровне 5-22 %. При лазерной обработке непосредственно сталей и в зависимости от режимов воздействия могут наблюдаться также процессы неполной аустенизации при нагреве, концентрационной неоднородности твердого раствора и другие явления.

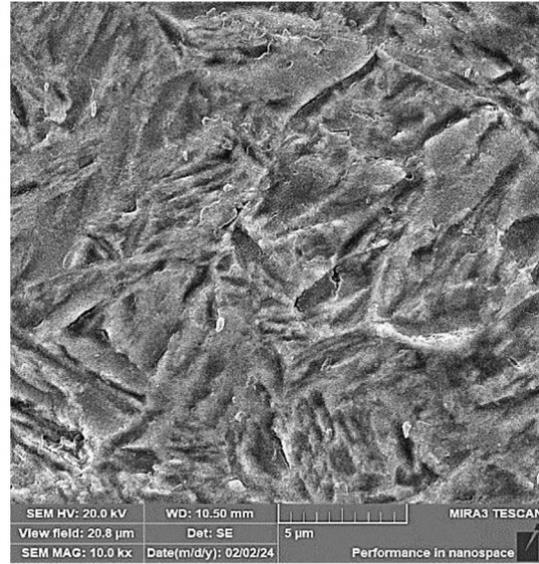
На рисунке 3 приведены характерные микро-структуры, образующиеся в поверхностном слое детали «палец» при такой комбинированной обработке. В зоне оплавления (рис. 3б) основная структурная составляющая – мелкодисперсный мартенсит с рельефными границами между пластинами. По всей видимости, это реечный мартенсит, возможно с некоторым количеством бейнита. Рентгеновский анализ показывает, что в поверхностных слоях зоны оплавления имеется только α -Fe (мартенсит и оксиды железа). При этом карбиды, как правило, растворяются. В результате такой комплексной обработки образуется гладкая поверхность с низкой шероховатостью и разнотолщинностью. Следует отметить, что такое качество при используемых мощностных режимах обработки данного оборудования было характерно для предварительно наносимых слоев толщиной порядка 200-500 мкм.



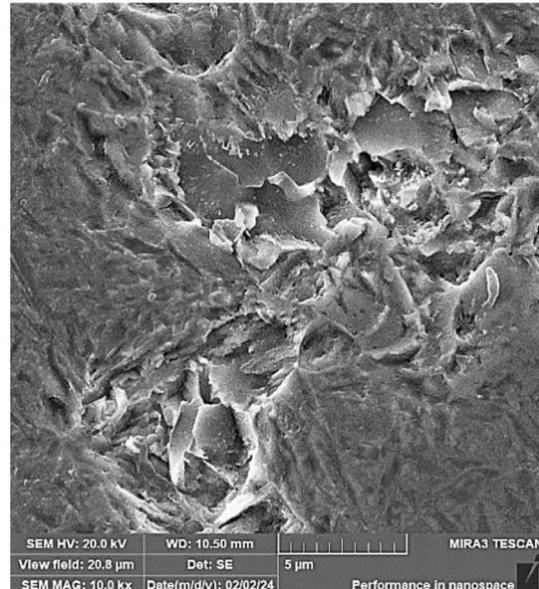
a



б



в



г

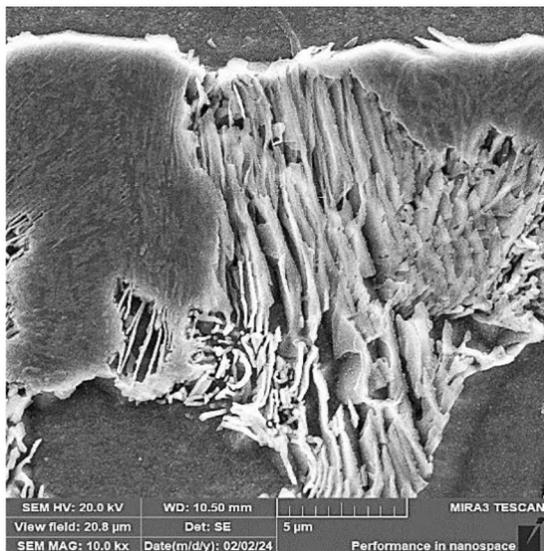


Рисунок 3. Микроструктура поверхностного слоя детали «палец» после комбинированной обработки: а – общий вид с обозначением исследуемых участков 1- 4 с увеличением – 400 х; б-д – на участках 1- 4 с увеличением 10000 х

Установлено также, что если непосредственно на самой поверхности рентгенофазовым анализом после МЭУ регистрируются такие фазы, как α -Fe, TiO_2 , Ti_3O_5 , FeO и Fe_2O_3 , то при последующей лазерной обработке состав оксидов может видоизмениться. Дополнительно могут появляться такие сложные оксиды, как $FeTiO_3$, $FeTi_3O_9$, $FeTi_2O_5$ и другие. То есть, при лазерном нагреве до температуры плавления материала и выше, несмотря на обработку в инертной атмосфере, происходит трансформация соответствующих оксидов. Этому может способствовать также воздух в порах, образующихся после нанесения покрытий.

В зоне закалки из твердой фазы картина схожа с тем, как происходят превращения при обработке стали 45 излучением мощного непрерывного CO_2 -лазера [8]. Наблюдается неоднородность структуры по глубине: сначала мартенситотроостит (рис. 3в), затем мартенсит и трооститная сетка, которая переходит в трооститоферритную (рис. 3г), и на границе с исходной структурой – в ферритную (рис. 3д). В нижних слоях, которые нагреваются до более низких температур, превращение феррита происходит не до конца и образующийся аустенит недостаточно насыщен углеродом. Это, в свою очередь, приводит к значительному снижению критической скорости охлаждения и образованию трооститной, трооститоферритной и ферритной сеток соответственно.

Анализ изменения микротвердости по глубине (рис. 4) в результате комбинированного упрочнения поверхности детали «палец» на указанных режимах показывает, что глубина зоны лазерного воздействия находится на уровне 500 мкм, микротвердость в

зоне оплавления достигает значений 7500 МПа (59 HRC). Сравнение этого показателя с аналогичным результатом ранее проведенных исследований [11], в которых при использовании CO_2 -лазера микротвердость покрытия из Fe-Ti в зоне расплава не превышала 5000 МПа (48 HRC), в зоне закалки из твердой фазы значения микротвердости для этого порошка были на уровне 4000 МПа (41 HRC). В этой связи использование излучения мощного волоконного лазера для оплавления покрытий после МЭУ является более эффективным. Данный результат может быть связан с большими скоростями нагрева поверхностного слоя вследствие значительно более высокого коэффициента поглощения излучения волоконного лазера с длиной волны 1,09 мкм по сравнению с излучением CO_2 -лазера с длиной волны 10,6 мкм. Это дает возможность проводить лазерную обработку в более скоростных режимах сканирования лазерного луча, обеспечивающих большие скорости охлаждения при кристаллизации и закалке.

В результате такой комбинированной обработки снижается разнотолщинность упрочненного поверхностного слоя, а преобразованная поверхность детали становится более гладкой и характеризуется невысокой шероховатостью.

Заключение

Экспериментальные исследования оплавления покрытия из порошка Fe-Ti, нанесенного на поверхность стали 45 способом МЭУ, с использованием волоконного лазера ЛС-2 с максимальной выходной мощностью 2 кВт, показали существенные структурные изменения покрытия, сопровождающиеся преобразованием топографии поверхности в более гладкую, с уменьшенной шероховатостью и снижением разнотолщинности упрочненного поверхностного слоя. На глубине лазерного воздействия (500) мкм в зоне оплавления наблюдается сплошная мелкодисперсная структура, переходящая в зоне закалки в мелкоигольчатую мартенситно-аустенитную. Микротвердость в зоне оплавления достигает значений 7500 МПа (59 HRC), а в зоне отпуска происходит дальнейшее снижение микротвердости до исходных значений. При этом полностью устраняются такие нежелательные дефекты, как поры и трещины.

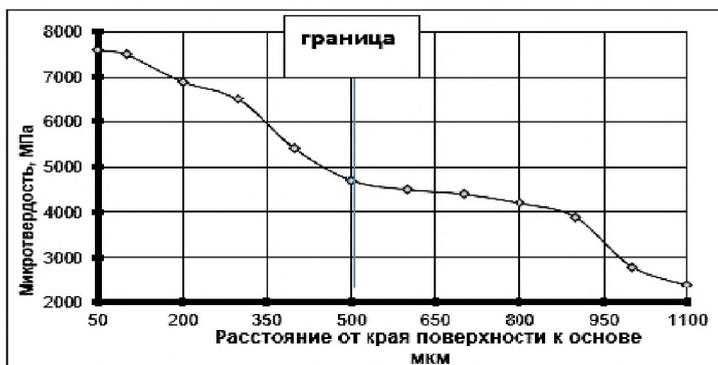


Рисунок 4 Изменение микротвердости по глубине детали «палец» после комбинированной обработки

Полученные результаты исследований свидетельствуют о положительном влиянии лазерного оплавления на повышение качества покрытий, наносимых способом МЭУ на поверхности из стали 45, и дают основания рекомендовать комбинированную технологию упрочнения для применения при ремонте ответственных деталей сельскохозяйственной и другой техники.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Организация технического сервиса в агропромышленном комплексе: учеб. пособие / В.П. Миклуш, А.С. Сайганов. – Минск: ИВЦ Минфина, 2014. – 607 с.
2. Черноиванов, В.И. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы) / В.И. Черноиванов, И.Г. Голубев. – М.: Росинформагротех, 2010. – 376 с.
3. Технология ремонта машин / Е.А. Пучин [и др.]; под ред. Е.А. Пучина. – М.: Триада, 2006. – Ч. I. – 348 с.
4. Анализ высокоэффективных методов обработки при проектировании технологических комплексов / Л.М. Акулович [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 1999. – Т. 72. – № 5. – С. 971-979.
5. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л. Хейфец. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
6. Комбинированный способ упрочнения и финишной абразивной обработки поверхностей деталей в магнитном поле / С.А. Чижик [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17. – № 11 (203). – С. 509-519.

7. Повышение износостойкости деталей сельскохозяйственной техники электроконтактной обработкой стальных газотермических покрытий / М.И. Черновол [и др.] // Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 28-29 октября 2015 / Полоцкий гос. ун-т; редкол. А.И. Гордиенко, В.К. Шелег. – Новополоцк, 2015. – С. 211-214.

8. Астапчик, С.А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С.А. Астапчик, В.С. Голубев, А.Г. Маклаков. – Минск: Белорусская наука, 2008. – 252 с.

9. Афанасенко, Е.В. Восстановление и упрочнение деталей машин комбинированным методом электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Афанасенко; БАТУ. – Минск, 1994. – 28 с.

10. Акулович, Л.М. Методика синтеза комбинированных способов упрочнения поверхностей деталей в магнитном поле / Л.М. Акулович, А.В. Миранович, В.Г. Мисько // Машиностроение. – Минск: БНТУ. – 2023. – Вып. 34. – С. 5-12.

11. Характеристика покрытий после магнитно-электрического упрочнения и лазерной обработки / Л.М. Акулович [и др.] // Инновационные технологии в машиностроении: электронный сборник материалов Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 19-20 апреля 2018 г. – Новополоцк, 2018. – С. 156-159.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 16.07.2024

Радиоволновой влагомер зерна

Предназначен для непрерывного измерения влажности зерна в процессе сушки на зерносушильных комплексах.

Влагомер обеспечивает непрерывный контроль влажности зерна в потоке и автоматическую коррекцию результатов измерения при изменении температуры материала, имеет аналоговый выход – 4-20 мА, а также интерфейс – RS-485.



Основные технические данные

Диапазон измерения влажности зерна	от 9 до 25 %
Основная абсолютная погрешность	не более 0,5 %
Температура контролируемого материала	от +5 до +65 °С
Цена деления младшего разряда блока индикации	0,1 %
Напряжение питания	220 В 50 Гц
Потребляемая мощность	30 ВА