Тип статьи: научная
УДК 621.793
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-6-96-108

# СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

***Алексей Валерьвеич Миранович [1], Владимир Григорьевич Мисько [2]***
*[1,2]Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Беларусь*
[1]miron23@tut.by
[2]kalochch@mail.ru

***Реферат.*** *Одним из методов восстановления и упрочнения изношенных поверхностей рабочих органов сельскохозяйственных машин является нанесение покрытий и(или) упрочняющей термической обработки. Проанализированы магнитно-электрические упрочнения (МЭУ) и лазерные методы упрочнения. Последующую обработку непрерывным лазером покрытий, сформированных после МЭУ, исследовали для устранения таких дефектов как высокая шероховатость поверхности и вероятность образования микротрещин.Эксперименты проводили на цилиндрических образцах из стали 45. Поверхность, подлежащую упрочнению, обрабатывали до параметра шероховатости 12,5 мкм, затем наносили покрытия из двухкомпонентных легированных порошков на основе железа Fe-5%V и Fe-Ti , сплава ФБХ-6-2 на специальной установке. Последующую лазерную обработку покрытий производили на СО2-лазере мощностью 1 кВт. Изменение интенсивности процесса магнитно-электрического упрочнения и переноса материала порошка было экспериментально установлено. Механизмы тепловых явлений, обеспечивающих при магнитно-электрическом упрочнении плавление частиц ферромагнитного порошка, формирование покрытия и структурные превращения в поверхностном слое рассмотрены. Установлено, что при моделировании тепловых процессов от быстродвижущегося источника целесообразно использовать соотношение, описывающее процесс распространения тепла от точечного источника, быстродвижущегося по полупространству с адиабатической границей. Установлено с помощью экспериментальных исследований, что лазерная обработка покрытий, сформированных после МЭУ, значительно уменьшает градиент структурной неоднородности, приводит к полному исчезновению микротрещин, уменьшает среднюю разнотолщиность покрытий до 1,2 раза и объемную пористость покрытий до 3-х раз., а также наблюдается снижение микронапряжений с 0,74 % до 0,1%.*

***Ключевые слова:*** *лазерная обработка, электрическая дуга, ферромагнитный порошок, толщина покрытий, разнотолщинность.*

# PROPERTIES OF COATINGS AFTER MAGNETIC-ELECTRIC HARDENING AND LASER PROCESSING

***Alexey Mironovich [1], Vladimir Misko [2]***
*[1]Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus*
[1]miron23@tut.by
[2]kalochch@mail.ru

***Abstract.*** *One of the methods of restoration and hardening of worn surfaces of the working bodies of agricultural machines is the application of coatings and (or) hardening heat treatment. Magnetic-electric hardening (MEH) and laser methods of hardening are analyzed. Subsequent processing by a continuous laser of coatings formed after MEA was studied to eliminate such defects as high surface roughness and the likelihood of microcracks. from two-component alloyed powders based on Fe-5% V and Fe-Ti iron, FBKh-6-2 alloy on a special installation. The subsequent laser treatment of the coatings was carried out on a CO2 laser with a power of 1 kW. The change in the intensity of the process of magnetic-electric hardening and the transfer of powder material was experimentally established. The mechanisms of*

*thermal phenomena that ensure the melting of particles of a ferromagnetic powder during magnetic-electric hardening, the formation of a coating and structural transformations in the surface layer are considered. It has been established that when modeling thermal processes from a fast-moving source, it is advisable to use a relation that describes the process of heat propagation from a point source moving fast along a half-space with an adiabatic boundary. It has been established using experimental studies that laser treatment of coatings formed after MEA significantly reduces the gradient of structural inhomogeneity, leads to the complete disappearance of microcracks, reduces the average thickness variation of coatings up to 1.2 times and the volumetric porosity of coatings up to 3 times. reduction of microstresses from 0.74% to 0.1%..*

***Keywords:*** *laser treatment, magnetic-electric hardening, coating thickness, coating thickness, bulk porosity, microhardness.*

**Для цитирования:** Миско В.Г. Свойства покрытий после магнитно-электрического упрочнения и лазерной обработки // Наука в центральной России Science in the central Russia. 2022. Т. 60, № 6. С. 96-108. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-6-96-108.

**For citation:** Misko V. Properties of coatings after magnetic-electric hardening and laser processing. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2022; 60(6): 96-108. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-6-96-108.

**Введение.** Актуальной проблемой в машиностроительном и ремонтном производствах является улучшение качества, повышение надежности и долговечности быстроизнашивающихся деталей машин и механизмов. Сельскохозяйственные машины содержат множество деталей, работающих в условиях трения как с открытым грунтом, когда превалирует абразивный и коррозионный виды изнашивания, так и в парах сопряжений [1]. Восстановление и упрочнение изношенных поверхностей рабочих органов сельскохозяйственных машин осуществляют путем нанесения покрытий и(или) упрочняющей термической обработки [2-4].

Для нанесения покрытий используют современные электрофизические методы, которые обеспечивают высокую прочность сцепления наносимых материалов с основой, минимальную зону термического влияния и высокую производительность. К их числу относятся электроискровое легирование, лазерное упрочнение (ЛУ), магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) и др.

По физической сущности механизма формирования покрытия электроискровое легирование и МЭУ являются наиболее близкими способами. Их отличие состоит в том, что при МЭУ нанесение покрытий происходит путем многоэлектродного воздействия электрических разрядов [5], что повышает производительность обработки. К тому же при МЭУ импульсное магнитное поле оказывает модифицирующее воздействие на материал поверхностного слоя.

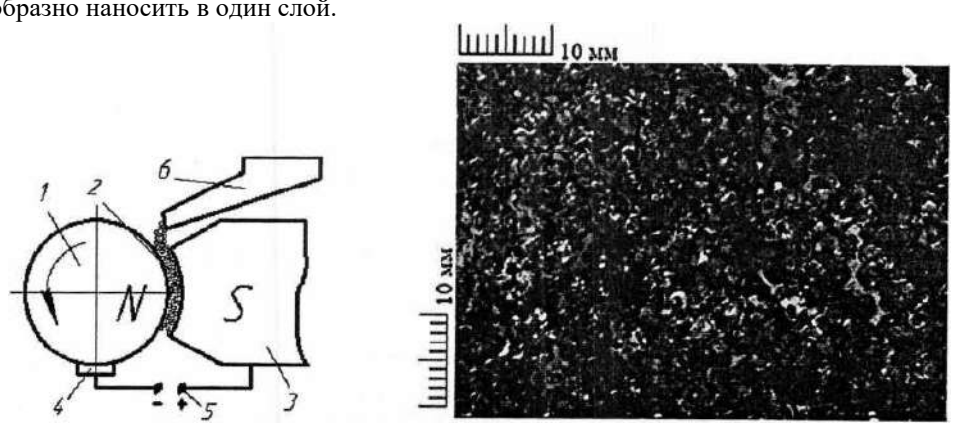
Лазерные методы упрочнения основаны на использовании тепла, генерируемого световым лучом с высокой концентрацией передаваемой энергии (не менее $10^6$ Вт/см$^2$). При взаимодействии с материалом детали лазерный луч за короткое время ($10'^2$-$10^{-3}$ с) оказывает интенсивное тепловое воздействие на материал поверхностного слоя, что обуславливает его модифицирование [6-9]. Воздействие лучом непрерывного $CO_2$ лазера мощностью более 1 кВт обеспечивает термическое упрочнение поверхностного слоя и может применяться при восстановлении рабочих органов сельскохозяйственных машин. Для нанесения многослойных покрытий используют технологические системы, которые обеспечивают послойный лазерный синтез и позволяют получать качественные и недорогие изделия в условиях единичного производства [4]. Одной из разновидностей технологии послойного лазерного синтеза является селективное лазерное спекание (СЛС) порошковых материалов (в англоязычной литературе - Selective Laser Sintering - SLS) [10]. В основе СЛС лежит избирательный нагрев лучом лазера порошковой смеси различных материалов, в результате которого происходит их синтез путем соединения частиц порошка между собой образующейся жидкой фазой. СЛС-метод применяется как для быстрого создания трехмерных прототипов деталей, так и при изготовлении самих деталей практически из любых материалов.

Концентрированное энергетическое воздействие на материал поверхностного слоя как при

МЭУ, так и при лазерном упрочнении, проявляется в модифицирующем эффекте. Плотность мощности потоков источников энергии находится в диапазонах: в локализованных зонах воздействия множества электроискровых разрядов при МЭУ - ($5 \cdot 10^6 ... 10^8$) Вт/см$^2$; в сфокусированной зоне непрерывного лазера - ($10^6$... $10^9$) Вт/см$^2$ [9].

При МЭУ упрочняемую поверхность располагают с определенным зазором относительно поверхности полюсного наконечника электромагнита и подключают их к источнику импульсного технологического тока (рис. 1, а). Затем упрочняемой поверхности сообщают кинематическое движение относительно полюсного наконечника магнита 3, и в зазор из бункера- дозатора 6 непрерывно подают ферромагнитный порошок (ФМП), частицы которого выстраиваются в токопроводящие «цепочки» 2 и замыкают контакты источника импульсного тока. Под действием электрического разряда происходит плавление частиц ФМП в местах их контакта с поверхностью заготовки, что приводит к формированию на упрочняемой поверхности покрытия в виде множества точечных вкраплений (рис. 1, б).

Энергическое воздействие множеством электрических разрядов осуществляет перенос материала ФМП и распределение его по оплавленной поверхности заготовки. Экспериментально установлено, что на начальной стадии процесса МЭУ перенос материала порошка происходит наиболее интенсивно, затем замедляется, и начинает частично сниматься упрочненный слой. В результате многократного воздействия разрядов первоначальные вкрапления частично разрушаются. Это вызвано эрозией (разрушением) тех, уже нанесенных точечных вкраплений, на которых повторно выстраиваются токопроводящие «цепочки» из частиц ФМП. То есть, процесс формирования упрочненного слоя сопровождается нанесением покрытия и эрозией его отдельных участков. В результате этого рельеф упрочненной поверхности состоит из хаотически расположенных выступов и мелких лунок. Знак изменения массы покрытия за рассматриваемый промежуток времени зависит от того, какой процесс превалировал в течение этого времени. Если процесс переноса материала порошка на поверхность детали превалирует над эрозией, то масса покрытия увеличивается. Если же превалирует эрозия - масса покрытия уменьшается. Увеличение длительности МЭУ не приводит к адекватному увеличению массы покрытия, поэтому удельная длительность упрочнения не должна превышать 4 с/см$^2$. Следовательно, покрытия при МЭУ целесообразно наносить в один слой.




*а* *б*

1 - заготовка, 2 - токопроводящие «цепочки» из ФМП, 3 - полюсный наконечник магнита, 4 - скользящий контакт, 5 - источник технологического тока, 6 — бункер-дозатор ФМП

Рисунок 1 - Схема реализации МЭУ и фотография нанесенного покрытия

Рассмотрим механизмы тепловых явлений, обеспечивающие при МЭУ плавление частиц ФМП, формирование покрытия и структурные превращения в поверхностном слое. Источником теплового воздействия является энергия электрического разряда, проходящего по цепочкам из частиц ФМП. Мощность $q_э$, необходимая для нагрева и плавления токопроводящих «цепочек» включает мощность от проходящего по ней тока и эффективную мощность электрической дуги:

$$q_э = J^2 R_{эц} + \eta_э JU ,$$

где $J$ - сила тока дуги, А;

$R_{эц}$ - электрическое сопротивление токопроводящих «цепочек», Ом;

$\eta_э$ - эффективный к.п.д. нагрева электрической дугой;

$U$ - напряжение дуги, В.

Каждая токопроводящая «цепочка» состоит из п частиц ФМП с контактными сопротивлениями $R_{12}$, ..., $R_{i(i+1)}$, ..., $R_{(n-1)n}$, величины которых можно определить, используя зависимости [11]:

$$R_{i(i+1)} = \frac{R_к}{p_к^{0,75}} , \quad (1)$$

и

$$R_к = \frac{p_f t_f}{\pi r^2}, \quad R_{i(i+1)} = \frac{p_f t_f}{\pi r^2 f_ц^{0,75}}$$

где $R_К$ - сопротивление в контакте;

$p_к$ - давление в контакте;

$p_f$ —удельное сопротивление оксидной пленки;

$t_f$ - суммарная толщина оксидной пленки;

$r$ - радиус зоны контакта.

Для этого необходимо определить величину силы $f_u$, с которой вся «цепочка» прижимается к упрочняемой поверхности. На граничащую с обрабатываемой поверхностью частицу будет действовать суммарная сила магнитного поля со стороны всех частиц, выстраиваемых в «цепочку».

В частице ФМП, находящейся в магнитное поле рабочего зазора, происходит ориентация молекулярных токов, направление которых таково, что созданные ими магнитные поля совпадают с направлением внешнего магнитного поля и усиливают его. Прохождение молекулярного тока по поверхности частиц ФМП можно уподобить поведению контура проводника с током в неоднородном магнитном поле.

Радиальная сила, действующая на частицу ФМП в неоднородном магнитном поле, равна:

$$f_p = P_м \frac{\Delta B}{\Delta x} , \quad (2)$$

где $P_м$ - магнитный момент частицы, А · м$^2$;

ΔВ - величина градиента напряженности магнитного поля, А/м;

$\Delta x$ - расстояние между рассматриваемыми сечениями, м.

Величина градиента напряженности магнитного поля по определению равна:

$$\Delta B = \frac{\Phi}{S_1} - \frac{\Phi}{S_2} ,$$

где $\Phi$ - магнитный поток, Т · м$^2$;

$S_1$ и $S_2$ - площади перпендикулярных сечений, м$^2$.

Определим величину градиента напряженности магнитного поля в масштабе одной частицы, приняв ее геометрическую форму в виде эллипсоида вращения с наибольшей осью Δ (рис. 2).

Тогда:

$$S_1 = R_д \beta b ,$$

$$S_2 = (R_д + \Delta)\beta b ,$$

$$\Delta B = \frac{\Phi \Delta}{\beta b R_д (R_д + \Delta)}$$

где $R_д$ - радиус упрочняемой поверхности;

$b$ - малая ось эллипсоида;

β - угол между радиусами деталей, касательными к наибольшему сечению частицы в плоскости, перпендикулярной оси детали.

При этом соотношение $\frac{\Delta B}{\Delta x}$ в (1) примет вид:

$$\frac{\Delta B}{\Delta x} = \frac{\Phi}{\beta b R_д (R_д + \Delta)}, \quad (3)$$

а магнитный момент частицы порошка в форме эллипсоида вращения –

$$P_м = \frac{4}{3} K H_1 \Delta^2 b, \quad (4)$$

где К - магнитная восприимчивость материала ферропорошка;

$H_1$- напряженность магнитного поля на нижней границе частицы, А/м.

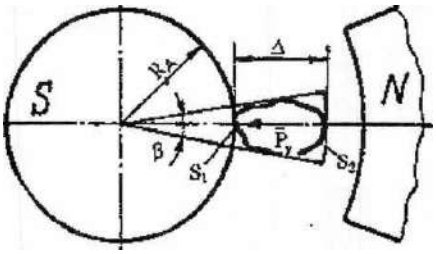



Рисунок 2 - Схема действия на зерно ФМП силы неоднородного магнитного поля в направлении нормали к поверхности детали

Подставив формулы (3) и (4) в выражение (2) и учитывая, что

$$\Phi = B_1 S_1 \mu H_1 R_д b \beta,$$

для единичной частицы получим:

$$f_p = \frac{4\mu\Delta^2 b K H_1^2}{3(R_д + \Delta)}, \quad (5)$$

где μ - магнитная проницаемость материала порошка.

На частицу ФМП, контактирующую с упрочняемой поверхностью, будет действовать суммарная сила $f_ц$ магнитного поля, учитывающая все частицы «цепочки», величина которой определяется:

$$f_ц = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^{n} \frac{\mu\Delta^2 b K H_1^2}{(R_д + \Delta)}, \quad (6)$$

где *n*- число частиц в цепочке;

$R_i$ - расстояние от начала i-й частицы до оси упрочняемой поверхности;

$H_i$ — напряженность магнитного поля на границе i-й частицы;

$\Delta_i$, $b_i$ - размеры большой и малой осей эллипсоида, описывающего i-ю частицу.

При дуговом разряде переменное электрическое сопротивление «цепочки», согласно (1), обуславливает градиент температуры в зонах контакта частиц ФМП, что определяет точечный характер вкраплений их материала на упрочненной поверхности (рис. 1*а*).

При МЭУ максимальные температуры возникают в поверхностном слое детали, от которого исходят тепловые потоки. Поэтому математическая модель тепловых процессов должна содержать уравнения теплопроводности с учетом теплофизических свойств покрытия и основы.

Для условий, когда покрытие наносится за один проход и сопровождается объемной зоной тепловыделения, закон распределения интенсивности теплового потока примем равномерным. Количество тепла, идущего в деталь от быстродвижущегося источника, определяется его скоростью, теплофизическими свойствами материала детали и от закона распределения зависит незначительно. Поэтому при моделировании тепловых процессов такого источника целесообразно

использовать соотношение, описывающее процесс распространения тепла от точечного источника, быстродвижущегося по полупространству с адиабатической границей:

$$\theta_i = \frac{q_i}{2\pi\lambda(z - z_u)} \exp\left[ -\frac{V_u\left((x - x_u)^2 + y^2\right)}{4\omega(z - z_u)} \right], \quad (7)$$

где $x_u$, θ, $z_и$ - координаты точечного источника;

$q_i$ - интенсивность точечного источника;

$\lambda$ - коэффициент теплопроводности материала;

$\omega$ - коэффициент температуропроводности;

$V_и$ - скорость движения точечного источника тепла;

$x, y, z$ - координаты рассматриваемой точки.

Рассмотренный температурно-временной фактор процесса МЭУ влияет на образование новых фаз в системе покрытие-основа и определяет основные свойства упрочненного поверхностного слоя. Достоинствами МЭУ являются отсутствие специальной предварительной подготовки поверхности детали, незначительная зона термического влияния и высокая прочность сцепления покрытия с основным материалом, что дает основание относить МЭУ к эффективным способам упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственных машин. Вместе с тем, упрочненный поверхностный слой обладает рядом существенных недостатков. К ним относятся:

- неравномерность распределения по упрочняемой поверхности отдельных точечных вкраплений материала ФМП, вызванная спонтанным формированием токопроводящих цепочек из зерен ФМП, что приводит к снижению сплошности наносимого покрытия и его разнотолщинности;
- высокая шероховатость поверхности (Ra ≥ 12,5 мкм);
- вероятность образования микротрещин (рис. 3) в поверхностном слое, вызванная высоким градиентом температуры при действии дугового разряда.

Перечисленные дефекты покрытий ограничивают область применения МЭУ. Для устранения дефектов некоторых показателей качества покрытий, сформированных после МЭУ, были проведены исследования их последующей обработки непрерывным лазером.

**Материалы и методы.**

При расчете температурного поля при движении непрерывного лазера применяют принцип суперпозиции, согласно которому весь период действия источника энергии разбивают на бесконечно малые элементы и рассматривают отдельные элементарные тепловые воздействия источника на теплопроводящее тело в последовательные моменты времени в точках, расположенных по оси перемещения источника. Процессы распространения тепла от элементарных воздействий источника можно рассматривать как точечные вне зависимости друг от друга, каждое из которых описывается уравнением (7). Суммированием таких элементарных воздействий можно получить уравнение процесса распространения тепла при непрерывном действии подвижного источника, приемлемое для практических расчетов. По принципу наложения можно определить изменение температуры в какой- либо точке теплопроводящего тела, представив ее как сумму изменений температуры при распространении тепла от отдельных элементарных воздействий источника с учетом времени и места их приложения.

Эксперименты проводили на цилиндрических образцах из стали 45 (ГОСТ 1050-88) представляющих собой кольца с наружным диаметром 40 мм, внутренним — 16 мм и высотой 12 мм. Исходные образцы подвергали нормализации и поверхность, подлежащую упрочнению, обрабатывали до параметра шероховатости Ra = 12,5 мкм.

На поверхность образцов наносили покрытия из двухкомпонентных легированных порошков на основе железа Fe-5%V и Fe-Ti (ГОСТ 9849-86), а также сплава ФБХ-6-2 (ГОСТ 11546-75) на установке модели УМЭУ-1. Последующую лазерную обработку покрытий производили на $CO_2$-лазере модели «Комета-2» мощностью 1 кВт.

Микроструктуру покрытий изучали методом оптической металлографии поперечных шлифов с использованием светового микроскопа Mef-3 фирмы «Reichert-Jung» (Австрия) и цифрового фотоаппарата «HP photosmart 715 digital camera». Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3М

при величине статической нагрузки на индентор Р ~ 0,49 Н (50 г). Толщину покрытий определяли по распределению микротвердости в поперечном сечении образцов при помощи окулярной вставки с увеличением в 200 раз. Разнотолщинность покрытий определяли по разности максимальной и минимальной местных толщин покрытий образца. Объемную пористость покрытий определяли методом гидростатического взвешивания.

Результаты исследований.

Экспериментально установлено, что толщина упрочненного слоя увеличивается с уменьшением скорости передвижения лазерного луча. При увеличении интенсивности теплового воздействия лазерным лучом, превышающем определенное значение, материал детали начинает испаряться, в результате чего на нем образуется кратер (каверна), а толщина упрочненного слоя увеличивается.

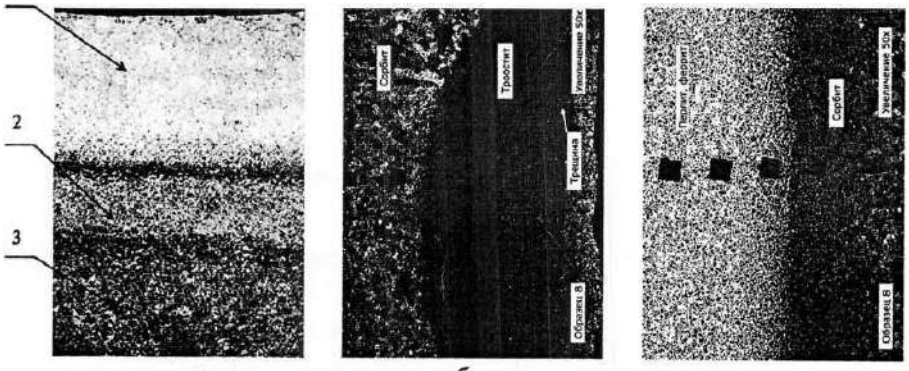
Упрочненный поверхностный слой формируется в результате взаимодействия материалов ФМП и детали с образованием твердых растворов и взаимным диффузионным проникновением.

Микроструктура упрочненного слоя, обеспечивающая его физикомеханические параметры, определяется химическим составом ФМП и материала основы. По структурному строению в упрочненном слое после МЭУ можно выделить три зоны: наплавленную, диффузионную и зону термического влияния (рис. 3, а).

Воздействие непрерывным лазером на поверхностный слой с покрытием после МЭУ уменьшает градиент структурной неоднородности, приводит к исчезновению микротрещин, повышает сплошность покрытия и уменьшает разнотолщинность (рис. 3,6 и в).

Микроструктурный анализ показал, что покрытия из ФМП Fe-Ti характеризуется мелкодендритным строением (рис. 4, а), основу которого составляет твердый раствор титана в а-железе, а также незначительного количества остаточного аустенита, интерметаллидов (FeTi, Fe2Ti), карбидов титана (TiC) и железа (FeC). Граница раздела имеет плавный переход, в котором на глубине до 50-90 мкм происходит полная фазовая перекристаллизация материала основы с последовательным образованием структур - однофазной (дислокационного мартенсита) и двухфазной (дислокационного мартенсит и рекристаллизованного феррита).

Покрытие из порошка Fe-5%V также характеризуется мелкодендритным строением (рис. 4, б), основу которого составляет твердый раствор ванадия в а-железе. Структура наплавленного металла состоит из основы - твердого раствора ванадия в а-железе, остаточного аустенита, карбидов ванадия (V2C, $V_4C_{2>}67$) и железа (FeC, FeCs). Диффузионная зона имеет структуру дислокационного мартенсита. Зона термического влияния представляет собой область неполной закалки, структура которой представляет феррит и отдельные участки перлита, превратившегося в троостомартенсит. Под зоной термического влияния находится область неполной закалки, структура которой представляет феррит и отдельные участки перлита, превратившегося в троостомартенсит.

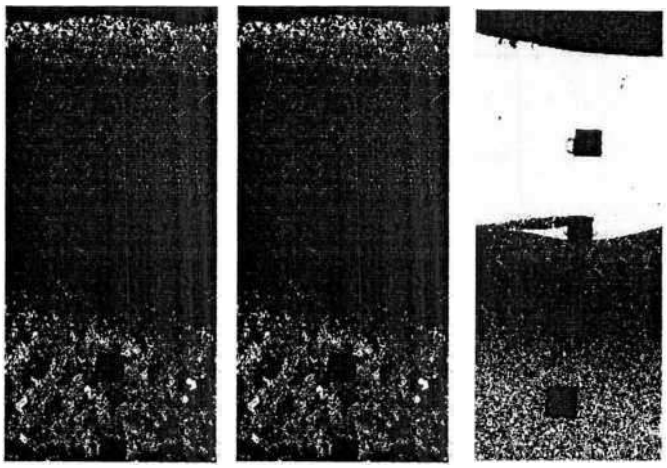



*а* *б* *в*

а - структурное строение покрытия после МЭУ; б - после МЭУ между зонами структурного строения (×50); в - после МЭУ и лазерной обработки между зонами структурного строения (×50);

**1 - покрытие; 2 - зона термического влияния; 3 - основной материал**

Рисунок 3 - Фотографии микроструктур покрытий из композиционного ферромагнитного порошка Fe-Ti



а б в

*а* - Fe-Ti (x50); *б* - Fe-5%V (×50); *в* - ФБХ-6-2 (×50)

Рисунок 4 - Фотографии микроструктуры различных покрытий после МЭУ и лазерной обработки

В покрытии из ФБХ-6-2 наплавленный слой имеет микроструктуру мелкодисперсного строения (рис. 4, в). Поверхностные слои состоят из частиц очень тонкого игольчатого строения, которые вытянуты в сторону основного металла. Основу покрытия составляет твердый раствор хрома в а- железе, остаточный аустенит, а также карбиды железа ($Fe_2C$), бориды (FeB, $CrB_2$, $CГ_5B_3$) и ферробориды ($Cr_{1,65}Fe_{0,35}B_{0,96}$). Структура покрытия состоят из основы - твердого раствора хрома в а-железе, а также остаточного аустенита, карбидов железа ($Fe_2C$), боридов (FeB, $CrB_2$, $Cr_5B_3$) и ферроборида ($Cr_{1,65}Fe_{0,35}B_{0,96}$).

Результаты исследований показывают (таблица 1), что глубина упрочненного слоя по параметру средней микротвердости составляет до 3 мм. Наблюдается также снижение микротвердости у покрытий, что возможно по причине перераспределения внутренних напряжений на границе раздела «покрытие-основа детали».

Таблица 1 - Микротвердость поверхностного слоя покрытий из композиционного ферромагнитного порошка Fe-Ti после МЭУ и лазерной обработки

| Расстояние от поверхности, мм | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Микротвёрдость, HV | 437 | 467 | 438 | 346 | 376 | 371 | 242 | 209 | 201 | 204 |

Результаты экспериментальных исследований (таблица 2) показывают, что лазерная обработка покрытий, полученных МЭУ, при уменьшении средней их толщины в 1,12 раза, позволяет повысить качество поверхностного слоя за счет снижения их объемной пористости в 2,7-3,3 раза и средней разнотолщинности в 1,16-1,21 раза

Таблица 2 - Пористость, толщина и разнотолщинность покрытий, полученных МЭУ и лазерной обработки

| Материал ФМП | Обработка поверхности | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | МЭУ | | | МЭУ + лазерная обработка | | |
| | Характеристика покрытий | | | | | |
| | Объемная пористость, % | Средняя толщина, мкм | Средняя разнотолщинность, мкм | Объемная пористость, % | Средняя толщина, мкм | Средняя разнотолщинность, мкм |
| Fe-Ti | 6,8 | 257 | 63 | 2,3 | 229 | 54 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fe-5%V | 4,6 | 263 | 57 | 1,4 | 235 | 49 |
| ФБХ-6-2 | 5,1 | 274 | 51 | 1,9 | 244 | 42 |

Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре Ultima IV (Rigaky) в Cuka-излучении с вращением образца в собственной плоскости. Результаты анализа приведены ниже.

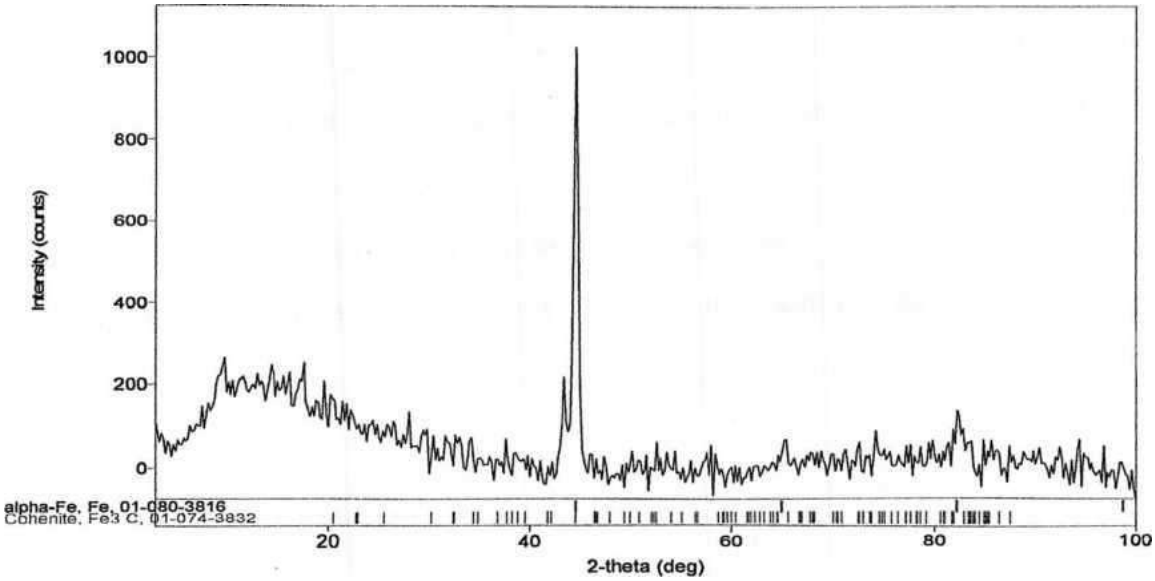



Рисунок 5 - Диаграмма напряжений в образец № 2

Результаты рентгеноструктурного анализа приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 - Результаты рентгеноструктурного анализа после обработки

| No. | 2-theta(deg) | d(ang.) | Height(counts) | FWHM(deg) уширение | Int. I(counts deg) | Int. W(deg) | Asym. factor |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 9 | 8 | 28 | 367 | 44 | 1 |
| 2 | 11.4 | 7.8 | 126 | 11 | 1810 | 14 | 0.50 |
| 3 | 19 | 5 | 38 | 10 | 742 | 19 | 1 |
| 4 | 26.8 | 3.3 | 85 | 22 | 2453 | 29 | 1 |
| 5 Fe | 44.578 | 2.0309 | 725 | 0.47 | 489 | 0.67 | 1.2 |
| 6 | 50 | 1.83 | 51 | 21 | 1355 | 27 | 1 |
| 7 | 65.1 | 1.43 | 46 | 14 | 944 | 21 | 0.6 |
| 8 | 74 | 1.28 | 21 | 14 | 411 | 19 | 1 |
| 9 | 82.0 | 1.174 | 55 | 8 | 828 | 15 | 1 |
| 10 | 95 | 1.05 | 41 | 13 | 683 | 17 | 1 |

| Phase name | a(A) | b(A) | c(A) | alpha(deg) | beta(deg) | gamma(deg) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fe (aipha-Fe) | 2.870 | 2.870 | 2.870 | 90.000000 | 90.000000 | 90.000000 |
| | | | | | | |

| Phase name | Crystallite size(A) | Strain(%) |
|---|---|---|
| Fe ('abha-Fe') | 142.3 | 0.1 |
| Fe3C | 4.195 | 8.8 |

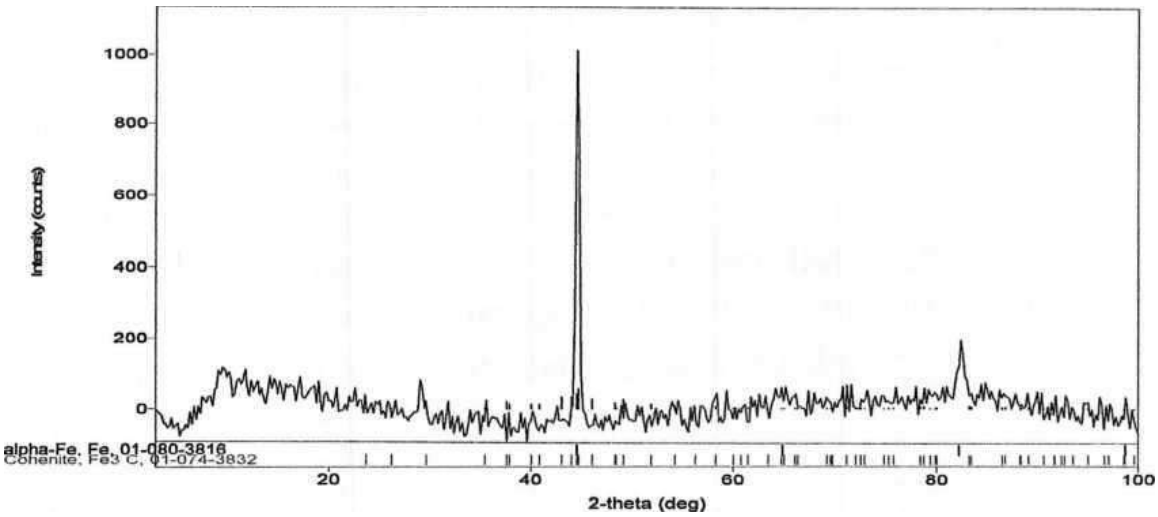



Рисунок 6 - Диаграмма напряжений в образец № 3

Таблица 4 - Результаты рентгеноструктурного анализа до обработки

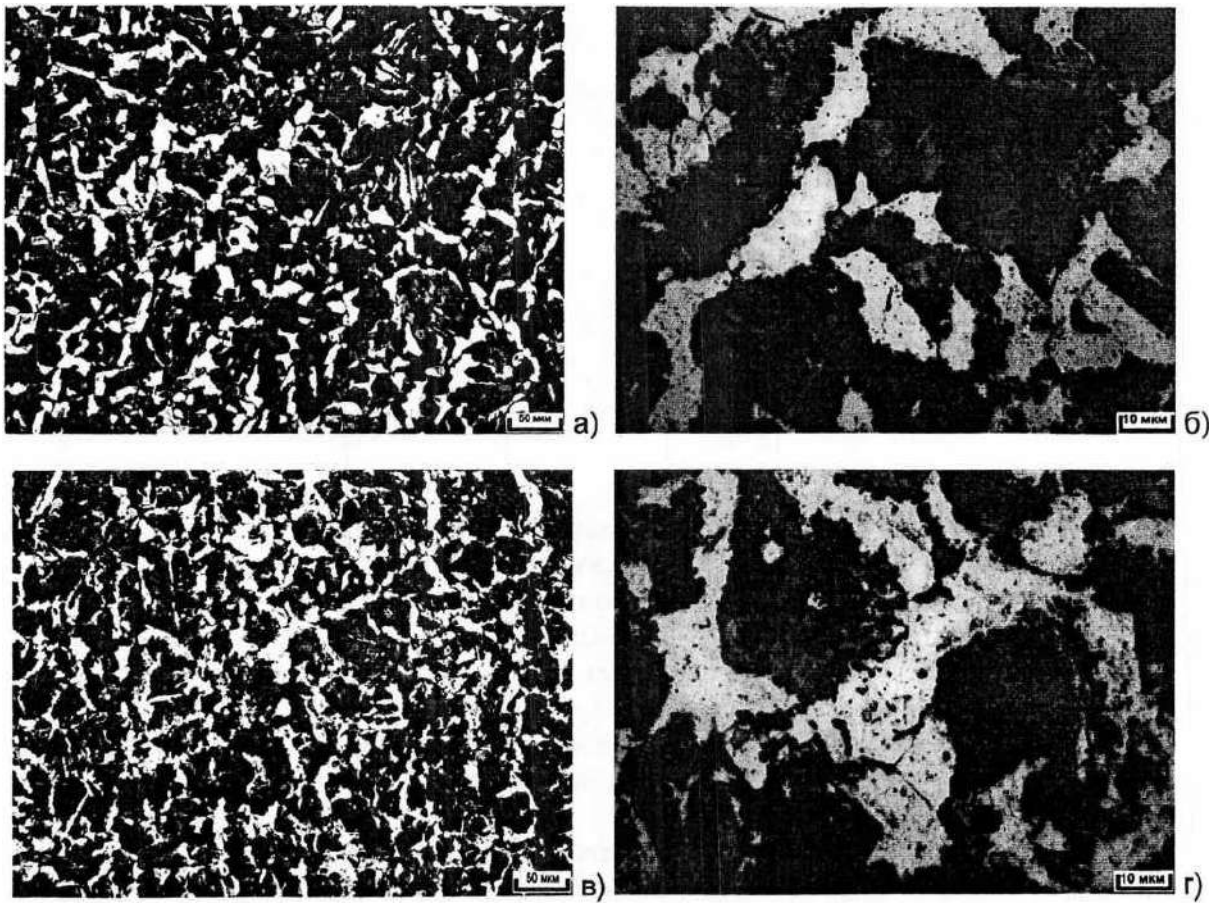
| No. | 2-theta(deg) | d(ang.) | Height(counts) | FWHM(deg) уширение | Int. I(counts deg) | Int. W(deg) | Asym. factor |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 9.5 | 9.3 | 109 | 3.6 | 519 | 4.8 | 2 |
| 2 | 12.0 | 7.4 | 109 | 7 | 1182 | 11 | 0.5 |
| 3 | 16.5 | 5.4 | 73 | 7 | 713 | 10 | 1 |
| 4 | 24.0 | 3.71 | 132 | 12 | 1814 | 14 | 2 |
| 5 | 29.4 | 3.03 | 101 | 7 | 1075 | 11 | 0.5 |
| 6 | 36 | 2.53 | 9 | 5 | 63 | 7 | 1 |
| 7 | 36 | 2.5 | 38 | 4 | 200 | 5 | 1 |
| 8 | 42 | 2.1 | 116 | 14 | 1872 | 16 | 1 |
| 9 Fe | 44.63 | 2.0287 | 819 | 0.34 | 325 | 0.40 | 1.1 |
| 10 | 51 | 1.78 | 43 | 7 | 329 | 8 | 0.9 |
| 11 | 58.0 | 1.59 | 14 | 7 | 155 | 11 | 5 |
| 12 | 59 | 1.6 | 29 | 10 | 339 | 12 | 2 |
| 13 | 65.0 | 1.433 | 44 | 4 | 306 | 7 | 2 |
| 14 | 68.3 | 1.37 | 21 | 5 | 146 | 7 | 1 |
| 15 | 82.43 | 1.1690 | 111 | 0.59 | 85 | 0.8 | 2 |
| 16 | 91 | 1.1 | 24 | 21 | 547 | 23 | 2 |
| 17 | 99.5 | 1.0093 | 70 | 4.5 | 364 | 5 | 5 |

| Phase name | a(A) | b(A) | c(A) | alpha(deg) | beta(deg) | gamma(deg) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fe (abha-Fe) | 2.872 | 2.872 | 2.872 | 90.000000 | 90.000000 | 90.000000 |
| Fe3C | 4 | 6 | 4 | 90.000000 | 90.000000 | 90.000000 |

| Phase name | Crystallite size(A) | Strain (%) |
|---|---|---|
| Fe f alpha-Fe') | 433 | 0.74 |
| Fe3C | 14.88 | 8.1 |

Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что при обработке происходит измельчение размеров кристаллитов. Так, до обработки размер кристаллитов основной фазы a- Fe (alpha-Fe) составляет 433 А, после обработки 142 А, размер цементитных включений Fe3C в исходном состоянии 15 А, после обработки — 4 А. После обработки наблюдается снижение микронапряжений с 0,74 % до 0,1%.

Исследование микроструктуры проводилось на световом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия) при увеличении ×100, ×500 (рисунок 7).




а), в) ×100; б), г) ×5000

Микроструктура образцов феррито-перлитная: перлит (феррит + Fe3C) с сеткой феррита.

Фазовый состав: α- Fe - феррит, цементит - Fe3C

Рисунок 7 - Микроструктура образца до (а, б) и после (в, г) обработки

**Выводы.** Показаны основные полученные результаты применения совершенно новой технологии обработки непрерывным лазером покрытий поверхности деталей сельскохозяйственных машин, выполненных МЭУ. Проведены экспериментальные исследования. Научно обоснована новизна и возможность целесообразности широкого применения обработки непрерывным лазером покрытий, полученных после МЭУ. Экспериментальными исследованиями установлено, что лазерная обработка таких покрытий значительно уменьшает градиент структурной неоднородности, приводит к полному исчезновению микротрещин, уменьшает среднюю разнотолщиность покрытий до 1,2 раза и объемную пористость покрытий до трех раз., а также наблюдается снижение микронапряжений с 0,74 % до 0,1%.

**Список источников**

1. Черноиванов, В. И. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы) / В. И. Черноиванов, И. Г. Голубев. - М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. - 376 с.

2. Казаровец, Н. В. Инновационные технологии упрочнения деталей сельскохозяйственной техники / Н.В. Казаровец, Г.Ф. Бетеня, Г.И. Анискович // Сборник докладов 12 МНТК (10 - 12 сентября 2012 г., г. Углич). М., ФГУП «Изд-во «Известия», 2012. - С. 219— 228.

3. Бетеня, Г.Ф. Упрочнение деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин в условиях импульсного закалочного охлаждения / Г.Ф. Бетеня, А.В. Кривцов // Агропанорама. 2015. - №3. - С. 15-19.

4. Анискович, Г.И. Экономическая эффективность импортозамещающего производства запасных частей для тракторных плугов / Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2018. - №4. - С. 10-17.

5. Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л.М. Акулович, А.В. Миранович. - Минск: БГАТУ, 2016. - 236 с.

6. Перспективные методы модификации поверхности металлов лазерной обработкой / В. Е. Архипов [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2008. - № 12. -С. 26-31.

7. Шатульский, А.А. Применение методов прототипирования для изготовления изделий машиностроения / А.А. Шатульский, М.А. Шаповалова // Наукоемкие технологии в машиностроении. - 2011. - № 1. - С. 24-29.

8. Девойно, О.Г. Поверхностное упрочнение серого чугуна совмещенной лазерной и ультразвуковой обработкой / Наука и техника. - 2013. - №2. - С. 3-6.

9. Григорьянц, А.Г. Создание композиционных покрытий из металлических порошков лазерной объемной наплавкой / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, Р.С. Третьяков // Сварочное производство. - 2018. - №5. - С.21-28.

10. Deckard, C.R. Recent advances in selective laser sintering / C.R. Deckard, J.J. Beaman // Proceedings of the 14th Conference on Production Research and Tech-nology. Michigan, 1987. - P. 447-451.

11. Хейфец, М.Л. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов : учеб. пособие / М. Л. Хейфец [и др.]. - Новополоцк: ПГУ, 2012. - 304 с.

**References**

1. Chernoivanov, V. I. Restoration of machine parts (State and prospects) / V. I. Chernoivanov, I. G. Golubev. - M. : FGNU "Rosinformagrotech", 2010. - 376 p.

2. Kazarovets, N. V. Innovative technologies for strengthening parts of agricultural machinery / N.V. Kazarovets, G.F. Betenya, G.I. Aniskovich // Collection of reports 12 ISTC (September 10 - 12, 2012, Uglich). M., FSUE Izvestia Publishing House, 2012. - S. 219— 228.

3. Betenya, G.F. Hardening of parts of working bodies of agricultural machines in conditions of pulsed quenching cooling / G.F. Betenya, A.V. Krivtsov // Agropanorama. 2015. - No.3. - pp. 15-19.

4. Aniskovich, G.I. Economic efficiency of import–substituting production of spare parts for tractor plows / Agricultural machinery: maintenance and repair. - 2018. - No. 4. - pp. 10-17.

5. Akulovich, L.M. Magnetic-electric hardening of surfaces of agricultural machinery parts / L.M. Akulovich, A.V. Miranovich. - Minsk: BGATU, 2016. - 236 p.

6. Promising methods of modification of metal surfaces by laser treatment / V. E. Arkhipov [et al.] // Hardening technologies and coatings. - 2008. - No. 12. - pp. 26-31.

7. Shatulsky, A.A. Application of prototyping methods for the manufacture of machine-building products / A.A. Shatulsky, M.A. Shapovalova // High-tech technologies in mechanical engineering. - 2011. - No. 1. - pp. 24-29.

8. Devoino, O.G. Surface hardening of gray cast iron by combined laser and ultrasonic treatment / Science and Technology. - 2013. - No. 2. - pp. 3-6.

9. Grigoryants, A.G. Creation of composite coatings from metal powders by laser bulk surfacing / A.G. Grigoryants, I.N. Shiganov, R.S. Tretyakov // Welding production. - 2018. - No.5. - pp.21-28.

10. Deckard, C.R. Recent advances in selective laser sintering / C.R. Deckard, J.J. Beaman // Proceedings of the 14th Conference on Production Research and Technology. Michigan, 1987. - P. 447-451.

11. Heifetz, M.L. Electrophysical and electrochemical methods of materials processing: textbook. manual / M. L. Heifets [et al.]. - Novopolotsk: PSU, 2012. - 304 p.

**Информация об авторах**

А.В. Миранович – кандидат технических наук, доцент; В.Г. Мисько – кандидат технических наук, доцент.

**Information about the authors**

A. Mironovich - Candidate of technical Sciences, Associate Professor; V. Misko – Candidate of technical Sciences, Associate Professor.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

***Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.***

**Contribution of the authors:** all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

***The authors declare no conflict of interest.***

Поступила в редакцию (Received): 29.11.2022 Принята к публикации (Accepted): 16.12.2022