

УДК 621.78:535.211

В. С. Голубев, И. И. Вегера, В. Г. Залесский, С. Н. Соколов, А. Н. Миряха
Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь;
ООО «Научно-Производственное Предприятие «Инжект», г. Саратов, РФ.
Тел.: +375 (029) 638-19-50, E-mail: gvs_fti@mail.ru

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОЩНОГО ДИОДНОГО ЛАЗЕРА

Исследованы особенности проведения операций наплавки, модифицирования и легирования на поверхностях стальных образцов с использованием излучения мощного диодного лазера. Широкополосная лазерная наплавка осуществлялась с использованием порошка нержавеющей стали 20X13 и твердосплавного порошка на никелевой основе ZTC-60WCS. Апробирована возможность оплавления аналогичного твердосплавного порошка T-Термо 660, нанесенного в виде шликерной обмазки толщиной ~ 200 мкм. В качестве легирующих материалов в данных экспериментах использовались порошки карбидов В₄С и WС.

Ключевые слова: лазерное легирование, модифицирование, наплавка, поверхностный слой, микроструктура, микротвердость.

V. S. Golubev, I. I. Vegera, V. G. Zalessky, S. N. Sokolov, A. N. Miryakha

SURFACE ENGINEERING OF METALLIC MATERIALS USING A HIGH POWER DIODE LASER

The features of surfacing, modification and alloying operations on the surfaces of steel samples using radiation from a powerful diode laser are investigated. Broadband laser surfacing was carried out using 20X13 stainless steel powder and ZTS-60WCS nickel-based carbide powder. The possibility of melting a similar T-Thermo 660 carbide powder applied in the form of a slip coating with a thickness of ~ 200 μm was tested. В₄С and WС carbide powders were used as alloying materials in these experiments.

Keywords: laser alloying, modification, surfacing, surface layer, microstructure, microhardness.

1. Введение

В последние годы в результате разработки мощных волоконных, диодных, а ранее СО₂ – лазеров, появились возможности развивать различные технологии обработки материалов лазерным излучением [1-8]. Например, сегодня технология лазерного термоупрочнения прямым излучением полупроводникового лазера активно развивается за рубежом и применяется в различных ведущих отраслях промышленности – автомобильной, оборонной, авиационно-космической, судостроении, транспортном машиностроении др. Однако зарубежные лазерные технологические установки и соответствующие полупроводниковые лазеры запрещены к экспорту в Россию действующими санкциями со стороны недружественных стран.

В связи с этим сегодня ООО «Научно-Производственное Предприятие «Инжект» (г. Саратов) активно участвует в разработке и производстве оптоэлектронных компонент - полупроводниковых лазеров, суперлюминесцентных диодов, фотодиодов и др. НПП «Инжект» имеет производственную линию полного цикла изготовления лазерных полупроводниковых излучателей от изготовления полупроводниковых гетероструктур до испытания готовых изделий. В ООО «НПП «Инжект» к настоящему времени разработан и серийно выпускается мощный отечественный полупроводниковый технологический лазер PLD-6. Лазер получил диплом лауреата на Всероссийском конкурсе программы «100 лучших товаров России». Диплом № 2022640101501, декларация соответствия ЕАЭС N RU Д-RU.PA01.B.41144/21 от 08.10.2021г. В ноябре 2023 г. ООО «НПП «Инжект» награжден дипломом победителя

конкурса AMTEXPO AWARDS-2023 в номинации «Научные разработки в области новых материалов и технологий». Следует отметить, что разработанный в Саратове лазер практически не имеет аналогов в России и за рубежом. В этой связи в настоящей работе исследовались особенности проведения таких операций как наплавка, модифицирование и легирование на поверхностях стальных образцов с использованием излучения указанного мощного диодного лазера.

2. Материалы и методики исследований

Образцы для исследования вырезались из листов конструкционной стали типа 40Х толщиной ~ 15 - 20 мм. В подготовке образцов и последующем их изучении принимали участие специалисты в области лазерных технологий Физико-технического института НАН Беларуси. Обработка образцов проводилась на экспериментальной базе ООО «НПП «Инжект» на технологическом лазере PLD-6. Широкополосная лазерная наплавка осуществлялась с использованием порошка нержавеющей стали 20Х13 и твердосплавного порошка на никелевой основе ЗТС-60WCS.

Порошок ЗТС-60WC на основе NiCrSiFeB с добавкой карбида вольфрама WC 60% предназначен для газо-термической порошковой наплавки газовыми горелками. Грануламетрия порошка: 20-100 мкм, грануламетрия WC: 40-120 мкм, форма гранул сферичная, наплавка возможна на стали и чугуны. Покрытия, получаемые после наплавки данного порошка, имеют исключительные износостойкие характеристики в средах абразива, коррозии, эрозии, удара, трения, термических нагрузок, давления. Апробирована также возможность оплавления аналогичного твердосплавного порошка Т-Термо 660, нанесенного в виде шликерной обмазки толщиной ~ 200 мкм на рабочие поверхности измельчающих ножей кормоуборочного комбайна КВК-800 производства ПО «Гомсельмаш». В качестве легирующих материалов в данных экспериментах использовались порошки карбидов V_4C и WC. Предварительно перед лазерной обработкой на поверхности формировали слой, нанося на нее обмазку из вышеуказанных порошков. Толщина слоя составляла ~100 - 150 мкм. В качестве защитного газа при осуществлении процесса легирования использовался аргон. Измерения микротвердости проводились на микротвердомере ПМТ-3, для микроструктурного анализа использовался оптический микроскоп НЕОРНОТ-2. Элементный состав, морфология поверхности изучались с использованием сканирующего электронного микроскопа «Mira» (фирмы «Tescan»- Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором «INCA Energy 350» (фирмы «Oxford Instruments Analytical»-Великобритания). Погрешность указанного метода измерения весьма высока и составляет 3-5 %.

Для обработки образцов применялся полупроводниковый технологический лазер PLD-6 с выходной мощностью 6 кВт. Лазер полупроводниковый технологический PLD-6 предназначен для генерации лазерного излучения и формирования оптического пучка при использовании в составе технологических комплексов. В состав лазера входят 40 полупроводниковых инжекционных модулей с выводом излучения на световод через оптический соединитель типа SMA 905, 40 блоков питания, блок управления. Лазерное излучение по оптическому жгуту поступает в оптическую головку и через систему линз направляется непосредственно в рабочую зону. Лазер PLD-6 имеет оригинальную конструкцию – это многолучевой лазер, с индивидуальной регулировкой мощности излучения в лучах лазера для конфигурирования лазерной мощности в пятне лазерного воздействия.

Лазер имеет следующие технические характеристики: мощность лазерного излучения, 6 кВт; потребляемая мощность, 20 кВт; пределы регулирования мощности лазерного излучения, 10-100 %; длина волны лазерного излучения в диапазоне, 760-980 нм; габариты блока излучателей (Д x В x Ш), 1072 x 1560 x 74 мм; масса лазера, 500 кг.



а)



б)

Рисунок 1. а – Полупроводниковый лазер PLD-6; б – Широкополосная наплавка с использованием лазера PLD.

Габариты оптической головки (без волоконного кабеля и крепления), Ø 137 x 674 мм. В отличие от широко распространенных волоконных лазеров лазер имеет широкую прямоугольную форму пятна в зоне лазерного воздействия на поверхности детали с размерами ~ от 22x2.

3. Результаты исследований и обсуждение

Лазерное оплавление поверхностного слоя, как известно [1-8], дает возможность осуществления таких процессов, как лазерная наплавка, модифицирование и легирование. Причем модифицирование по существу является промежуточным процессом между наплавкой и легированием, при этом глубина упрочненного слоя под поверхностью и толщина наплавленного над поверхностью невелики (~ 0,1-0,2 мм). При этом присадочные материалы могут наноситься на поверхность инъекцией их в расплав, создаваемый лазерным лучом, газотермическим напылением покрытия, шликерной обмазкой и другими способами. Указанные методы позволяют насыщать поверхностные слои деталей простыми и сложными компонентами и в конечном итоге формировать широкую гамму поверхностных структур. В этой связи цель настоящих экспериментов и состояла в изучении особенностей осуществления всех этих трех вышеуказанных процессов с использованием мощного полупроводникового лазера.

На рисунке 2 а изображена пластина с наплавленными дорожками в один и два слоя.



а)



б)

Рисунок 2. Внешний вид лазерной наплавки порошка: а – 20X13; б – 3ТС - 60WCS порошка стали 20X13.

Толщина слоя наплавки составляла соответственно ~ 1 и 1,8 мм, твердость слоя наплавки достигала ~ 45 HRC. Структура наплавленного слоя имела характерный для такого процесса мелкодисперсно-дендритный вид, фазовый состав состоял из мартенсита и остаточного аустенита с выделениями мелкодисперсных исходных карбидов хрома.

На рисунке 2 б изображена пластина с наплавленным слоем толщиной ~ 1,0 мм твердосплавного порошка на никелевой основе 3TC-60WCS с концентрацией карбида вольфрама 60%. Твердость наплавки достигала ~ 60-65 HRC. На рисунке 3 показаны микроструктуры на поперечном шлифе по всей глубине слоя (3 а) и на одном из его участков (3 б, в).

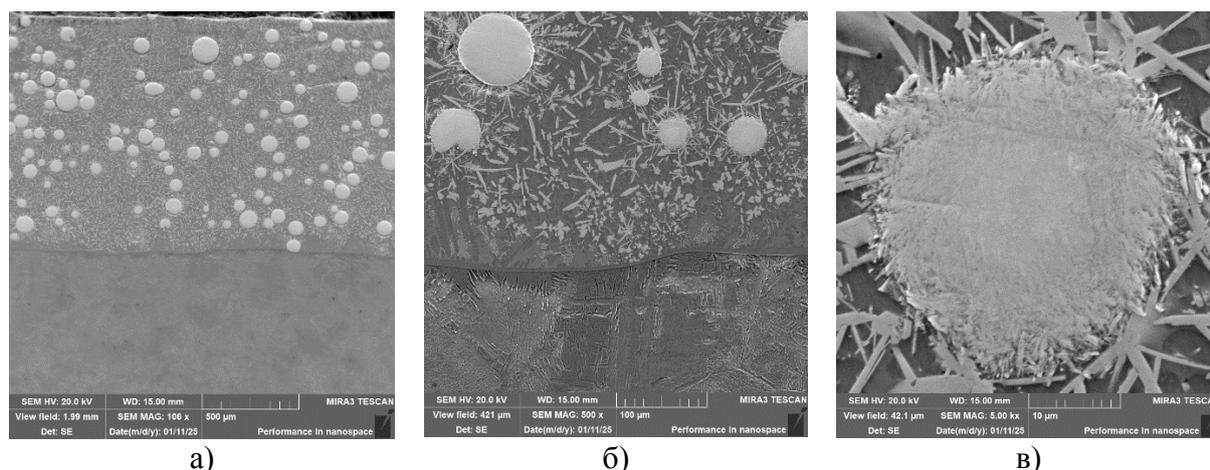
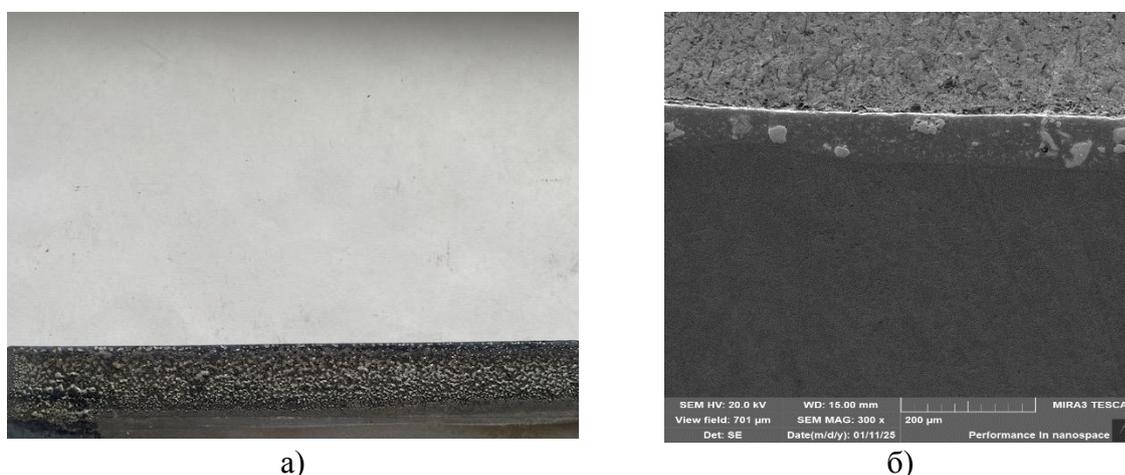


Рисунок 3. Микроструктуры наплавленного слоя порошка 3TC-60WCS с различным увеличением: а – по всей толщине; б - на одном из его участков; в – отдельная частица WC.

Видно, что структура имеет мелкодисперсный характер с сохранением округлых не до конца растворившихся исходных частиц карбидов вольфрама. Их твердость была на уровне ~19000 – 20000 МПа. Как показано [8], микроструктура наплавленных лазером сплавов существенно отличается от микроструктуры слоев, полученных другими методами (ТВЧ, вакуумной дуги, плазменной струи). Наиболее полно исследована микроструктура сплавов системы NiCrBSi, наплавленных с помощью лазерного излучения и нанесенных другими методами. Фазовый состав этих покрытий во всех случаях близок, в покрытиях обнаруживаются следующие основные фазы: γ -фаза, Ni_3B , карбиды и бориды хрома, зафиксировано также наличие силицида никеля Ni_5Si_2 . При этом на микроструктуре в большинстве случаев видна пластинчатая эвтектика $[\gamma + Ni_3B]$, в ее состав может входить также борид CrB, кроме того, возможно образование эвтектики $[\gamma + Cr_7C_3]$. В случае лазерной наплавки дифракционные линии отличаются большей размытостью, что может свидетельствовать о повышенной плотности дислокаций и измельчении зерна. Отметим также, что при лазерной наплавке упрочняющие фазы могут иметь свои морфологические особенности. В структуре наплавленных слоев [8], могут присутствовать глобулярные, линейчатые или звездчатые фрагменты. Например, линейчатые фрагменты характерны для карбидов хрома, а звездчатые дендриты - для боридов железа, тогда как глобулярные характерны и для боридов, и для карбидов железа и хрома.

Таким образом из анализа полученных результатов следует, что технология наплавки с использованием указанного мощного диодного лазера может уже быть успешно применена при необходимости создания широких и протяженных износостойких слоев с толщиной слоя 1-2 мм. О возможностях такой наплавки проинформированы специалисты ряда предприятий сельскохозяйственного машиностроения Республики Беларусь. Предполагается, например, провести эксперименты по такой наплавке на выпускаемых в республике деталях плугов и других быстроизнашивающихся деталях рабочих органов сельхозмашин.

Была также апробирована возможность модифицирования, в частности, нанесения достаточно тонкого (0,1-0,2 мм) износостойкого слоя с использованием порошка Т-Термо 660 (никелевая основа с добавкой также 60% карбида вольфрама) на рабочие поверхности измельчающих ножей к кормоуборочному комбайну КВК-800 производства ПО «Гомсельмаш» (рисунок 4). Данный порошок выпускается другим производителем, аналогичен по составу порошку ЗТС-60WCS, и в отличие от последнего, частицы карбида вольфрама в нем не имеют округлого вида.



а) Внешний вид рабочей поверхности измельчающего ножа к кормоуборочному комбайну КВК-800 с наплавкой порошком Т-Термо 660;
б) Микроструктура наплавленного слоя на поперечном шлифе рабочей поверхности кормоуборочного комбайна КВК – 800.

Было апробировано несколько режимов оплавления предварительно нанесенных на рабочие поверхности ножей слоев шликерной обмазки из указанного порошка. На рисунке 4а приведен внешний вид наиболее приемлемого оплавленного слоя, толщина которого составляла ~ 100 мкм. На рисунке 4, б показана микроструктура такого слоя по глубине. В целом результаты по структуре, фазовому составу и микротвердости были близки результатам по наплавке порошка ЗТС-60WCS. Однако исходные частицы, судя по анализу результатов микрорентгеноспектрального элементного состава (Рисунок 5), представляют собой конгломерат непосредственно вольфрама и его карбида (W-WC). Что может быть связано с особенностями метода производства указанного порошка, когда не весь вольфрам успевает прореагировать с образованием его карбида.

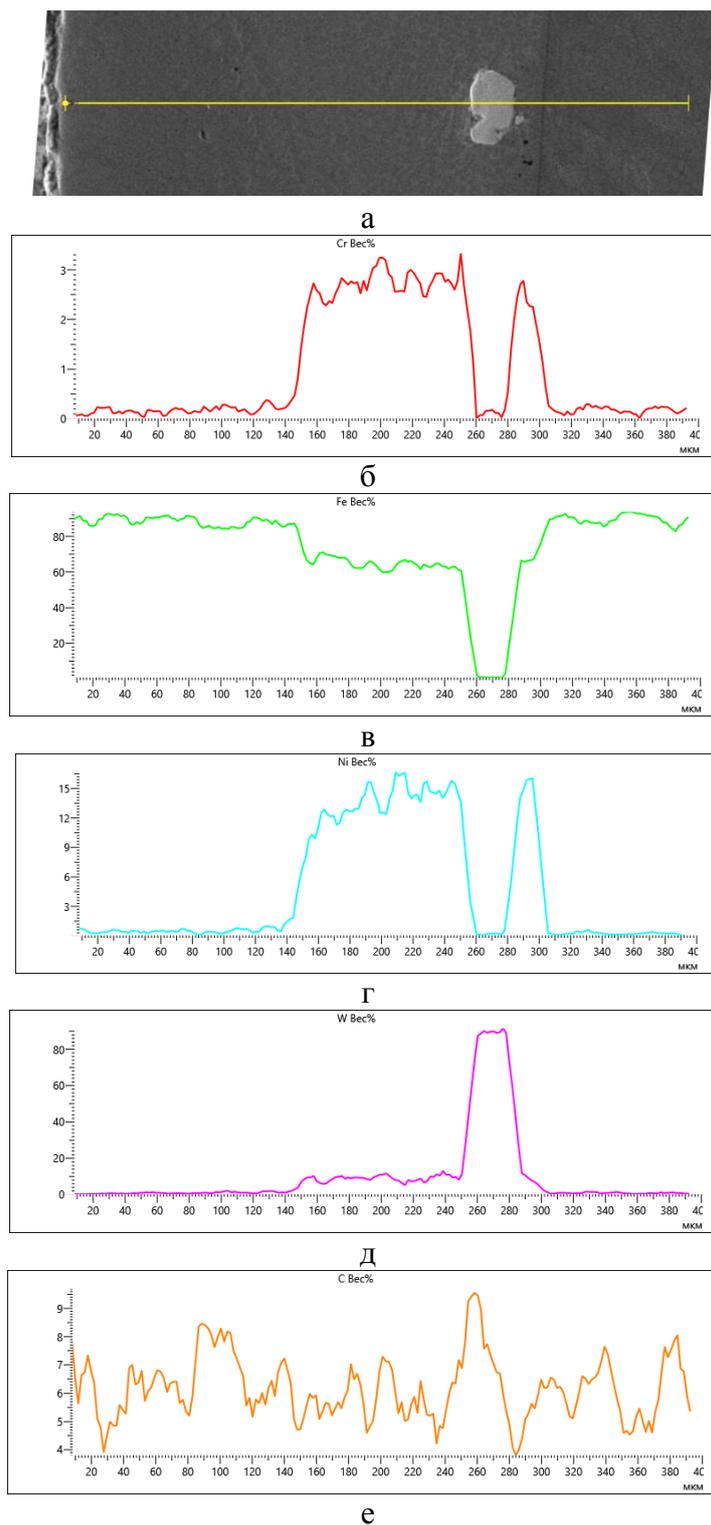


Рисунок 5. Результаты микрорентгеноспектрального анализа распределения элементов по глубине наплавленного слоя порошка Т-Термо 660 на рабочую поверхность измельчающего ножа кормоуборочного комбайна КВК-800: а – микроструктура слоя; б-е – распределение различных элементов.

Тем не менее есть основания считать, что выбранные в данных экспериментах режимы не являются оптимальными с точки зрения решения задачи создания на

рабочих поверхностях такого рода ножей качественных износостойких слоев. Это было связано с тем, что при выбранных режимах на поверхности деталей могло наблюдаться частичное сворачивание расплава в мелкодисперсные капли. Причиной такого поведения расплава, по-видимому, является недостаточная температура его нагрева. Это в свою очередь, по-видимому, связано с достаточно большими размерами зоны фокусировки лазерного излучения (22x2 мм) и соответственно с не очень высокой его плотностью на поверхности. При этом лазерную обработку приходилось вести с более низкими скоростями сканирования луча, что способствовало более глубокому прогреву непосредственно основы детали. Кроме того, следует учитывать особенности такого рода применяемых порошков, представляющих собой механическую смесь за счет добавления частиц карбида вольфрама. Следует отметить, что температура плавления непосредственно NiCrSiB основы используемого порошка составляет ~ 1050 °С, тогда как температура плавления частиц добавленного карбида вольфрама WC составляет ~ 2780 °С. Поэтому было бы более целесообразным в этих случаях проводить обработку с более высокими интенсивностями излучения, достигая при этом более высоких температур нагрева применяемого порошка. В этой связи сделан вывод о необходимости продолжения данных экспериментов с использованием мощного диодного лазера с точки зрения оптимизации режимов обработки как по оплавлению предварительно нанесенных, так и по непосредственному нанесению достаточно тонких износостойких слоев (~ 0,2 мм) на рабочие поверхности клинообразных быстроизнашивающихся сельскохозяйственных деталей типа выше указанных ножей.

Что касается лазерного поверхностного легирования, то осуществление такого процесса открывает возможности дополнительного повышения большого ряда или всего комплекса свойств сталей и сплавов: таких как твердость, теплостойкость, коррозионная и жаростойкость, жаропрочность и другие [1-8]. Применяемые в экспериментах химические соединения в качестве легирующих компонентов обладают набором ряда важных свойств. В частности, карбиды металлов помимо высокой твердости, износостойкости, температуры плавления обладают и высокой устойчивостью к взаимодействию с другими химическими веществами. Это же характерно и для боридов, обладающих также высокой твердостью, химической стойкостью, тугоплавкостью. Для них характерно такое свойство, как металлоподобность, то есть они могут обладать высокой электро- и теплопроводностью, магнитными свойствами. Благодаря своей высокой твердости и инертности бориды наравне с карбидами при использовании метода лазерного легирования весьма успешно могут применяться при создании на поверхностях стандартных сталей достаточно глубоких слоев со свойствами необходимых инструментальных сталей, твердых сплавов и т.д. Которые могут находить применение при производстве современных высокоэффективных режущих и абразивных инструментов для различных областей народного хозяйства. Метод лазерного легирования может быть также эффективным для создания жаропрочных и жаростойких поверхностей изделий в энергетической, электротехнической, приборостроительной, авиационно-космической и другой технике.

В настоящих экспериментах, также как отмечалось выше при наплавке, в зоне расплава формировалась мелкозернистая гетерофазная структура, в зависимости от режимов с включениями исходных легирующих или дополнительно выделенных фаз. Микротвердость при использовании WC и V₄C в зоне легирования варьировалась соответственно в диапазоне 4000 – 8000 МПа, 8500 – 12000 МПа. Аналогичные результаты наблюдались нами также при использовании для легирования излучения

волоконного лазера мощностью 2 кВт. Ранее [5] нами было показано, что при соответствующей более острой фокусировке излучения волоконного лазера при диаметре кругового пятна ≤ 1 мм глубина легированного слоя может достигать $\sim 1 - 4$ мм, при этом время лазерного воздействия при такой обработке составляло не более 0,3 сек. Особенность обработки в этом случае состояла в том, что для ряда порошков в основных режимах лазерного воздействия шероховатость поверхности была достаточно небольшой на уровне $R_{\max} \leq 50$ мкм. Это позволяло сохранять достаточную толщину упрочненного слоя при последующей механической обработке. В то же время при осуществлении процесса легирования в настоящих экспериментах с применением диодного лазера наблюдалось значительное изменение профиля обработанной поверхности. Перепад максимальных высот пика и впадины профиля мог достигать 1-2 мм.

Как известно [2, 4], вследствие термо-капиллярного эффекта в процессе лазерного легирования происходит конвективный массоперенос в зоне расплавления основного металла, перемешивание и последующее диффузионное перераспределение легирующих элементов. При этом, например, в отличие от обычной химико-термической обработки при лазерном легировании появляется возможность достигать весьма высоких концентраций легирующих компонентов. Такая особенность проведения процесса легирования при использовании диодного лазера, по всей вероятности, связаны с теми же причинами, которые обсуждались выше относительно процесса модифицирования рабочих поверхностей ножей сельскохозяйственного назначения. Это невысокие значения плотности мощности падающего излучения вследствие высоких значений площади его фокусировки. Это в свою очередь сказывается не только на температуре нагрева расплава, но на его вязкости, уровне термо-капиллярных натяжений и на динамике происходящих в нем конвекционных процессов. В этих случаях, по-видимому, было бы целесообразно уменьшать площадь фокусировки падающего излучения, например, за счет уменьшения ширины с 2 до 0,5 мм и менее.

4. Заключение

Лазерная наплавка, в том числе с использованием диодного лазера, принципиально может осуществляться с использованием широкой гаммы порошков металлов и сплавов, разработанных и успешно применяемых для газотермических и плазменных методов напыления и наплавки. В первую очередь, это самофлюсующиеся порошки, например, на никелевой и железной основах, в том числе с карбидом вольфрама и другими весьма твердыми и износостойкими компонентами, порошки на стальной основе различного технологического применения. Большую перспективу для наплавки могут представлять также порошки на основе цветных металлов и сплавов, в частности, медных, алюминиевых, титановых и других сплавов.

Оптимизация применения полупроводникового технологического лазера с целью модифицирования и легирования поверхности различных сталей и сплавов, лазерных технологий автоматизированной обработки материалов может обеспечить импортозамещение, сформирует основу для широкого внедрения лазерных технологий в массовое машиностроительное производство деталей. Внедрение технологий обработки материалов излучением диодных лазеров в промышленности приведет к повышению комплекса поверхностных свойств, в целом ресурса деталей и техники, росту качества и конкурентоспособности продукции отечественного машиностроения.

В целом, при использовании лазерных методов обработки материалов повышается культура производства и увеличивается производительность; реализуется

автоматизированное производство, снижаются производственные дефекты. Возрастает также надежность и повторяемость процесса, что обеспечивает повышение конкурентных преимуществ производителя. Имеется возможность программирования, компьютерного моделирования и оптимизации технологического процесса, что сокращает время подготовки производства и издержки внедрения технологического процесса производства изделий, различающихся по конструкции.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Астапчик, С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. – Минск: Белорусская наука, 2008. – 252 с.
2. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюрков; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
3. Астапчик, С. А. Лазерные технологии: возможности и перспективы обработки деталей и инструмента / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков // Тяжелое машиностроение. – 2004, № 2. – С. 33–37.
4. Бернацкий, А. В. Лазерное поверхностное легирование стальных изделий (Обзор) / А. В. Бернацкий // Автоматическая сварка. – 2013, № 12. – С. 3 – 10.
5. В. С. Голубев, И. И. Вегера, В. Е. Ходюш, О. В. Дьяченко, К. В. Протасевич. Поверхностное легирование стали Hardox 600 с использованием волоконного лазера. В сб. трудов XV межд. н.-т. конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», ФТИ НАН Беларуси, Минск, 2023, с. 72-84
6. В. С. Голубев, И. И. Вегера, О. Чернашеюс, В. В. Чаевский. Лазерная обработка материалов с изменением химического состава поверхностного слоя. // Вестник БарГУ, сер. Технические науки – 2019, Т.7. – С.34-42
7. В. П. Бирюков, Я. А. Горюнов, А. Н. Миряха Определение механических и триботехнических характеристик покрытий при лазерной широкополосной наплавке сталей. Фотоника, Выпуск №2, 2025.
8. Тарасова, Т. В. Особенности формирования структуры наплавленных слоев при лазерной обработке / Т. В. Тарасова, В. С. Голубев, С. Д. Кузьмин // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2014. — № 9. — С. 26—30.

Поступила в редколлегию 15.04.2025 г.