

УДК 669.056.017

В. С. Голубев¹, И. И. Вегера¹, О. Чернашеюс², В. В. Чаевский³¹Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220004, Минск, Республика Беларусь, gvs_fti@mail.ru²Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса, Саулетекио алл., 11, Вильнюс, Литовская Республика³Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Свердлова, 13а, 220006 Минск, Республика Беларусь

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ С ИЗМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

В данной работе исследованы особенности влияния энергетических параметров и технологических факторов на эффективность поверхностной обработки с использованием лазерных способов: легирования, модифицирования, наплавки. Изучено структурно-фазовое состояние, качество поверхностных и переходных слоев.

Ключевые слова: лазерное легирование; модифицирование; наплавка; поверхностный слой; микроструктура; легирующие элементы; эксплуатационные характеристики.

Рис. 6. Библиогр.: 11 назв.

V. S. Golubev¹, I. I. Vegeera¹, O. Chernasheyus², V. V. Chaevsky³¹Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevicha Str., 220004 Minsk, the Republic of Belarus, gvs_fti@mail.ru²Vilnius Gediminas Technical University, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius³Belarusian State Technological University, 13a Sverdlova str., 220006 Minsk, the Republic of Belarus

LASER TREATMENT OF MATERIALS WITH CHANGE OF CHEMICAL COMPOSITION OF THE SURFACE LAYER

In this paper, the features of the influence of energy parameters and technological factors on the efficiency of surface treatment, using such laser methods as alloying, modifying and surfacing, have been investigated. The structure-and-phase state and the quality of the surface and transition layers have been studied.

Key words: laser alloying; modification; surfacing; surface layer; microstructure; alloying elements; performance characteristics.

Fig. 6. Ref.: 11 titles.

Введение. Преимущество применения технологических лазеров обусловлено возможностями сфокусированного лазерного излучения: бесконтактность и локальность воздействия, минимальная зона термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения, снижение уровня остаточных напряжений, отсутствие коробления, повышение дисперсности структуры и т. д. Оплавление поверхностного слоя при такой обработке обеспечивает возможность лазерной наплавки, лазерного легирования и модифицирования (как промежуточного процесса между наплавкой и легированием) поверхностного слоя элементами, наносимыми на поверхность в виде шликерной обмазки, напыленного покрытия, инъекцией порошка в ванну расплава, наведенную лазерным лучом [1—6]. Процесс лазерного легирования происходит путем конвективного массопереноса в жидкой ванне и диффузионного перераспределения легирующих элементов. В условиях лазерного легирования, в отличие от обычной химико-технической обработки (ХТО), можно обеспечить очень высокое насыщение матрицы легирующим элементом на значительную глубину (до 1 мм) за короткое время. Введение различных легирующих элементов при лазерной обработке приводит к существенному изменению эксплуатационных характеристик материала (твердость, контактная

прочность, износостойкость, жаропрочность и др.). Этот метод позволяет создавать широкий спектр легированных поверхностных слоев в зависимости от конкретных условий эксплуатации. По сравнению с ранее известными способами (например, цементация, азотирование, борирование и т. д.) модификация поверхности легированием при локальном лазерном нагреве и высоких скоростях плавления и затвердевания обладает рядом преимуществ: экономией легирующего материала, минимальным объемом последующей механической обработки, отсутствием деформации деталей и необходимостью последующей термической обработки, достаточно хорошим воспроизводством.

Применение лазерного излучения является перспективным также в технологии наплавки износостойких покрытий [1—6]. При этом обеспечивается высокая прочность сцепления покрытия с основой вследствие частичного проплавления и минимального теплового воздействия на обрабатываемое изделие. Появляется реальная возможность создания износостойких слоев на поверхностях деталей, изготовленных из недорогих и недефицитных марок сталей и сплавов. Кроме того, использование энергии лазера позволяет восстанавливать отдельные изношенные места с повышением физико-механических свойств поверхности. При этом процесс осуществляется таким образом, что основа подплавляется минимально, а свойства покрытия определяются в основном свойствами присадочного материала. В зависимости от вида детали можно проводить лазерное оплавление предварительно нанесенного покрытия или непосредственно лазерную наплавку при подаче в зону лазерного нагрева присадочного материала в виде порошка или проволоки. При этом обеспечиваются высокое качество наплавленного слоя, высокая прочность его сцепления вследствие металлургической связи с основой и минимальное тепловое воздействие на обрабатываемую деталь. В общем, при легировании идет расплавление тонкого слоя присадочного материала и металла основы и их интенсивное перемешивание для получения заданного состава поверхностного слоя. При лазерной наплавке процесс ведут с минимальным перемешиванием с основой (до 10...15 %), обеспечивая металлургическую связь, когда состав и свойства поверхностного слоя практически полностью определяются составом и структурой присадочного материала после лазерной обработки.

Следует отметить, что большие потенциальные возможности этих методов обработки зачастую сложно реализовать на практике вследствие не всегда верного выбора энергетических характеристик луча, таких как интенсивность излучения, частота импульсов облучения и т. д. Помимо этого, сложности с правильным выбором легирующих и наплавочных материалов, связующих компонентов, отсутствие достаточной информации относительно количественных показателей составов, получаемых физико-механических и эксплуатационных свойств до сих пор серьезно сдерживают развитие процессов лазерного легирования-модифицирования-наплавки как весьма перспективных способов лазерной поверхностной обработки.

Методика эксперимента. В рамках данной работы проведено изучение геометрических размеров, качества и структуры поверхностных слоев, создаваемых в результате лазерной обработки легирования-модифицирования-наплавки, на образцах на основе металлического порошка со средним размером частиц 3 мкм марки DIN 1.2083, изготовленных селективным лазерным спеканием (SLS — selective laser sintering) [7] и из стали 40X. Химический состав порошка в первом случае был следующим: C ~0,4%; Si ≤ 1%; Mn ≤ 0,8%; P ~0,03%; S ~0,03%; Cr ~1,3%; Ni ≤ 0,8%. В качестве легирующих материалов использовались порошки вольфрама и различных химических соединений: W₂B₅, Co₃B, B₄C, TiC, Cr₂₃C₆, TiN, TaSi₂. Предварительно на поверхности формировали слой, нанося на нее шликерным методом вышеуказанные порошки. Это обеспечивает экономный расход легирующих элементов и возможность получения в зоне упрочнения большой концентрации легирующего элемента, которая легко регулируется толщиной слоя обмазки. Следует отметить, что именно этим способом можно наносить самые разнообразные легирующие композиции, что нельзя

осуществить никаким другим методом. Толщина слоя составляла $\sim 100 \dots 150$ мкм. Дальнейшее увеличение толщины слоя (свыше 300 мкм) обычно приводит к большой шероховатости поверхности, появлению трещин и пор.

При лазерном модифицировании и наплавке предварительно на образцы указанных сталей шликерным методом наносили порошок износостойкого состава, содержащего карбиды вольфрама, хрома, бориды и другие тугоплавкие соединения. Для наплавки использовали порошки износостойких сплавов на кобальтовой ПГ-10К-01 и никелевой ПГ-10Н-01 основах, а также Т-Термо 650 (ПГ-10Н-01 + 50% WC). Обработку поверхности проводили с использованием CO₂-лазера непрерывного действия «Комета-2».

Режимы лазерной обработки для сталей подбирались в зависимости от плотности мощности лазерного излучения установки, линейных скоростей перемещения лазерного луча, расстояния между лазерными дорожками и диаметра лазерного пятна. Микроструктурный анализ проводили на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-2 на травленых шлифах в поперечных сечениях перпендикулярно поверхности, элементный — на электронном микроскопе SEM 515 с приставкой EDAX, дюрометрический — на микротвердомере ПМТ-3.

Результаты исследований и обсуждение. Установлено, что размеры легированной зоны зависят в основном от энергетических параметров излучения и фокусирующей системы, окружающей газовой атмосферы. Установлено, что при оптимальных режимах обработки вся зона поверхностного легирования может иметь достаточно однородный состав, зависящий в основном от толщины слоя предварительно нанесенного материала (TaSi₂) и глубины оплавления (рисунок 1). Аналогичный вид имели структуры при легировании порошком В₄С.

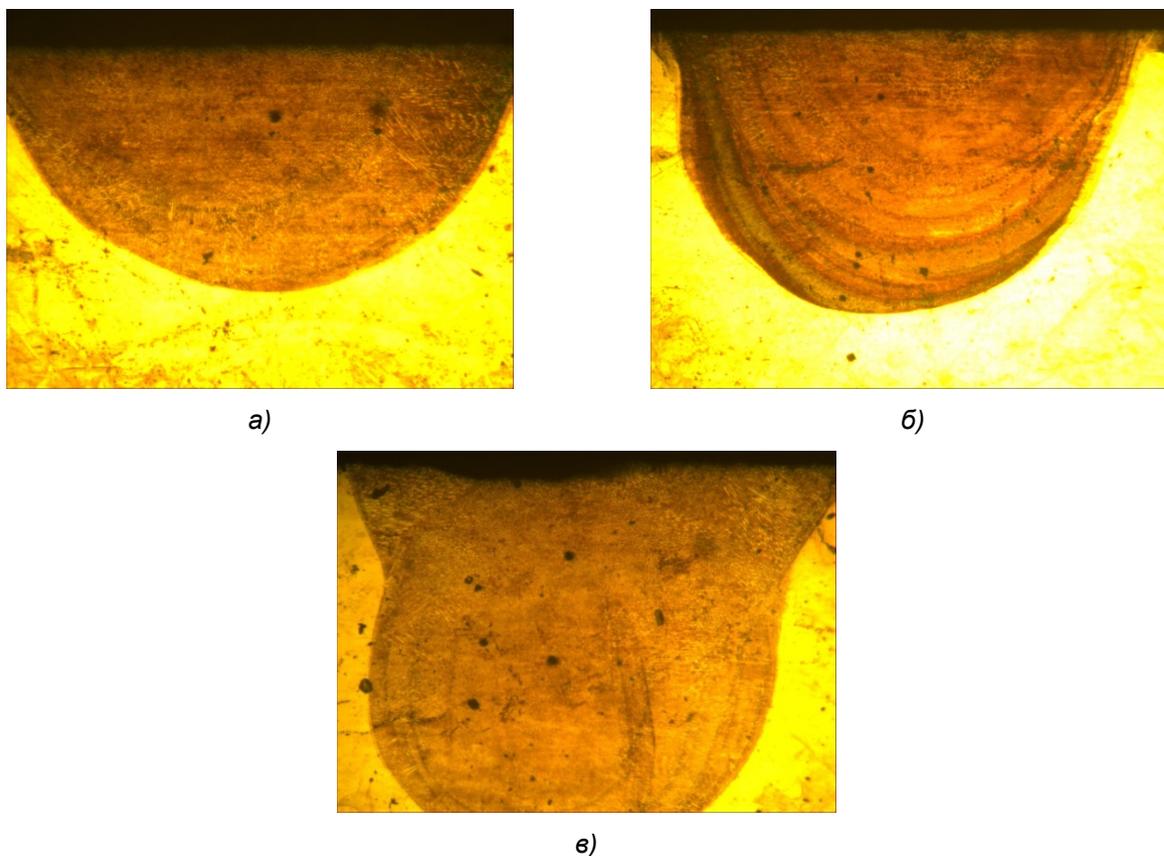


Рисунок 1. — Типичная структура зон лазерного легирования легирующим порошком TaSi₂ при различных режимах обработки. $\times 126$ (а); $\times 250$ (б); $\times 200$ (в)

В то же время при использовании других порошков в зависимости от режима лазерной обработки в структуре могли наблюдаться нерастворившиеся остаточные включения (рисунок 2).

На рисунке 3 приведены распределения микротвердости по глубине лазерного легирования с использованием порошка W_2B_5 , при этом микротвердость включений составляла на уровне 1600...2500 кг/мм². Изменение содержания легирующих компонентов при переходе от области лазерного расплавления к материалу основы происходит в достаточно узкой зоне, зачастую почти скачкообразно. Главной причиной выравнивания концентрации компонентов при лазерном легировании поверхности является перемешивание металла в жидком виде. Большую роль играют также термические и диффузионные процессы.

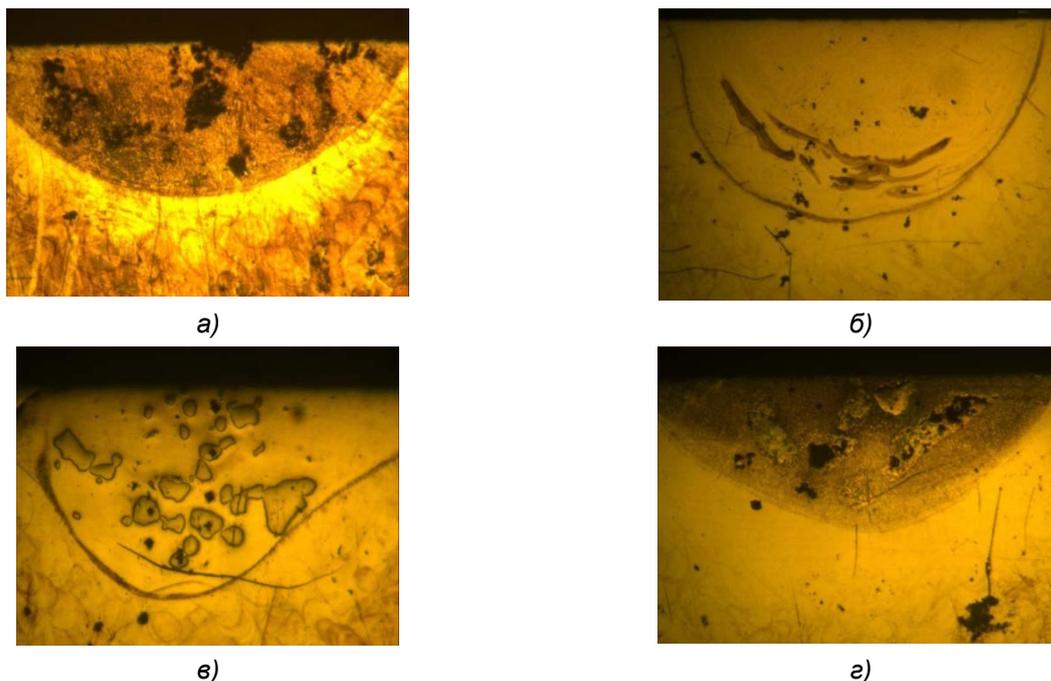
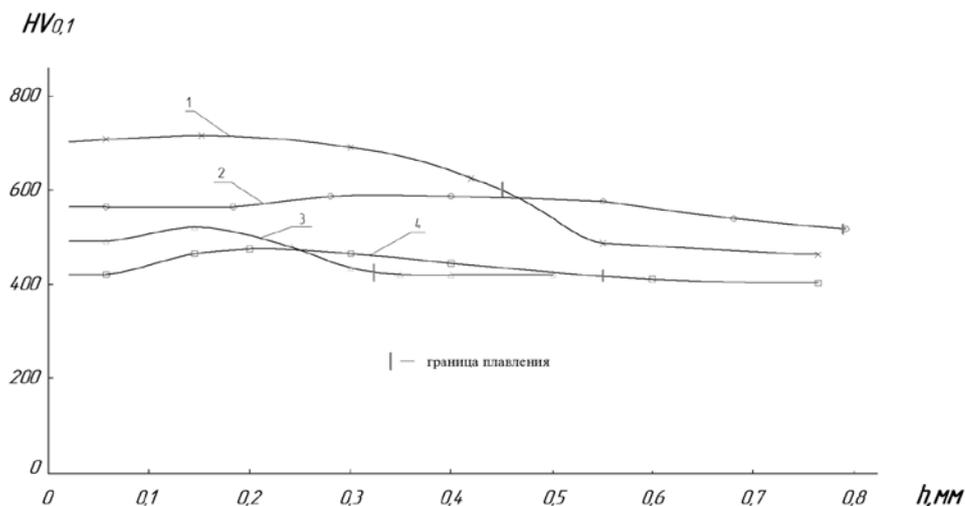


Рисунок 2. — Характерные структуры зон поверхностного легирования при использовании различных легирующих материалов: легирующий порошок TiN (а); $Cr_{23}C_6$ (б); W (в); Co_3B (г)



легирующий порошок — W_2B_5 ; 1 — 65 см/мин; 2 — 8,5 см/мин; 3 — 90 см/мин; 4 — 55 см/мин

Рисунок 3. — Распределение микротвердости в основе по глубине лазерного легирования для различных скоростей сканирования лучом

Приведенные оценки свидетельствуют, что действие этих факторов может оказывать влияние на структурно-фазовое состояние материала лишь в микроскопических объемах из-за весьма малого времени воздействия на поверхность лазерного луча. Термодиффузия элементов из области расплава в зону термического влияния распространяется на глубину порядка 10 мкм. Правда, в ряде случаев экспериментальными исследованиями было обнаружено перераспределение некоторых легирующих компонентов в твердой фазе в зоне термического влияния на глубинах до 200...300 мкм. Этот факт может быть связан с образованием тонких каналов-прослоек жидкой фазы по границам зеренной и блочной структуры и массопереносом по ним в твердой основе металла. Причинами такого массопереноса в твердом состоянии могут являться резкие локальные деформации и дислокационные перемещения соответствующих атомов [8].

Следует отметить, что основное отличие строения зон лазерного легирования при оптимальных режимах от вида диффузионных покрытий состоит в отсутствии стабильной слоистости. Из-за конвективного перемешивания расплава в зоне легирования при удалении от поверхности, постепенного перехода от выделившихся фаз с большей концентрацией легирующего компонента к соответствующим фазам с меньшим содержанием не происходит. Как правило, по глубине все имеющиеся фазы в зоне легирования при оптимальных режимах обработки перемешиваются достаточно равномерно. Строение зоны лазерного легирования выглядит аналогично строению соответствующей области при лазерной закалке с поверхностным оплавлением. Главное отличие состоит в том, что в ванну расплавленного металла вводятся легирующие компоненты. Было отмечено, что в зоне расплава образующаяся мартенситно-аустенитная структура с возрастанием скорости обработки становится более дисперсной. Установлено, что в микроструктуре основными ее элементами являются твердые растворы на основе α - и γ -железа и дисперсные включения упрочняющих фаз в виде боридов и карбидов железа и хрома. Наряду с этим твердые растворы на основе α - и γ -железа могут быть значительно пересыщены, к примеру, такими элементами внедрения, как углерод и бор [9].

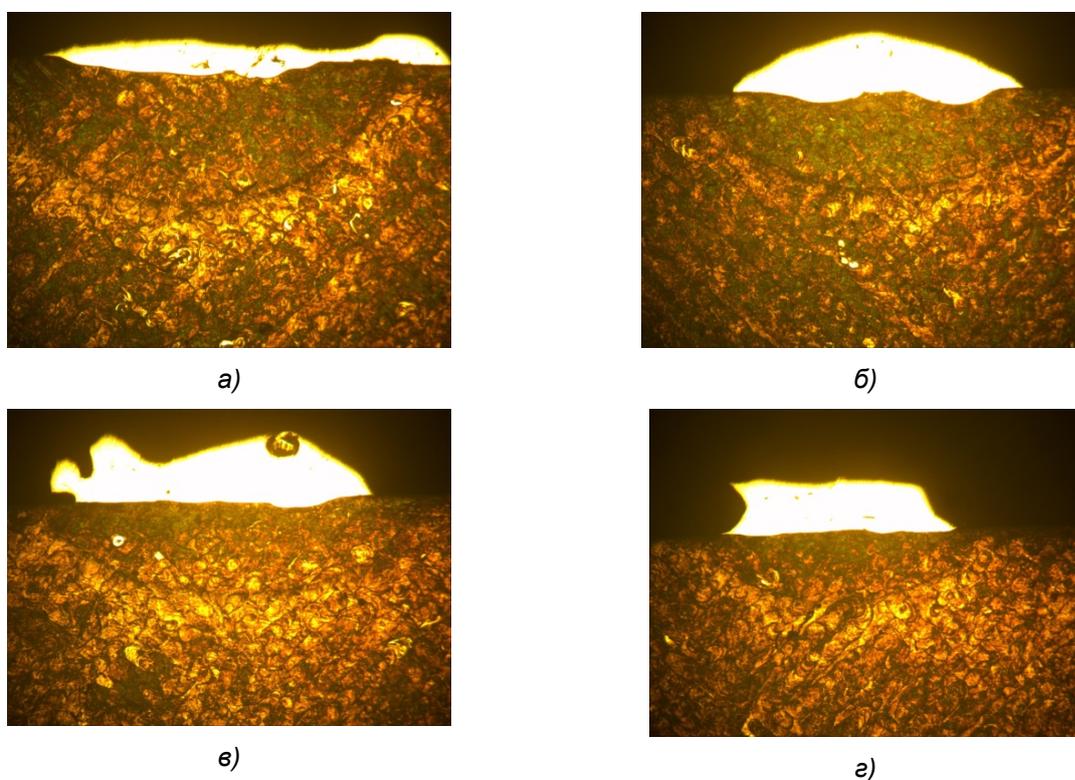
Отметим также, что при лазерном легировании упрочняющие фазы могут иметь свои морфологические особенности. После лазерного воздействия в структуре легированных зон, так же, как и наплавленных слоев [5], могут присутствовать глобулярные, линейчатые или звездчатые фрагменты. Например, линейчатые фрагменты характерны для карбидов хрома, а звездчатые дендриты — для боридов железа, тогда как глобулярные характерны и для боридов, и для карбидов железа и хрома. Микротвердость в зоне легирования могла достигать 13 000...18 000 МПа, при этом в зоне легирования могли быть полностью исключены такие дефекты, как поры и трещины. Причем такая картина была более выраженной при обработке в инертной атмосфере. Таким образом, методы лазерного легирования дают возможность получения высококачественных деталей и изделий, которые работают в тяжелых условиях, в том числе при интенсификации режимов их эксплуатации и более высоких скоростей и нагрузок. Экономический эффект от применения способов лазерного легирования заключается в значительном снижении расхода дефицитных и достаточно дорогостоящих материалов, повышении ресурса работы различных деталей, изделий и инструмента, машин и механизмов, различного оборудования [10].

Особый интерес представляет протекание процесса модифицирования поверхностного слоя. По сути, этот процесс происходит при режимах на грани процессов легирования-наплавки. Размеры заглупления в металл основы при этом процессе приблизительно равны толщине наращенного слоя. Общая толщина получаемого слоя составляет порядка 0,2...0,3 мм. При этом толщина предварительно наносимой шликерной обмазки такого же порядка ~0,2 мм. Предварительно нанесенный слой шликерной обмазки из порошкового сплава ПГ-10К-01 на кобальтовой основе оплавлялся излучением CO_2 — лазера при различных скоростях сканирования лазерного луча. Обработка проводилась в воздушной атмосфере. Химический состав используемого порошка следующий: С — 1,5%, Cr — 23 %, Ni — 30 %, Со — осн.,

Si — 1,0 %, W — 4,0 %, В — 1,5 %. На рисунке 4 приведены характерные валики, образующиеся при таком оплавлении. Видно, что с увеличением скорости сканирования заглублиение в металл основы снижается, а наплавочный материал стягивается с краев под действием сил поверхностного натяжения и постепенно формируется наплавочный валик. При этом постепенно снижаются размеры зон термического влияния (ЗТВ) в материале основы.

Так, ширина ЗТВ уменьшается с 2,2 мм до 1,25, а глубина — с 1,0 мм до 0,5 мм. Наблюдается также, что под действием давления от «паров отдачи» (см. рисунок 4, а, справа) расплав может смещаться за пределы ЗТВ. Максимальная интенсивность лазерного факела при лазерной обработке наблюдалась именно при минимальных скоростях сканирования луча, т. е. при максимальных энергозатратах. На рисунке 5 приведены зависимости микротвердости поверхностного слоя по глубине при лазерном оплавлении покрытия из порошкового сплава ПГ-10К-01 при различных скоростях сканирования луча. Такое распределение микротвердости по глубине можно связать с процессами интенсивного выплескивания капель расплава, испарения и выгорания компонентов из расплава порошкового слоя и с их перемешиванием с материалом основы.

Аналогичный эксперимент был проведен с использованием порошков на никелевой основе ПГ-10Н-01 и Т-Термо 650 (ПГ-10Н-01 + 50% WC). Обработка проводилась как на воздухе, так и в инертной атмосфере — при подаче в зону наплавки аргона. Твердость основы наплавленных валиков из порошков на Ni-основе с увеличением содержания бора и углерода возрастает от 5 200...5 700 до 7 900...9 300 МПа. С использованием электронного микроскопа SEM 515 с приставкой EDAX для элементного анализа было проведено изучение распределения различных элементов по глубине валиков при лазерной наплавке в воздушной атмосфере (рисунок 6, а) и в инертной среде — в аргоне (см. рисунок 6, б).



$V = 10$ (а), 20 (б), 30 (в), 40 (г) см / мин

Рисунок 4. — Фотографии валиков при лазерном оплавлении покрытия из порошкового сплава ПГ-10К-01 при различных скоростях сканирования луча. $\times 50$

ляющем собой механическую смесь самофлюсующегося порошка на никелевой основе ПГ-10Н-01 и карбида вольфрама WC, помимо непосредственно карбида присутствуют довольно крупные частицы вольфрама. При оплавлении обычного самофлюсующегося порошка с присутствующими в нем добавками бора и кремния происходит их окисление окружающим воздухом. При этом легкие оксиды последних всплывают в виде шлака и в конечном итоге защищают расплав от дальнейшего окисления. В то же время при наплавке в инертной атмосфере — аргоне — окисления этих добавок бора и кремния не происходит, и они могут активно взаимодействовать с имеющимися в расплаве частицами вольфрама с образованием соответствующих силицидов или боридов.

Как известно [11], среди тугоплавких металлов вольфрам имеет самые высокие значения температуры плавления, модуля упругости и коэффициента теплопроводности. При нагревании вольфрама с бором, углеродом или кремнием свыше 1 000...1 200 °С образуются бориды, карбиды и силициды вольфрама. Силициды вольфрама (WSi_2 , W_5Si_3) обычно получают нагреванием смеси порошков вольфрама и кремния в инертной или восстановительной среде. Силициды вольфрама характерны своей твердостью и высокой температурой плавления. Из силицидов более широко применяют дисилициды вольфрама, молибдена и титана, благодаря их исключительной окислительной устойчивости, вследствие чего их используют в качестве материалов для нагревателей, работающих в воздушной среде в интервале 1 300...1 700 °С. В этой связи можно предположить, что образующиеся при лазерной наплавке в инертной атмосфере слои на основе самофлюсующегося порошка Т-Термо 650 могут обладать комплексом высоких физико-механических свойств, таких как износостойкость, термостойкость и т. д. Следует также отметить появление железа в зоне наплавки, что связано с подплавлением основы и с перемешиванием с наплавляемым материалом. В то же время концентрация хрома и никеля в наплавленном слое постепенно снижается при приближении к границе наплавки.

Заключение. Проведены исследования влияния газовой среды (воздух, аргон) на особенности протекания процессов лазерной обработки: легирования-модифицирования-наплавки. Изучены геометрические размеры, структура и качество поверхностных слоев, создаваемых в результате лазерного воздействия. Отмечено, что лазерная обработка типа легирование-модифицирование-наплавка из обзоров увеличивает разнообразие возможных структур получаемых поверхностных слоев по сравнению с традиционными способами химико-термической обработки. При этом технологии лазерной обработки из шликерных обзоров позволяют весьма экономно использовать присадочные материалы, практически до 100%. Химическим составом слоя, его микротвердостью и однородностью можно управлять путем регулирования следующих основных параметров обработки: типа и толщины присадочной обмазки, фракционного состава используемого порошка, рода окружающей газовой среды, геометрии фокусировки лазерного излучения, мощности и скорости сканирования луча.

По аналогии с лазерным поверхностным упрочнением сталей в этом случае также наблюдается волнообразный характер изменения микротвердости по сформированным слоям: сформированный слой с измененным химическим составом, закалки в твердой фазе, отпуска и основного металла подложки. В зависимости от поглощенной энергии лазерного излучения меняются глубины слоев и степень упрочнения мартенситно-аустенитной структуры при перекристаллизации. Микротвердость в зоне легирования могла достигать 13 000...18 000 МПа, при этом в зоне легирования могли быть полностью исключены такие дефекты, как поры и трещины. Причем такая картина была более выраженной при обработке в инертной атмосфере (аргон). Глубина зоны упрочнения уменьшается по мере увеличения линейной скорости перемещения луча, суммарная протяженность зоны термического влияния также уменьшается по мере увеличения скорости обработки.

Установлено влияние рода защитного газа на топографию и твердость поверхности сформированной композиции. Лазерная наплавка композиционного порошка на никелевой

основе в аргоновой среде по сравнению с воздушной обеспечивает более однородный по высоте и регулярный рельеф поверхности. Более высокая твёрдость имеет место при воздушной защите зоны наплавки. Такая тенденция может быть связана как с формированием твёрдых нитридных и оксидных фаз в процессах взаимодействия ванны расплава с азотом и кислородом при воздушной защите, так и с образованием силицидов вольфрама при обработке в аргоне порошка Т-Термо 650. При этом твердость матрицы в наплавленном слое возрастает по мере растворения упрочняющих фаз и насыщения твердого раствора основного металла и может достигать 18 000 МПа и выше.

Следует считать перспективным применение методов лазерного легирования-модифицирования-наплавки для упрочнения быстроизнашивающихся поверхностей деталей широкой номенклатуры, в частности, для лазерной модификации поверхности спеченных с помощью SLS-технологии дисперсных порошков на основе железа. Глубина упрочненных слоев при модифицировании может составить до 0,2...0,3 мм, при легировании — до 0,7...1,0 мм, при наплавке — до 1,0...1,5 мм. Достижимые твердости при этом могут быть от 50 до 70 HRC. Методы предварительного нанесения присадочного порошка — шликерный, газотермическое напыление, химсостав присадочного порошка — зависят от марки спекаемого материала.

Список цитируемых источников

1. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров ; под ред. А. Г. Григорьянца. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 664 с.
2. Астапчик С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. — Минск : Беларус. наука, 2008. — 252 с.
3. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов : справочник / Н. Н. Рыкалин [и др.]. — М. : Машиностроение, 1985.
4. Технологические лазеры : справочник : в 2 т. / Г. А. Абильсиитов [и др.] ; под общ. ред. Г. А. Абильсиитова. — М. : Машиностроение, 1991.
5. Особенности структуры наплавленных слоев при лазерной обработке / Т. В. Тарасова [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — М. : Машиностроение, 2010.
6. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И. Н. Шило, [и др.]. — Минск : БГАТУ, 2010. — 320 с.
7. Лазерная модификация спеченных дисперсных порошков на основе железа / В. Маркович [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16—18 сент. 2015 г. : в 2 кн. — Минск, 2015. — Кн. 2. — С. 330—335.
8. Лахтин, Ю. М. Поверхностное насыщение стали бором при воздействии излучения лазера / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, А. В. Бурякин // МиТОМ. — 1985. — № 11.
9. Брежнев, А. А. Формирование модифицированных упрочненных слоев на сталях методами комплексного поверхностного легирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Брежнев. — М., 2012.
10. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. — 6-е изд. — М. : Metallurgia. — 1986. — 544 с.
11. Защита вольфрама от окисления при высоких температурах / В. Е. Иванов [и др.]. — М. : Атомиздат, 1968. — 159 с.

Поступил в редакцию 21.05.2019