



УДК 621.785.5: 621.9.048.7

## ЛАЗЕРНОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ (Обзор)

А. В. БЕРНАЦКИЙ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Выполнен анализ литературы, посвященной лазерному поверхностному легированию стальных изделий. Исследованы процессы, происходящие при формировании структуры поверхностных слоев при лазерном легировании сталей. Приведены примеры практического применения лазерного поверхностного легирования сталей различными материалами и смесями. Показано, что при лазерном легировании обеспечивается возможность формирования поверхности стальных изделий, которые имеют высокий уровень твердости, теплостойкости, износостойкости, коррозионной стойкости и других физико-механических характеристик. Установлено, что работы, выполненные в этом направлении, не носили системного характера, а зачастую были направлены на решение локализованной задачи повышения эксплуатационных характеристик отдельно взятого материала или деталей из него. Поэтому полученные разными авторами результаты не поддаются систематизации из-за существенных различий в схемах и условиях проведения исследований. Библиогр. 50, рис. 2.

*Ключевые слова:* лазерное легирование, схема, процесс, зона легирования, сталь, легирующие материалы, промышленное внедрение

С ростом требований к качеству рабочего слоя [1, 2], показателям экономической эффективности процессов [3], подбору материалов в зависимости от поверхностных свойств и сечения деталей, а также вследствие увеличения объемной доли комплекснолегированных сталей в процессе производства деталей и инструмента, становятся актуальными задачи применения ресурсосберегающих технологий для повышения эксплуатационного ресурса нагруженных стальных изделий, например, поверхностным легированием [4].

Легирование (от лат. *ligo* — связываю, соединяю) — введение добавок (металлов, неметаллов и их соединений) в металлы, сплавы и полупроводники для придания им определенных физических, химических, механических свойств [5]. При легировании металлов и сплавов могут образовываться твердые растворы, смеси двух и более фаз, интерметаллиды, карбиды, нитриды, оксиды, сульфиды, бориды и другие соединения легирующих элементов с основой сплава или между собой [4, 5].

В результате легирования существенно меняются физико-химические характеристики исходного металла или сплава и прежде всего электронная структура [5]. Легирующие элементы влияют на температуру плавления, характер дефектов кристаллической решетки, на формирование зерен и тонкой кристаллической структуры, область существования аллотропических модификаций и кинетику фазовых превращений, на дислокационную структуру, жаростойкость и коррозионную стойкость, электрические, магнитные, механические,

диффузные и многие другие свойства сплавов [3–8].

Легирование подразделяют на объемное и поверхностное [5]. При объемном легировании легирующий элемент в среднем статистически распределяется в объеме металла. В результате поверхностного легирования легирующий элемент концентрируется на поверхности металла. Легирование сразу несколькими элементами, определенное содержание и соотношение которых позволяет получить необходимый комплекс свойств, называют комплексным легированием и соответственно сплавы — комплекснолегированными. Например, в результате легирования аустенитной хромоникелевой стали вольфрамом ее жаропрочность возрастает в 2...3 раза, а при совместном использовании вольфрама, титана и др. элементов — в 10 раз [5].

В основе большинства традиционных процессов поверхностного легирования сталей (в сочетании с термической обработкой) лежит диффузное насыщение элементами из газовой или жидкой фазы и химическое осаждение из газовой фазы [9]. Общее название этих методов — химико-термическая обработка (ХТО). К таким процессам относят алитирование (легирующий элемент алюминий), цементацию (легирующий элемент углерод), цианирование (легирующие элементы углерод и азот), азотирование (легирующий элемент азот), борирование (легирующий элемент бор) и т. д. [5, 9].

Однако перечисленные методы ХТО имеют ряд общих существенных недостатков как по технологии процесса, так и по свойствам легирован-



ного слоя. К числу основных недостатков, ограничивающих применение этих способов как методов обработки, упрочняющих поверхность, можно отнести [10]:

— большую продолжительность операции (например, скорость насыщения углеродом порядка  $2,8 \cdot 10^{-5}$  мм/с, а для получения азотированного слоя толщиной 0,5 мм в конструкционных сталях при 773...793 К нужно потратить 50...70 ч), следствием чего является малая производительность процесса;

— деформацию и коробление под действием напряжений, создаваемых условиями нагрева во время технологического процесса и последующего охлаждения и, как следствие, необходимость в дополнительных операциях механической обработки;

— хрупкость и отшелушивание внешней части обработанного слоя.

Также недостатками перечисленных выше методов ХТО является небольшая толщина легированного слоя и плохая его связь со структурой базового металла. При форсированных режимах эксплуатации легированный слой быстро срывается с поверхности детали.

В связи с растущими эксплуатационными требованиями к тяжело нагруженным деталям различных узлов и механизмов актуальными становятся задачи повышения жаростойкости и трещиностойкости. Однако обычная ХТО с закалкой и отпуском хотя и влияет на свойства изделия, во многих случаях явно недостаточна. Она в наибольшей степени подходит для повышения износостойкости, коррозионной стойкости и в меньшей степени для повышения жаростойкости, а

также сопротивления возникновению и распространению трещин [5].

Применение перечисленных выше методов поверхностного легирования в значительной степени связано с историей развития машиностроения в развитых странах. Сама эволюция этих методов была вызвана стремлением повысить эксплуатационные качества поверхностных слоев нагруженных стальных изделий. На современном этапе развития техники и технологии особое внимание вызывают новые методы поверхностного легирования, позволяющие устранить перечисленные недостатки указанных выше методов [10]. В основе этих новых методов лежит использование локальных источников нагрева. Для модифицирования поверхности металлов предпочтение отдается таким методам, которые используют в качестве теплового источника концентрированные потоки энергии: лазерные, ионные, ультразвуковые и другие.

Лазерные технологии позволяют успешно решать проблему создания материалов с заданным комплексом свойств путем целенаправленного формирования структуры [10–50]. При лазерном легировании появляется возможность формировать такие поверхностные слои, которые имеют высокий уровень твердости [10–12], теплостойкости [10, 13, 14], износостойкости [10, 15–17], коррозионной стойкости [10, 18] и других характеристик [10–20]. Процессы локального легирования реализуются посредством как импульсного [6, 10–13, 17], так и непрерывного [6, 8, 10, 12–20] лазерного излучения. При этом могут применяться различные схемы обработки «с перекрытием» [10, 12, 13, 15–17, 19, 20] и без него [6, 10–13, 17]. Результаты процесса зависят также от способа подачи в зону обработки легирующего материала [10, 12, 13, 17], вида легирующего элемента (элементов) [6, 8, 10–20], свойств матричного материала [10–13, 15, 17] и многих других факторов.

Поверхностное лазерное легирование заключается в получении легированных слоев с принудительной подачей присадочных материалов непосредственно в зону действия сфокусированного лазерного излучения. Схема процесса лазерного легирования показана на рис. 1 [12]. Образец с тонким слоем легирующей обмазки при движении под лазерным лучом локально оплавляется, легирующие компоненты переходят в объем жидкой ванны металла, которая затем кристаллизуется.

Исследования процесса лазерного поверхностного легирования [6, 8, 10–20] показывают, что лазерное излучение, направленное на обрабатываемую поверхность, частично поглощается присадочным и основным материалами, а частично отражается. Вследствие поглощения в зоне действия лазерного излучения начинает действовать интенсивный источник теплоты [10]. При плот-

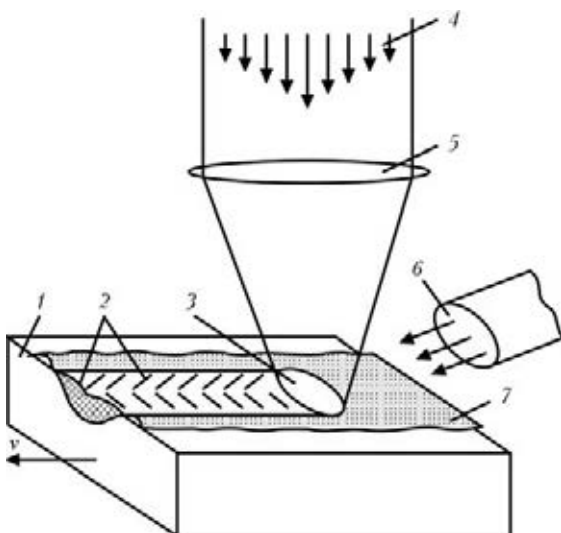


Рис. 1. Схема процесса лазерного легирования [12]: 1 — образец, движущийся со скоростью  $v$ ; 2 — легированная дорожка; 3 — ванна расплава; 4 — лазерный пучок; 5 — фокусирующая система; 6 — защитный газ; 7 — легирующая обмазка



ностях мощности излучения  $10^5 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> происходит активный локальный разогрев присадочных материалов, при котором на поверхности ванны расплава (жидкой фазы) образуется парогазовая фаза [12]. При лазерном легировании происходят взаимосвязанные процессы теплопереноса и микрометаллургические процессы. При перемещении лазерного луча расплавленный металл вследствие явления теплопереноса (интегрального действия давления пара, разницы сил поверхностного натяжения в центральной и хвостовой частях ванны расплава, турбулентных течений расплава) оттесняется в хвостовую часть ванны [10]. В момент существования жидкого металла благодаря термокапиллярной конвекции Марангони происходит перемешивание расплавленной легирующей композиции с металлической матрицей [21]. При этом происходит насыщение поверхности сталей легирующими элементами из композиций, образование химических соединений, частичная гомогенизация в зоне жидкого металла [8, 10, 13]. При кристаллизации металла ванны расплава образуется легированный слой. При повышении плотности мощности излучения более  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> наблюдается переход в режим кинжального проплавления, характеризующегося образованием парогазового канала в ванне расплава [10].

Рассмотрим более подробно процессы, происходящие при формировании структуры поверхностных слоев при лазерном легировании сталей. В зависимости от теплофизических характеристик материала основы, а именно от теплопроводности, поверхность металла разогревается до разных температур [10, 13, 17, 22]. В случае, когда материал основы имеет низкий коэффициент теплопроводности, металл в ванне расплава разогревается до очень высоких температур. Глубина ванны расплава при этом небольшая. Концентрация легирующих элементов резко возрастает. При воздействии лазерного излучения на поверхность сталей, имеющих высокий коэффициент теплопроводности, глубина ванны расплава увеличивается, и, соответственно, содержание легирующих элементов в ванне снижается [10]. При этом температура в зоне оплавления оказывается ниже, чем в первом случае.

В связи с тем, что наибольшее распространение получили лазерные установки с гауссовым распределением энергии в лазерном пучке, в центре луча наблюдается максимум энергии, а к периферии луча его энергия уменьшается [10, 23]. Таким образом, в центре тепловой источник более сильно нагреет, чем на периферии. Следовательно, и металл оказывается нагретым тоже неравномерно [12, 13, 24]. Это способствует возникновению кругового характера движения жидкости, направленного от поверхности металла к периферии и

вглубь ванны расплава [10–13, 21, 23, 24]. Потoki жидкости как бы симметрично закручиваются в противоположные стороны, т. е. создаются два симметричных макровихря [12, 13, 21]. Они образуются в том случае, когда физико-химические и механические свойства жидкого металла по всей ванне расплава одинаковы. При дальнейшем перемещении теплового источника в пределах ванны расплава образуются несколько вихрей, так как свойства металла в зоне лазерного воздействия существенно отличаются [12]. С одной стороны, где к ванне расплава прилегает холодный, не нагретый лазерным лучом металл, теплоотвод осуществляется интенсивнее, чем со стороны металла, уже подверженного влиянию лазерного излучения. Таким образом, с одной стороны ванны расплава температурный градиент оказывается большим, чем с другой [11]. Движение металла происходит от областей с более высокой температурой к менее нагретым областям [12]. Вихревой характер движения жидкости приводит к ее интенсивному перемешиванию, что способствует получению гомогенной структуры [10]. При этом высокие температуры в сочетании с малым временем позволяют сохранить высокую концентрацию легирующих компонентов [10–20].

Все экспериментальные данные показывают достаточно однородное распределение легирующей добавки по сечению жидкой ванны [10–20]. Это однозначно указывает на главную роль конвективного теплопереноса по сравнению с диффузионным [10]. Испарением металла (и соответственно давлением отдачи паров) при легировании пренебрегают [12], так как практически всегда процесс легирования идет ниже температуры кипения материала.

Зона обработки после лазерного легирования имеет строение, аналогичное строению зоны после лазерной закалки с оплавлением. Отличие заключается в том, что в металл расплавленной ванны вводят легирующие элементы. Диффузия элементов из зоны оплавления в зону термического влияния обычно происходит на глубину не более 10 мкм [10, 11]. Однако в некоторых случаях экспериментально обнаружено перераспределение легирующих элементов в твердой фазе под зоной оплавления на глубине 200...300 мкм [10, 12, 13, 17]. Это может быть вызвано образованием тонких каналов жидкой фазы по границам зерен и блоков в твердом металле и теплопереносом по этим каналам [12, 13, 17]. Процессы теплопереноса в твердой фазе также могут быть обусловлены дислокационным перемещением атомов в результате быстрых локальных деформаций [10, 12].

Отличие строения зон, легированных лазером, от строения диффузионных покрытий заключается в отсутствии слоистости [10]. Вследствие конвективного перемешивания расплава по мере



удаления от поверхности, перехода от фаз с большей концентрацией легирующего элемента к фазам с меньшей концентрацией не происходит [10, 12, 13, 17]. Все фазы в легированной зоне по глубине перемешаны примерно равномерно [10].

Существуют следующие способы подачи легирующего элемента в зону лазерного воздействия [10, 12, 13]:

нанесение легирующего состава в виде порошка на обрабатываемую поверхность;

обмазка поверхности специальным легирующим составом;

легирование в жидкости (жидкой легирующей среде);

накатывание фольги из легирующего материала на обрабатываемую поверхность;

легирование в газообразной легирующей среде;

удержание ферромагнитных легирующих элементов на матричной поверхности магнитным полем;

нанесение легирующего состава газотермическими способами (например, газопламенным, плазменным, детонационным напылением и пр.);

электролитическое осаждение легирующего покрытия;

подача легирующего состава в зону обработки синхронно с лазерным излучением.

Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки [10–13], которые определяют целесообразность его использования в конкретном случае, причем результаты, полученные при незначительных изменениях в технологических режимах и способе подачи материала, могут внести значительные коррективы в полученный результат. Так, в работах [25, 26] экспериментально исследовано влияние концентрации поверхностно-активного вещества (ПАВ) на конвекцию расплава и результаты лазерного легирования. Показано [25], что добавление в легирующую обмазку селена или серы в качестве ПАВ позволило регулировать профиль поверхности и форму сечения легированных дорожек.

Исходя из целей лазерного легирования (повышение износостойкости, коррозионной стойкости, контактной выносливости и других служебных характеристик) [10], необходимо учитывать известные результаты работ по ХТО [1, 4, 5, 9]. Вместе с тем нельзя сразу сопоставлять процессы формирования легированного поверхностного слоя при оплавлении лазером [10–25] с процессами ХТО, при которых легирование идет как диффузия в твердой фазе. При лазерном легировании в результате «жесткого» термического цикла с большими скоростями нагрева и охлаждения характерно образование перенасыщенных метастабильных структур высокой дисперсности, что недостижимо при обычной ХТО [10].

Размеры легированной зоны зависят в основном от энергетических параметров излучения [12] и толщины покрытия из легирующего материала. Как правило, легирование импульсным излучением обеспечивает меньшие размеры легированной зоны, чем при обработке непрерывным излучением [10–17]. В частности, если при импульсной обработке глубина зоны достигает 0,3...0,7 мм, то применение непрерывного излучения мощных  $\text{CO}_2$ -лазеров и Nd:YAG-лазеров позволяет увеличить глубину зоны до 3 мм [10].

Большое количество научных трудов, посвященных использованию способа лазерного легирования широкой номенклатуры металлов и сплавов, появилось в последнее время благодаря работе многих научных коллективов. В качестве легирующих добавок традиционно используют три основные группы веществ: неметаллы, металлы и их соединения (например, карбиды) [10–22].

Легирование неметаллическими компонентами (например, углеродом, азотом, бором, кремнием) является альтернативой традиционным методам цементации, азотирования, борирования, силицирования [10, 12, 13, 17].

Легирование низкоуглеродистых сталей углеродом приводит естественным образом к формированию мелкозернистой структуры из мартенсита и остаточного аустенита, причем микротвердость достигает 9000 МПа [10, 14, 17].

Структурой сталей после лазерного азотирования является азотистый мартенсит, остаточный аустенит и нитриды железа [6, 10, 12, 27].

В структуре борированных лазером зон при небольшом содержании бора присутствуют  $\alpha$ -Fe и боридная эвтектика [10, 12, 13, 28]. При этом микротвердость составляет  $(6...12) \cdot 10^8$  МПа [10, 12, 13]. При увеличении концентрации бора в структуре появляется большое количество боридов ( $\text{FeB}$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$ ,  $\text{Fe}_3\text{B}$ ), остаточный аустенит отсутствует, микротвердость резко повышается до  $(14...21) \cdot 10^8$  МПа [10, 13, 28]. Легированная поверхность с повышенным содержанием фазы  $\text{FeB}$  хорошо работает при абразивном износе, тогда как при ударном воздействии рекомендуется получать в структуре бориды  $\text{Fe}_2\text{B}$  и  $\text{Fe}_3\text{B}$  [12, 28].

При увеличении концентрации кремния при лазерном силицировании кроме  $\alpha$ -Fe в структуре зоны лазерного воздействия образуются силициды  $\text{Fe}_3\text{Si}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Si}_3$ ,  $\text{FeSi}$ ,  $\text{FeSi}_2$  и микротвердость сталей увеличивается от  $8 \cdot 10^3$  до  $(14...15) \cdot 10^3$  МПа, значительно увеличиваются также теплостойкость, износостойкость и коррозионная стойкость [10, 12, 13, 19, 20].

Легирование чистыми металлами (алюминием [6, 10, 12, 13, 29], кобальтом [10, 12, 13, 30], хромом [6, 10–13, 30, 31], никелем [6, 10–13, 30, 32] и др.), а также сплавами на их основе приводит к формированию пересыщенных твердых раство-



ров и образованию интерметаллидов. Это способствует значительному росту микротвердости и износостойкости легированных слоев, улучшает сопротивление коррозии и повышает другие физико-механические характеристики изделий. Так, например, лазерная обработка способствует повышению износостойкости в 1,5...3,0 раза при поверхностном упрочнении с последующим азотированием; достигается наибольшая микротвердость и износостойкость низкоуглеродистых сталей азотированием поверхности, легированной алюминием [33]. Однако наличие повышенного содержания интерметаллидов снижает пластичность и охрупчивает легированный слой, что может привести к его преждевременному разрушению [6, 10, 17].

Наличие карбидов, боридов, силицидов, нитридов и их комбинаций в структуре материала позволяет существенно повысить его твердость и износостойкость, теплостойкость и коррозионную стойкость [6, 10–21, 34–36]. В частности, повышение износостойкости поверхностей трения деталей фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением обеспечивается лазерным легированием с обмазкой (15 % Fe + 30 % Ni + 20 % В + 10 % Si + 25 % жидкого стекла) в атмосфере азота на режиме ( $q = 0,31 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>,  $v = 33$  мм/с) [36]. При этом снижается износ штока и втулки соответственно в 3,44 и 3,21 раза.

Ниже приведены примеры практического применения лазерного легирования стальных изделий различными материалами и смесями. Технология лазерного легирования освоена в ЗАО «Сибур-Химпром» (г. Пермь) для упрочнения поверхности деталей, работающих при различных видах износа [11]. В работах [11, 22, 37] показано, что в результате лазерного легирования композицией (В<sub>4</sub>С + Сг) на поверхности плунжеров насосно-компрессорного оборудования, изготовленных из сталей 10, 20, 15Х, 12ХН3А и 12Х2Г2НМФТ формируются слои глубиной 0,15...0,25 мм. Микро-рентгеноспектральным анализом установлено [37], что после лазерной обработки происходит интенсивное насыщение поверхностных слоев легирующими элементами, например, содержание хрома в слоях возрастает в 9...13 раз. В фазовом составе слоев присутствуют сильно пересыщенные твердые растворы на основе альфа и гамма модификаций железа, а также бориды и карбиды хрома и железа. Установлено, что скорость коррозии легированных слоев уменьшается в 3...8 раз (соответственно для 573 и 1173 К), по сравнению со скоростью коррозии слоев, не подвергавшихся обработке [11]. Испытания на износ в условиях трения скольжения показали, что износостойкость легированных слоев увеличилась в 1,5...7,0 раз по сравнению с необработанными лазерным излучением поверхностями [11, 22]. Таким образом было установлено, что использова-

ние лазерного легирования позволяет увеличить срок службы деталей оборудования в 2...4 раза за счет повышения их служебных свойств [11, 22, 37].

Авторами работы [38] проводились исследования по лазерному легированию стальной поверхности молибденом для снижения величины износа разного инструментального оборудования. В ходе исследования молибден предварительно наносили на стальные поверхности плазменным напылением, а затем оплавляли с помощью непрерывного излучения Nd:YAG-лазера. Для мониторинга процесса использовали видеокамеру, оборудование для анализа звука и группу пирометров. Система мониторинга процесса использовала соответствующую среду для определения взаимодействия «пучок/материал». Например, благодаря использованию звукового анализа выбросов, можно было качественно оценивать спады интенсивности при легировании. Измерение температуры поверхности расплава с использованием пирометра позволило вносить корреляцию по содержанию молибдена в легированные зоны, что играет важную роль и связано с получаемой трещиностойкостью и интенсивностью износа [38].

Среди многообразия инструментов особыми условиями работы выделяются разделительные штампы, матрицы и пуансоны которых подвергаются ударной нагрузке, высоким контактным давлениям, достигающим 1500 МПа при скоростях деформирования 0,1...5,0 м/с. В работах [39, 40] выполнены исследования закономерностей ударного износа рабочих поверхностей матриц и пуансонов разделительных штампов, изготовленных из сталей У8 и Х12М, которые были легированы смесями на основе соединений бора, кремния и углерода. Обеспечено внедрение разработанных рекомендаций по лазерному борокарбосилицированию в производство на заводе «Электродеталь» и Брянском заводе технологического оборудования, в результате чего достигнуто повышение износостойкости инструментов в 1,5...3,0 раза [39].

Лазерное легирование деталей штамповой оснастки для горячего деформирования (рис. 2) выполнено [41–44] во Фраунгоферовском институте (Fraunhofer Institut für Produktions technologie IPT, Aachen). Авторами работы [41] установлено, что добавление при лазерном легировании в качестве легирующих элементов молибдена и карбида ванадия значительно увеличивает твердость штампового инструмента и повышает жаропрочность, но не существенно влияет на износостойкость. Показано [41], что при дополнительном легировании марганцем можно улучшить износостойкость поверхностных слоев деталей, которые подвергаются воздействию большой нагрузки. В работах [42–44] лазерное легирование стали 1.2365



Рис. 2. Лазерное легирование элементов штамповой оснастки для горячего деформирования, изготовленных из стали 1.2365 (X32CrMoV3-3) [42]

(X32CrMoV3-3) выполнено карбидом титана, карбидом вольфрама и кобальтом. Проведенные натурные испытания позволили установить, что износостойкость штамповой оснастки, которая прошла лазерное легирование, повысилась на 67 % по сравнению с необработанной оснасткой [42–44]. Кроме этого, важным является то, что также возросло время эксплуатации оснастки после лазерного легирования, что также позволило сократить расходы и повысить объемы производства [42–44].

На российских предприятиях г. Нижний Новгород ООО «Гидротермаль» и ОАО «Инженерный центр» при изготовлении и обработке элементов конструкции энергетических установок типа штуцер, фланец, втулка, поворотный клапан и других, изготавливаемых из стали 38Х2МЮА, используется лазерное легирование смесями порошков хрома, молибдена, алюминия и  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ , а также алюминия и  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  [45, 46]. Установлено [45], что легированные зоны имеют тонкий слой дендритного строения. Это слой, обогащенный алюминием и, вероятно, нитридом алюминия. При проведении испытаний установлено, что наибольшую износостойкость имеют не верхние слои, а расположенные на некоторой глубине. Авторы работы [45, 46] предполагают, что это связано с диффузией азота во внутренние слои обрабатываемой зоны и образованием нитридов алюминия. Износостойкость стали 38Х2МЮА после лазерного легирования смесью порошков увеличивается, причем смесь Cr–Mo–Al– $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  обеспечивает повышение сопротивления поверхности износу в 6,5...9,5 раза, а смесь Al– $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  увеличивает износостойкость в 2,86...3,58 раза при поверхностного слоя [45, 46].

Прессы для глубокой вытяжки, которые используются для формирования стандартного листа металла в автомобильной промышленности

должны выдерживать экстремальные нагрузки и даже после большого количества операций они должны сохранять свою точность и размеры. Расходы на ремонт и потери продукции приводят к удорожанию этих изделий, поэтому существует заинтересованность промышленных пользователей в увеличении срока службы инструмента. В зависимости от цели упрочнения при процессе лазерного легирования карбидом вольфрама поверхности кузнечного инструмента, благодаря высокой точности технологии лазерного легирования, обеспечивается защита от износа металлических инструментов в отдельных локальных зонах [47]. Во Фраунгоферовском институте в тесном сотрудничестве с компанией «HB Seissenschmidt AG» благодаря таким технологиям достигается увеличение сроков службы инструмента до 500 % по сравнению с традиционными методами обработки [47].

Исследование структуры и свойств большой номенклатуры деталей из сталей 45, У8А и 6ХС при лазерном легировании никелем, молибденом, хромом, бором и боридом вольфрама при непрерывном лазерном воздействии выполнено в работах [48–50]. Обнаружено влияние состава и толщины легирующей обмазки на формирование глубины зоны легирования [48]. Установлены оптимальные параметры [48–50], разработана и внедрена технология лазерного легирования на предприятиях различных отраслей (ОАО «Завод «Красное Сормово», ОАО «Павловский автобус», ОАО «Горьковский металлургический завод», ОАО «Выксунский металлургический завод», ОАО «Нижегородский авиастроительный завод «Сокол»). Благодаря использованию технологии лазерного легирования в 1,5...2,0 раза возросла износостойкость поверхностного слоя изделий (ножи, скалки, оси, втулки и др.) при одновременном снижении затрат на используемые материалы [48].

## Выводы

1. Перспективность применения в различных отраслях промышленности результатов лазерного поверхностного легирования отмечается многими авторами. Однако несмотря на несомненный научный и практический интерес лазерные технологии поверхностной обработки в настоящее время не получили должного развития и внедрения. Причиной этого является недостаточная изученность общих закономерностей изменения свойств обрабатываемых сталей в зависимости от фазового и структурного состояния при легировании различными материалами в условиях сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения, что сдерживает разработку конкретных рабочих технологий и рекомендаций прикладного характера.



2. Работы, выполненные в области лазерного легирования стальных изделий, часто были направлены на решение локализованной задачи повышения эксплуатационных характеристик отдельно взятого материала или деталей из него. Поэтому полученные разными авторами результаты не поддаются систематизации из-за существенных различий в схемах и условиях проведения исследований. Во многом это объясняется отсутствием принципов управления структурообразованием при формировании в поверхностном слое сталей структуры, обеспечивающей высокий уровень характеристик конструкционной прочности, которые лежат в основе разработки таких технологий.

1. *Петренко К. П.* Структурная модель проектирования упрочняющих технологических процессов, обеспечивающих заданное качество поверхностного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2013. — № 1. — С. 7–9.
2. *Влияние* предварительной подготовки поверхностей изделий на качество покрытий, полученных лазерной наплавкой / М. Д. Павлов, Т. В. Тарасова, А. П. Назаров, А. А. Окунькова // Там же. — 2012. — № 12. — С. 31–34.
3. *Экономическая* эффективность высоких технологий на примере лазерного производства / Ю. Ф. Назаров, А. В. Иванайских, П. В. Точилин, И. В. Сорокина // Свароч. пр-во. — 2010. — № 3. — С. 48–50.
4. *Модифицирование* структуры композиций с защитными покрытиями путем легирования и высокоэнергетического воздействия / Ю. Н. Сараев, В. П. Безбородов, В. Г. Дураков и др. // Там же. — 2012. — № 12. — С. 10–13.
5. *Гуляев А. П.* *Металловедение.* — 6-е изд. — М.: Металлургия, 1986. — 544 с.
6. *Чудина О. В.* Комбинированные технологии поверхностного упрочнения конструкционных сталей: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М.: Моск. гос. автомобил.-дор. ин-т, 2003. — 46 с.
7. *The effect of main alloying elements on the physical properties of Al-Si foundry alloys* / F. Stadler, H. Antrekowitsch, W. Fragneretal // Materials Sci. and Eng. — 2013. — № 560. — P. 481–491.
8. *Anandan S., Pityana L., Majumdar J. D.* Structure property correlation in laser surface alloyed AISI 304 stainless steel with WC + Ni + NiCr // Ibid. — 2012. — Vol. 536. — P. 159–169.
9. *Лактин Ю. М., Леонтьева В. П.* *Материаловедение.* — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1990. — 528 с.
10. *Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюрин А. И.* Технологические процессы лазерной обработки. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 664 с.
11. *Калашиникова М. С.* Повышение служебных свойств поверхности конструкционных низкоуглеродистых сталей методом лазерного легирования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Екатеринбург: Перм. гос. техн. ун-т, 2003. — 16 с.
12. *Технологические* лазеры: Справочник: В 2 т. / Г. А. Абыльситов, В. С. Голубев, В. Г. Гонтарь и др. / Под общ. ред. Г. А. Абыльситова. — М.: Машиностроение, 1991. — Т. 1. Расчет, проектирование и эксплуатация, 1991. — 432 с.
13. *Коваленко В. С., Головка Л. Ф., Черненко В. С.* Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. — Киев: Техніка, 1990. — 192 с.
14. *Бураков В. А., Бровер Г. И., Буракова Н. М.* Повышение теплостойкости быстрорежущих сталей лазерным легированием // *Металловедение и терм. обработка мет.* — 1985. — № 11. — С. 2–6.
15. *Лихошва В. П., Шатрава А. П., Бондарь Л. А.* Лазерное легирование узлов трения // *Процессы литья.* — 2007. — № 3. — С. 35–37.
16. *Application of high power diode laser (HPDL) for alloying of X40CrMoV5-1 steel surface layer by tungsten carbides* / L. A. Dobrzanski, M. Bonek, E. Hajduczek, A. Klimpel // *J. of Mat. Proc. Tech.* — 2004. — № 155-156. — С. 1956–1963.
17. *Лазерні технології та комп'ютерне моделювання* / Під ред. Л. Ф. Головка та С. О. Лук'яненко. — Київ: Вістка, 2009. — 296 с.
18. *Zhong M., Liu W., Zhang H.* Corrosion and wear resistance characteristics of NiCr coating by laser alloying with powder feeding on grey iron liner // *Wear.* — 2006. — **260**, Issues 11-12. — P. 1349–1355.
19. *Microstructure, microhardness, composition, and corrosive properties of stainless steel 304 I. Laser surface alloying with silicon by beam-oscillating method* / Y. Isshiki, J. Shi, H. Nakai, M. Hashimoto // *Applied Physics A.* — 2000. — **70**, Issue 4. — P. 395–402.
20. *Majumdar J. D.* Development of wear resistant composite surface of mild steel by laser surface alloying with silicon and reactive melting // *Mater. Lett.* — 2008. — Vol. 62. — P. 4257–4259.
21. *Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layer in manufacturing* / J.-P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, T. H. Childs // *CIRP Annals — Manufacturing Technology.* — 2007. — **56**, Issue 2. — P. 730–759.
22. *Игнатов М. Н., Калашиникова М. С., Белова С. А.* Влияние температурно-временных параметров на структуру и свойства поверхностного слоя конструкционных сталей после лазерного легирования // *Вестн. ПГТУ: Механика и технология материалов и конструкций.* — 2002. — № 5. — С. 154–159.
23. *Гаращук В. П.* *Основи фізики лазерів. Лазери для термічних технологій.* — Київ: ІЕЗ ім. С. О. Патона, 2005. — 244 с.
24. *Бирюков В. П.* Влияние распределения плотности мощности лазерного луча на повышение износостойкости поверхностей трения // *Вестн. машиностроения.* — 2008. — № 3. — С. 33–36.
25. *Майоров В. С., Матросов М. П.* Влияние поверхностно-активных веществ на гидродинамику лазерного легирования металлов // *Квантовая электроника.* — 1989. — **16**, № 4. — С. 806–810.
26. *Лазерные* технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В. Я. Панченко. — М.: Физматлит, 2009. — 664 с.
27. *Закономірності* формування азотованих шарів комбіновано лазерно-хіміко-термічною обробкою сталей / М. В. Кіндрачук, Н. В. Іщук, Л. Ф. Головка, М. В. Писаренко // *Металознавство та обробка металів.* — 2007. — № 1. — С. 31–35.
28. *Вплив* термоциклования на триботехнічні властивості боридних шарів, одержаних лазерним легуванням / М. В. Кіндрачук, О. І. Дудка, Ю. Г. Сухенко, Я. М. Михайлович // *Наук. пр. Українського держ. ун-ту харчових технологій.* — 2001. — № 10. — С. 74–75.
29. *A combined hot dip aluminizing/laser alloying treatment to produce iron-rich aluminide on alloy steel* / M. Emami, H. R. Shahverdi, S. Hayashi, M. J. Torka // *Metallurgical and Materials Transactions A.* — 2013. — № 2. — P. 1–9.
30. *Бирюков В. П.* Лазерное упрочнение и легирование // *Фотоника.* — 2011. — № 3. — С. 34–37.
31. *Leech P. W., Batchelor A. W., Stachowiak G. W.* Laser surface alloying of steel wire with chromium and zirconium // *J. of Materials Sci. Letters.* — 1992. — **11**, Issue 16. — P. 1121–1123.
32. *Тарасова Т. В.* Перспективы использования лазерного излучения для повышения износостойкости коррозионно-стойких сталей // *Металловедение и терм. обработка металлов.* — 2010. — № 6. — С. 54–58.
33. *Формування* покриттів триботехнічного призначення комбіновано, лазерно-хіміко-термічною обробкою / О. А. Корнієнко, М. С. Яхья, Н. В. Іщук, В. М. Писарен-



- ко // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. — Київ: НАУ, 2008. — Вип. 49, Т. 2. — С. 61–65.
34. *Thawari G., Sundararajan G., Joshi S. V.* Laser surface alloying of medium carbon steel with SiC<sub>(p)</sub> // *Thin Solid Films*. — 2003. — Vol. 423. — P. 41–53.
  35. *Dobrzanski L. A., Bonek M., Labisz K.* Effect of laser surface alloying on structure of a commercial tool steel // *J. of Microstructure and Materials Properties*. — 2013. — 8, Issue 1/2. — P. 27–37.
  36. *Лазько Г. В.* Особливості структуроутворення та шляхи підвищення властивостей бар'єрних шарів на корозійноотривких сталях, сформованих лазерним легуванням: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Донецьк: ДНТУ, 2009. — 21 с.
  37. *Коррозионная стойкость поверхностных слоев конструкционных сталей после лазерной обработки / М. С. Калашникова, С. А. Белова, Ю. А. Мазепина, М. Н. Игнатов // Физ. и химия обработки материалов*. — 2003. — № 2. — С. 34–39.
  38. *Haferkamp H., Bach F.-W., Gerken J.* Laserstrahl-legieren plasmagespritzter molybdanschichten in stahloberflächen zur erhöhung des verschleisswiderstandes // *Metall*. — 1995. — 49, Issue 7-8. — P. 516–522.
  39. *Жостик Ю. В.* Исследование ударного изнашивания разделительных штампов и повышение их стойкости лазерным легированием: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Брянск: Брянская гос. инж.-технологич. академия, 1998. — 18 с.
  40. *Инютин В. П., Колесников Ю. В., Жостик Ю. В.* Влияние лазерного борирования на контактные деформации стали 45 при ударно-циклическом нагружении // *Электронная техника*. — Сер.6. Материалы. — 1986. — Вып. 4 (215). — С. 77–78.
  41. *New developments in surface technology: laser alloying using Mo/VC and Mn / F. Klocke, L. Rozsnoki, T. Celiker, W. Koenig // CIRP Annals — Manufacturing Technology*. — 1996. — 45, Issue 1. — P. 179–182.
  42. *Klocke F., Auer O., Hamers M.* Verschleibreduzierung bei schmiedewerkzeugen // *Maschinenmarkt*, Wuerzburg. — 1998. — 104, Issue 34. — P. 32–33.
  43. *Klocke F., Auer O., Hamers M.* Verschleibschutz von Wärmumformwerkzeugen // *VDI-Z Integrierte Produktion Special*. — 2002. — № 2. — P. 67–69.
  44. *Klocke F., Auer O., Hamers M.* Laser scan help protect tools // *Quelle diecasting world*. — 2000. — № 6. — P. 18–21.
  45. *Кастро В. А.* Разработка технологии лазерного термического упрочнения и легирования сталей для энергетического машиностроения с целью повышения эксплуатационного ресурса изделий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. П. Е. Алексеева, 2012. — 23 с.
  46. *Особенности формирования структуры сталей при лазерном термическом цикле / В. А. Кастро, Г. Н. Гаврилов, И. Брауэр, Е. С. Беляев // Заготовительные производства в машиностроении*. — 2011. — № 12. — С. 38–41.
  47. *Werkzeuge harten senkt die Kosten [Электронный ресурс]* — Режим доступа: [http://www.archiv.fraunhofer.de/archiv/alte%20jahresberichte/pflege.zv.fhg.de/german/publications/jahresber/jb1997/f\\_oberfl.html](http://www.archiv.fraunhofer.de/archiv/alte%20jahresberichte/pflege.zv.fhg.de/german/publications/jahresber/jb1997/f_oberfl.html).
  48. *Гаврилов Г. Н.* Разработка и освоение технологий поверхностного термического упрочнения и наплавки металлических материалов лазерным излучением: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2000. — 35 с.
  49. *Гаврилов Г. Н., Горшкова Т. А., Федосеев В. Б.* Влияние термохимических эффектов на процесс лазерного легирования // *Изв. Инж.-технолог. акад. Чувашской республики: объединен. науч. журн.* — 1997. — № 3-4. — С. 118–121.
  50. *Гаврилов Г. Н., Горшкова Т. А., Дубинский В. Н.* Исследование износостойкости стали 45 после лазерного легирования // *Там же*. — 1998. — № 1-2. — С. 122–125.

Поступила в редакцию 02.09.2013



## Международная научно-техническая конференция «СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ»

16–18 июня 2014 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона (г. Киев) состоится Международная научно-техническая конференция «Сварочные материалы».

### Организаторы:

- **Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины**
- **Ассоциация «Электрод» предприятий стран СНГ**
- **Международная ассоциация «Сварка»**

На конференции предполагается обсудить актуальные вопросы разработки, производства и промышленного применения сварочных и наплавочных материалов, включая покрытые электроды, проволоки порошковые и сплошного сечения, ленты, флюсы, порошки. Планируется издание сборника по итогам работы конференции.

Для участия в работе конференции необходимо до 1 марта 2014 г. прислать заявку на адрес: [office@association-electrode.com](mailto:office@association-electrode.com) или [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua).

**Контакты:** 03680, г. Киев, ул. Горького, 54, Дирекция Ассоциации «Электрод».  
Тел.: +38 (044) 200-63-02, +38 (044) 200-82-77, +38 (044) 200-80-62.  
Факсы: +38 (044) 287-72-35, +38 (044) 200-82-77.