

УДК 621.785.5: 621.9.048.7

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ЛАЗЕРНЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

О. В. АКИМОВ*, АЛАА ФАДИЛ АДАН

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, УКРАИНА

*email: litvo11@kpi.kharkov.ua

АННОТАЦИЯ Розробка нових ресурсозберігаючих, екологічно чистих технологій поверхневого легування є важливим завданням сьогодення. Метою даної роботи є вивчення й аналіз даних по лазерному легуванню, що дозволить в подальшому вирішити проблему значної тривалості хіміко-термічної обробки і прискорити процеси насичення легуючими елементами завдяки новим видам поверхневих обробок. Показано, що лазерне легування дозволяє відійти від необхідності нагріву деталей до високих температур і тривалої витримки при цих температурах, а, отже, і істотно знизити енерговитрати і не зменшувати матрицю деталі.

Ключові слова: поверхнєве лазерне легування, хіміко-термічна обробка, зміцнення деталі

АННОТАЦИЯ Разработка новых ресурсосберегающих, экологически чистых технологий поверхностного легирования является важной задачей на сегодняшний день. Целью данной работы является изучение и анализ данных по лазерному легированию, что позволит в дальнейшем решить проблему значительной длительности химико-термической обработки и ускорить процессы насыщения легирующими элементами благодаря новым видам поверхностных обработок. Показано, что лазерное легирование позволяет отойти от необходимости нагрева деталей до высоких температур и длительной выдержки при этих температурах, а, следовательно, и существенно снизить энергозатраты и не разупрочняют матрицу детали.

Ключевые слова: поверхностное лазерное легирование, химико-термическая обработка, упрочнение детали

IMPROVEMENT OF PERFORMANCE PROPERTIES OF PARTS BY LASER SURFACE ALLOYING

O. AKIMOV*, ALAA FADHIL IDAN

National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT Development of new resource-saving, environmentally friendly technologies of surface alloying is an important task of our time. The aim of this work is the study and analysis of data on laser alloying, which will continue to solve the main problem of chemical heat treatment and accelerate the processes of saturation of the alloying elements by creating new kinds of surface treatments. It is shown that laser alloying allows to depart from the required heating of the parts to a high temperature and long exposure at these temperatures, and, consequently, significantly reduce energy costs and prevent weakening of the matrix details. After analyzing the issues examined laser alloying, it is possible to draw the following conclusions: 1. Laser alloying increases the diversity of possible structures of the diffusion layers in comparison with traditional methods of chemical-thermal treatment. Phase composition of the layer can be controlled by adjusting the three main process parameters: the value of energoimpuls laser radiation, the amount of alloying of the coating and the degree of revocationdate laser beam. 2. Laser alloying leads to a significant hardening of the modified layer, wherein the hardness of the doping zones is determined mainly by the hardness of themselves chemical compounds. In the laser processing of the surface is observed the increase of wear resistance of steels. 3. The brittleness of high-strength zones laser alloying can be reduced through the development of various combined methods of surface hardening of parts. 4. Laser alloying of the coatings allows adjustment of the phase composition of the hardened layer and the transition zone, microhardness and its distribution by varying the composition of the saturating mixture. 5. In combined treatment, including laser and chemical-thermal treatment, as well as in multicomponent alloying of the coatings are formed of modified layers having corrosion resistance in most acids.

Keywords: surface laser alloying, chemical heat treatment, hardening details

Введение

В настоящее время актуальным является вопрос применения ресурсосберегающих технологий для повышения эксплуатационного срока службы нагруженных стальных деталей. Предъявляемые

высокие требования к качеству рабочего слоя с одновременным использованием более дешевой матрицы, дали толчок для развития новых экономически целесообразных технологий поверхностного упрочнения, одной из которых является поверхностное легирование, достигаемое

различными методами.

Легирование (от лат. *ligo* – связываю, соединяю) – введение добавок (металлов, неметаллов и их соединений) в металлы и сплавы для придания им определенных физических, химических, механических свойств [1].

При легировании металлов и сплавов могут образовываться твердые растворы, смеси двух и более фаз, интерметаллиды, карбиды, нитриды, оксиды, бориды и другие соединения легирующих элементов с основой сплава или между собой [1, 2].

В результате легирования существенно меняются физико-химические характеристики исходного металла или сплава. 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 [2].

Разработка новых ресурсосберегающих, экологически чистых технологий поверхностного легирования является важной и актуальной задачей.

Цель работы

Целью данной работы является изучение и анализ данных по лазерному легированию, что позволит в дальнейшем решить проблему значительной длительности химико-термической обработки и ускорить процессы насыщения легирующими элементами благодаря новым видам поверхностных обработок.

Изложение основного материала

Легирование подразделяют на объемное и поверхностное [1, 2]. При объемном легировании легирующий элемент в среднем статистически распределяется в объеме металла. В результате поверхностного легирования легирующий элемент концентрируется на поверхности металла. Комплексное легирование представляет собой насыщение сразу несколькими элементами, определенное содержание и соотношение которых позволяет получить необходимый комплекс свойств.

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 – химико-термическая обработка (ХТО), в результате которой происходит изменение химического состава и микроструктуры материала поверхности (рис. 1) [3].

Наиболее распространенными такими процессами насыщения неметаллическими

элементами являются: цементация (легирующий элемент углерод), азотирование (легирующий элемент азот), борирование (легирующий элемент бор) и т. д.

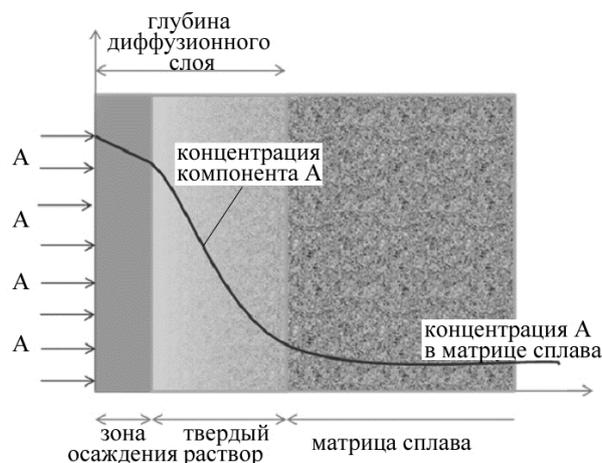


Рис. 1 – Принципы химико-термической обработки, показывающие распределение химического элемента внутри сплава наряду с типично модифицированными поверхностными областями

Однако перечисленные методы ХТО имеют ряд общих существенных недостатков как по технологии процесса, так и по свойствам легированного слоя. К числу основных недостатков, ограничивающих применение этих способов как методов обработки, упрочняющих поверхность, можно выделить [4]:

- значительную длительность процессов (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 температурах 500–520 °С длительность составляет 50–70 ч), следствием чего является малая производительность процесса и существенное разупрочнение сердцевины детали;

- 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, в связи с резким перепадом твердости между упрочненным слоем и матрицей.

Также недостатками перечисленных выше методов ХТО является небольшая толщина легированного слоя и плохая его связь со структурной базой 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 являются 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 [1, 2].

С целью улучшения поверхностных свойств изделий проводят **лазерное поверхностное легирование**. Его осуществляют путем введения в заданные участки поверхности различных компонентов, которые, смешиваясь с материалом основы, образуют сплавы или композиции требуемого состава. При этом обязательным условием является сохранение в обработанных лазером участках поверхности значительного материала основы. Таким образом, принципиальное отличие легирования от закалки состоит в изменении химического состава поверхностного слоя материала. Схематическое изображение поперечного сечения стального образца после лазерного легирования представлено на рис. 2 [5].

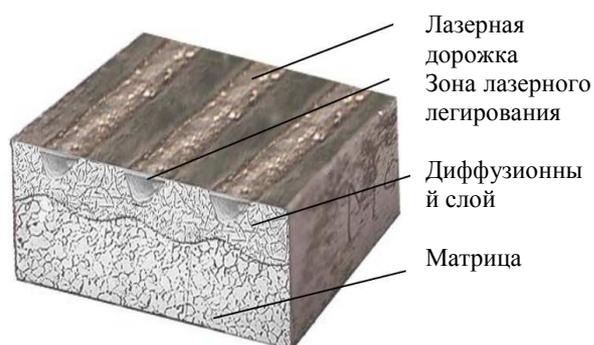


Рис. 2 – Формирование модифицированного слоя на стальной поверхности

Преимущества лазерного поверхностного легирования заключается в следующем [4]:

1. Хорошая воспроизводимость параметров и свойств поверхностного слоя.
2. Большая скорость процесса и достижение высокого качества поверхностного слоя.
3. Возможность получения узких локальных зон с заданным химическим составом.
4. Экономия дорогостоящего легирующего материала.
5. Отсутствие необходимости в последующей термообработке.
6. Экологическая чистота процесса легирования.

Без расплавления поверхности обеспечить достижение диффузионного насыщения легирующими элементами на большую глубину практически невозможно. Это связано с кратковременностью лазерного термического воздействия. Теоретический анализ диффузионных процессов в твердой фазе при нагреве лазерным

излучением показал, что глубина проникновения растворенного компонента наибольшая, примерно 1 мкм при длительности импульса 4 мс.

В процессе лазерного оплавления (рис. 3) поверхностей металлов и сплавов вследствие больших градиентов температуры возникают интенсивные гидродинамические потоки [3, 4]. При этом процессы массопереноса по всей зоне оплавления ускоряются, что позволяет на практике осуществлять лазерное легирование.

Образование легированных зон сопровождается по крайней мере тремя процессами, приводящими к перемешиванию легирующих добавок с расплавом матрицы, массопереносом на расстояния в несколько сот микрометров в результате конвекционного перемешивания, массопереносом на расстояния в несколько микрометров вследствие диффузии в жидкой и твердой фазах и массопереносом в результате действия термокапиллярных сил.

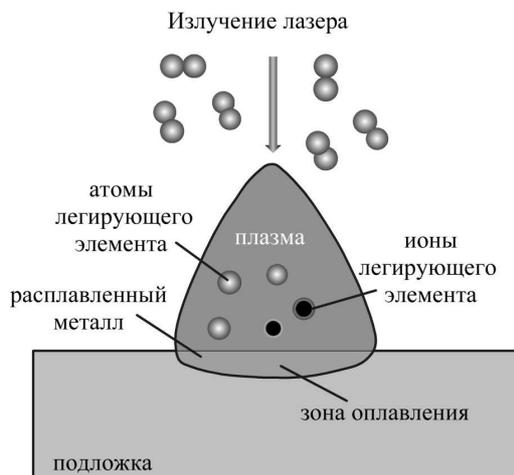


Рис. 3 – Схематическое изображение лазерного легирования с оплавлением

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

Отличие строения зон, легированных лазером, от строения диффузионных покрытий состоит в

отсутствии слоистости. Вследствие конвективного перемешивания расплава по мере удаления от поверхности перехода от фаз с большей концентрацией легирующего элемента к фазам с меньшей концентрацией не происходит. Все фазы в легирующей зоне по глубине перемешаны примерно равномерно.

Характер проведения процессов получения поверхностных покрытий во многом зависит не только от вида и формы присадочного материала, но и от способа введения его в зону лазерной обработки. Кусковой присадочный материал – фольга, проволока, прутки – легко наносятся на поверхность подложки, большая часть энергии излучения при этом теряется на отражение. Использование порошкового присадочного материала позволяет несколько уменьшить отражение, однако в этом случае возникают проблемы закрепления порошка на поверхности и повышения коэффициента его использования. Подачу присадочных материалов при легировании наиболее просто осуществлять из газовой или жидкой фазы.

Различают предварительное нанесение легирующих компонентов на поверхность деталей или образцов в виде фольги, проволоки прутков, порошковых смесей и т.д., а также подачу этих компонентов в зону лазерного оплавления одновременно с воздействием излучения. Предварительное нанесение можно осуществлять газотермическим напылением, гальваническим и химическим осаждением, накаткой, диффузионным методом, нанесением паст, насыпкой и др. Во время лазерного воздействия компоненты подают только при обработке непрерывными лазерами, так как при импульсном воздействии необходимы сложные устройства, синхронизирующие подачу присадки к воздействию импульса. Ее осуществляют с помощью газовой, порошковой или жидкой струи, под действием силы тяжести порошков, при механической подаче ленты или проволоки и т.д.

Отличие строения зон, легированных лазером, от строения диффузионных покрытий заключается в отсутствии слоистости. Вследствие конвективного перемешивания расплава по мере удаления от поверхности, перехода от фаз с большей концентрацией легирующего элемента к фазам с меньшей концентрацией не происходит. Все фазы в легирующей зоне по глубине перемешаны примерно равномерно [4–6].

Исходя из целей лазерного легирования (повышение износостойкости, коррозионной стойкости, контактной выносливости и других служебных характеристик), необходимо учитывать известные результаты работ по ХТО. Вместе с тем нельзя сразу сопоставлять процессы формирования легированного поверхностного слоя при оплавлении лазером 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.

Размеры легированной зоны зависят в основном от энергетических параметров излучения и толщины покрытия из легирующего материала. Как правило, легирование импульсным излучением обеспечивает меньшие размеры легированной зоны, чем при обработке непрерывным излучением. В частности, если при импульсной обработке глубина зоны достигает 0,3–0,7 мм, то применение непрерывного излучения мощных лазеров позволяет увеличить глубину зоны до 3 мм [4–10].

Лазерное легирование неметаллическими компонентами – углеродом, азотом и бором – наибольшее распространение получили при использовании способа с нанесением на поверхность обмазок или паст и последующим оплавлением поверхности импульсным или непрерывным лазером. В этом случае технологические режимы лазерного легирования определяются параметрами лазерной обработки и толщиной слоя пасты. С повышением мощности излучения или энергии импульса размеры легированных зон возрастают, а концентрация легирующих элементов в них снижается. С увеличением толщины слоя пасты размеры легированных зон уменьшаются, а концентрация легирующего элемента повышается. Для каждой толщины слоя имеются критические режимы, при которых энергия лазерного излучения расходуется только на нагрев поверхности до температуры плавления, легирование в этом случае не происходит. При лазерном легировании с перекрытием зон обработки микротвердость в зонах повторного нагрева снижается значительно меньше, чем при термоупрочнении.

Технологической особенностью лазерного легирования с оплавлением обмазок является то, что при этом не требуется нанесение поглощающих покрытий, поскольку обмазки, как правило, обеспечивают поглощение энергии лазерного излучения на уровне 60 % и более. Лучшие результаты были получены при лазерном легировании не полированной, а шероховатой поверхности, так как это позволило обеспечить лучшую адгезию обмазки в более полный переход легирующего компонента в расплав вследствие быстрого подплавления вершин микронеровностей.

Средняя глубина образующихся легированных объемов при импульсной обработке в большинстве случаев составляет 0,3–0,4 мм, а при непрерывной – 0,3–1,0 мм. Необходимо учитывать, что, так как после легирования, как правило, высота наплавов равна 20–100 мкм, при последующей обработке поверхности значительная часть поверхностного слоя должна быть сошлифована [4–10].

Современные методы лазерного легирования

Лазерное легирование решает основную проблему химико-термической обработки – необходимость нагрева деталей до высоких температур и длительная выдержка при этих температурах, а, следовательно, и высокие энергозатраты и разупрочнение матрицы детали. Также для ускорения процессов насыщения легирующими элементами во время химико-термической обработки, проводят предварительную пластическую деформацию или лазерную обработку поверхности (изменение поверхностной структуры и создание внутренних напряжений). Наличие деформированной структуры в поверхностном слое значительно ускоряет диффузионные процессы, способствующие формированию упрочненного поверхностного слоя.

В другом случае лазерный нагрев существенно ускоряет диффузионные процессы, так как производится в режиме локального оплавления. Однако формирование легированных зон на поверхности происходит дискретно, как при импульсном, так и при непрерывном режимах обработки. Получение более однородных легированных слоев происходит путем последующего диффузионного отжига лазерно-легируемых изделий. При этом снижается суммарная длительность процесса для достижения заданной концентрации элемента в поверхностном слое.

Решению этой проблемы посвящены следующие работы UA19551, UA25412, UA98452, RU2415964, RU2527511.

Основными недостатками известных методов лазерного легирования являются:

- недостаточный уровень проникновения легирующих элементов в поверхностный слой материала за счет существенного теплового сопротивления на границе «поверхностный слой – матрица» в результате слабого теплового контакта, который обусловлен наличием связующих соединений в обложке, а также нежелательное легирование материала химическими соединениями, содержащиеся в связующих веществах;

- использование опасных химических соединений, таких как ацетилен и ацетон, что усложняет работу, необходимость дополнительного технического оборудования для подачи жидкости в зону лазерного действия, а также сложность контроля химической реакции во время обработки.

В работе UA26467 решается задача разработки способа лазерного легирования сплавов на основе железа, который путем повышения концентрации углерода в γ -твердом растворе сплавов и улучшения стойкости контакта «углерод-матрица», позволяет повысить механические свойства поверхности сплавов, а именно твердости, износостойкости и др.

Также актуальным является и подбор качественной обложки (UA45796, UA50172, UA62427,

UA62980), которая позволила бы увеличить количество легирующих веществ, способных проникать через барьер поверхностного слоя, образующих химические соединения, такие как карбиды, нитриды, бориды и т.д., повышающие эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей. Решению этой же проблеме посвящены и зарубежные патенты CN103114292, US5985056, US6229111.

Анализ литературных данных позволил выявить некоторые общие закономерности формирования поверхностных слоев при лазерном легировании:

1. Образующийся упрочненный слой состоит из двух зон. Первая (легируемая) зона в процессе обработки находится в расплавленном состоянии, в нее вводится насыщающее вещество. Вторая зона остается при лазерном воздействии твердой, но нагревается (зона термического влияния). Зона термического влияния располагается вокруг зоны легирования (ее можно наблюдать только в материалах, имеющих фазовые превращения при нагреве в твердом состоянии). Максимальную твердость зоны термического влияния должна иметь после лазерного легирования, в процессе которого в ней происходит мартенситное превращение.

2. На формирование легируемой зоны оказывают влияние три технологических параметра обработки: толщина наносимой пасты, скорость перемещения обрабатываемой поверхности и плотность мощности лазерного излучения. Значительную трудность представляет сравнение и воспроизведение основного параметра лазерной обработки – плотности мощности (Вт/см²) или мощность (Вт).

3. Структура легируемой зоны зависит от количества легирующего вещества, приходящегося на единицу объема расплавленного металла. Увеличение скорости перемещения и уменьшение плотности мощности излучения приводит к повышению содержания легирующего вещества в зоне легирования, так как одно и то же количество легирующего вещества растворяется в меньшем расплавленном объеме. Увеличение слоя пасты до определенного предела также приводит к повышению концентрации легирующего элемента в легируемой зоне.

Выводы

Проанализировав рассмотренные вопросы лазерного легирования, можно сделать следующие выводы:

1. Лазерное легирование увеличивает многообразие возможных структур диффузионных слоев по сравнению с традиционными способами химико-термической обработки. Фазовым составом слоя можно управлять путем регулирования трех основных параметров обработки: значением энергии импульса лазерного излучения, количеством

наносимой легирующей обмазки и степенью расфокусированности лазерного луча.

2. Лазерное легирование приводит к существенному упрочнению модифицированного слоя, при этом твердость зон легирования определяется, главным образом, твердостью самих химических соединений. При лазерной обработке поверхности наблюдается повышение износостойкости сталей.

3. Хрупкость высокопрочных зон лазерного легирования можно уменьшить путем разработки различных комбинированных методов упрочнения поверхности деталей.

4. Лазерное легирование из обмазок позволяет регулировать фазовый состав упрочненного слоя и переходной зоны, микротвердость и ее распределение путем варьирования состава насыщающей смеси.

5. При комбинированной обработке, включающей лазерную и химико-термическую обработки, а также при многокомпонентном легировании из обмазок формируются модифицированные слои, обладающие коррозионной стойкостью в ряде кислот.

Список литературы

1. Гуляев, А. П. *Металловедение* / А. П. Гуляев. – 6-е изд. – М.: Металлургия. – 1986. – 544 с.
2. Бернацкий, А. В. Лазерное поверхностное легирование стальных изделий (Обзор) / А. В. Бернацкий // *Сварочное производство*. – 2013. – № 12. – С. 3-10.
3. Czerwinski, F. Thermochemical Treatment of Metals / F. Czerwinski. – 2012. – P. 73-112 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.5772/51566>
4. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисуров; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2006. – 664 с.
5. Chudina, O. Modification of Steel Surface Using the Laser Energy / O. Chudina // *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*. – 2014. – № 4. – P. 181-188. Published Online July 2014 in *SciRes*. [Web]: <http://dx.doi.org/10.4236/jseamat.2014.44021>
6. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання / Під ред. Л. Ф. Головка та С. О. Лук'яненко. – Київ: Вістка. – 2009. – 296 с
7. Kannatey-Asibu, Jr. E. Principles of laser materials processing / E. Kannatey-Asibu Jr. – Wiley, 2009. – 838 p.
8. Qui, F. Transformation hardening of medium-carbon steel with a fiber laser: the influence of laser power and laser power density / F. Qiu, V. Kujanpää // *Mechanika (Mechanics)*. – 2011. – Vol. 17, No.3. – P. 318-323.
9. Goia, F. Surface Hardening of an AISI D6 Cold Work Steel Using a Fiber Laser / F. Goia, M. de Lima // *Journal of ASTM International*. – 2011. – Vol. 8, No.2. – P. 315-318.
10. Чудина, О. В. Поверхностное легирование углеродистых сталей при лазерном нагреве / О. В. Чудина, А. А. Брежнев // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2010. – № 4. – С. 10-16.

Bibliography (transliterated)

1. Gulyaev, A. P. *Metallography*. 6th ed. – Moscow: Metallurgy. – 1986. – 544 s.
2. Bernacki, A. V. Laser surface alloying of steel products (Review). *Welding production*. – 2013. – № 12. – S. 3-10.
3. Czerwinski, F. Thermochemical Treatment of Metals. – 2012. – P. 73-112 [Web]: <http://dx.doi.org/10.5772/51566>
4. Grigor'yants, A. G., Shiganov, I. N., Misurov, A. I. Technological processes of laser processing: proc. manual for schools / Moscow: MGTU im. N. E. Bauman ed. – 2006. – 664 p.
5. Chudina, O. Modification of Steel Surface Using the Laser Energy. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*. – 2014. – № 4. – P. 181-188. Published Online July 2014 in *SciRes*. [Web]: <http://dx.doi.org/10.4236/jseamat.2014.44021>
6. Laser technology and computer modeling / Ed. by L. F. Head and S. A. Lukyanenko. / Kyiv: Vistka. – 2009. – 296 s.
7. Kannatey-Asibu, Jr., E. Principles of laser materials processing. Wiley. – 2009. – 838 p.
8. Qui, F., Kujanpää, V. Transformation hardening of medium-carbon steel with a fiber laser: the influence of laser power and laser power density. *Mechanika (Mechanics)*. – 2011. – № 17(3). – P. 318-323.
9. Goia, F., M. de Lima Surface Hardening of an AISI D6 Cold Work Steel Using a Fiber Laser / *Journal of ASTM International*. – 2011. – № 8(2). – P. 315-318.
10. Chudina, O. V., Brezhnev, A. A. Surface alloying of carbon steels in laser heating. *Hardening technologies and coatings*. – 2010. – № 4. – P. 10-16.

Поступила (received) 29.05.2015