

УДК 621.785.53.001.18:669.15

О.В. Чудина

д-р техн. наук, проф., МАДИ,

тел.: 8(499)155-03-55,

e-mail: chudina_madi@mail.ru

СОЗДАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ УПРОЧНЕННЫХ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация. Статья посвящена повышению эксплуатационных свойств стальных изделий путем создания упрочненных модифицированных слоев на поверхности методами лазерной и химико-термической обработки. Предложена комбинированная технология, заключающаяся в лазерном легировании стальной поверхности нитридообразующими элементами и азотировании. Показано, что при лазерном легировании в непрерывном режиме излучения в поверхности стали формируется слой с равномерной мелкозернистой структурой толщиной 600 мкм. Последующее азотирование повышает микротвердость малоуглеродистых сталей до 20 000 МПа, износостойкость – в 1,5–3 раза. Определены оптимальные режимы технологического процесса, обеспечивающие получение многофазных диффузионных слоев с высокой твердостью и износостойкостью.

Ключевые слова: модифицирование стальной поверхности, лазерное легирование, азотирование, микроструктура, микротвердость, износостойкость.

Введение

На современном этапе развития техники актуальной является задача разработки металлических материалов с качественно новыми высокими и

сверхвысокими свойствами, позволяющими существенно снизить металлоемкость изделий и обеспечить ресурсосбережение. Изменение и усложнение условий эксплуатации машин, узлов и агрегатов требует постоянного совершенствования материалов и модернизации технологий их изготовления.

Научно-технический прогресс в высокотехнологичных отраслях экономики в большой степени связан с совершенствованием применяемых материалов и технологических методов их обработки с целью обеспечения требуемых эксплуатационных свойств деталей машин. В последние годы большое внимание уделяется развитию технологий поверхностного упрочнения, так как именно состояние поверхности во многом определяет уровень прочности и эксплуатационные свойства деталей машин и инструмента.

Принципиально новые высокие физико-механические и эксплуатационные свойства изделий могут быть достигнуты путем целенаправленного создания модифицированных слоев на стальной поверхности путем легирования различными элементами или их композициями с использованием лазерного нагрева. Достоинством лазерного метода является возможность бесконтактно, быстро и строго дозированно передавать энергию на поверхность обрабатываемого материала. После лазерной обработки значительно повышается твердость и износостойкость сталей, в особенности содержащих карбидные, нитридные или боридные фазы. Кроме того, лазерный нагрев не вызывает деформации изделий, что сокращает технологический процесс, так как не требуется доводка. Лазерное легирование позволяет значительно сократить расход дорогостоящих легирующих элементов [1].

Процесс легирования может проводиться с использованием импульсного или непрерывного излучения. Разница в том, что в импульсном режиме на поверхности обрабатываемого металла образуются

легированные «пятна» округлой формы с глубиной проплава 150...300 мкм, а в непрерывном режиме – «дорожки», глубина которых может быть более 900 мкм [2].

Однако в настоящее время этот метод модифицирования поверхности пока не имеет широкого применения в промышленности. Это объясняется особенностью методов обработки металлов высококонцентрированными источниками энергии, заключающейся в значительном градиенте температур на границе основного металла с зоной плавления, что приводит к формированию растягивающих напряжений, которые в процессе эксплуатации изделий вызывают образование в них трещин с последующим разрушением по хрупкому механизму [3, 4]. Этот недостаток можно устранить путем нагрева, однако уровень упрочнения металлов, достигнутый лазерной обработкой, существенно снижается [5].

В связи с этим актуальным является поиск путей повышения эффективности использования лазерной энергии для получения модифицированных упрочненных слоев на поверхности конструкционных и инструментальных сталей, что обеспечит высокий уровень физико-механических и эксплуатационных свойств деталей машин и инструмента. Решение этой проблемы возможно путем разработки технологических процессов упрочнения, сочетающих лазерную и химико-термическую обработку сталей.

Материалы и методика проведения исследований

В работе исследовали углеродистые стали 20 (0,2%C), 40 (0,4%C), 45 (0,45%C), У10 (1,0%C) и армко-железо в качестве модельного материала. Для легирования использовали порошки нитридообразующих элементов Cr, V, Mo, Nb и Al. Обработку образцов проводили на газоразрядном CO₂ – лазере непрерывного действия типа ЛОК-2М мощностью до 1 кВт со скоростью перемещения лазерного луча от 2 до 30 мм/с и на

технологическом лазере импульсного действия «Квант-16» при мощности излучения до 24 Дж. Легирование осуществляли из обмазки на основе 10% раствора клея в ацетоне, количество которой контролировали весовым методом. Азотирование проводили при температуре 510–570°C в атмосфере частично диссоциированного аммиака. Продолжительность насыщения варьировали от 3 до 30 ч. Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе «Neophot-21» при увеличении до $\times 1000$. Концентрацию легирующих элементов в легированном слое определяли с поверхности поперечных шлифов на микрорентгеноспектральном анализаторе «Superprobe-704» при непрерывном сканировании зонда. Распределение легирующих элементов и азота в модифицированном слое исследовали на сканирующем микрорентгеноспектральном анализаторе «Link-system», а фазовый состав определяли рентгеновским методом на установке «Дрон-3». Микротвердость упрочненного слоя измеряли на твердомере ПМТ-3. Исследования износостойкости исследовали по схеме ролик – колодка в условиях сухого трения. Для определения остаточных напряжений в легированном слое до и после азотирования использовали метод многократных наклонных съемок, измерения проводили в фильтрованном K_{α} Co излучении на дифрактометре «Дрон-2».

Обсуждение результатов исследований

Лазерное легирование сталей. Локальное легирование стальной поверхности в импульсном режиме лазерного излучения происходит в течение 3...5 мс, поэтому процессы массопереноса и конвективного перемешивания в зоне переплава происходят неполно и легирующие элементы в ней распределены неравномерно (рис. 1).

В условиях непрерывного излучения время воздействия лазерного луча на поверхность обрабатываемого изделия увеличивается, поэтому

структура легированного слоя более однородна (рис. 2, рис. 3а и рис. 3б). Причем степень однородности структуры зависит от скорости перемещения лазерного луча относительно обрабатываемой поверхности. Чем меньше скорость, тем больше толщина слоя и более однородная структура с равномерно распределенным легирующим элементом образуется в нем.



Рис. 1. Микроструктура углеродистой стали после легирования Nb в импульсном режиме излучения, x750

Технологическими параметрами лазерного легирования являются плотность мощности излучения и количество легирующей обмазки, наносимой на поверхность упрочняемого изделия. С увеличением плотности мощности толщина модифицированного слоя увеличивается для всех исследуемых легирующих элементов, причем слои с алюминием всегда имеют большую толщину, в то время как слои, легированные молибденом – наименьшую. Количество обмазки, наносимой на поверхность стали перед обработкой, также оказывает существенное влияние как на толщину легированного слоя, так и на концентрацию легирующих элементов. Чем больше обмазки, тем меньше толщина легированного слоя и тем выше концентрация легирующих элементов в нем.

Микрорентгеноспектральным анализом при непрерывном сканировании зонда в характеристическом излучении соответствующих

элементов установлено, что легирующие элементы в модифицированном слое содержатся в количестве от 5 до 17%. Установлено, что более высокая концентрации легирующих элементов наблюдается в образцах, обработанных в непрерывном режиме лазерного излучения, чем в образцах обработанных в импульсном режиме, причем распределены они по всей толщине слоя равномерно (рис. 3б). Исследования фазового состава показали, что в малоуглеродистых сталях в легированных зонах образуются твердые растворы замещения легирующих элементов в α -Fe, а в высокоуглеродистых – кроме твердого раствора в структуре появляются мелкодисперсные карбиды легирующих элементов, что и объясняет более высокий уровень их упрочнения уже на этапе легирования.



Рис. 2. Микроструктура стали 45 после лазерного легирования Mo в условиях непрерывного излучения, $P = 1 \text{ кВт}$, $V = 15 \text{ мм/с}$, $\times 100$

При легировании стали в непрерывном режиме лазерного излучения ванадием или хромом в модифицированном слое их концентрация достигает 15–17%, молибденом около 8%, алюминием – до 5%. На дифракционных спектрах, снятых с поверхности поперечных шлифов, обнаружены интерметаллиды типа FeMo and Fe_7Mo_6 , что объясняет природу высокой твердости малоуглеродистой стали после лазерного легирования молибденом.

Металлографическим анализом серии образцов, подвергнутых лазерному легированию в непрерывном режиме излучения, был определен интервал скоростей перемещения лазерного луча относительно обрабатываемой поверхности, обеспечивающий получение сверхмелкозернистой структуры легированного феррита, более или менее однородной по всему объему зоны плавления (рис. 3а). Лишь вблизи границы с основным металлом образуются кристаллы, ориентированные в сторону отвода тепла. Обнаружено, что наибольшее измельчение зерна наблюдается при легировании молибденом, а наименьшее – ванадием.

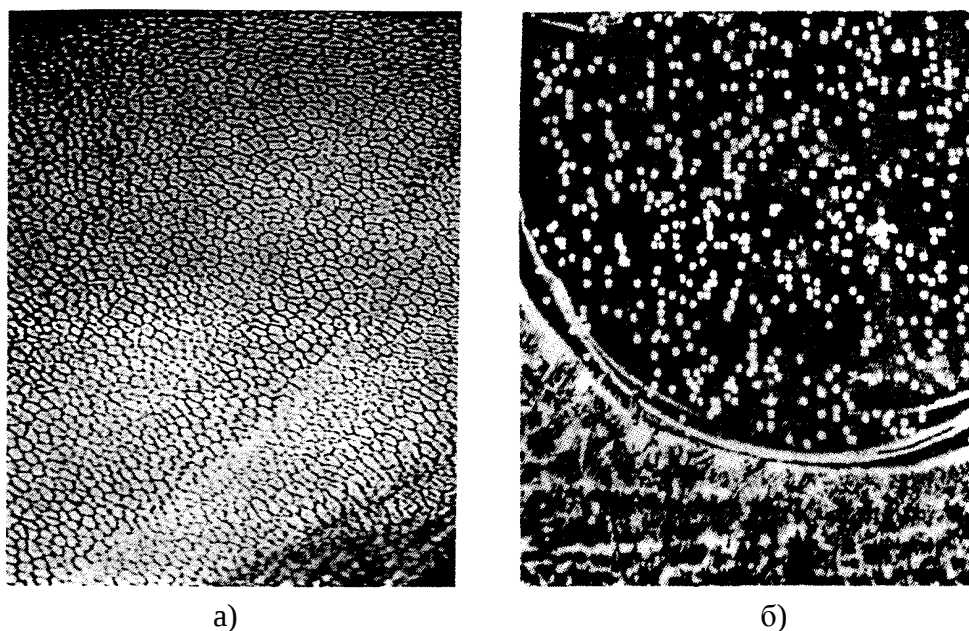


Рис. 3. Микроструктура стали 20 после лазерного легирования Cr в условиях непрерывного излучения, $P = 1$ кВт, $V = 10$ мм/с, $\times 800$ (а), распределение Cr в легированной зоне, $\times 100$ (б)

Микротвердость стали, упрочненной лазерным легированием в условиях непрерывного действия, существенно зависит от содержания углерода и типа легирующего элемента. Микротвердость сохраняется постоянной на всю толщину модифицированного слоя и составляет 3000...12000 МПа для малоуглеродистых сталей и 8000...15000 МПа для высокоуглеродистых.

Лазерное легирование сталей нитридообразующими элементами с последующим азотированием. Недостатком лазерной обработки сталей, особенно высокоуглеродистых, является неоднородное распределение остаточных напряжений вблизи границы с основным металлом, что отрицательно сказывается на характеристиках трещиностойкости. Этот недостаток устраняется печным нагревом, который, однако, снижает эффект упрочнения, достигнутый лазерным легированием. В этой связи нагрев лазернолегированной стали в атмосфере аммиака предпочтительнее, с точки зрения устранения неблагоприятных растягивающих напряжений при нагреве, и создания дополнительных благоприятных сжимающих напряжений за счет образования нитридных фаз.

Исследования влияния комбинированной обработки на формирование модифицированного слоя проводились для сталей с содержанием углерода от 0,2% до 1,0%. Азотирование лазернолегированных сталей проводили в промышленной печи по стандартным режимам. На рисунке 4 показано формирование модифицированного слоя в поверхности стали.

После лазерного легирования и кратковременного азотирования при температуре 570°C максимальные значения микротвердости до 21000 МПа достигаются на малоуглеродистых сталях, легированных алюминием.

Кратковременное азотирование сталей, поверхность которых легирована хромом, ванадием и молибденом формирует модифицированные слои с твердостью от 12000 МПа до 18000 МПа, постепенно снижающейся по толщине (рис. 5). Увеличение продолжительности процесса азотирования до 29 ч выравнивает микротвердость по толщине упрочненного слоя.

Эффективность комбинированной технологии для высокоуглеродистых сталей несколько ниже, так как в процессе

азотирования в модифицированном слое образуются карбонитриды легирующих элементов, которые имеют меньшую твердость по сравнению с нитридами.

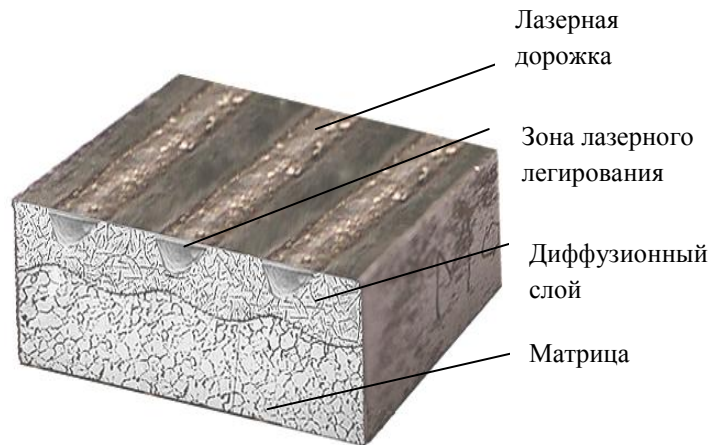


Рис. 4. Формирование модифицированного слоя на поверхности стали

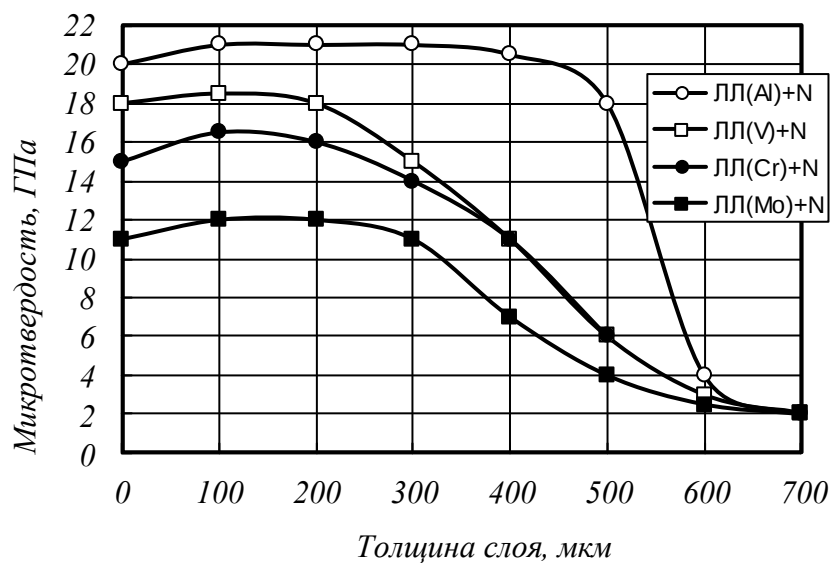


Рис. 5. Изменение микротвердости по толщине модифицированного слоя стали 20 после лазерного легирования и кратковременного азотирования

Проведенные исследования остаточных напряжений показали позитивное влияние азотирования на характер их распределения в модифицированном слое углеродистых сталей. Процесс азотирования

оказывает двойное воздействие на зоны, подвергнутые лазерному легированию: с одной стороны, насыщение азотом приводит к увеличению объема и, как следствие, к появлению благоприятных сжимающих напряжений. С другой стороны, нагрев сопровождается снижением неблагоприятных растягивающих напряжений, возникших в процессе лазерной обработки. После лазерного легирования в центре лазерной дорожки образуются значительные по величине сжимающие напряжения, достигающие $380 \pm 30 \div 520 \pm 80$ МПа в зависимости от содержания углерода в стали. Чем больше углерода, тем выше это значение. По мере удаления от центра в мало- и среднеуглеродистых сталях уровень сжимающих напряжений снижается практически до нуля, а затем вновь незначительно увеличивается. В высокоуглеродистых сталях на границе легированной зоны с матрицей напряжения меняют знак на противоположный, т.е. становятся растягивающими. В соответствующих азотированных образцах уровень сжимающих напряжений в центре лазерной дорожки ниже по сравнению с не азотированными образцами и составляет $80 \pm 80 \div 120 \pm 80$ Мпа, а за ее пределами уменьшаются до нуля, причем в высокоуглеродистых сталях неблагоприятные растягивающие напряжения не обнаруживаются (рис. 6).

Таким образом, после комбинированной обработки углеродистых сталей в поверхностном слое формируются незначительные по величине сжимающие напряжения и полностью отсутствуют неблагоприятные растягивающие напряжения.

Сравнение свойств модифицированных слоев, полученных легированием и комбинированной обработкой позволило установить технологические особенности упрочнения для деталей, работающих в различных условиях эксплуатации. В результате длительных испытаний на износостойкость выявлено существенное различие в триботехнических характеристиках модифицированных слоев, легированных различными

легирующими элементами, как до, так и после азотирования. Наилучшие результаты достигаются на сталях с содержанием углерода 0,1...0,3%С, легированных алюминием, ванадием и хромом с последующим азотированием. Применение комбинированной технологии упрочнения позволяет повысить износостойкость азотированной стали 20 в 15 раз и получить поверхностный слой, обладающий в 1,5...3 раза большей износостойкостью, чем дорогостоящие нитраллои, типа 38Х2МЮА, азотированные по аналогичным режимам, за счет высокой твердости поверхностного слоя и формирования рельефа по типу Шарпи.

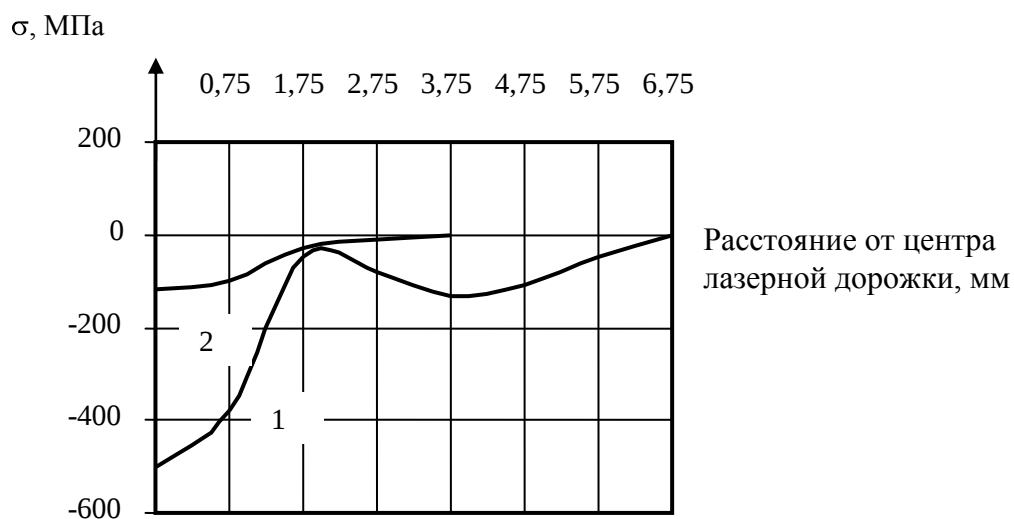


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений на поверхности стали 20 в направлении, перпендикулярном лазерной дорожке: 1 – легирование ванадием, 2 – комбинированная обработка: легирование ванадием + азотирование

Выводы

1. Предложена комбинированная технология, заключающаяся в лазерном легировании стальной поверхности нитридообразующими элементами и азотировании.
2. Показано, что при лазерном легировании в непрерывном режиме излучения в стальной поверхности формируется упрочненный слой толщиной 600 мкм с однородной мелкозернистой структурой и

равномерно распределенным легирующим элементом. Последующее азотирование повышает микротвердость малоуглеродистых сталей до 20000 МПа, износостойкость – в 1,5–3 раза по сравнению с традиционно азотируемыми нитраллоями.

3. Определены оптимальные режимы технологического процесса, обеспечивающие получение многофазных диффузионных слоев с высокой твердостью и износостойкостью.

Литература

1. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов / М.: Машиностроение, 1985. 496 с.

2. Чудина О.В. Комбинированные методы поверхностного упрочнения сталей с применением лазерного нагрева: теория и технология. М.: 2003. 248 с.

3. Solind A, Dl. Sanctis M. Paganini L. oth. Origin and Development of Residual Stresses Induced by laser Surface – Hardening Treatments // J. Heat Treat. 1984. №3. С. 193–204.
URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02833261>

4. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н., Майоров В.С., Басков А.Ф., Ивашов Г.П. Распределение остаточных напряжений на поверхности сталей, упрочненных непрерывным CO₂-лазером // Металловедение и термическая обработка металлов. 1987. № 9. С. 45–49.

5. Бровер Г.И., Бровер А.В., Дьяченко Л.Д. Структура и свойства инструментальных сталей после обработки различными источниками концентрированных потоков энергии // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 12. С. 27–31.

URL: http://www.mashin.ru/files/el.versiya/uprochnyayuwie_tehnologii_i_pokrytiya/2010/utp_04_2010.pdf

References

1. Rykalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V., Kokora A.N *Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov* (Laser and electron beam processing of materials), Moscow, Mashinostroenie, 1985. 496 p.
2. Chudina O.V. *Kombinirovannye metody poverhnostnogo uprochneniya staley s primeneniem lazernogo nagreva: teoriya i tehnologiya* (Combined methods of surface hardening of steels using laser heating: theory and technology), Moscow, 2003. 248 p.
3. Solind A, Dl. Sanctis M. Paganini L. *J. Heat Treat*, 1984, № 3, pp. 193–204. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02833261>
4. Grigor'yants A.G., Safonov A.N., Mayorov V.S., Baskov A.F., Ivashov G.P. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1987, № 9, pp. 45–49.
5. Brover G.I., Brover A.V., D'yachenko L.D. *Uprochnyayushchie tehnologii i pokrytiya*, 2005, № 12, pp. 27–31.
URL: http://www.mashin.ru/files/el.versiya/uprochnyayuwie_tehnologii_i_pokrytiya/2010/utp_04_2010.pdf

O. Chudina

*Creating of modified hardening layers
on the surface of steels by laser and chemical heat treatment*

Abstract. The article is devoted to the problem of increasing of operational properties of steel products through the creation of hardened layers on the surface modified by laser and chemical-thermal treatment. The combined technology consisting in laser alloying of steel by nitride-forming elements and nitriding was proposed. It is shown that laser alloying in continuous radiation

forms layer with homogeneous fine-grained structure with thickness of 600 microns. The subsequent nitriding increases the microhardness of the surface layer of low- carbon steels to 20,000 MPa, increases wear-resistance in 1,5–3 times, and crack resistance in a 1,5 times. The optimal of technology, which provide homogeneous multiphase diffusion layers with high hardness and wear resistance, were defined.

Keywords: steel, surface, modification, laser alloying, nitriding, the microstructure, microhardness, wear resistance.