

УДК 620.378.325

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

О.В. АФАНАСЬЕВА, Н.А. ЛАЛАЗАРОВА

Импульсное лазерное излучение интенсивно упрочняет сталь при закалке. Работа посвящена определению влияния длительности импульса и количества импульсов на структуру и свойства упрочнённого слоя сталей 20 и 40.

Ключевые слова: импульсное лазерное излучение, лазерная закалка стали, микротвёрдость, количество импульсов.

ВВЕДЕНИЕ

Технике нового поколения необходим большой запас надёжности и долговечности, в том числе и за счет увеличения износостойкости деталей машин и механизмов. До 90 % машин выходят из строя вследствие преждевременного износа их деталей. Так как поверхностный слой деталей, который играет важную функциональную роль в механическом поведении твёрдых тел, подвергается наиболее интенсивным внешним воздействиям, то его структура и свойства оказывают решающее влияние на работоспособность изделия в целом. Среди основных достижений в области прогрессивных технологий упрочнения материалов можно выделить одно из наиболее перспективных направлений повышения эксплуатационных характеристик поверхности деталей — лазерную обработку, которая посредством целенаправленного изменения структуры материалов лазерным лучом позволяет получать нетрадиционные комбинации физических, химических и механических свойств в поверхностных рабочих слоях.

Лазерный нагрев относится к одному из видов скоростного нагрева и происходит в условиях, отличающихся от равновесных. Это приводит к тому, что температуры фазовых превращений смещаются от равновесных значений — при нагреве в сторону высоких температур, при охлаждении — в сторону низких. Степень перегрева и степень переохлаждения также зависят от скорости нагрева или охлаждения.

При воздействии лазерного излучения в зависимости от времени воздействия и энергии излучения, а также от режимов работы лазера скорости нагрева достигают величин $10^4 \dots 10^8 \text{ K} \cdot \text{c}^{-1}$, а скорости охлаждения — $10^3 \dots 10^4 \text{ K} \cdot \text{c}^{-1}$. Такие режимы нагрева и охлаждения приводят к образованию пересыщенных твердых растворов с мелкодисперсными структурами вплоть до аморфных. В результате формируется слой с повышенной твердостью, с хорошим сопротивлением износу и схватыванию при трении.

Высокая скорость нагрева и охлаждения приводит к закалке отдельных участков, что обеспечивает модификацию поверхностного слоя и его высокую твердость. Кроме того, благодаря высокой скорости охлаждения идет процесс диспергирования, который также способствует упрочнению поверхности. Такая обработка дает положительный результат при изготовлении трущихся деталей электронной техники (например, при работе считывающих головок и др.).

Другой особенностью лазерного нагрева является его локальный и импульсный характер (он сохраняется и для непрерывного излучения).

Еще одной особенностью лазерной обработки, обусловленной ее локальностью, является сопровождающая данный процесс автозакалка объемов изделия, нагретых до температур выше критических. Сразу же после прекращения лазерного импульса или перемещения луча лазера непрерывного действия на новый участок поверхности обрабатываемого изделия начинается охлаждение нагретого объема. Тепло частично рассеивается в окружающем пространстве за счет лучеиспускания, но главным образом — отводится вглубь изделия. Вследствие высокой теплопроводности металлов и сплавов, обрабатываемых лазерным излучением, и с учетом того, что нагретый объем составляет незначительную часть всего изделия, скорость отвода тепла (скорость охлаждения) оказывается выше критической скорости охлаждения не только для средне- и высокоуглеродистых сталей, но и для сталей с низким содержанием углерода. Таким образом, при лазерном упрочнении не требуется принудительное охлаждение нагретых объемов, т.е. происходит автозакалка. Это является одним из существенных преимуществ лазерного упрочнения сталей.

Лазерный нагрев может осуществляться как с оплавлением поверхности обрабатываемого изделия, так и без. Оплавление в сочетании с последующей автозакалкой представляет собой особый вид термической обработки — закалку

из жидкого состояния. Сущность ее заключается в быстром затвердевании тонких поверхностных слоев с образованием в них метастабильных структур. Поскольку формирование таких структур часто приводит к повышению эксплуатационных характеристик изделий, закалка из жидкого состояния прочно вошла в арсенал методов поверхностного упрочнения. При такой закалке на поверхности обрабатываемого изделия могут появляться мелкие неровности, как следствие газовой выделения и усадки металла при его затвердевании. Правильный и тщательный подбор режима лазерного нагрева позволяет ограничить высоту этих неровностей. Последующая механическая обработка обеспечивает получить необходимое качество поверхности.

Высокая скорость охлаждения при автозакалке после лазерного нагрева, приводя к измельчению дендритной структуры, увеличивает суммарную долю приграничных объемов ветвей дендритов, которые, как правило, обогащены легирующими элементами и примесями. В результате вырастает содержание этих элементов в дендритах и, соответственно, уменьшается их количество, связанное в интерметаллические соединения. Следовательно, уменьшается количество кристаллов этих соединений. В предельном случае стабильные интерметаллиды могут вообще отсутствовать. Вместо них возможно образование метастабильных промежуточных фаз, появление которых в равновесных или близких к ним условиях термодинамически невозможно.

Лазерное термическое упрочнение характеризуется малым временем воздействия и обеспечивает отсутствие деформации деталей. Технологические возможности лазерной закалки позволяют использовать этот процесс в качестве заключительной операции без последующей механической обработки [1, 2]. Многочисленные эксперименты свидетельствуют о том, что при этом в сталях упрочнение происходит намного интенсивнее, чем при других известных методах поверхностной обработки.

Физическая сущность процесса термообработки заключается в изменении структуры и свойств материалов под воздействием нагрева и последующего охлаждения.

При нагревании материала с помощью лазера могут развиваться три основных процесса: лазерный нагрев поверхностного слоя материала до температуры, не превышающей температуру плавления, выдержка при этой температуре и последующее охлаждение; нагрев материала до температур, превышающих температуру плавления, кристаллизация расплава и охлаждение закристаллизовавшегося материала; нагревание материала до температур, превышающих температуру его испарения, пластическая деформация за счет ударной волны, нагрева поверхностного слоя плазмой, образующейся при взаимодействии лазерного излучения с материалом. Эти

три режима лежат в основе лазерного упрочнения.

В наших предыдущих работах [3, 4] была сделана попытка обосновать возможность использования лазеров низкой мощности, работающих в импульсном режиме, для поверхностной лазерной закалки деталей или отдельных их участков. Разработанные режимы позволяли проводить закалку только с оплавлением поверхности. Практика работы с лазерным излучением показала, что лазерная термическая обработка металлов без оплавления поверхности практически невозможна без специальных технологических мер, повышающих поглощающую способность металла. Для получения стабильных результатов лазерной термической обработки на обрабатываемую поверхность перед облучением наносят соответствующие покрытия. Чаще всего для этой цели используют фосфаты марганца или цинка, различные краски, суспензии. Толщина этих обмазок должна быть такой, чтобы излучением прогревалась не только обложка, но и упрочняемый материал. Основным недостатком применения таких обмазок — невозможность контроля их толщины. В случае использования YAG:Nd³⁺-лазера применение обмазок невозможно — его излучение ($\lambda = 1,06$ мкм) плохо поглощается неметаллами. Наиболее эффективным способом проведения лазерной закалки без оплавления является, на наш взгляд, использование многоимпульсной обработки (МИО), применяющейся в основном для повышения точности и качества размерной обработки. Сущность МИО заключается в том, что нагрев поверхности происходит под действием серии импульсов излучения лазера определенной энергии и длительности, последовательно доводящих температуру поверхности до необходимой. Важная особенность МИО состоит в обработке материала серией коротких импульсов, период следования которых значительно больше времени остывания материала. В этом случае характерный размер зоны термического влияния определяется длительностью отдельного короткого импульса. В сочетании с высокой плотностью энергии, которой легко добиться в каждом отдельном импульсе, это в первую очередь способствует резкому снижению доли расплава в поверхностном слое.

1. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве материала исследования были выбраны углеродистые конструкционные стали с различным содержанием углерода: сталь 20 (0,2 % С) и сталь 40 (0,4 % С). Образцы подвергались предварительной термической обработке — закалке с охлаждением в воде и отпуску при температуре 600° С (улучшение, режим 1) и отжигу (режим 2). С целью увеличения поглощательной способности поверхности образцы после отпуска не полировались.

Лазерное упрочнение проводилось с использованием YAG:Nd³⁺-лазера со средней мощностью излучения 5 Вт. Основными параметрами лазера, определяющими характер обработки, являются: энергия излучения, плотность энергии, длительность импульса, пространственная и временная структура излучения, пространственное распределение плотности мощности излучения в пятне фокусировки, условия фокусировки, физические свойства материала (отражательная способность, теплофизические свойства, температура плавления и т. д.). Основным варьируемым параметром была выбрана длительность импульса. Частота следования импульсов составляла 20 Гц, диаметр пятна фокусировки – 0,8 мм. Энергия в импульсе измерялась калориметрическим методом.

После лазерной обработки образцы подвергались травлению и металлографическому исследованию. В качестве параметра контроля свойств упрочненного слоя была выбрана микротвердость. Измерение микротвердости проводилось с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 100 г.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Цель данного исследования – изучить влияние плотности энергии излучения и количества импульсов на упрочнение конструкционных сталей с различным содержанием углерода.

Результаты исследований микротвердости приведены на рис. 1. Анализ полученных результатов показывает, что предварительная термическая обработка (исходная структура) оказывает значительное влияние на структуру поверхностных слоев после лазерной закалки и их свойства. Улучшение (режим 1) формирует структуру сорбит отпуска (феррито-цементитная смесь со сфероидизированными карбидами). Структура сталей 20 и 45 после отжига – феррит и перлит (пластинчатые карбиды).

Последующая лазерная закалка в импульсном режиме приводит к образованию закалочной структуры – мартенсита. При этом для каждой стали существует определенное значение плотности энергии, позволяющее получить максимальную твердость (рис. 1, а). Эти данные неплохо согласуются с результатами работ [1, 2]. При повышении содержания углерода оптимальная плотность энергии увеличивается.

Микротвердость упрочненных лазерной закалкой слоев стали 40, предварительно обработанной по режиму 2, значительно выше, чем на образцах, подвергнутых улучшению (режим 1).

Металлографические исследования показали, что при обработке импульсами с плотностью энергии менее 150 Дж/см² структурные изменения не происходят. Не изменяется и микротвердость феррита и перлита, 1600 и

2200 МПа соответственно, что соответствует уровню отожженной стали 20. С повышением плотности энергии до 150 Дж/см² структура стали изменяется. При этом можно выделить три зоны, которые соответствуют исходной структуре: феррито-перлитной, феррито-мартенситной и мартенситной.

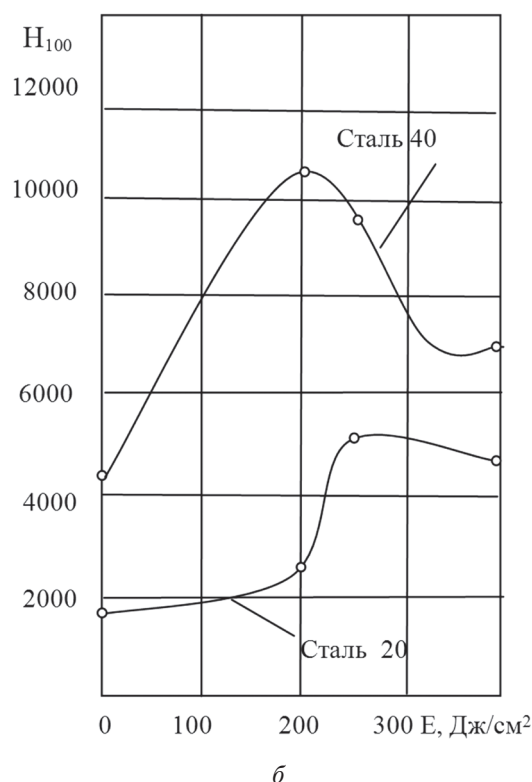
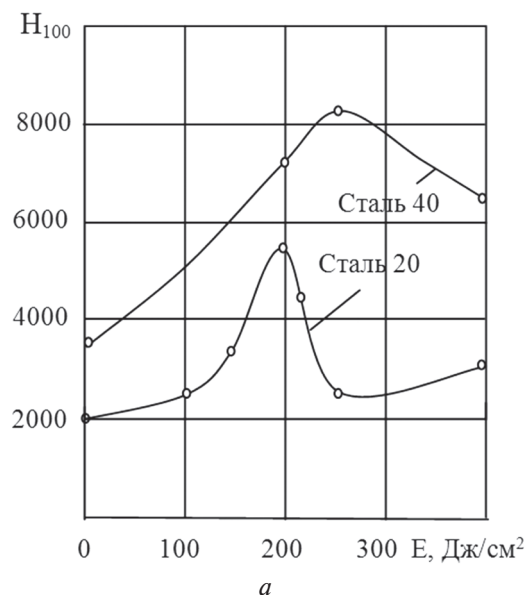


Рис. 1. Зависимость микротвердости сталей 20 и 40 от плотности энергии: а – режим 1 (предварительная термическая обработка – закалка и высокий отпуск); б – режим 2 (предварительная термическая обработка – отжиг)

В феррито-мартенситной области строение стали крайне неоднородно, хотя и феррит и перлит испытали превращение. Структура состоит из мартенситных кристаллов и α -фазы, прошедшей $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ перекристаллизацию (рис. 2).

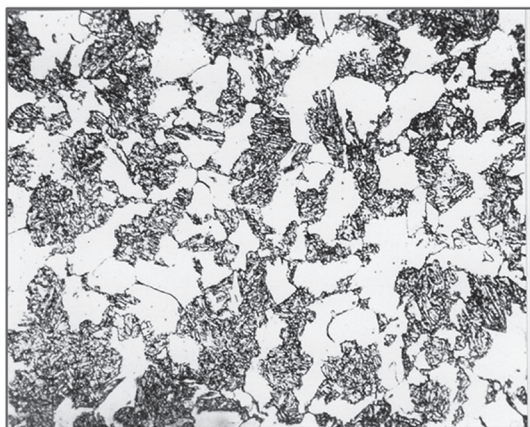


Рис. 2. Микроструктура стали 20 после лазерной обработки, $\times 350$

В соответствии с изменением структуры стали изменилась и твёрдость структурных составляющих. Причём, чем выше энергия импульса, тем больше значения микротвёрдости. При плотности энергии импульса 150 Дж/см^2 микротвёрдость достигает максимальных значений – 630 для мартенсита и 200 кгс/мм^2 для феррита (рис. 3). Такие результаты получаются в том случае, когда в аустените полностью растворяются карбидные частицы.

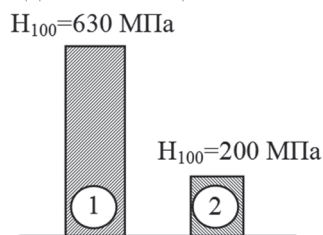


Рис. 3. Микротвёрдость мартенсита (1) и феррита (2) при плотности энергии 150 кгс/мм^2

После обработки с большой плотностью энергии образуется однородная структура – мелкоигольчатый мартенсит (рис. 4).

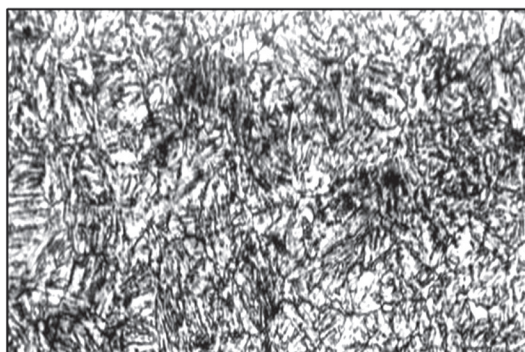


Рис. 4. Микроструктура стали 20 после лазерной обработки (количество импульсов – 3), $\times 350$

К заметным структурным изменениям приводит и уменьшение/увеличение количества импульсов излучения. После воздействия двух импульсов при плотности энергии 150 Дж/см^2 вокруг мартенситных кристаллов появляется тёмная кайма, а в α -фазе происходит дробление зёрен.

Наблюдаемые структурные изменения объясняются кратковременностью действия лазерных импульсов. За это время сталь нагревается до температур аустенитного превращения ($>A_{c3}$). При этом из перлитных колоний, содержащих $0,8\%$ С, возникают участки аустенита с высокой концентрацией углерода, но меньше эвтектоидной. Об этом свидетельствует наличие нерастворённых цементитных пластин. Из феррита образуется малоуглеродистый аустенит. Поэтому в результате нагрева стали образуется крайне неоднородный по количеству углерода твёрдый раствор – аустенит.

После прекращения действия лазерного луча происходит резкое охлаждение в результате теплоотвода, что приводит к превращению высокоуглеродистого аустенита в мартенсит, а малоуглеродистого – в низкоуглеродистый мартенсит или феррит. Об этом свидетельствует как морфология структурных составляющих, так и значения микротвёрдости.

С увеличением плотности энергии импульса температура нагрева возрастает, диффузионные процессы активизируются и за время действия лазерного луча цементит перлита полностью растворяется в образующемся аустените. Этим и объясняется повышение твёрдости мартенсита.

При увеличении количества импульсов до 5 концентрация углерода в аустените выравнивается вследствие его диффузии из высокоуглеродистой фазы в малоуглеродистую.

ВЫВОДЫ

1. При воздействии лазерного излучения в стали очень быстро происходит перекристаллизация по схеме $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$.
2. В образующемся при нагреве аустените распределение углерода крайне неоднородно.
3. Выравнивания концентрации углерода в аустените и образования однородной структуры можно достичь увеличением энергии импульсов до 150 Дж/см^2 и их количества (до 10).

Литература

- [1] Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера / В.С. Коваленко, Л.Ф. Головкин, В.С. Черненко. – К.: Техника, 1990. – 192 с.
- [2] Основы лазерного термоупрочнения сплавов / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов; под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высшая школа, 1988. – 159 с.
- [3] Афанасьева О.В., Лалазарова Н.А. Поверхностное упрочнение сталей лазерами малой мощности. – Харьков, Прикладная радиоэлектроника. – 2013. – Т. 12, № 3. – С. 442–446.
- [4] Лазерная закалка сталей в различном исходном состоянии / О.В. Афанасьева, Н.А. Лалазарова, Е.Г. Попова, Н.П. Пенкина // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (75). – Х., 2013. – С. 72–76.

Поступила в редколлегию 25.09.2015



Афанасьева Ольга Валентиновна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физических основ электронной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: лазерные промышленные технологии и материаловедение.



Лалазарова Наталья Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и материаловедения Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Научные интересы: материаловедение и обработка материалов.

УДК 620.378.325

Вплив параметрів імпульсного лазерного гартування на структуру та властивості вуглецевих сталей / О.В. Афанасьєва, Н.О. Лалазарова // Прикладна радіоелек-

троніка: наук.-техн. журнал. — 2015. — Том 14. — № 3. — С. 262–266.

Імпульсне лазерне випромінювання інтенсивно зміцнює сталь при гартуванні. Робота присвячена вивченню впливу тривалості імпульсу і кількості імпульсів на структуру та властивості зміцненого шару сталей 20 та 40.

Ключові слова: імпульсне лазерне випромінювання, лазерне гартування сталі, мікротвердість, кількість імпульсів.

Л. 4. Бібліогр.: 4 найм.

UDC 620.378.325

Influence of pulse laser hardening parameters on the structure and properties of carbon steels / O.V. Afanasieva, N.O. Lalazarova // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2015. — Vol. 14. — № 3. — P. 262–266.

Pulse laser radiation has an intense strengthening action on steel. The paper is dedicated to studying influence of pulse duration and quantity of impulses on the structure and properties of the hardened case of steel grades 20 and 40.

Keywords: pulse laser radiation, laser steel, hardening, microhardness, quantity of impulses.

Fig. 4. Ref.: 4 items.