



ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ПРИ ЛАЗЕРНОМ УПРОЧНЕНИИ

В. Бирюков, к. т. н.,
Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, laser-52@yandex.ru

Исследованы изменение структуры, повышение твердости, износостойкости и прочности сталей 30Г2, 45, 40Х, 65Г под действием лазерного излучения газовых и волоконных лазеров. Показано, что применение высокочастотного сканирования луча по нормали к траектории движения детали значительно повышает качество упрочненных слоев по сравнению с обработкой неподвижным расфокусированным лучом.

Факт улучшения свойств сталей после лазерной обработки известен давно [1-5]. Цель проведенных исследований – изучение влияния, которое оказывает излучение газовых и волоконных лазеров на повышение твердости, износостойкости и прочности сталей 30Г2, 45, 40Х, 65Г. Ранее в работе [1] были описаны результаты лазерной закалки поверхности сталей, содержащих 0,006–0,78% С. Образцы облучили CO₂-лазером с выходной мощностью 2,5–5,0 кВт, при этом скорость перемещения образцов составила 5–40 мм/с. Закаленные зоны, образовавшиеся в результате облучения, имели вид полос шириной 2,5–3,0 мм, обладающих частичным оплавлением поверхности, а при использовании сканирующего устройства – закаленные зоны без оплавления поверхности глубиной 0,5–0,6 мм. В качестве поглощающих покрытий использовали углеродные, фосфатные и оксидные пленки.

При лазерном облучении поверхности малоуглеродистой стали 09Г2 α -фаза представляет собой пакетный мартенсит, а на некотором расстоянии от поверхности – тростоосорбит и измельченные зерна феррита. Закаленная зона среднеуглеродистых сталей 35 и 30Х имеет структуру пакетного и пластинчатого мартенсита с небольшим количеством остаточного аустенита. Структура закаленного слоя эвтектонидной стали 75Г представляет собой пластинчатый высокодисперсный

мартенсит с 20% остаточного аустенита. Износостойкость железа и сталей определена по уменьшению массы образцов после испытаний на машине "Амслер" при качении с 10%-ным проскальзыванием на базе 70 тыс. оборотов. Износ роликов диаметром 40 и толщиной 6 мм после лазерной закалки с оплавлением поверхности уменьшился. Интенсивность изнашивания в значительной степени зависит от содержания углерода в стали: так, для стали с содержанием углерода 0,1% износ после лазерной закалки уменьшился на 130%; для стали с 0,4% С – на 250%, а для стали с 0,75% С – на 450%. Предел контактной выносливости сталей 40Х и 75Г, определенный при испытаниях по схеме шар-плоскость, в результате лазерной закалки повысился на 70%.

Формирование структуры и изменение свойств поверхностных слоев ряда промышленных сплавов описаны в работе [2]. Исследователи обрабатывали стали 12ХН3А, 45, 40Х, 9Х, ШХ15 непрерывными CO₂-лазерами. Для увеличения поглощающей способности образцов на их поверхность наносили фосфатные покрытия, покрытия на основе графита или окислов металлов. Было обнаружено, что при обработке образцов из стали 45 упрочнение без оплавления поверхности было достигнуто на скорости 5 м/мин. Глубина зоны лазерной закалки составила 0,15 мм. При обработке с оплавлением поверхности увеличение



мощности или скорости обработки приводит к снижению среднего значения микротвердости поверхности [3]. При этом среднее значение микротвердости вдоль полосы оказалось несколько выше, чем поперек полосы.

Из проведенных исследований микроструктуры сталей стало понятно, что упрочненная зона в общем случае состоит из трех слоев. Первый слой, полученный закалкой из жидкого состояния, для исследованных сталей характеризуется высокой дисперсностью структурных составляющих, основная доля которых приходится на мартенсит. Исследования стали 45 методами рентгеноструктурного анализа, проведенного после обработки непрерывным лазерным излучением, показали отсутствие остаточного аустенита. В сталях 9Х и ШХ15 при некоторых режимах обработки образуется белый нетравящийся слой толщиной около 50 мкм, микротвердость которого составляет 900–1200 НВ. Второй слой образовался при нагреве металла ниже температуры плавления. Ввиду чрезвычайно высоких скоростей нагрева и охлаждения возможен сдвиг критических точек в области высоких температур [4], поэтому структуры этого слоя, как правило, аналогичны структурам, наблюдаемым после неполной закалки. Так, в нормализованной стали 45 наряду с мартенситом сохраняется сетка феррита, в сталях 9Х и ШХ15 – мелкодисперсные карбиды. Только в том случае, если сталь в исходном состоянии закалена и низкоотпущена, между слоем закалки из твердого состояния и исходной структурой имеется третий слой толщиной 75–440 мкм. Его микротвердость составляет 300–450 НВ из-за образования структур отпуска.

Авторы работы [5] исследовали образцы стали 45 и 40Х, упрочненные лучом лазера до твердости HRC 56. Испытания образцов прошли в среде масла, загрязненного абразивом, в условиях трения скольжения. Ширина зон закалки составляла 3 мм, глубина 0,6–0,8 мм, а расстояние между дорожками – 3 мм. Результаты испытаний сравнили с результатами испытаний других образцов – стали ШХ15СГ, которые подвергли объемной закалке на твердость HRC 60, и металлическими образцами из стали 18ХГТ, прошедшими азотирование, и имеющими поверхностную твердость более 56 HRC. Результаты испытаний показали, что износостойкость образцов сталей 45 и 40Х, подвергнутых лазерной закалке, превосходит на 20% износостойкость образцов стали ШХ15СГ, однако она меньше на 20–30% износостойкости азотированных образцов.

В ИМАШ РАН провели серию экспериментальных работ с целью исследовать влияние, которое оказывает на повышение твердости, износостойкости и прочности сталей 30Г2, 45, 40Х, 65Г излучение газовых и волоконных лазеров. Для этого воспользовались газовым лазером мощностью до 2 кВт и волоконным лазером ЛСЗ,5, принадлежащими лазерному центру МИФИ. Затем на приборе ПМТ-3 (нагрузка на индентор – 0,98 Н) определили микротвердость. Рентгеновские съемки проводили на дифрактометре ДРОН-2 в К α С α излучении при напряжении 32 кВ.

Износостойкость образцов исследовали на машине трения при возвратно-поступательном движении (МТВ-1). В качестве смазки использовали масло индустриальное И-Г-А-68 (И40А). Продолжительность испытаний 8 часов. Абразивный износ определяли по схеме Бриннеля-Хаворта на машине БХ-4. К вращающемуся резиновому диску прижимали образец с нагрузкой 26 Н, в зону трения подавали кварцевый песок с фракцией 0,2 – 0,4 мм. Продолжительность испытаний составила 30 мин.

Образцы сталей 45, 40Х, 65Г с размерами 15×20×70 мм упрочняли на лазерной установке



Микрошлиф резьбы с лазерным упрочнением

"Комета-М", варьируя мощность в пределах 700–1300 Вт. Обработку производили расфокусированным пятном с эффективным диаметром 3 мм и при высокочастотном сканировании луча с частотой 240 Гц с амплитудой 3–15 мм. Образцы труб стали 30Г2 обрабатывали по цилиндрическому участку и резьбовой части ниппельного конца трубы на газовом и волоконном лазере.

Исследования показали, что на всех дифрактограммах, полученных от узких дорожек (без сканирования луча), интенсивность в максимуме всех дифракционных линий выше интенсивности соответствующих линий от широких дорожек, полученных при сканировании луча. Кроме того, линия дорожки, полученная при сканировании поверхности лучом, оказалась шире, чем линия дорожки, упрочненная неподвижным лучом. Расчеты показали, что средний размер блоков широких дорожек составляет примерно $0,3 \cdot 10^{-5}$ см, а узкой – приблизительно $0,4 \cdot 10^{-5}$ см. Это свидетельствует о наличии более существенных структурных изменений в случае сканирующего луча. То есть в образцах появлялись фрагменты с более значительным измельчением элементов структуры и деформации кристаллической решетки. Твердость закаленных лазерным лучом слоев зависит от времени воздействия и плотности мощности лазерного пучка. После подбора оптимальных режимов лазерного воздействия на сталь 45 и сталь 40Х получены значения твердости 57–61 HRC.

Испытания на износ образцов сталей 45, 40Х на машине трения МТВ-1 показали, что износостойкость образцов, упрочненных при высокочастотном сканировании луча, оказалась выше, чем у образцов, закаленных неподвижным лучом. При равных площадях упрочненной поверхности разница составила 20–30%. При работе сканирующим лучом было замечено, что износостойкость возрастает с увеличением ширины дорожки закалки. Зависимость эта носит линейный характер, и при максимальной амплитуде

износостойкость увеличивается на 15%. При увеличении площади закаленной поверхности на 50% от номинальной площади образца износостойкость возрастает в 2,5–3 раза по сравнению с образцами, прошедшими объемную закалку с высоким отпуском. Дальнейшее увеличение площади лазерной закалки до 100% повышает износостойкость на 30–50%, при этом трудоемкость обработки возрастает в два раза. Поэтому при назначении технологических режимов упрочнения деталей машин необходимо руководствоваться условиями их работы и, исходя из них, определять оптимальную площадь упрочнения. Для тяжело нагруженных узлов трения и газостатических направляющих станков необходимо проводить 100%-ную закалку поверхности трения на глубину не менее 1 мм. Для деталей, работающих при малых и средних нагрузках, площадь лазерного упрочнения может составлять 40–60% от номинальной площади поверхности трения при глубине слоя 0,3–0,6 мм.

Испытанию на абразивное изнашивание подвергали несколько образцов. Это были стали 45, 40Х, предварительно прошедшие лазерное упрочнение расфокусированным и сканирующим лучом, и образцы стали 18ХГТ после ионного азотирования в течение 6 часов. В результате установлено, что износостойкость образцов, закаленных расфокусированным лазерным лучом, в среднем на 10% ниже, чем стойкость образцов, упрочненных сканирующим лучом. В свою очередь образцы, прошедшие ионное азотирование, имели износостойкость соответственно на 12% и 22% выше, чем у образцов, упрочненных лазером. Следует отметить, что абразивному изнашиванию подвергаются в основном участки на границах дорожек закалки, которые при наложении частично отпущены. Результаты испытаний свидетельствуют о том, что дорогостоящие стали 18ХГТ с успехом могут быть заменены более дешевыми сталями 45 и 40Х.

Лазерное упрочнение стали 30Г2 производили при мощности излучения газового и волоконного лазера 700–1000 Вт. Диаметр лазерного луча изменяли в пределах 3–10 мм. Скорость обработки на газовом лазере меняли от 10 до 30 мм/с, на волоконном – от 10 до 100 мм/с. На цилиндрических проточенных образцах труб упрочнение производили без поглощающего покрытия и с покрытием СГ504. Лазерное упрочнение ниппельного конца трубы выполнено без применения поглощающего покрытия. Металлографические исследования



упрочненных зон показали, что в зависимости от режимов обработки глубина упрочненного слоя изменяется в пределах 0,25-1,3 мм на цилиндрических участках труб. Лазерную обработку выполняли, начиная с максимальных плотностей мощности q_{\max} при оплавлении поверхности и доводили до оптимальных значений $q_{\text{опт}}$. И, наоборот – начинали с минимальных плотностей мощности q_{\min} , а затем доводили до оптимальных значений $q_{\text{опт}}$.

Изучено влияние на глубину упрочненного слоя диаметра лазерного луча – d (мм), скорости перемещения детали – v (мм/с) и мощности лазерного излучения – P (Вт). В первом случае глубина зоны закалки определяется из соотношения

$$Z = K \cdot P \cdot d^n / C_q \cdot v^m \cdot 10^2.$$

Во втором случае, когда обработка начинается с низкой плотности мощности излучения,

$$Z = K \cdot P / C_q \cdot d^k \cdot v^m \cdot 10^2,$$

где K – коэффициент, учитывающий условия обработки; P – мощность излучения; n , m , k – показатели степени; C_q – удельная энергия поглощенного излучения. Зависимость изменения глубины зоны упрочнения от режимов обработки носит экстремальный характер. В наших экспериментах при обработке на газовом лазере получены значения коэффициентов $n=0,5$; $m=0,45$, а при упрочнении на волоконном лазере $n=0,7$; $m=0,45$.

Твердость упрочненного слоя на высоких скоростях обработки составила 52-55 HRC, на средних скоростях – 45-50 HRC. Применение поглощающего покрытия СГ504 позволяет увеличить зону упрочнения на 25-30%. Глубина упрочненного слоя на резьбовой части трубы составила 0,2-0,3 мм (см. рисунок) при твердости 45-50 HRC. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при прочих равных условиях лазерное упрочнение на волоконном лазере способствует уменьшению времени обработки резьбы в 3-5 раз в сравнении с газовым лазером в зависимости от мощности излучения.



Содержание углерода влияет на твердость лазерного упрочнения сталей. Так, при упрочнении стали 65Г твердость поверхностных слоев достигает 61–67 HRC при режимах облучения, указанных выше для газового лазера. Был определен прогиб лап культиваторов, изготовленных по традиционной технологии на ОАО "Грязевский культиваторный завод". Оказалось, что после лазерной закалки крыльев лап тремя дорожками шириной 6 мм с шагом 8 мм прогиб стал в 5 раз меньше, чем у серийных лап. Таким образом, сопротивление изгибу в результате лазерного упрочнения существенно повышается, что, в конечном счете, повышает усталостную прочность лап. Износостойкость лап, закаленных лазерным лучом, повышается в 4–5 раз. Эти результаты затем подтвердили полевые испытания, проведенные в компании "СЕВКАВМИС" (г. Зерноград) [6].

Лазерное упрочнение сталей 45 и 40Х успешно применяют на деталях типа направляющих скольжения специальных станков, посадочных мест под подшипники и других узлах трения. Применение высокочастотного сканирования луча по нормали к траектории движения детали значительно повышает качество упрочненных слоев, а производительность процесса обработки – в 1,5–2 раза по сравнению с обработкой неподвижным расфокусированным лучом.

Сталь 30Г2 применяется при изготовлении насосно-компрессорных труб. Известно, что детали нефтегазовых изделий испытывают значительные нагрузки. Так, вращающийся буровой инструмент внедряется в породу под действием осевой нагрузки, а также ударов, наносимых с помощью специальных механизмов с определенной частотой [7]. Поэтому необходимо изменить конструкционные требования к резьбовым

соединениям насосно-компрессорных, утяжеленно бурильных труб и других видов трубной продукции. Повышение качества труб в их замковой части обеспечит большой экономический эффект. Обрыв трубы приводит в возможной потере колонны бурильных труб и телеметрической аппаратуры – это убытки в размере 30–40 млн. руб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шур Е.А., Воинов С.С., Клещева И.И. Повышение конструктивной прочности сталей при лазерной закалке. – *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1982, №5, с. 36–38.
2. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н., Тарасенко В.М. и др. Упрочнение поверхности сплавов лазерным излучением. – *Физика и химия обработки материалов*, 1983, №9, с.124–131.
3. Григорьянц А.К., Сафонов А.Н., Тарасенко В.М., Морящев Н.Ю. – *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1982, №9, с. 29.
4. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1975.
5. Акулина Г.А., Цырлин Э.С. Лазерная закалка деталей машин. – М.: Машиностроение, 1984.
6. Бирюков В.П., Дозоров А.В. Лазерные системы для упрочнения, наплавки деталей и точного раскроя листового материала. – *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2006, №1, с.60–66.
7. Песин М.В. Повышение надежности резьбовых соединений нефтегазовых изделий. – *Технология машиностроения*, 2011, №9, с.49–50.

ЛАЗЕРНО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ, БИОЛОГИИ И ГЕОЭКОЛОГИИ – 2012

XX Международная Конференция проводится с 11 по 14 сентября 2012 года на базе отдыха "Романтик", п. Абрау-Дюрсо, г. Новороссийск, Краснодарский край.

Тематика конференции:

- лазерная физика;
- лазерные системы;

- лазеры в биологии и медицине;
- лазеры в геоэкологии;
- формирование и передача оптической информации;
- оптические технологии.

Заявки на участие, тезисы и акт экспертизы направлять до 30 июня 2012 года по адресу:

353900, Новороссийск, 20, НПИ, профессору В.Г.Шеманину, E-mail: vshemanin@nbkstu.org.ru elhator@yandex.ru.

Информацию о конференции можно найти на сайтах: http://laser-portal.ru/cogherent_404 или <http://www.abrauconf.novtelecom.net>.

Председатель оргкомитета В.Привалов