

# ЛАЗЕРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛЕЙ: СРАВНЕНИЕ ВОЛОКОННЫХ И СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРОВ

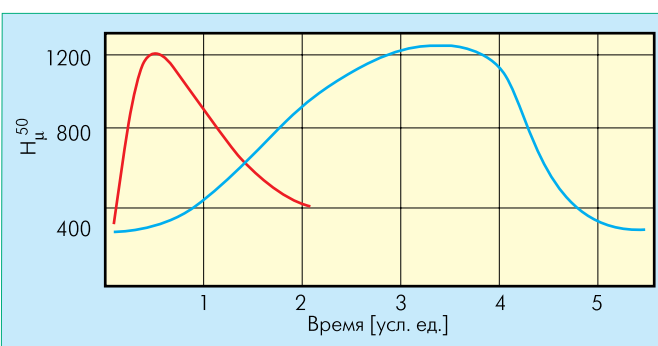
**В**ыбор эффективного лазерного источника для упрочнения поверхностей – сложная задача. Необходимо учитывать не только влияние параметров лазерного луча, но и неоднородность структуры поверхностного слоя, наличие в нем карбидообразующих элементов. В статье сравниваются эффекты использования СО<sub>2</sub>-лазеров и волоконных YAG-излучателей.

Появление новейших мощных лазерных источников: диодных и волоконных лазеров привлекло внимание к вопросу выбора эффективного источника для лазерной закалки. Причем результаты и условия, полученные при использовании СО<sub>2</sub>-лазеров и YAG-излучателей, нельзя непосредственно перенести на лазерные методы с использованием других источников. Во-первых, мы имеем существенное отличие длин волн излучателя, во-вторых, – иные пространственно-геометрические параметры светового пучка.

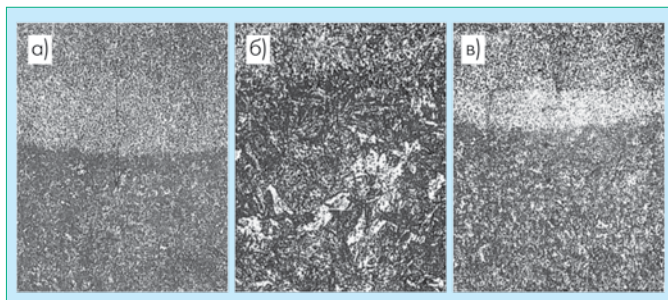
В ряду задач процессов закалки одна из самых актуальных – это закалка без плавления. Например, для закалки штамповой оснастки недопустимо локальное плавление металла даже в микрizonaх. Поэтому логика оптимизации процесса связана с обеспечением равномерного распределения мощности излучения, как в пространстве, так и во времени. Структура излучения мощных YAG-лазеров усложняет решение этой задачи. Для обеспечения равномерной экспозиции при закалке СО<sub>2</sub>-лазерами были разработаны специальные многоканальные лазеры типа МТЛ-2. Основным недостатком закалки классическими лазерами является чрезвычайно низкая энергетическая эффективность. Для СО<sub>2</sub>-лазера энергетический КПД от розетки не превосходит 10%, а коэффициент поглощения излучения металлами не превосходит нескольких процентов, так что полный КПД процесса закалки составляет доли процента. Для его повыше-

ния приходится использовать разные технологии нанесения поглощающих покрытий, что сильно усложняет процесс и вводит в него множество трудноконтролируемых факторов. Для YAG-лазера коэффициент поглощения может достигать 10–15%, но зато полный КПД самого лазера обычно составляет не более 2–3%.

Кроме того, работоспособность деталей машин и элементов конструкций в значительной мере определяется качеством поверхностного слоя, в особенности на участках и в зонах концентрации напряжений и деформаций. Поэтому к основным характеристикам методов упрочнения относятся глубина и степень упрочнения, остаточные напряжения и микроструктура слоя. Значения параметров, характеризую-



**Рис. 1** Зависимость величины микротвердости поверхностного слоя сталей марок 40X (левый пик) и 40X13 (правый пик) от времени лазерной обработки



**Рис. 2** Микрошлифы образцов, упрочненных сканирующим лазерным лучом: а) и б) волоконным лазером ( $P = 700$  Вт,  $v = 30$  мм/с), в) CO<sub>2</sub>-лазером ( $P = 1200$  Вт,  $v = 6$  мм/с). (б – увеличенное изображение структуры переходной зоны, 200×)

щих качество поверхностного слоя, зависят от температурно-временных параметров лазерного упрочнения без оплавления. Изменяя их, можно сформировать поверхностный слой с высокой твердостью и достаточно однородной структурой. Понятие однородности определяется эксплуатационными свойствами применяемых конструкционных материалов [1–4]. Оно подразумевает, что слой состоит на 70–80% из основной фазы, размер областей других фаз (карбидов, остаточного аустенита и т.д.) не превышает 5 мкм. Обработка материалов лазерным излучением без оплавления поверхности обеспечивает быстрый нагрев поверхностного слоя. Это ведет к быстрому росту градиента температуры по толщине материала без изменения геометрии участка и размера изделия в целом. Такие преимущества открывают перспективы участия лазерных методов в технологических процессах термоупрочнения поверхности без последующей финишной обработки. Однако получение материалов с условно однородными структурами является сложной задачей.

Параметры лазерного термического цикла и исходное структурно-фазовое состояние материала, по-видимому, влияют на структуру упрочненного поверхностного слоя [4]. Если исходная структура однородна, то лазерная обработка значительно упрочнит поверхностный слой. Это объясняется образованием более мелкозернистой, чем при традиционных способах закалки, мартенситной структуры [5]. Однако в ряде случаев при обработке поверхности с исходной неоднородностью сложно получить однородную структуру и требуемую твердость [3, 4, 6] даже после повторной лазерной обработки без оплавления. Такая структурная неоднородность поверхностного слоя может привести к изменению знака остаточных напряжений от минуса к плюсу. И это сведет к нулю эффективность лазерной обработки. В связи с этим интерес представляют не только исследования влияния технологических факторов лазерного термоупрочнения на формирование однородных и относительно мелкозернистых структур поверхностного слоя, но и сравнение эффективности использования CO<sub>2</sub>-лазеров и волоконных YAG-излучателей (см. табл.).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для оценки влияния физико-химических процессов при лазерном термоупрочнении и исходного структурного фактора были выбраны конструкционные материалы с различной степенью неоднородности исходной структуры и различным размером зерна: литая сталь марки 45Л с относительно однородной структурой, хромистые нержавеющие стали 40Х13, 20Х13, низколегированная перлитная сталь марки 38ХНЗМА, инструментальные стали Р6М5К5, У8, У10 и 9ХФ, 4Х16МФТЛ.

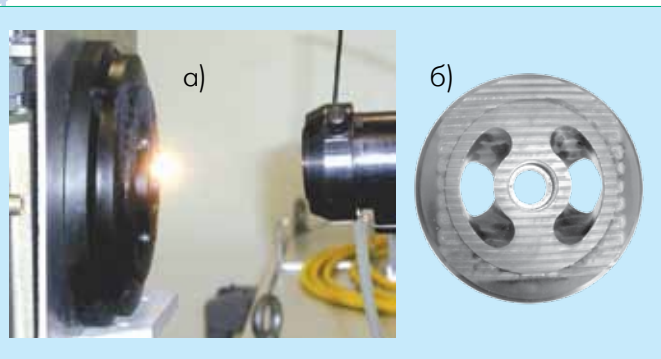
Лазерное термоупрочнение поверхностного слоя образцов проводилось с помощью CO<sub>2</sub>- и волоконного лазеров. Использовались установка "МТЛ-2,5" на основе CO<sub>2</sub>-лазера с мощностью до 2,5 кВт (ЦНИИ КМ "Прометей"), длиной волны излучения 10,6 мкм, с обладающим равномерным распределением плотности мощности по сечению луча, а также волоконный лазер ЛС-07 серии YLR (ИРЭ-ПОЛЮС) мощностью до 750 Вт, длиной волны 1,07 мкм и транспортным волокном 50 мкм. Лазер использовался в режиме непрерывного излучения, для фокусировки использовалась вариосистема VF001W с переменным фокусным расстоянием с насадкой для сварки. Поверхность шлифованного металлического образца относительно лазерного пучка размещалась под углом 20°, чтобы отраженное излучение не попало в технологическую головку. Для получения данных о свойствах металла после обработки использовали шлифованные образцы стали 40Х в виде штапиков 10×10×80 мм. Для сравнения эти же образцы были обработаны пучком CO<sub>2</sub>-лазера при том же диаметре лазерного пучка на детали.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Ранее была найдена зависимость [7] твердости поверхностного слоя низколегированной стали от скорости перемещения лазерного луча. В частности наблюдалось увеличение твердости до 1000–1300 Н<sub>μ</sub><sup>50</sup> для стали марки 40Х (при обычной закалке Н<sub>μ</sub><sup>50</sup> ≤ 800 ед.). Это объясняется условиями формирования мартенситной структуры. Дальнейшее увели-

Микротвердость Н<sub>ν</sub> при нагрузке 50 г, кг/мм<sup>2</sup>

Типа лазера	h, мкм	H, Н <sub>ν</sub>
Волоконный (P = 700 Вт, v = 30 мм/с)	100	870
	200	940
	300	920
	400	920
	500	1000
	600	390
	700	400
	800	420
CO <sub>2</sub> (P = 1200 Вт, v = 6 мм/с)	100	870
	200	890
	300	900
	400	460
	500	360
	600	620
	700	400



**Рис.3** Лазерная закалка поверхности изделия: а – установка, б – вид детали, работающей при повышенных контактных нагрузках, после закалки

чение скорости охлаждения при лазерной обработке поверхностного слоя привело к снижению твердости до 400–500 ед.  $H_{\mu}^{50}$  за счет увеличения аустенитной составляющей [4,6]. Структура поверхностных слоев после лазерной закалки при размере зерна более 20 мкм для исследуемых сталей с неоднородной структурой характеризуется различным по глубине зоны обработки фазовым составом. При увеличении времени нагрева при многократном упрочнении глубина однородной мартенситной зоны увеличивается. Структурные изменения после лазерного нагрева приводят к уменьшению неоднородности структуры в зависимости от времени выдержки в аустенитном состоянии.

Как уже известно, степень легирования сталей влияет на количество остаточного аустенита [4] и твердость сталей после лазерного упрочнения. Исследования зависимости твердости от хромового эквивалента  $Cr_{\text{экв}}$  после лазерного упрочнения показали, что с увеличением количества карбидообразующих элементов наблюдается уменьшение твердости поверхностного слоя. При увеличении длительности нагрева твердость сталей с повышенным значением  $Cr_{\text{экв}}$  растет, в то время как твердость сталей с низким  $Cr_{\text{экв}}$  заметно падает. Вероятно, это связано с уменьшением скоростей охлаждения материала после лазерного упрочнения. Аналогичное снижение наблюдалось и другими исследователями [7]. Можно сделать вывод, что чем больше карбидообразующих элементов содержит сталь, тем больше времени обработки необходимо для получения условно однородной структуры и высокой твердости. На рис.1 представлена зависимость твердости поверхностного слоя от времени обработки. Видно, что с его увеличением твердость поверхностного слоя увеличивается от 300 до 1200  $H_{\mu}^{50}$ . На этом же рисунке приведены две зависимости твердости для стали 40X и 40X13. Видно, что твердость стали 40X достигает максимума при временах обработки, значительно меньших, чем для стали 40X13. Подобное поведение проката из стали 40X13 связано, по-видимому, с растворением стабильных карбидов хрома при увеличении времени обработки, т.е. времени нагрева поверхностного слоя.

Таким образом, специфическое влияние карбидообразующих элементов при неизотермических диффузионных про-

цессах лазерной обработки основного металла целесообразно учитывать при выборе лазерных технологических режимов. Очевидно, что влияние таких параметров, как размер зерна, химический состав, исходная структура, будет определяться временем нагрева, достаточного для растворения карбидов. Однако преимущества лазерной обработки при этом могут быть утрачены. В этом случае ее применение окажется неоправданным, так как при этом существенно будет увеличена зона нагрева детали.

Сравнение эффективности двух типов лазеров показало, что эффективность поглощения излучения волоконного лазера чрезвычайно высока. Так, при мощности излучения 700 Вт и скорости 10–20 мм/с происходило интенсивное плавление поверхности с образованием дорожки шириной до 3–4 мм. Для обеспечения обработки без плавления пришлось увеличивать скорость движения источника до 30–40 мм/с. Заметим, что для  $CO_2$ -лазеров на этой скорости при более высокой мощности излучения 1500–2000 Вт плавление не наблюдается даже при использовании поглощающих покрытий.

На рис.2а показана микроструктура сечения на стали 40X при скорости 30 мм/с и мощности излучения 700 Вт и соответствующее распределение микротвердости. Примечательно, что структура закаленного слоя довольно однородна (микроструктура имеет вид мелкодисперсного мартенсита) и полностью отсутствует переходная зона (рис.2б). На рис.2в для сравнения приведен микрошлиф зоны обработки при использовании  $CO_2$ -лазера с мощностью  $P = 1200$  Вт и скоростью  $v = 6$  мм/с. Здесь отчетливо присутствует переходная зона – как на металлографических снимках, так и на замерах микротвердости.

Важно то, что общая эффективность процесса с использованием волоконного лазера (как отношение производительности к затраченной лучевой мощности) существенно выше, чем для  $CO_2$ -лазера. Если грубо оценить повышение эффективности перемножением факторов "глубина закалки"×"мощность излучения"×"скорость", то получим коэффициент, равный примерно 12. Объяснение этого факта исключительно более высоким коэффициентом поглощения излучения с длиной волны 1,07 мкм в сравнении с длиной волны 10,6 мкм не правомерно. Вероятно, повышение эффективности связано с более быстрым нагревом и увеличением поглощения нагретой поверхностью. С учетом того, что КПД волоконных лазеров составляет 25%, что в 2,5–3 раза выше КПД серийных  $CO_2$ -лазеров, общая энергетическая эффективность процесса закалки волоконными лазерами оказывается выше в 20–30 раз. Это позволяет позиционировать данный процесс как реально коммерчески конкурентный с известными видами закалки, например токами высокой частоты. При этом с учетом доставки излучения по оптическому волокну и исключения нанесения поглощающих покрытий – рассмотренный процесс чистый и полностью контролируемый.

Отличные результаты тестов позволили без особых проблем перейти к закалке опытных партий деталей. Выполнялась закалка деталей специальных насосов, производимых на ОАО "Пролетарский завод". Материал деталей – сталь 40X с покрытием "воронение". Поверхность обрабатывалась путем строчной раскладки валиков при диаметре светового пятна около 4 мм с шагом между валиками около 7 мм. На рис.3а приведена фотография процесса обработки, а на рис.3б – внешний вид обработанной детали. Время обработки отдельной детали составило 84 с. Причем после выполнения оптимизации время может быть сокращено до 42 с. Заводские испытания первой партии из 25 шт. показали стопроцентное качество закалки и глубину закалки 0,55 мм до значения 920–940 Нв.

Однако списывать со счета CO<sub>2</sub>-лазеры, еще рано, для ряда поверхностных процессов эти лазеры послужат еще долго. Дело в том, что длина волны излучения 10,6 мкм прекрасно подходит для нагрева неметаллических составляющих при лазерном модифицировании. Создание окисных пленок, проплавление неметаллических фаз, а также уже налаженные некоторые химико-термические процессы сложно отменить из-за своей конкретной эффективности и поэтому спрос на них останется. В то же время при использовании волоконных лазеров появляется проблема низкой надежности головок для термообработки. Это оборудование выходит из строя при попадании отраженного луча.

При обработке деталей с изменяющейся геометрией поверхности, например кулачков, нельзя избежать случая попадания отраженного луча в технологическую головку. Так что эра волоконных лазеров еще только начинается и впереди много работы по решению проблем использования головок.

Таким образом, установлено, что неизотермические диффузионные процессы оказывают влияние на структурную неоднородность и твердость поверхностных слоев. Кинетика неизотермических процессов существенным образом влияет не только на структуру поверхностного слоя, но зачастую определяет и механические свойства поверхностного слоя. И это следует учитывать при разработке технологических процессов лазерного термоупрочнения различных сталей. Хромовый эквивалент позволяет определить время, необходимое для лазерного скоростного нагрева данной стали.

Тестирование закалки металлов излучением волоконного лазера показало, что производительность процесса в 12 раз превосходит значения для CO<sub>2</sub>-лазеров даже без использования поглощающих покрытий. Общая энергетическая эффективность закалки в 20–30 раз выше, и процесс вполне конкурентоспособен среди других методов упрочнения и закалки. Но внедрение волоконных лазеров тормозит низкая надежность головок для лазерного термического упрочнения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кремнев Л.С., Холоднов Е.В., Владимирова О.В. Выбор сталей, подвергаемых лазерному упрочнению. – *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1987, №9.
2. Бураков В.А., Бровер Г.И., Буракова Н.М. Повышение теплостойкости быстрорежущих сталей лазерным легированием. – *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1985, №11.
3. Трегулов Н.Г., Соколов Б.К., Варбанов Г.А. и др. Лазерные технологии на машиностроительном заводе. – В кн.: *Применение процессов лазерной обработки материалов*: ВНТО им. А.Н.Крылова, Уфа. 1993.
4. Бровер А.В., Бровер Г.И., Дьяченко Л.Д. Некоторые особенности структурного состояния сталей в зонах лазерной обработки. – *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*, 2007, №6.
5. Гуреев Д.М., Зайкин А.Е., Ямщиков С.В. Влияние лазерной и термической обработки на структуру и свойства высокохромистого чугуна. – *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1985, №11.
6. Вайнерман А.Е., Калганов Б.Д., Попов В.О. Особенности и перспективы создания и применения материалов с особыми свойствами поверхностных слоев. – *Вопросы материаловедения*, 1996, №1.
7. Аравин Б.П., Вайнерман А.Е., Калганов Б.Д. и др. Лазерная обработка деталей бурового инструмента. – В кн.: *Применение процессов газотермического напыления и лазерной обработки материалов*. – Н.Новгород: ВНТО им. А.Н.Крылова, 1990.