

## Hardening of structural steel by a multichannel CO<sub>2</sub> laser

V.I. Yugov<sup>1,†</sup>, L.E. Afanasieva<sup>2</sup>, I.A. Barabonova<sup>2</sup>, G.V. Ratkevich<sup>2</sup>

<sup>†</sup>yugov\_laser@bk.ru

<sup>1</sup>Vladimir State University named after Alexander and Nikolai Stoletovs, Gorky St., 87, 600000 Vladimir, Russia

<sup>2</sup>Tver State Technical University, Afanasiy Nikitin emb., 22, 170026, Tver, Russia

Studies are carried out on the microstructure and micro-hardness distribution of structural steel 30HN3A samples hardened by laser quenching by means of continuous radiation from a multi-channel 48 rays CO<sub>2</sub> laser system CLT-Yu-5. To provide the formation of a uniform structure, hardness and depth distribution in the hardened material layer a laser emitter was used with four plug-in radiating tubes arranged one into another in an octahedral configuration (patent RF № 2580350). An important role of a high uniformity of the integral heat input across the hardening zone width on the uniformity of properties of the hardened layer is demonstrated. It was found that in the hardened area a finely dispersed martensite structure was formed. The carbides contained in the initial structure of sorbite dissolve not completely during laser hardening. They are characterized by a globular form and size of 0.2...0.3 µm. The microhardness of steel in the hardened area was about 6800 MPa. The thickness variation of the hardened layer, which is characterized by the ratio between minimal,  $h_{\min}$ , and maximal,  $h_{\max}$ , depths, is equal to 0.76 at  $h_{\max} = 1050$  µm. A reduction in microhardness in a tempering zone formed between two successive hardened bands down to the values of 5500...6000 MPa was found. The width of this tempering zone is about 1.8 mm. The decrease of microhardness in this zone is due to a dissociation of the martensite and formation of tempering troostite structure. Lamellar carbides are formed during this process. Steel in the laser hardened area has a favorable structure in terms of the strength and durability. Thus, hardening of steel by means of multi-channel CO<sub>2</sub> laser systems provides wide opportunities in improving of material properties and is recommended for hardening of expensive machine parts increasing their service lifetime.

**Keywords:** multi-channel CO<sub>2</sub> laser, laser hardening, structural steel.

## Упрочнение конструкционной стали с помощью многоканального СО<sub>2</sub> лазера

Югов В.И.<sup>1,†</sup>, Афанасьева Л.Е.<sup>2</sup>, Барабонова И.А.<sup>2</sup>, Раткевич Г.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, ул. Горького, 87, 600000 Владимир, Россия

<sup>2</sup>Тверской государственный технический университет, наб. Афанасия Никитина, 22, 170026, Тверь, Россия

Проведены исследования микроструктуры и распределения микротвердости образцов конструкционной стали марки 30ХН3А, упрочнённых лазерной закалкой с помощью непрерывного излучения многоканального (48 лучей) СО<sub>2</sub>-лазера на комплексе модели ЦЛТ-Ю-5. Для обеспечения равномерной структуры, твердости и глубины упрочненного слоя материала использовали лазерный излучатель с излучающими трубками, скомпонованными в виде пакета, состоящего из вложенных один внутри другого четырех восьмигранников (Patent RF № 2580350). Показана роль высокой степени однородности интегрального тепловложения по ширине полосы упрочнения на однородность свойств упрочненного слоя. Установлено, что в упрочненной зоне формируется структура мартенсит с тонким строением. Карбиды, входящие в состав исходной структуры сорбита, при лазерной закалке растворяются не полностью. Они имеют глобулярную форму и размер 0,2...0,3 мкм. Микротвердость стали в упрочненной зоне около 6800 МПа. Равномерность глубины упрочненного слоя, которая характеризуется отношением минимальной глубины упрочнения  $h_{\min}$  к максимальной глубине упрочнения  $h_{\max}$  равна 0,76 при  $h_{\max} = 1050$  мкм. Выявлено снижение микротвердости в зоне отпуска между полосами упрочнения до значений 5500...6000 МПа. Протяженность зоны отпуска около 1,8 мм. Снижение микротвердости в этой зоне обусловлено распадом мартенсита и формированием структуры троостит отпуска. При этом образуются карбиды пластинчатой формы. Сталь в зоне лазерного упрочнения имеет благоприятную с точки зрения прочности и износостойкости структуру. Лазерная закалка сталей с использованием многоканального СО<sub>2</sub> лазера имеет широкие возможности и рекомендуется для упрочнения дорогостоящих деталей, повышая их срок эксплуатации.

**Ключевые слова:** многоканальный СО<sub>2</sub> лазер, лазерная закалка, конструкционная сталь.

## 1. Введение

Термин лазерная обработка материалов включает в себя спектр промышленных технологий: резку, сварку, пайку, маркировку, наплавку, закалку и другие. Возникает проблема в выборе типа лазера в качестве оптимального инструмента для требуемой обработки материала. В одних технологиях, например, газолазерная резка, сварка оптимальным является использование лазерного излучения в виде Гауссовского пучка. Луч фокусируется в пятно малых размеров, почти вся его мощность сосредоточена в центре пятна. Для технологий термоупрочнения, наплавки необходимо использовать лазерное излучение с высокой степенью однородности интегрального тепловложения по ширине полосы. Применение однолучевых лазеров для этих целей приводит к неоднородной по структуре, глубине и твердости зоне упрочнения. Многолучевой лазер обеспечивает более равномерное, по сравнению с однолучевым, распределение интегрального тепловложения по ширине полосы упрочнения. В ООО «Центр лазерных технологий» в г. Владимире на протяжении ряда лет разрабатываются, изготавливаются и вводятся в эксплуатацию лазерные комплексы с широкими технологическими возможностями. Комплексы состоят из многоканальных (48 лучей)  $\text{CO}_2$ -лазеров с мощностью выходного излучения 5 кВт и технологических постов с пятью координатами манипулирования луча и двумя координатами манипулирования деталью. Для обеспечения равномерной структуры, твердости и глубины упрочняемого слоя материала используют лазерный излучатель с излучающими трубками, скомпонованными в виде пакета, состоящего из вложенных один внутри другого четырех восьмигранников (Patent RF № 2580350) [1]. Накоплен большой опыт по разработке и практической реализации технологий лазерного упрочнения и наплавки для десятков тысяч различных деталей и инструментов из сталей, чугунов, сплавов титана, меди, никеля [2, 3]. В настоящей работе исследуется возможность лазерного термоупрочнения конструкционной стали марки 30ХН3А с целью повышения срока службы изготовленных из неё дорогостоящих деталей.

Вопросам упрочнения конструкционных сталей с помощью лазерного излучения посвящен ряд публикаций [4–7], в которых представлены результаты металлографических исследований, расчетов тепловых полей в зоне упрочнения, даны рекомендации по оптимизации параметров лазерной закалки для достижения максимальной производительности. Однако, в этих работах стали упрочняли с помощью однолучевых лазеров. Цель настоящей работы исследовать микроструктуру и распределение микротвердости в упрочненных поверхностных слоях конструкционной стали марки 30ХН3А при непрерывном воздействии многоканального  $\text{CO}_2$  лазера.

## 2. Методы проведения исследований

Лазерному упрочнению подвергались образцы конструкционной стали марки 30ХН3А (ГОСТ 4543–71) размером  $9 \times 15 \times 100$  мм после закалки и высокотем-

пературного отпуска. Лазерную закалку выполняли с помощью непрерывного излучения многоканального (48 лучей)  $\text{CO}_2$ -лазера на комплексе модели ЦЛТ-Ю-5 на следующих режимах: мощность излучения — 1,2...3 кВт, скорость перемещения лазерного пучка по упрочняемой поверхности 8...15 мм/с, диаметр пучка 6 мм. Каждый образец был упрочнен двумя полосами с перекрытием 50% по линейной схеме. Микроструктуру стали изучали с помощью универсального растрового электронного микроскопа JEOL 6610LV (Япония). Для выявления микроструктуры использовали химическое травление шлифов 3% раствором азотной кислоты. Микротвёрдость измеряли на приборе ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450–76 при усилии 1,96 Н. В качестве индентора применяли алмазную четырёхгранную пирамидку с квадратным основанием. Отпечатки твердости располагали матричным способом. Шаг между узлами матрицы по оси  $x$  составлял 500 мкм, по оси  $y$  — 100 мкм.

## 3. Результаты исследования и их обсуждение

Конструкционная сталь марки 30ХН3А (ГОСТ 4543–71) обладает повышенными прочностными свойствами в сочетании с хорошей пластичностью, вязкостью, высоким сопротивлением развитию трещин. Она применяется для изготовления крупных деталей ответственного назначения [8]. Химический состав стали приведен в таблице 1.

Макроструктура одного из образцов с отпечатками алмазного индентора представлена на рис. 1. На рис. 2 показано распределение микротвердости по ширине упрочненной зоны. Каждое значение микротвердости на графике представляет собой среднее арифметическое чисел твердости, рассчитанных по первым 6 отпечаткам на глубину 650 мкм.

На рис. 3 представлено распределение микротвердости по глубине упрочнения в центральной части полосы. Точками показаны измеренные значения микротвердости, линия — аппроксимация экспериментальных данных по функции Больцмана с использованием компьютерной программы Origin. Полученные данные показывают, что на глубину до 1 мм происходит повыше-

Табл. 1. Массовая доля элементов, % в стали 30ХН3А.

Table 1. The mass fraction of elements, % in 30HN3A steel.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe и примеси
0,27...0,33	0,17...0,37	0,30...0,60	0,6...0,9	2,75...3,15	остальное

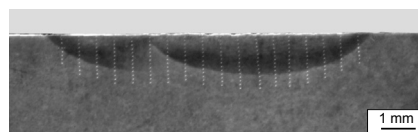


Рис. 1. Макроструктура стали марки 30ХН3А с отпечатками пирамидального индентора.

Fig. 1. Macrostructure of the 30HN3A steel sample with the imprints of pyramidal indenter.

ние микротвердости до 6800 МПа. Вне зоны лазерного воздействия сталь марки 30ХН3А имеет структуру сорбита с микротвердостью около 3800 МПа. Изображение микроструктуры представлено на рис. 4а.

Высокие скорости нагрева и охлаждения стали — ключевые характеристики лазерной заковки. Благодаря этому в зоне упрочнения формируется мартенсит с тонким строением. Карбиды, входящие в состав исходной структуры сорбита, при лазерной заковке растворяются не полностью. Они имеют глобулярную форму и размер 0,2...0,3 мкм (рис. 4б).

Известно, что при перекрытии полос упрочнения образуется зона разупрочнения из-за прохождения процессов отпуска стали при повторном нагреве в интервале температур ниже точки  $A_{c1}$  [2]. По распределению микротвердости установлено, что протяженность зоны отпуска между полосами около 1,8 мм. Значения микротвердости снижаются до 5500...6000 МПа. В этой зоне происходит распад мартенсита с выделением карбидов пластинчатой формы. Формируется структура троостит отпуска (рис. 4с).

Важной характеристикой лазерной заковки является равномерность глубины упрочнения, которая характеризуется отношением минимальной глубины упрочнения  $h_{\min}$  к максимальной глубине упрочнения  $h_{\max}$ . Для образца, изображенного на рис. 1,  $h_{\min} = 800$  мкм,  $h_{\max} = 1050$  мкм. Равномерность глубины упрочнения равна 0,76. Сталь в зоне лазерной обработки имеет благоприятную с точки зрения прочности и износостойкости структуру.

#### 4. Заключение

Проведены металлографические исследования конструкционной стали 30ХН3А в зоне лазерной заковки с помощью многоканального  $\text{CO}_2$ -лазера. Микротвердость упрочненного слоя около 6800 МПа. Микроструктура стали мартенсит с тонким строением и карбиды глобулярной формы размером 0,2...0,3 мкм. Равномерность упрочнения 0,76. Лазерная заковка рекомендуется для упрочнения дорогостоящих деталей с целью повышения их срока эксплуатации.

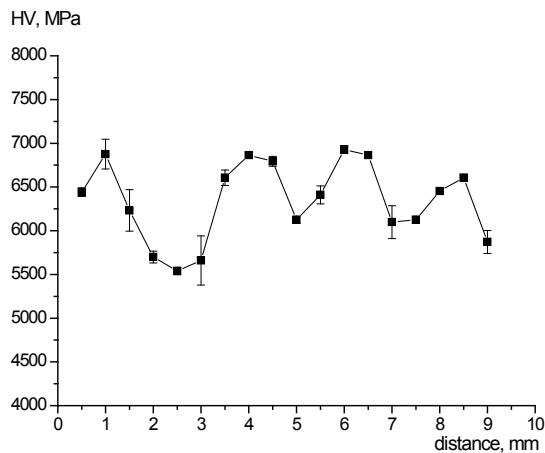


Рис. 2. Распределение микротвердости по ширине зоны упрочнения.

Fig. 2. Distribution of microhardness across the strengthened region.

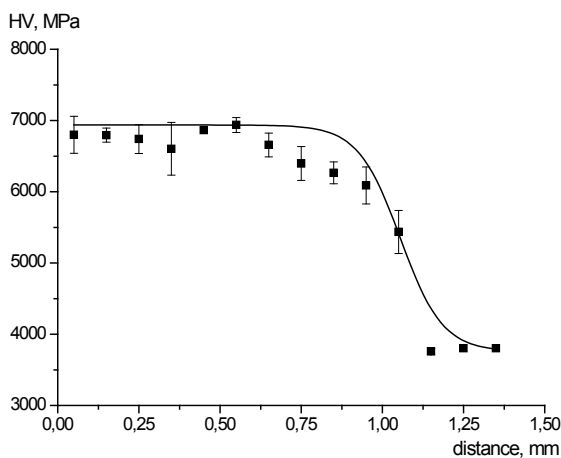


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине зоны упрочнения.

Fig. 3. Distribution of microhardness in depth of the strengthened region.

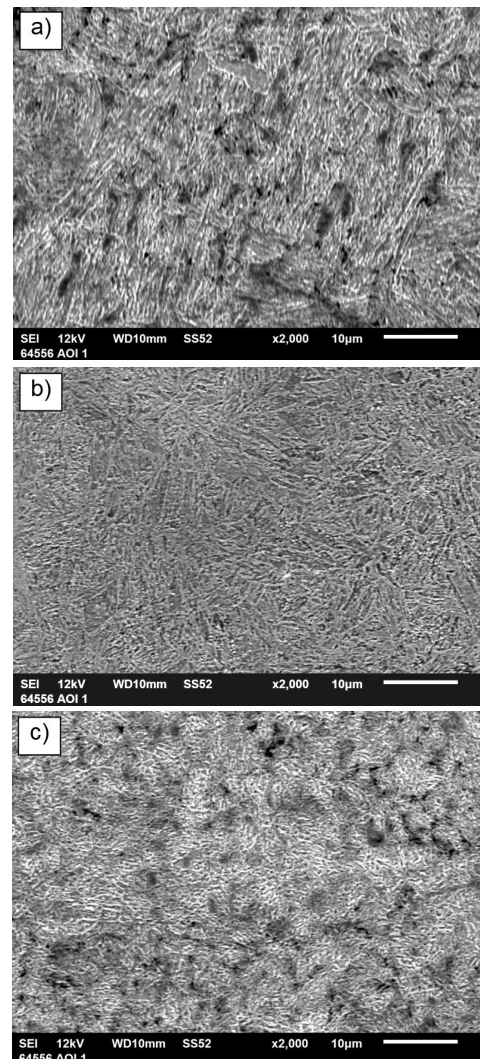


Рис. 4. Микроструктура стали 30ХН3А вне зоны лазерного воздействия (а) в упрочненной зоне (б) и зоне отпуска (с).

Fig. 4. Microstructure of the 30ХН3А steel sample outside the zone of laser processing (a), inside the hardened region (b) and in the zone of tempering (c).

Для получения однородной структуры, твердости и глубины упрочняемого слоя сталей, а также других термически упрочняемых сплавов эффективно использовать многоканальный CO<sub>2</sub>-лазер (Patent RF № 2580350). Такой лазер обеспечивает равномерное распределение интегрального тепловложения по ширине полосы упрочнения.

### Литература/References

1. Patent RF № 2580350, 05.11.2014 (in Russian) [Патент РФ № 2580350, 05.11.2014].
2. V.I. Yugov. Fotonika (2012). 4, P. 12–20. (in Russian) [В.И. Югов Фотоника. (2012). 4, С. 12–20.]
3. L.E. Afanasieva, I.A. Barabonova Laser and cryogenic treatment of high speed steel. Tver, TvSTU. (2014). 96 p. (in Russian) [Афанасьева Л. Е., Барабонова И. А. Лазерная и криогенная обработка быстрорежущей стали/. Тверь, ТвГТУ, 2014. 96 с.]
4. Ashby M. F., Easterling K. E. //Acta Metallurgica. (1984). V. 32 (11). P. 1935–1948.
5. Na S. J., Yang Y. S. //Surface and Coatings Technology. (1988). V. 34 (3)/. P. 319–330.
6. Qingbin L., Hong L. //Journal of materials processing technology. (1999). V. 88 (1). P. 77–82.
7. Komanduri R., Hou Z. B. //Int. J. of Machine Tools and Manufacture. (2004). V. 44 (9). P. 991–1008.
8. Arzamasov B. N., Makarova V. I., Mukhin G. G., et al. Materials Science: textbook/Moscow, Bauman MGTU. (2005). 646 pp. (in Russian) [Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин и др. Материаловедение: учебник для вузов/М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 646 с.]