

## ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 40X13 ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ

*А. И. Веремейчик, к. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: vai\_mrtm@bstu.by*

*М. В. Нерода, к. т. н., доцент, проректор по учебной работе, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: nerodaMV@mail.ru*

*Б. Г. Холодарь, к. т. н., доцент, старший научный сотрудник НИЧ, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: hbg@list.ru*

*М. В. Хеук, м. т. н., ассистент кафедры теоретической и прикладной механики, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: kheuk@mail.ru*

### Реферат

Проведено исследование на изгиб образцов прямоугольного сечения из коррозионностойкой стали 40X13 после лазерной закалки и лазерного легирования. Установлено, что наличие зоны лазерного воздействия приводит к повышению области упругой работы образцов в пределах 20-30 процентов в соответствии с реализованным режимом обработки материала и еще более значительному увеличению уровня воспринимаемой максимальной нагрузки.

**Ключевые слова:** лазерная закалка, лазерное легирование, изгиб, испытания, режимы обработки, большие деформации.

## BENDING TESTS OF 40X13 STEEL SAMPLES AFTER LASER QUENCHING AND ALLOYING

A. I. Verameichyk, M. V. Neroda, B. G. Kholodar, M. V. Kheuk

### Abstract

A study was conducted on the bending of rectangular cross-section samples made of corrosion-resistant 40X13 steel after laser quenching and laser alloying. It has been established that the presence of a laser exposure zone leads to an increase in the area of elastic operation of the samples in the range of 20-30 percent in accordance with the implemented material processing mode and an even more significant increase in the level of perceived maximum load.

**Keywords:** laser hardening, laser alloying, bending, testing, processing modes, large deformations.

### Введение

Лазерные технологии поверхностной обработки (закалка, легирование, наплавка и др.) в ряде случаев заменяют традиционные методы термической обработки. Это обусловлено преимуществами сфокусированного лазерного излучения: бесконтактностью и локальностью теплового воздействия, минимальной зоной термического влияния, высокими скоростями нагрева и охлаждения, снижением уровня остаточных напряжений, сведением к минимуму коробления,

повышением дисперсности структуры [1]. Лазерная закалка может рассматриваться как альтернатива поверхностному упрочнению цементацией и последующей объемной закалке, а также ионно-плазменному азотированию.

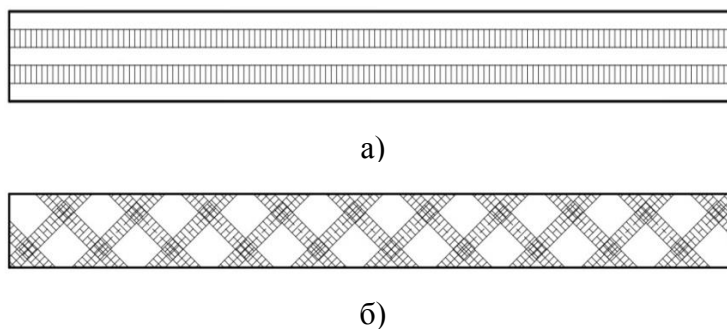
Актуальность проблем, связанных с влиянием режимов лазерной обработки на структуру и свойства различных материалов, подтверждается многочисленными публикациями отечественных и зарубежных ученых [2–11]. Статья посвящена описанию поведения образцов из стали 40X13 после лазерной закалки и легирования при испытаниях на изгиб.

**Методика проведения исследований.** В течение I и II кварталов 2024 года была проведена работа по проведению и анализу испытаний образцов из коррозионностойкой стали 40X13. Предварительно образцы были подвергнуты обработке высокоэнергетической струей лазера (рисунок 1) в лаборатории плазменных и лазерных технологий БНТУ, в процессе которой производилась их закалка или легирование бором на различных скоростных режимах. В лабораториях БрГТУ контрольная часть образцов была испытана на растяжение и изгиб. Испытаниям на растяжение и изгиб были подвергнуты также аналогичные образцы, не проходившие лазерную обработку.

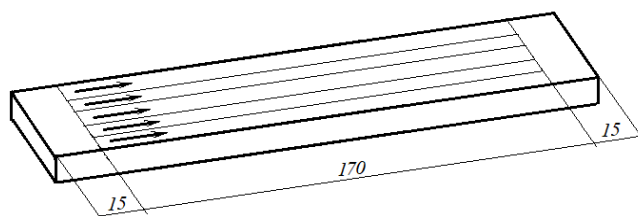


**Рисунок 1 – Волоконный иттербиевый лазер непрерывного действия ЛК-1000 фирмы IPG (тип YLR-1)**

Все образцы – плоские, длиной 200 мм, шириной 20 и 25 мм, толщиной 7 и 4 мм. Лазерное воздействие осуществлялось вдоль дорожек шириной 4 мм с одной или с двух сторон образца, число дорожек варьировалось. Дорожки в виде сетки наносились с двух сторон образцов вначале в одном направлении под углом 45 градусов к оси образца, а затем крестообразно в противоположном. Между дорожками образовались необработанные квадратные окна со стороной 10 мм. Схема и порядок нанесения дорожек приведены на рисунках 2, 3.



**а) дорожки вдоль образца; б) сетка**  
**Рисунок 2 – Схемы нанесения дорожек**



**Рисунок 3 – Схема движения лазерного пятна сканирования по поверхности образца**

В таблице 1 представлена программа испытаний образцов.

**Таблица 1 – Виды и режимы обработки образцов из стали 40Х13**

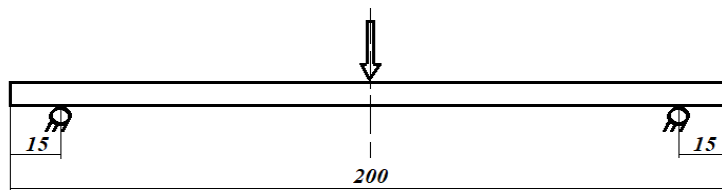
Серия	Вид обработки	Обработка, количество дорожек	Количество образцов, шт	Размер образца, мм
НО	Без обработки	-	3	7×20×200
7	Закалка	С одной стороны, 2 дорожки	3	
НОТ	Без обработки	-	3	4×25×200
8	Борирование	С двух сторон, 6 дорожек	3	
9		С двух сторон, 3 дорожки	3	
10		С двух сторон, сетка	3	
11	Закалка	С двух сторон, 6 дорожек	3	
12		С двух сторон, 3 дорожки	3	
13		С двух сторон, сетка	3	
14		С одной стороны, 3 дорожки	3	



**Рисунок 4 – Поверхность образцов 11.3, 13.1 (закалка) и 8.1, 10.3 (борирование) после лазерной обработки**

После обработки образцы имели начальную погибь до 0,5 мм.

На рисунках 5, 6 приведена схема испытаний и фотография установки образца на испытательной машине Kason WDW-50 (Китай).

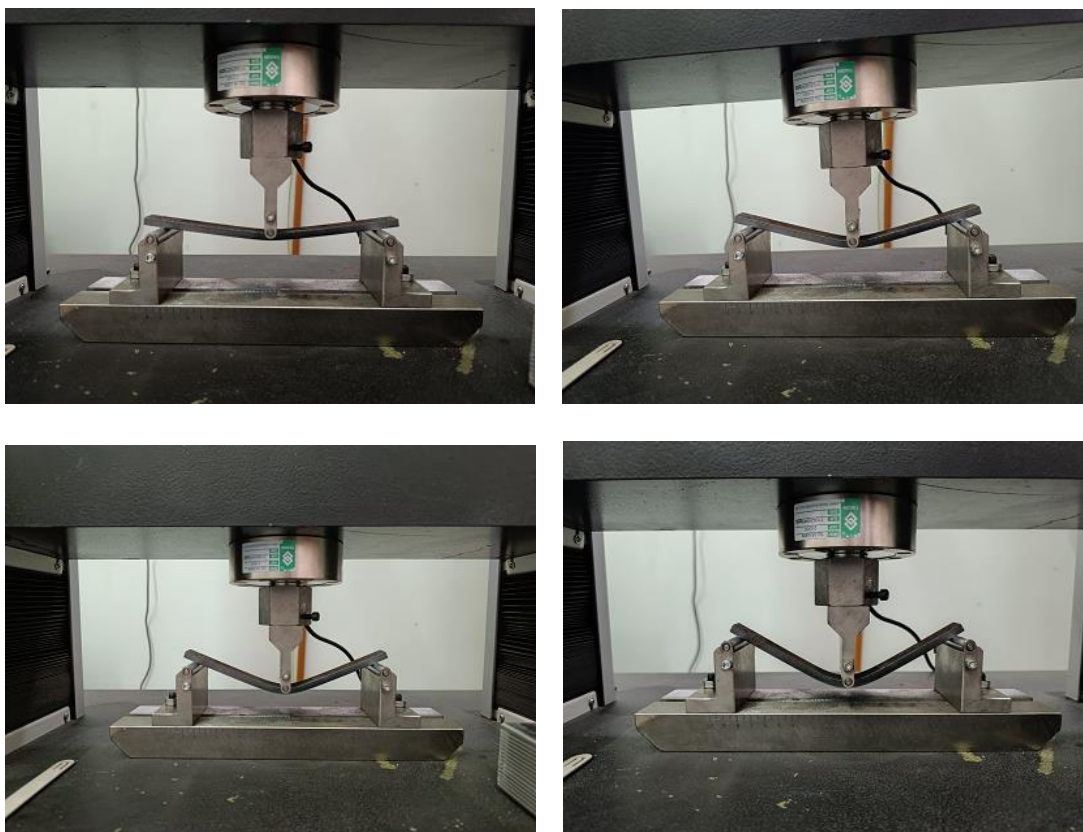


*Рисунок 5 – Схема испытаний*



*Рисунок 6 – Установка образца на испытательной машине Kason WDW-50*

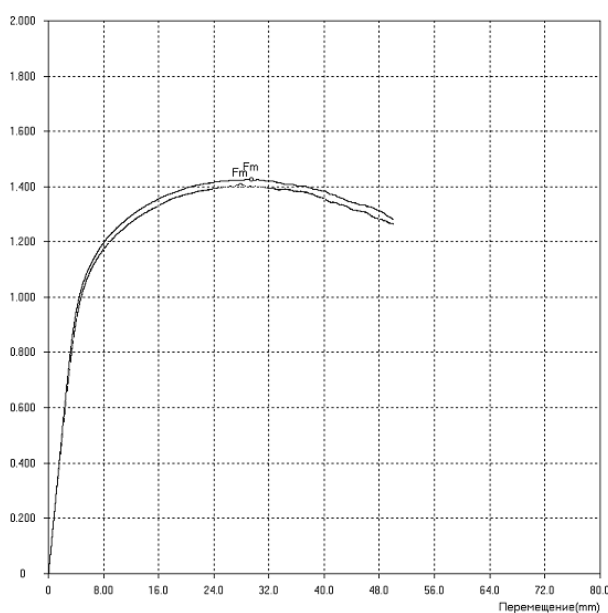
На рисунке 7 показано деформирование образца в процессе нагружения.



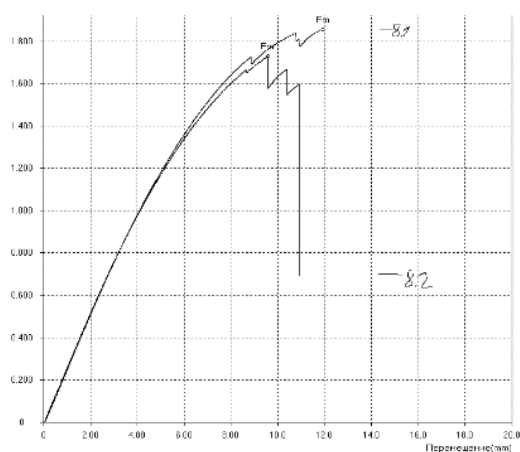
*Рисунок 7 – Деформирование образца в процессе нагружения*

По принятой методике проведены испытания обработанных и необработанных образцов. Диаграммы нагружения образцов толщиной 4 мм приведены на рисунках 8, 9.

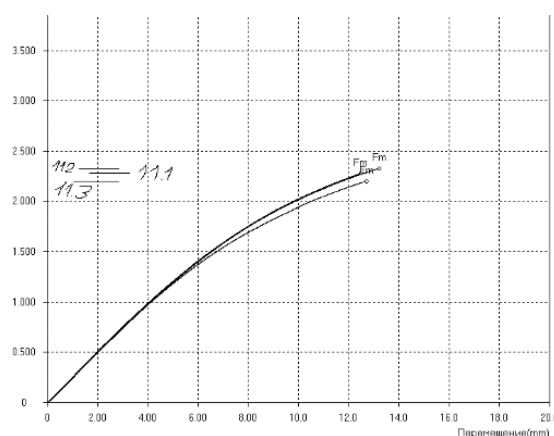




**Рисунок 8 – Диаграммы нагружения при изгибе необработанных образцов толщиной 4 мм**



**Серия 8 (борирование)**



**Серия 11 (закалка)**

**Рисунок 9 – Диаграммы нагружения при изгибе обработанных образцов толщиной 4 мм**

Все образцы разрушились по сечению, перпендикулярному оси образца. На легированных образцах трещины практически прямолинейные, на закаленных имеет место ступенчатость траектории, вызванная ее поворотом в местах переходов к необработанным участкам окон. На поверхности разрушения структура материала однородна, некоторый ручьистый узор наблюдается только у легированных образцов в зоне сжатия, губки сдвига отсутствуют.

#### Список цитированных источников

1. Ярьско, С. И. Анализ стойкости и изнашивания твердосплавного инструмента после лазерной термообработки / С. И. Ярьско // Известия Самарского науч. центра Российской акад. наук. – 2001. Т. 3, № 1. – С. 27–37.
2. Бирюков, В. П. Определение параметров зон лазерной закалки сталей и их трибологических характеристик / В. П. Бирюков [и др.] // Фотоника. 2019. – № 13(3). – С. 242–250.
3. Девойно, О. Г. Обеспечение ресурсных параметров ответственных элементов механических трансмиссий с использованием поверхностных слоев, формируемых лазерными технологиями / О. Г. Девойно, И. В. Швец // Теоретическая и прикладная механика : междунар. науч.-техн. сб. / Белорусский нац. техн. ун-т ; редкол.: А. В. Чигарев (пред. редкол.). – Минск : БНТУ, 2019. – Вып. 34. – С. 266–270.

4. Aborkin, A. V. Effect of Laser Hardening on Die Steel Microhardness and Surface Quality / A. V. Aborkin, V. E. Vaganov, A. N. Shlegel, I. M. Bukarev. // *Metallurgist*. – 2015. – Vol. 59, Is. 7–8. – P. 619–625.
5. Zhang, L. Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness, wear resistance and softening of a low carbon steel / L. Zhang, H. Yan, P. Q. Hu [at al.] // *Lasers in Engineering*. – 2014. – Vol. 28. – P. 135–149.
6. Šebek, M. The Effects of Laser Surface Hardening on Microstructural Characteristics and Wear Resistance of AISI H11 Hot Work Tool Steel / M. Šebek, L. Falat, F. Kováč [at al.] // *Archives of Metallurgy & Materials*. – 2017. – Vol. 62. – P.757–762.
7. A. Nath and S. Sarkar, Laser Transformation Hardening of Steel, in *Advances in Laser Materials Processing (Second Edition)*, pp. 257–298, 2018.
8. Мищирук, О. М. Влияние режимов лазерной закалки на свойства стали 40X13 / О. М. Мищирук [и др.] // *Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 103–112.
9. Kapustynskiy, O. Laser Treatment for Strengthening of Thin Sheet Steel / O. Kapustynskiy, N. Višniakov // *Materials Science and Engineering*. – 2020, Art. ID 5963012. – 13 p.
10. Mishchiruk, O. M. Research into the influence of laser scanning speed on the characteristics of 10G2 steel / O. M. Mishchiruk, A. I. Verameichyk, M. V. Neroda, B. G. Holodar // *Vestnik of Brest State Technical University*. 2022. – № 3 (132). – P. 69–74.
11. Višniakov, N. Laser welding of copper-niobium microcomposite wires for pulsed power applications / N. Višniakov, G. Mikalauskas, O. Černaš`ejus, J. Š`kamat // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. – 2019. – Vol. 50, № 5. – P. 646–662.
12. Kapustynskiy, O. Optimization of the parameters of local laser treatment for the creation of reinforcing ribs in thin metal sheets / O. Kapustynskiy, N. Višniakov, O. Černaš`ejus [at al.] : *Proceedings of 24th International Conference «Mechanika-2019»*, May 2019, Kaunas, Lithuania.

## References

1. Ярецько, С. И. Анализ стойкости и изнашивания твердосплавного инструмента после лазерной термообработки / С. И. Ярецько // *Известия Самарского науч. центра Российской акад. наук*. – 2001. Т. 3, № 1. – С. 27–37.
2. Бирюков, В. П. Определение параметров зон лазерной закалки сталей и их трибологических характеристик / В. П. Бирюков [и др.] // *Фотоника*. 2019. – № 13(3). – С. 242–250.
3. Девойно, О. Г. Обеспечение ресурсных параметров ответственных элементов механических трансмиссий с использованием поверхностных слоев, формируемых лазерными технологиями / О. Г. Девойно, И. В. Швец // *Теоретическая и прикладная механика : междунар. науч.-техн. сб. / Белорусский нац. техн. ун-т ; редкол.: А. В. Чигарев (пред. редкол.)*. – Минск : БНТУ, 2019. – Вып. 34. – С. 266–270.
4. Aborkin, A. V. Effect of Laser Hardening on Die Steel Microhardness and Surface Quality / A. V. Aborkin, V. E. Vaganov, A. N. Shlegel, I. M. Bukarev. // *Metallurgist*. – 2015. – Vol. 59, Is. 7–8. – P. 619–625.
5. Zhang, L. Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness, wear resistance and softening of a low carbon steel / L. Zhang, H. Yan, P. Q. Hu [at al.] // *Lasers in Engineering*. – 2014. – Vol. 28. – P. 135–149.
6. Šebek, M. The Effects of Laser Surface Hardening on Microstructural Characteristics and Wear Resistance of AISI H11 Hot Work Tool Steel / M. Šebek, L. Falat, F. Kováč [at al.] // *Archives of Metallurgy & Materials*. – 2017. – Vol. 62. – P.757–762.
7. A. Nath and S. Sarkar, Laser Transformation Hardening of Steel, in *Advances in Laser Materials Processing (Second Edition)*, pp. 257–298, 2018.
8. Мищирук, О. М. Влияние режимов лазерной закалки на свойства стали 40X13 / О. М. Мищирук [и др.] // *Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 103–112.
9. Kapustynskiy, O. Laser Treatment for Strengthening of Thin Sheet Steel / O. Kapustynskiy, N. Višniakov // *Materials Science and Engineering*. – 2020, Art. ID 5963012. – 13 p.
10. Mishchiruk, O. M. Research into the influence of laser scanning speed on the characteristics of 10G2 steel / O. M. Mishchiruk, A. I. Verameichyk, M. V. Neroda, B. G. Holodar // *Vestnik of Brest State Technical University*. 2022. – № 3 (132). – P. 69–74.

11. Vis̆niakov, N. Laser welding of copper-niobium microcomposite wires for pulsed power applications / N. Vis̆niakov, G. Mikalauskas, O. Černašėjus, J. Škamat // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2019. – Vol. 50, № 5. – P. 646–662.

12. Kapustynskiy, O. Optimization of the parameters of local laser treatment for the creation of reinforcing ribs in thin metal sheets / O. Kapustynskiy, N. Vĭsniakov, O. Černašėjus [at al.] : Proceedings of 24th International Conference «Mechanika-2019», May 2019, Kaunas, Lithuania.

УДК 624.042.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ

*А. И. Веремейчик, к. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: vai\_mrtm@bstu.by*

*Б. Г. Холодарь, к. т. н., доцент, старший научный сотрудник НИЧ, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: hbg@list.ru*

### Реферат

Исследована кинематика движения пятна нагрева при сканирующей лазерной закалке, теоретически определены размеры зон «пятно-промежуток» для различных скоростей движения лазерной головки. Для решения задачи теплопроводности используется метод мгновенно приложенного точечного источника (функций Грина) при соответствующем интегрировании воздействия по площади пятна нагрева. Разработан алгоритм и компьютерная программа расчета температурного поля, тепловых импульсов при сканирующей лазерной закалке сталей.

**Ключевые слова:** сканирующая закалка, температурное поле, лазер, пятно, луч.

## SIMULATION OF THE TEMPERATURE FIELD DURING SCANNING LASER QUENCHING

### Abstract

The kinematics of the heating spot movement during scanning laser hardening is investigated, the sizes of the "spot-gap" zones are theoretically determined for different speeds of the laser head movement. The method of an instantly applied point source (Green's functions) is used to solve the problem of heat conductivity with the corresponding integration of the effect over the area of the heating spot. An algorithm and a computer program for calculating the temperature field, thermal pulses during scanning laser hardening of steels are developed.

**Keywords:** scanning hardening, temperature field, laser, spot, beam.

### Введение

Воздействие движущегося теплового потока высокой интенсивности используется для модификации свойств материала в приповерхностной зоне. Задачей воздействия является целенаправленное изменение фазового состава