



МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 004.94:620.172

А.И. ВЕРЕМЕЙЧИК, канд. физ.-мат. наук, доц.
заведующий кафедрой прикладной механики¹
E-mail: vai_mrtm@bstu.by

М.В. НЕРОДА, канд. техн. наук, доц.
проректор по учебной работе¹
E-mail: nerodamv@mail.ru

Б.Г. ХОЛОДАРЬ, канд. техн. наук, доц.
старший научный сотрудник научно-исследовательской части¹
E-mail: hbg@list.ru

М.В. ХЕУК, магистр техн. наук
преподаватель-стажер кафедры прикладной механики¹
E-mail: kheuk@mail.ru

¹Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 24.05.2024.

ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 10Г2 ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ

Проведено исследование на изгиб образцов прямоугольного сечения из конструкционной стали 10Г2 после лазерной закалки и лазерного легирования. Установлено, что наличие зоны лазерного воздействия приводит к повышению области упругой работы образцов в пределах 20–30 % в соответствии с реализованным режимом обработки материала и еще более значительному увеличению уровня воспринимаемой максимальной нагрузки.

Ключевые слова: лазерная закалка, лазерное легирование, режимы обработки, механические характеристики, испытания на изгиб, большие деформации

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-71-77>

Введение. Лазерные технологии поверхностной обработки (закалка, легирование) 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 в качестве альтернативы 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 [2–16]. Следует отметить, что в основном исследования заключаются в определении влияния используемого воздействия на поверхностную твердость и износостойкость материала, а сопутствующим вопросам, касающимся изменения его механических характеристик прочности и пластичности, уделено недостаточное

внимание. Эти моменты в определенной степени освещены, например, в статье [7], где представлены результаты испытаний пластин из тонколистовой стали С22Е на прочность и способность сопротивляться изгибным нагрузкам, а также приведены результаты компьютерного моделирования такой задачи. Установлено, что локальная лазерная обработка поверхности может быть использована для повышения прочности и жесткости элементов конструкций из указанного материала. В статье [8] проведено исследование зависимости характеристик прочности и пластичности образцов из конструкционной стали 10Г2 от режимов лазерной закалки и лазерного легирования путем испытаний образцов на растяжение. Установлено, что разрушение обработанных образцов во всех случаях имело вязкий характер с удовлетворительным уровнем разрушающих деформаций при напряжениях выше предела текучести исходного материала.

Настоящая статья является продолжением работы [8] и посвящена описанию поведения образцов из стали 10Г2 после лазерной закалки и легирования при испытаниях на изгиб.

Методика проведения испытаний. Образцы из конструкционной стали 10Г2 толщиной 6 мм, шириной 20 мм и длиной 200 мм подвергались лазерной поверхностной обработке излучением волоконного иттербиевого лазера мощностью 1 кВт с объективом для фокусировки лазерного излучения, системой перемещения и сканирующей лазерный луч головкой [3, 6] при различных режимах закалки и легирования. Для каждого режима использовалось по три образца. На противоположных плоскостях образца наносилось поочередно по 5 дорожек шириной 4 мм и длиной 170 мм. Прохождение каждой дорожки производилось от одного заранее отмеченного торца образца (рисунк 1). Размер лазерного пятна равен 0,35 мм. Расстояние от поверхности образца до последнего дефлектора составило 450 мм. При лазерном легировании на образцы предварительно наносилась смесь бора аморфного с ацетоном и клеем БФ-4.

Испытаниям на изгиб были подвергнуты 15 образцов, обработка которых проводилась в соответствии с режимами, приведенными в таблице 1.

Высокие градиенты термического воздействия в зоне обработки вызывают большую не-

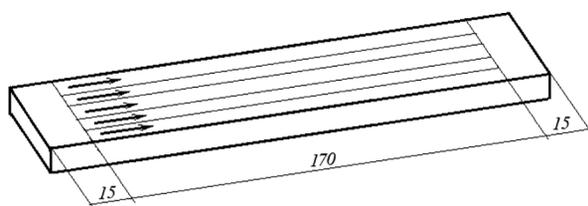


Рисунок 1 — Схема движения лазерного пятна сканирования по поверхности образца
Figure 1 — Movement diagram of the laser scanning spot on the specimen surface

Таблица 1 — Вид и режимы обработки
Table 1 — Type and modes of treatment

Серия	№ образца	Вид обработки	Скорость движения лазерной головки V , мм/мин
I	1.1, 1.2, 1.3	Необработанный	
II	2.1, 2.2, 2.3	Лазерная закалка (2а, 2б, 2в)	500
III	3.1, 3.2, 3.3	Лазерная закалка (3а, 3б, 3в)	700
V	5.1, 5.2, 5.3	Лазерное легирование (5а, 5б, 5в)	500
VI	6.1, 6.2, 6.3	Лазерное легирование (6а, 6б, 6в)	700

однородность процессов структурных превращений в термически активированном объеме и, как следствие, развитие дефектности структуры, что приводит к охрупчиванию материала и падению его деформативных свойств. В данном случае это подтверждено предварительными испытаниями на растяжение трех образцов каждой серии на испытательной машине Meitesi WDW-300 (Китай) для построения диаграмм деформирования материала обработанных и необработанных образцов. Результаты этих испытаний приведены в [8] и показывают высокую степень повторяемости диаграмм, некоторое увеличение временного сопротивления материала после лазерной обработки (на 10–14 %) и сокращение соответствующих ему значений относительного удлинения (на 25–40 %). С этой же целью произведены также визуальные наблюдения структуры поверхности материала необработанных, закаленных и легированных образцов с помощью металлографического микроскопа «Альтами МЕТ ЗС». На закаленных образцах обнаружено наличие поверхностных микротрещин в зоне дорожки, ориентированных преимущественно поперек продольной оси образцов. Их появление вызвано растрескиванием поверхностного слоя образца из-за возникших усачных напряжений материала.

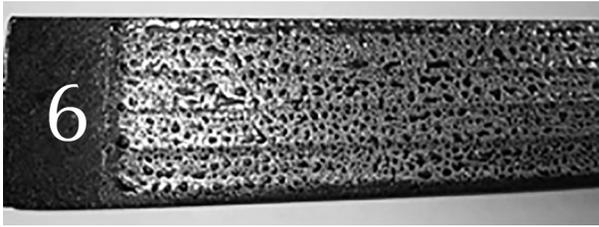
Поверхности образцов после лазерной закалки и лазерного легирования показаны на рисунке 2.

После обработки все образцы приобрели некоторую начальную погибь (порядка 0,5 мм) в связи с возникновением остаточных напряжений после теплового воздействия и охлаждения образцов.

При проведении испытаний на изгиб образцы устанавливались горизонтально плоской стороной симметрично на две неподвижные опоры с вращающейся цилиндрической обоймой диаметром 5 мм, расположенные на расстоянии 170 мм друг от друга, и среднему поперечному сечению образцов придавалось вертикальное перемещение с постоянной скоростью $V = 1$ мм/мин. Исследова-



a



b

Рисунок 2 — Поверхность образцов после лазерной обработки:
a — лазерная закалка; b — лазерное легирование
Figure 2 — Surface of specimens after laser treatment:
a — laser hardening; b — laser alloying

ния проведены на испытательной машине Kason WDW-50 (Китай) (рисунок 3).

На рисунке 4 показано деформирование образца для нескольких последовательных моментов времени. На рисунке 5 приведены фотографии образцов после разгрузки.

При проведении испытаний один из образцов из каждой серии устанавливался погибью в противоположную сторону двум остальным. В процессе нагружения фиксировались перемещение точки контакта образца с нагружающим штоком (до 43–53 мм) и соответствующее ему усилие. Кроме того, непосредственно на испытательном стенде определялось перемещение центрального сечения образца после разгрузки, а также остаточный прогиб образца после выгрузки из установки. Ни один из образцов в испытаниях не разрушился, видимых трещин в их телах также не обнаружено. В связи с реализацией в процессе испытаний свободного опирания образцов имело место проскальзывание их концевых участков на опорах (до 12–13 мм с каждой стороны) и заметное истирание рельефа поверхности за счет действия сил трения скольжения.

Результаты испытаний и их обсуждение.

На рисунке 6 в координатах «сила — перемещение» показаны совмещенные диаграммы нагружения образцов по сериям I–VI.

Максимальные усилия при нагружении и соответствующие им значения перемещений в об-

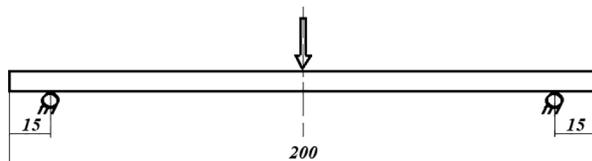
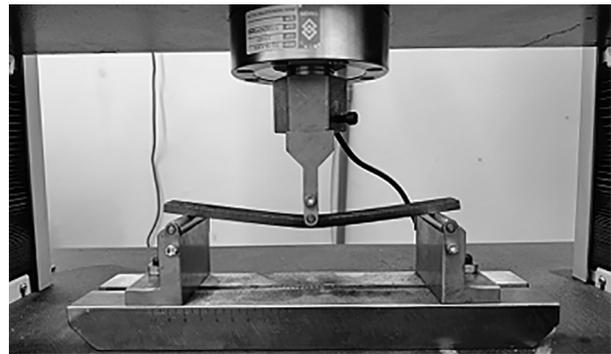
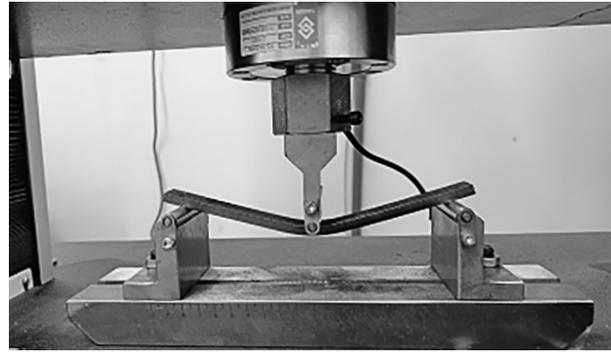


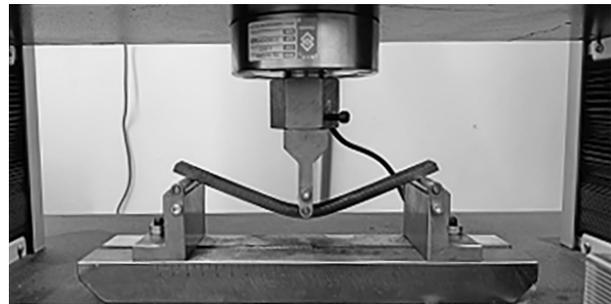
Рисунок 3 — Схема испытаний на изгиб
Figure 3 — Bending test diagram



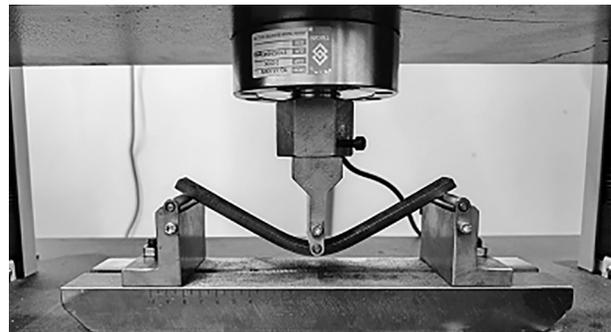
a



b



c



d

Рисунок 4 — Деформирование образца 5.2 в процессе нагружения
Figure 4 — Deformation of specimen 5.2 in the process of loading

разцах, а также значения остаточных прогибов и углов поворота поперечных сечений на опорах приведены в таблице 2.

Различия в результатах измерений положения штока перед и после разгрузки объясняются наличием проскальзывания образца на опорах и влиянием упругих деформаций в процессе восстановления формы образцов. В крайней правой колонке

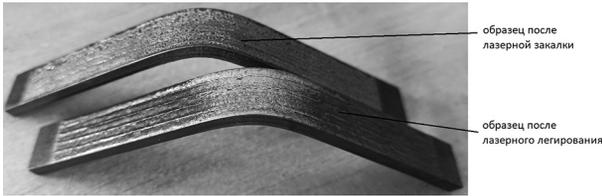


Рисунок 5 — Образцы после испытаний
Figure 5 — Specimens after testing

таблицы 2 указан максимальный остаточный прогиб срединной линии продольного сечения образца на участке, соответствующем концу нагружения (длина участка ~19,5 мм), и угол ее отклонения от начального положения. Длина поверхностных

растянутых слоев образцов составляет примерно 203 мм, сжатых — 196 мм независимо от вида лазерной обработки, что указывает на сжатие осевой линии образцов на ~0,5 мм, связанное с наклоном опорных реакций к оси нагружения. Наибольшие нагрузки имеют место при приблизительно одинаковых прогибах образцов независимо от режимов их обработки.

На рисунке 7 показано графическое представление зависимости максимального усилия от перемещения сечения образца, из которого видно, что наибольшие усилия возникают у образцов после лазерного легирования, наименьшие — у необработанных образцов.

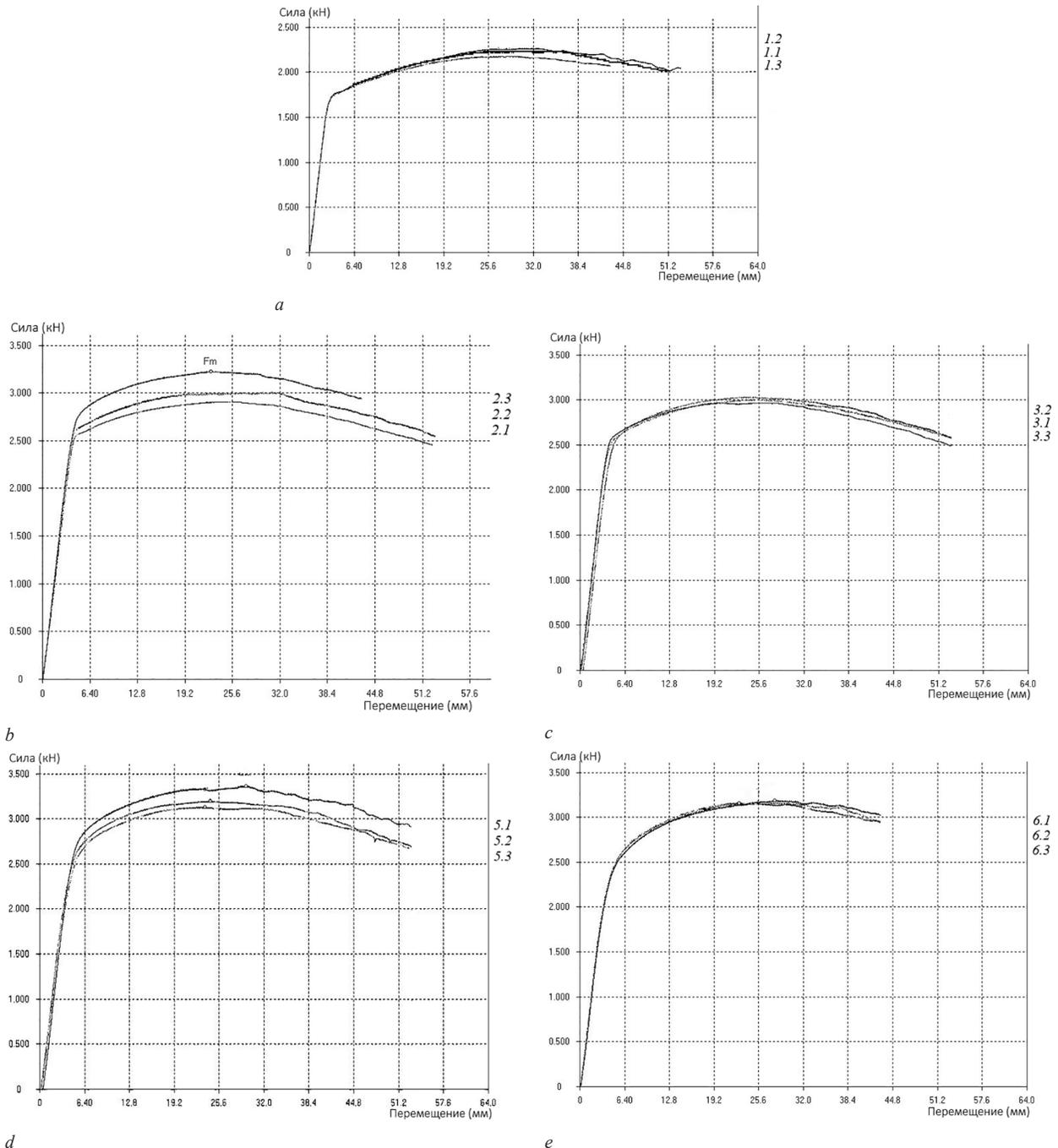


Рисунок 6 — Диаграммы нагружения при изгибе по сериям I-VI
Figure 6 — Bending loading diagrams for series I-VI

Таблица 2 — Результаты испытаний
Table 2 — Test results

Серия	№ образца	Максимальное усилие на штоке при изгибе, Н	Перемещение штока при максимальной силе, мм	Перемещение штока перед и после разгрузки, мм	Остаточный прогиб, мм, и угол на опоре, град
I	1.1	2220	30,50	51,00 / 44,25	46 / 32
	1.2	2264	32,00	53,00 / 46,67	49 / 34
	1.3	2181	28,00	43,00 / 37,65	41 / 28
II	2.1н	2908	26,00	52,50 / 45,20	47 / 31
	2.2в	3009	31,00	53,00 / 44,99	47 / 31
	2.3	3227	23,50	43,00 / 36,03	39 / 26
III	3.1в	3005	23,50	53,00 / 45,23	47 / 31
	3.2в	3033	23,50	53,00 / 45,17	47 / 31
	3.3н	2967	26,50	53,00 / 45,38	47 / 32
V	5.1в	3361	29,50	53,00 / 44,81	46 / 30
	5.2н	3198	23,50	53,00 / 44,53	46 / 30
	5.3н	3131	23,00	53,00 / —	45 / 29
VI	6.1в	3188	28,00	43,00 / 36,09	39 / 25
	6.2н	3171	25,50	43,00 / 35,91	40 / 26
	6.3н	3164	25,50	43,00 / 36,08	39 / 26

Примечание: Буквы «н» и «в» после номера образца указывают на его установку перед нагружением выпуклостью вниз или вверх соответственно.

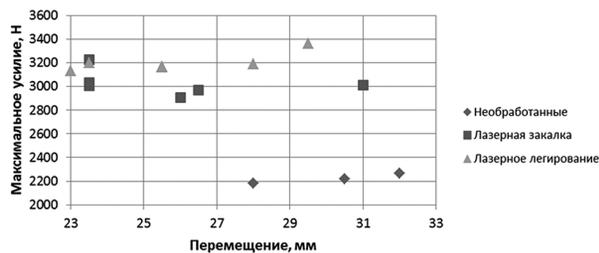


Рисунок 7 — Зависимость максимального усилия на нагружающем штоке от его перемещения
Figure 7 — Dependence of the maximum force on the loading rod on its displacement

Заключение. Проведены испытания на изгиб образцов прямоугольной формы из стали 10Г2 после лазерной закалки и лазерного легирования. Результаты исследований показывают, что при изгибной деформации образцов имеют место те же тенденции, что и при их одноосном деформировании растяжением [8], а именно — наличие лазерного воздействия приводит к повышению зоны упругой работы образцов в пределах 20–30 % в соответствии с реализованным режимом обработки материала (при скорости лазерной головки $V = 500$ мм/мин результаты выше, чем при $V = 700$ мм/мин) и еще более значительному увеличению уровня воспринимаемой максимальной нагрузки (у легированных образцов выше, чем у закаленных). Исходная погиб образцов, полученная после термообработки, при испытаниях показала влияние в пределах менее 3–8 % от максимального уровня нагрузки, реализующейся в своей серии (более высокая нагрузка имеет место при установке образца выпуклостью вверх).

Данные проведенных испытаний могут быть использованы для уточнения расчетных моделей при определении напряженно-деформированного

состояния стержней в случаях больших перемещений за пределом упругости.

Работа выполнена в рамках задания 3.2.8 НИР № 1 «Исследование механических свойств элементов деталей машин после лазерно-плазменной обработки» подпрограммы «Электромагнитные, пучково-плазменные и литейно-деформационные технологии обработки и создания материалов» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии».

Список литературы:

1. Ярьсько, С.И. Анализ стойкости и изнашивания твердосплавного инструмента после лазерной термообработки / С.И. Ярьсько // Известия Самарского науч. центра Российской акад. наук. — 2001. — Т. 3, № 1. — С. 27–37.
2. Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness, wear resistance and softening of a low carbon steel / P.-L. Zhang [et al.] // Lasers in Engineering. — 2014. — Vol. 28, iss. 3–4. — Pp. 135–149.
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 [Электронный ресурс]: междунар. науч.-техн. сб. / Белорусский нац. техн. ун-т; редкол.: А.В. Чигарев (пред. редкол.). — Минск: БНТУ, 2019. — Вып. 34. — С. 266–270. — Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/52290>.
4. Effect of laser hardening on die steel microhardness and surface quality / A.V. Aborkin [et al.] // Metallurgist. — 2015. — Vol. 59, iss. 7–8. — Pp. 619–625. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-015-0148-8>.
5. Влияние лазерной закалки на микроструктуру и абразивную износостойкость стали 30ХГСА / Л.Е. Афанасьева [и др.] // Металлы. — 2020. — № 1. — С. 54–59.
6. Влияние режимов лазерной закалки на свойства стали 40X13 / О.М. Миширук [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2023. — Т. 68, № 2. — С. 103–112. — DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112>.
7. Kapustynskiy, O. Laser treatment for strengthening of thin sheet steel / O. Kapustynskiy, N. Višniakov // Advances in

- Materials Science and Engineering. — 2020. — DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/5963012>.
8. Research into the influence of laser scanning speed on the characteristics of 10G2 steel / О.М. Миширук [и др.] // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. — 2023. — № 3(132). — С. 69–74. — DOI: <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-132-3-69-74>.
 9. Определение параметров зон лазерной закалки сталей и их трибологических характеристик / В.П. Бирюков [и др.] // ФОТОНИКА. — 2019. — Т. 13, № 3. — С. 242–250. — DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.3.242.250>.
 10. The Effects of laser surface hardening on microstructural characteristics and wear resistance of AISI H11 hot work tool steel / M. Šebek [et al.] // Archives of Metallurgy & Materials. — 2017. — Vol. 62, iss. 3. — Pp. 1721–1726. — DOI: <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0262>.
 11. Валиуллин, А.Х. Предельный упругопластический изгиб балки / А.Х. Валиуллин // Вестн. Казанского технологич. ун-та. — 2012. — Т. 15, № 2. — С. 70–75.
 12. Nath, A. Laser Transformation hardening of steel / A. Nath, S. Sarkar // Advances in Laser Materials Processing / ed. by J. Lawrence. — 2nd ed. — Cambridge, 2018. — Pp. 257–298. — DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101252-9.00011-X>.
 13. Enhanced performance of nano-sized SiC reinforced Al metal matrix nanocomposites synthesized through microwave sintering and hot extrusion techniques / P.R. Matli [et al.] // Progress in natural science: materials international. — 2017. — Vol. 27, iss. 5. — Pp. 606–614. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2017.08.015>.
 14. Optimization of the parameters of local laser treatment for the creation of reinforcing ribs in thin metal sheets / O. Kapustynskyi [et al.] // Mechanika 2019: proc. of the 24th international scientific conference, Kaunas, 17 May 2019. — Pp. 71–75.
 15. FEA geometry element types [Electronic resource] // FEA-CAE-Engineering.com. — Mode of access: http://fea-cae-engineering.com/fea-cae-engineering/element_types.htm.
 16. Laser welding of copper-niobium microcomposite wires for pulsed power applications / N. Višniakov [et al.] // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. — 2019. — Vol. 50, iss. 5. — Pp. 646–662. — DOI: <https://doi.org/10.1002/mawe.201800175>.

VERAMEICHYK Andrey I., Ph. D. in Phys. and Math., Assoc. Prof.

Head of the Department of Applied Mechanics¹

E-mail: vai_mrtm@bstu.by

NERODA Mikhail V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Vice Rector for Academic Affairs¹

E-mail: nerodamv@mail.ru

KHOLODAR Boris G., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Senior Researcher of the Research Part¹

E-mail: hbg@list.ru

KHEUK Maksim V., M. Sc. in Eng.

Trainee Lecturer of the Department of Applied Mechanics¹

E-mail: kheuk@mail.ru

¹Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus

Received 24 May 2024.

BENDING TESTS OF SPECIMENS MADE OF STEEL 10Г2 (10G2) AFTER LASER HARDENING AND ALLOYING

A bending study was carried out on samples of rectangular cross-section made of structural steel 10Г2 (10G2) after laser hardening and laser alloying. It has been established that the presence of a laser impact zone leads to an increase in the elastic work area of the samples within 20–30 % 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, processing modes, mechanical characteristics, bending tests, large deformations

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-71-77>

References

1. Yaresko S.I. Analiz stoykosti i iznashivaniya tverdosplavnogo instrumenta posle lazernoy termooabrotki [Wear and wear resistance analysis of hard alloy tools after laser treatment]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2001, vol. 3, no. 1, pp. 27–37 (in Russ.).
2. Zhang P-L., Yan H., Xu P-Q., Yu Z-S., Li C-G., Lu Q-H. Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness, wear resistance and softening of a low carbon steel. *Lasers in engineering*, 2014, vol. 28, iss. 3–4, pp. 135–149.
3. Devoyno O.G., Shvec I.V. Obespechenie resursnykh parametrov otvetstvennykh elementov mekhanicheskikh transmissiy s ispolzovaniem poverkhnostnykh sloev, formiruemykh lazernymi tekhnologiyami [Ensuring resource parameters of critical

- elements of mechanical transmissions using surface layers formed by laser technologies]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika*, 2019, iss. 34, pp. 266–270. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/52290> (in Russ.).
4. Aborkin A.V., Vaganov V.E., Shlegel' A.N., Bukarev I.M. Effect of laser hardening on die steel microhardness and surface quality. *Metallurgist*, 2015, vol. 59, iss. 7–8, pp. 619–625. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-015-0148-8>.
 5. Afanaseva L.E., Novoselova M.V., Baranova I.A., Ratkevich G.V. Vliyanie lazernoy zakalki na mikrostrukturu i abrazivnyuyu iznosostoykost stali 30KhGSA [Influence of laser hardening on microstructure and abrasive wear resistance of 30KhGSA steel]. *Metally*, 2020, no. 1, pp. 54–59 (in Russ.).
 6. Mishchiruk O.M., Verameichyk A.I., Devoino O.G., Nero-da M.V., Kholodar B.G. Vliyanie rezhimov lazernoy zakalki na svoystva stali 40Kh13 [Influence of laser hardening modes on the properties of 40X13 steel]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 103–112. DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112> (in Russ.).
 7. Kapustynskiy O., Višniakov N. Laser treatment for strengthening of thin sheet steel. *Advances in materials science and engineering*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/5963012>.
 8. Mishchiruk O.M., Verameichyk A.I., Neroda M.V., Kholodar B.G. Research into the influence of laser scanning speed on the characteristics of 10G2 steel. *Vestnik of Brest State Technical University*, 2023, no. 3(132), pp. 69–74. DOI: <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-132-3-69-74> (in Russ.).
 9. Biryukov V.P., Isakov V.V., Fedotov A.Yu., Baulin D.A. Determination of the parameters of the laser hardening of steels and their tribological features. *Photonics Russia*, 2019, vol. 13, no. 3, pp. 242–250. DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.3.242.250>.
 10. Šebek M., Falat L., Kováč F., Petryshynets I., Horňák P., Girman V. The effects of laser surface hardening on microstructural characteristics and wear resistance of AISI H11 hot work tool steel. *Archives of metallurgy & materials*, 2017, vol. 62, iss. 3, pp. 1721–1726. DOI: <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0262>.
 11. Valiullin A.Kh. Predelnyy uprugoplasticheskiy izgib balki [The ultimate elastic-plastic bending of the beam]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, vol. 15, no. 2, pp. 70–75 (in Russ.).
 12. Nath A.K., Sarkar S. Laser transformation hardening of steel. *Advances in laser materials processing*, 2018, ch. 11, pp. 257–298. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101252-9.00011-X>.
 13. Matli P.R., Shakoore R.A., Parande G., Manakari V., Ubaid F., Mohamed A.M.A., Gupta M. Enhanced performance of nano-sized SiC reinforced Al metal matrix nanocomposites synthesized through microwave sintering and hot extrusion techniques. *Progress in natural science: materials international*, 2017, vol. 27, iss. 5, pp. 606–614. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2017.08.015>.
 14. Kapustynskiy O., Višniakov N., Černašėjus O., Golovko L., Chayeuski V. Optimization of the parameters of local laser treatment for the creation of reinforcing ribs in thin metal sheets. *Proc. 24th international conference "MECHANIKA 2019"*. Kaunas, 2019, pp. 71–75.
 15. *FEA geometry element types*. Available at: http://fea-cae-engineering.com/fea-cae-engineering/element_types.htm.
 16. Višniakov N., Mikalauskas G., Černašėjus O., Škamat J. Laser welding of copper-niobium microcomposite wires for pulsed power applications. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2019, vol. 50, iss. 5, pp. 646–662. DOI: <https://doi.org/10.1002/mawe.201800175>.