



# МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.94:620.172

А.И. ВЕРЕМЕЙЧИК, канд. физ.-мат. наук, доц.  
заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики<sup>1</sup>  
E-mail: vai\_mrtm@bstu.by

М.В. НЕРОДА, канд. техн. наук, доц.  
проректор по учебной работе<sup>1</sup>  
E-mail: nerodamv@mail.ru

Б.Г. ХОЛОДАРЬ, канд. техн. наук, доц.  
старший научный сотрудник научно-исследовательской части<sup>1</sup>  
E-mail: hbg@list.ru

М.В. ХЕУК, магистр техн. наук  
ассистент кафедры теоретической и прикладной механики<sup>1</sup>  
E-mail: kheuk@mail.ru

<sup>1</sup>Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 27.01.2025.

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

*Проведено исследование поведения плоских образцов из коррозионностойкой стали 40X13 после лазерной закалки и лазерного легирования при изгибном нагружении. Обработка проводилась с помощью волоконного иттербиевого лазера непрерывного действия ЛК-1000 со сканирующей системой. Дорожки шириной 4 мм наносились вдоль одной или двух сторон образца, число дорожек варьировалось от двух до шести. Испытания проводились на испытательной машине Kason WDW-50. По результатам испытаний установлено, что наличие лазерного воздействия приводит к уменьшению прогиба образца, достигнутого перед разрушением, и увеличению уровня воспринимаемой максимальной нагрузки. Результаты испытаний легированных и закаленных образцов показали снижение пластичности материала после лазерной обработки при одновременном увеличении максимальных воспринимаемых нагрузок, причем более существенное изменение свойств материала получено при лазерной закалке. Разрушение образцов имеет ярко выраженный хрупкий характер путем отрыва от действия продольных нормальных напряжений. Исследования показали, что более высокие уровни воспринимаемой нагрузки достигаются при двусторонней обработке. Конкретные результаты зависят от реализованных режимов обработки материала.*

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

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-2-71-45-54>

**Введение.** Лазерные технологии поверхностной обработки (закалка, легирование, наплавка) 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 нагре-

ва 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 [2–15]. Статья посвящена описанию поведения образцов из коррозионно-стойкой стали 40X13 после лазерной закалки и легирования при испытаниях на изгиб.

**Методика проведения исследований.** Образцы из стали 40X13 были подвергнуты обработке высокоэнергетической струей лазера в лаборатории плазменных и лазерных технологий БНТУ, в процессе которой производилась их закалка или легирование, при котором на образцы предварительно наносилась смесь бора аморфного с ацетоном и клеем БФ-4.

Обработка велась с помощью волоконного иттербиевого лазера непрерывного действия ЛК-1000 фирмы IPG (тип YLR-1). Лазер снабжен сканирующей системой на основе 2D-сканера фирмы «Ситела» (Беларусь), которая обеспечивает перемещение пятна воздействия по обрабатываемой поверхности с помощью системы двух зеркал, совершающих согласованное движение во взаимно перпендикулярных направлениях. В процессе обработки образцов мощность лазера составляла 1000 Вт, частота сканирования — 220 Гц, радиус лазерного пятна — 0,35 мм, скорость его движения вдоль дорожки — 500 мм/мин. После лазерной обработки на образцах могло иметь место остаточное деформирование в виде погиби или коробления.

Все использовавшиеся 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 двух сторон образца, число дорожек варьировалось.

Таблица 1 — Программа лазерной обработки образцов из стали 40X13  
Table 1 — Program of laser processing of specimens made of steel 40Kh13

Серия	Вид обработки	Количество дорожек	Количество образцов, шт	Размер образца, мм
НО	Без обработки	—	3	7×20×200
7	Закалка	По 2 дорожки с одной стороны	3	
НО	Без обработки	—	3	4×25×200
8	Борирование	По 6 дорожек с двух сторон	3	
9		По 3 дорожки с двух сторон	3	
10		Сетка с двух сторон	3	
11	Закалка	По 6 дорожек с двух сторон	3	
12		По 3 дорожки с двух сторон	3	
13		Сетка с двух сторон	3	
14		По 3 дорожки с одной стороны	3	

Программа обработки образцов приведена в таблице 1, а их вид после лазерного воздействия — на рисунке 1.

В лабораториях БрГТУ образцы были подвергнуты испытаниям на растяжение и изгиб. Испытания образцов на растяжение и микротвердость описаны в [13].

На рисунках 2, 3 приведена схема испытаний на изгиб и картина нарастания прогиба образца в процессе его нагружения на испытательной машине Kason WDW-50 (Китай).

В связи с наличием на части образцов исходной погиби их установка на испытательной машине погибью вниз или вверх контролировалась. Размеры образцов, их установка на испытательной машине, скорость перемещения нагрузочного штока удовлетворяют требованиям ГОСТ 14019-2003 (ИСО 7438:1985).

**Результаты испытаний.** Результаты испытаний приведены ниже в графической (диаграммы «сила – перемещение нагрузочного штока») и табличной форме.

Серия 7 (образцы толщиной 7 мм) (рисунок 4, таблица 2). При испытаниях на изгиб образцов

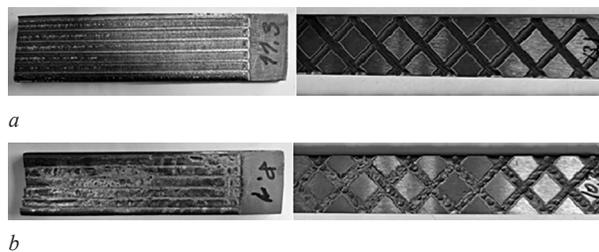


Рисунок 1 — Поверхность образцов после закалки (а) и легирования (б)

Figure 1 — Surface of specimens after hardening (a) and alloying (b)

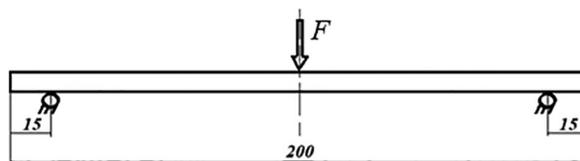
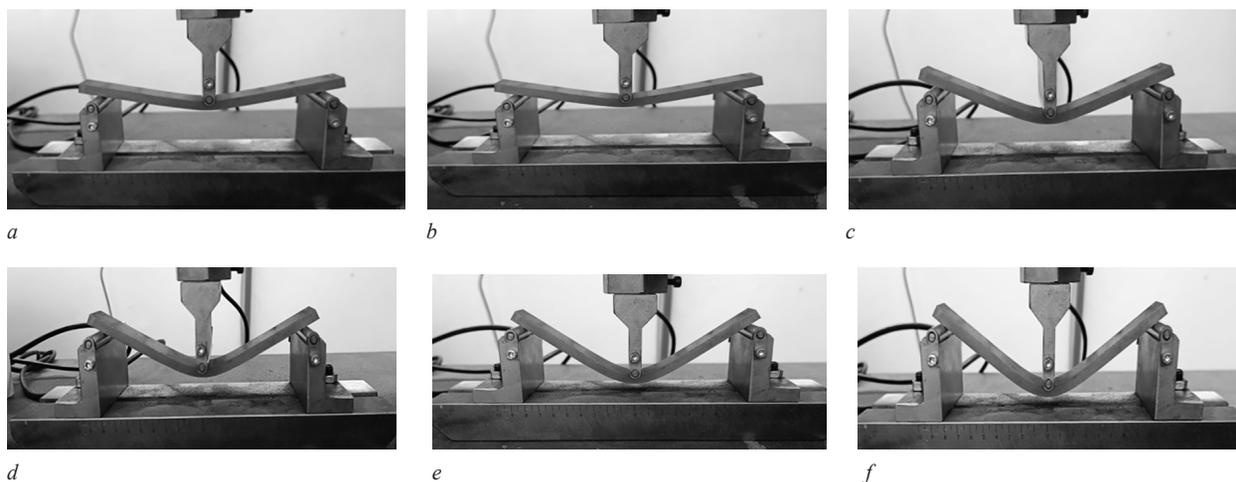


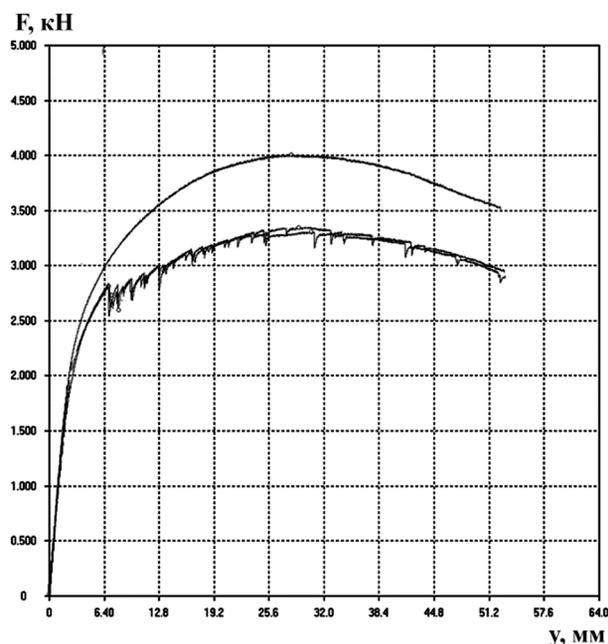
Рисунок 2 — Схема испытаний  
Figure 2 — Test scheme



**Рисунок 3 — Деформирование образца 7.3 в процессе нагружения:** *a* —  $y = 6$  мм,  $F = 2733$  Н; *b* —  $y = 13$  мм,  $F = 2983$  Н; *c* —  $y = 20$  мм,  $F = 3206$  Н; *d* —  $y = 34$  мм,  $F = 3302$  Н; *e* —  $y = 45$  мм,  $F = 3135$  Н; *f* —  $y = 50$  мм,  $F = 3032$  Н  
**Figure 3 — Deformation of specimen 7.3 during loading:** *a* —  $y = 6$  mm,  $F = 2,733$  N; *b* —  $y = 13$  mm,  $F = 2,983$  N; *c* —  $y = 20$  mm,  $F = 3,206$  N; *d* —  $y = 34$  mm,  $F = 3,302$  N; *e* —  $y = 45$  mm,  $F = 3,135$  N; *f* —  $y = 50$  mm,  $F = 3,032$  N

серии 7 при нахождении дорожек в растянутой зоне имело место растрескивание материала. Трещины расположены на одинаковом расстоянии друг от друга и занимают всю ширину дорожки. Раскрытие трещин уменьшается в соот-

ветствии с величиной местной деформации, что указывает на их зарождение непосредственно при лазерной обработке (рисунок 5 *a*). Скачки (зазубрины) на диаграммах нагружения соответствуют моментам раскрытия трещин в процессе нагружения. При нахождении дорожек в сжатой зоне наличие трещин визуально не обнаруживается (рисунок 5 *b*).



**Рисунок 4 — Диаграммы нагружения при изгибе образцов серии 7**

**Figure 4 — Bending loading diagrams of specimens of series 7**



*a*



*b*

**Рисунок 5 — Образцы серии 7 после испытаний**  
**Figure 5 — Specimens of series 7 after testing**

**Таблица 2 — Результаты измерений для образцов серии 7**  
**Table 2 — Measurement results for specimens of series 7**

Серия	№ образца	Максимальное усилие на штоке при изгибе, Н	Перемещение штока при максимальной силе, мм	Перемещение штока перед разрушением или разгрузкой, мм
7 закал	7.1н	3302	29,5	53 / разгрузка
	7.2в	4002	27,5	53 / разгрузка
	7.3н	3345	29,0	53 / разгрузка

*Примечание.* Здесь и далее: «н» — расположение образца дорожками вниз, «в» — расположение образца дорожками вверх.

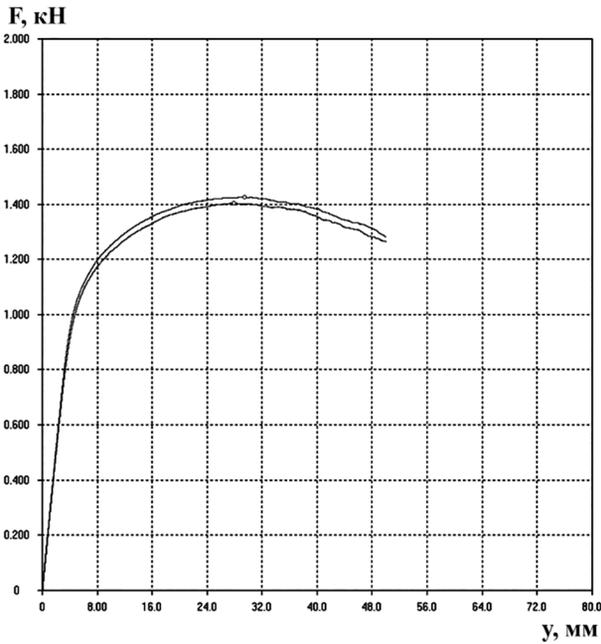


Рисунок 6 — Диаграммы нагружения при изгибе необработанных образцов  
Figure 6 — Bending loading diagrams of untreated specimens

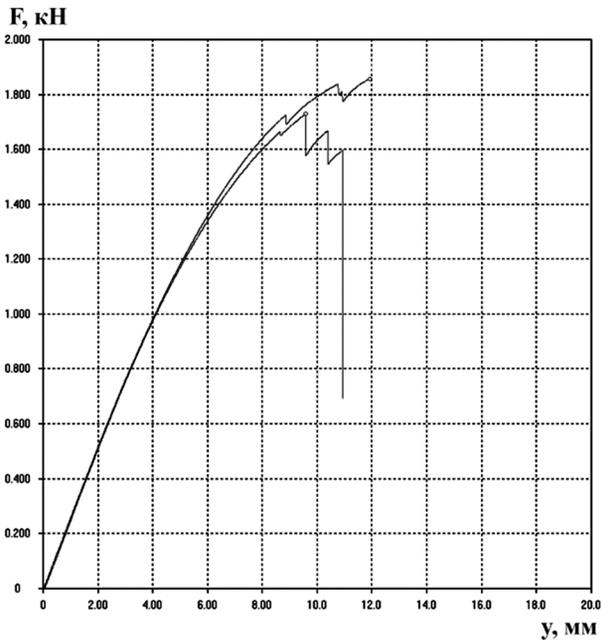
Серии 8, 11: нанесение в режиме закалки по 6 дорожек на обеих сторонах образцов вызвало их заметное коробление скручиванием (угловая точка на торце образца уходит относительно диагональной точки другого торца примерно на 3 мм). На легированных образцах имела незначительная исходная погибь (рисунок 7, таблица 3).

Образцы обеих серий разрушились при небольших прогибах, в 3–4 раза превышающих их толщину. Само разрушение, как и во всех остальных сериях, начиналось в растянутой зоне сечения.

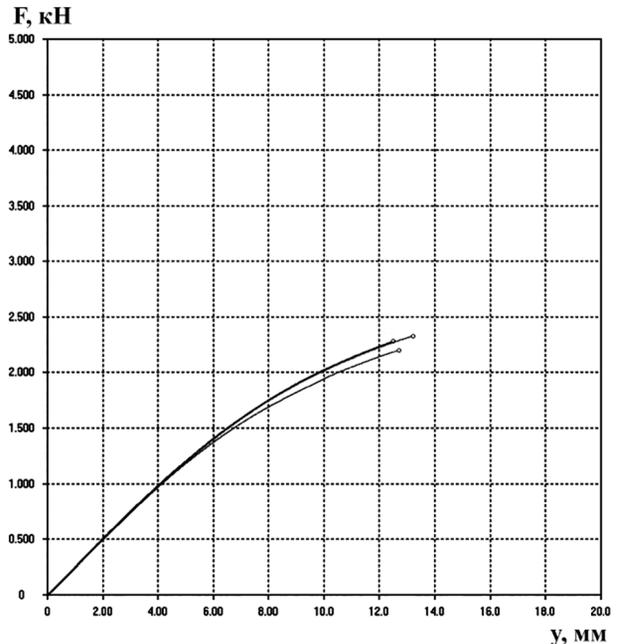
Серии 9, 12: в образцах серий 9 и 12 в отличие от серий 8 и 11 наносилось по три дорожки с каждой стороны образцов. Исходная погибь образцов незначительна (на уровне 0,1 мм) (рисунок 8, таблица 4).

На образце 9.1 вдоль дорожек имеют место трещинки числом до 6, аналогичные показанным на рисунке 5, но более узкие (рисунки 9–11).

Серии 10, 13: на образцах нанесена сетка с двух сторон. Образцы получили исходную погибь около одного миллиметра (рисунок 12, таблица 5).



a

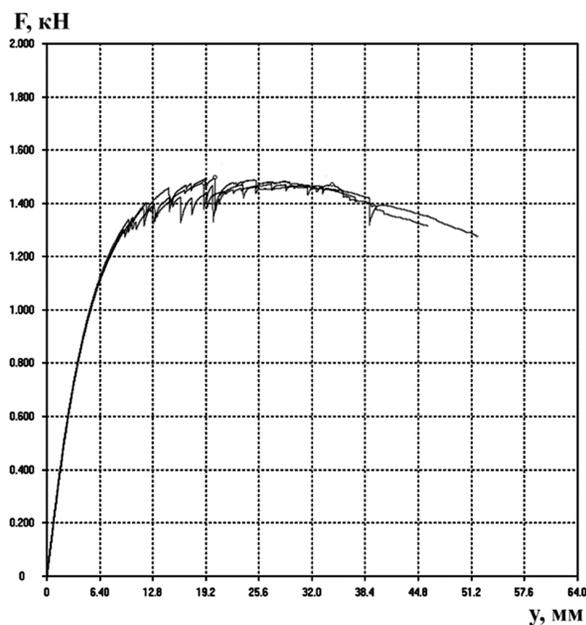


b

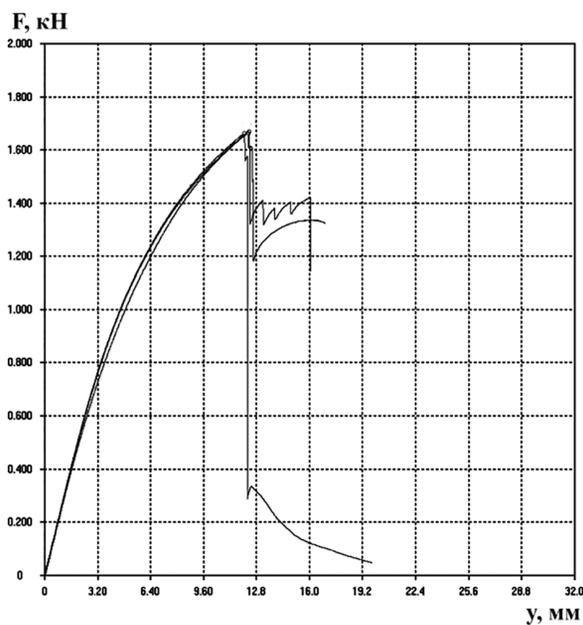
Рисунок 7 — Диаграммы нагружения при изгибе образцов серий 8 (a) и 11 (b)  
Figure 7 — Bending loading diagrams of specimens of series 8 (a) and 11 (b)

Таблица 3 — Результаты измерений для образцов серий 8 и 11  
Table 3 — Measurement results for specimens of series 8 and 11

Серия	№ образца	Максимальное усилие на штоке при изгибе, Н	Перемещение штока при максимальной силе, мм	Перемещение штока перед разрушением или разгрузкой, мм
8 легир	8.1	1833	12,00	12,0 / разрушение
	8.2	1727	9,50	11,0 / разрушение
	8.3	1988	17,00	18,5 / разрушение
11 закал	11.1	2235	12,50	12,5 / разрушение
	11.2	2311	13,30	13,3 / разрушение
	11.3	2185	12,80	12,8 / разрушение



a



b

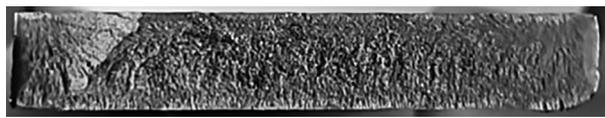
Рисунок 8 — Диаграммы нагружения при изгибе образцов серий 9 (a) и 12 (b)  
Figure 8 — Bending loading diagrams of specimens of series 9 (a) and 12 (b)

Таблица 4 — Результаты измерений для образцов серий 9 и 12  
Table 4 — Measurement results for specimens of series 9 and 12

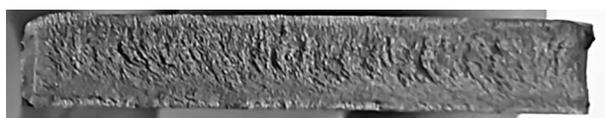
Серия	№ образца	Максимальное усилие на штоке при изгибе, Н	Перемещение штока при максимальной силе, мм	Перемещение штока перед разрушением или разгрузкой, мм
9 легир	9.1	1491	19,0	37,5 / разрушение
	9.2	1475	18,5	52 / разгрузка
	9.3	1470	17,5	46 / 35, разгрузка
12 закал	12.1	1655	12,0	16,5 / разрушение
	12.2	1661	12,0	12,0 / разрушение
	12.3	1665	12,0	17,0 / разрушение



Рисунок 9 — Образцы серии 9 после испытаний  
Figure 9 — Specimens of series 9 after testing

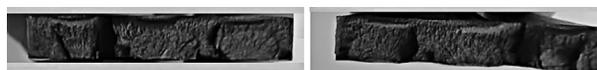


a



b

Рисунок 10 — Структура материала в сечении разрушения образцов серии 9  
Figure 10 — Material structure in the fracture cross-section of specimens of series 9



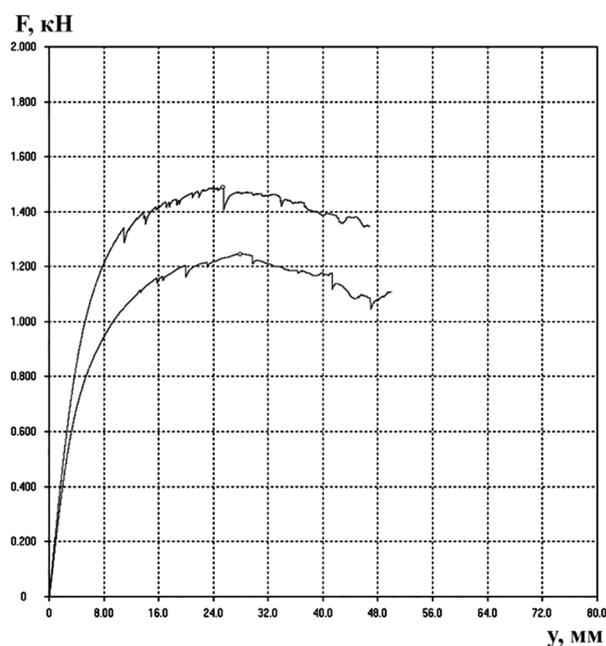
a



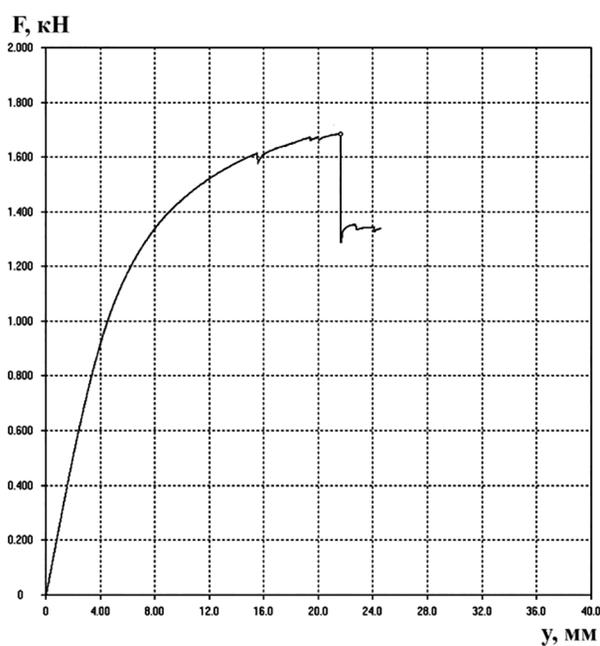
b

Рисунок 11 — Структура материала в сечении разрушения (a) и излом образца 12.3 (b)  
Figure 11 — Material structure in the fracture section (a) and breakage of specimen 12.3 (b)

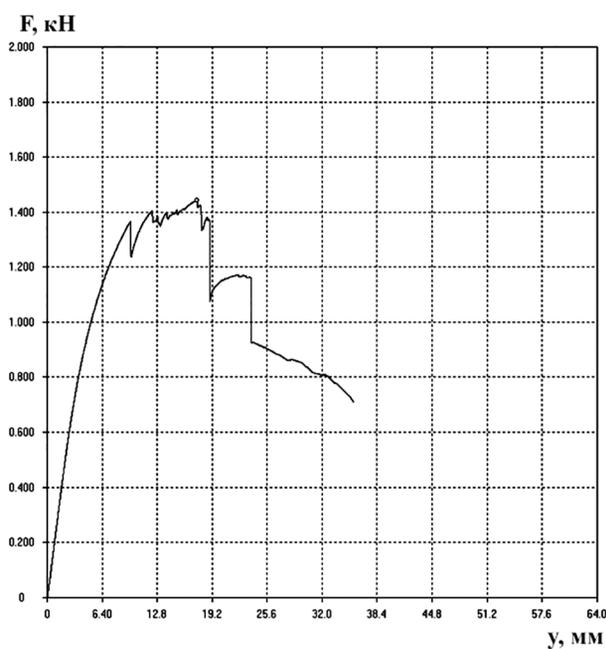
Все образцы разрушились по сечению, перпендикулярному оси образца. На легированных образцах трещины практически прямолинейные, на закаленных имеет место ступенчатость траектории, вызванная ее поворотом в местах переходов к необработанным участкам окон. На растянутой поверхности образцов 13.2 и 13.3 на середине



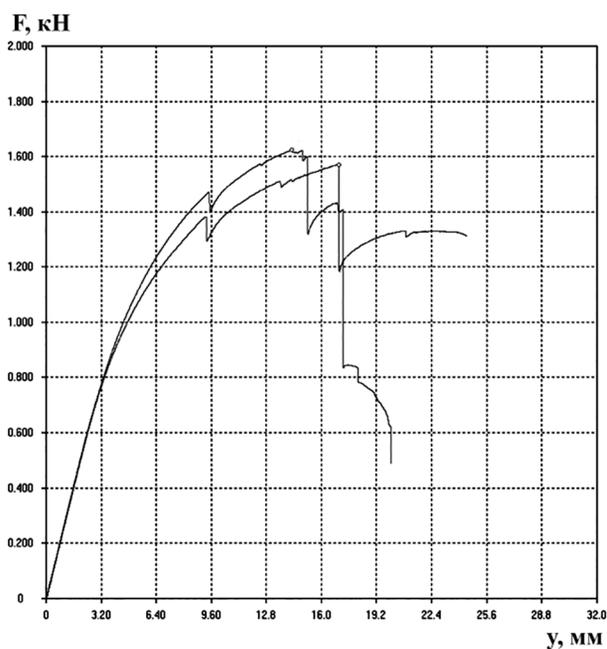
a



b



c



d

Рисунок 12 — Диаграммы нагружения при изгибе для образцов серий 10 и 13: a — образцы 10.1, 10.2; b — образец 10.3; c — образец 13.1; d — образцы 13.2, 13.3

Figure 12 — Bending loading diagrams for specimens of series 10 and 13: a — specimens 10.1, 10.2; b — specimen 10.3; c — specimen 13.1; d — specimens 13.2, 13.3

Таблица 5 — Результаты измерений для образцов серий 10 и 13  
Table 5 — Measurement results for specimens of series 10 and 13

Серия	№ образца	Максимальное усилие на штоке при изгибе, Н	Перемещение штока при максимальной силе, мм	Перемещение штока перед разрушением или разгрузкой, мм
10 легир	10.1н	1487	25,0	47 / разрушение
	10.2в	1246	28,0	52 / разгрузка
	10.3н	1685	21,5	25 / разрушение
13 закал	13.1в	1426	16,5	36 / разрушение
	13.2н	1617	14,0	20,5 / разрушение
	13.3н	1563	16,5	24,5 / разрушение

длины видно по одной волосовидной трещине перпендикулярно оси, на образце 13.1 на дорожке видно несколько раскрытых трещин, ширина которых уменьшается в сторону опоры. На легированных образцах 10.1 и 10.2 трещины занимают одну из наклонных дорожек в зоне приложения нагрузки и расположены на расстоянии 2–3 мм друг от друга. Со стороны сжатых поверхностей образцов трещины не обнаруживаются (рисунки 13, 14).

Серия 14: образцы серии 14 имели по три дорожки с одной стороны. Погибь после закалки до 1 мм, закручивание образцов незначительное (рисунок 15, таблица 6).

На рисунке 16 показаны образцы после испытаний.

**Заключение.** Результаты испытаний легированных и закаленных образцов указывают на снижение пластичности материала после лазерной обработки при одновременном увеличении максимальных воспринимаемых нагрузок (в 1,1–1,7 раза). Более заметное изменение свойств вызывается закалкой. Разрушение образцов имеет хрупкий характер путем отрыва от действия продольных нормальных напряжений.

Значительное снижение пластических свойств иллюстрируется диаграммами нагружения: например, для серии 8 нелинейный пластический участок составляет 0,8–1,0 от упругого, для серии 11 — 1,1–1,2 от упругого (у необработанных образцов — более 10). Наличие скачков (зубчиков)

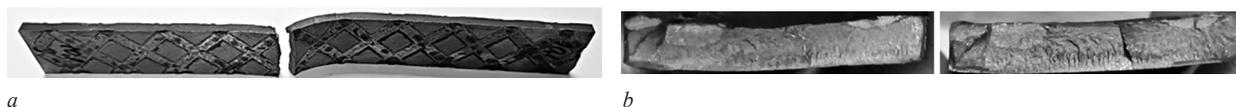


Рисунок 13 — Сечение разрушения (а) и структура материала в сечении (b) образца 10.1  
Figure 13 — Fracture section (a) and material structure in section (b) of specimen 10.1

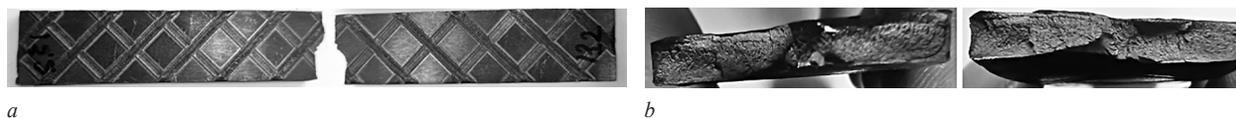


Рисунок 14 — Сечение разрушения (а) и структура материала в сечении (b) образца 13.2  
Figure 14 — Fracture section (a) and material structure in section (b) of specimen 13.2

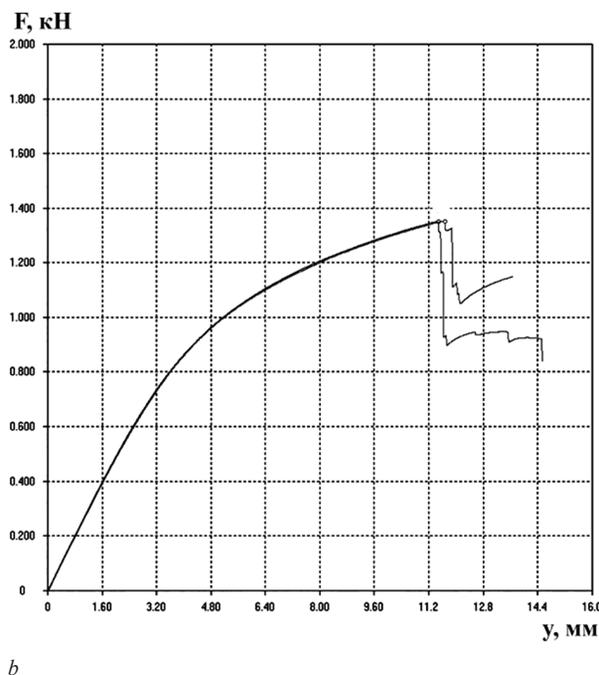
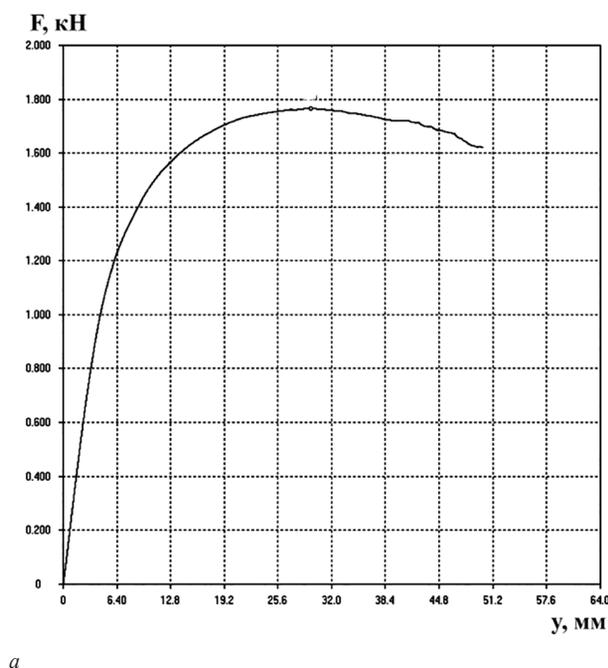


Рисунок 15 — Диаграммы нагружения при изгибе для образцов серии 14: а — образец 14.1; б — образцы 14.2, 14.3  
Figure 15 — Bending loading diagrams for specimens of series 14: а — specimen 14.1; б — specimens 14.2, 14.3

Таблица 6 — Результаты измерений для образцов серии 14  
Table 6 — Measurement results for specimens of series 14

Серия	№ образца	Максимальное усилие на штоке при изгибе, Н	Перемещение штока при максимальной силе, мм	Перемещение штока перед разрушением или разгрузкой, мм
14 легир	14.1в	1767	19,5	50 / 37, разгрузка
	14.2н	1349	11,5	13,7 / разрушение
	14.3н	1339	11,0	14,5 / разрушение

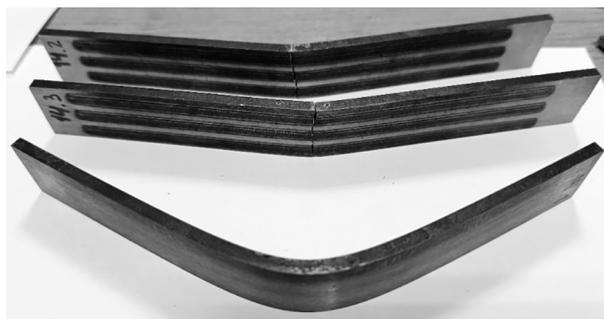


Рисунок 16 — Образцы серии 14 после испытаний  
Figure 16 — Specimens of series 14 after testing

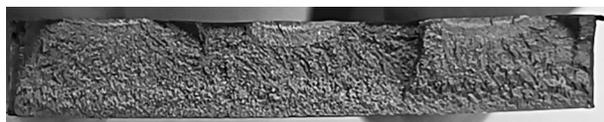


Рисунок 17 — Структура материала в сечении разрушения образца 14.3  
Figure 17 — Material structure in the fracture section of specimen 14.3

на диаграммах нагружения борированных образцов свидетельствует о более высокой внутренней неоднородности структуры сравнительно с обработанными путем закалки.

Структура материала в сечениях разрушения на образцах всех серий выглядит достаточно однообразно (см. рисунки 10, 11, 13, 14, 17) — подвергнутые непосредственному воздействию светлые и со слабо выраженной зернистостью сегменты дорожек глубиной до 0,2–0,3 мм окружены более темной зоной термического влияния, уходящей в глубину образца на 0,6–0,8 мм и имеющую небольшую ширину (0,3–0,6 мм) вдоль дорожек на его поверхности (на образцах с сеткой глубина прогрева существенно выше (см. рисунки 13, 14)). Остальная зона поверхности сечений разрушения занята зернистой структурой, имеющей рыхлый характер и позволяющей определить положение первоначальных зародышей трещины и направление движения ее фронта. Практически полное отсутствие губ среза подчеркивает хрупкий характер разрушения образцов отрывом.

Сечения разрушения расположены под нагружающим штоком в области возникновения максимальных изгибных деформаций и ориентированы перпендикулярно оси образцов. Для закаленных образцов линия излома прямолинейная, для легированных — со скачкообразными переходами от одной дорожки на соседнюю вдоль наблюдаемых полос термического влияния между дорожками. При значительном расстоянии между дорожками (образцы с тремя продольными дорожками, образцы с дорожками в виде сетки) магистральная трещина вне зон термического влияния может испытывать отклонение от прямолинейности, что указывает дополнительно на существенную неоднородность механических характеристик материала, возникшую после обработки.

Сравнение результатов испытаний образцов с двусторонним и односторонним нанесением дорожек (серии 8 и 9, 11 и 12) показывает, что более высокие уровни воспринимаемой нагрузки достигаются при двусторонней обработке (для легированных образцов примерно на 15 %, для закаленных — на 30 %).

Проведенный анализ результатов испытаний на изгиб образцов из стали 40X13 относится к реализованным конкретным значениям тепловой мощности воздействия и скорости движения лазерного пятна, поэтому при их изменениях сделанные выводы могут быть дополнены и откорректированы по данным экспериментов.

### Список литературы

1. Ярьсько, С.И. Анализ стойкости и изнашивания твердосплавного инструмента после лазерной термообработки / С.И. Ярьсько // Изв. Самарского науч. центра РАН. — 2001. — Т. 3, № 1. — С. 27–37.
2. Определение параметров зон лазерной закалки сталей и их трибологических характеристик / В.П. Бирюков, В.В. Исаков, А.Ю. Федотов, Д.А. Баулин // ФОТОНИКА. — 2019. — Т. 13, № 3. — С. 242–250. — DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.3.242.250>.
3. Девоино, О.Г. Обеспечение ресурсных параметров ответственных элементов механических трансмиссий с использованием поверхностных слоев, формируемых лазерными технологиями / О.Г. Девоино, 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. — URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/52290>.
4. 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, iss. 7–8. — P. 619–625. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-015-0148-8>.
5. Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness, wear resistance and softening of a low carbon steel / P.-L. Zhang, H. Yan, P.Q. Hu [et al.] // Lasers in Engineering. — 2014. — Vol. 28, iss. 3–4. — P. 135–149.
6. 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 [et al.] // Archives of Metallurgy & Materials. — 2017. — Vol. 62, iss. 3. — P. 1721–1726. — DOI: <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0262>.
7. Nath, A.K. Laser Transformation hardening of steel / A.K. Nath, S. Sarkar // Advances in Laser Materials Processing / ed. by J. Lawrence. — 2nd ed. — Cambridge, 2018. — P. 257–298. — DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101252-9.00011-X>.
8. 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>.
9. 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. Kholodar // 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>.
10. Laser welding of copper-niobium microcomposite wires for pulsed power applications / N. Višniakov, G. Mikalauskas, O. Černašėjus, J. Škamat // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. — 2019. — Vol. 50, iss. 5. — P. 646–662. — DOI: <https://doi.org/10.1002/mawe.201800175>.
11. Optimization of the parameters of local laser treatment for the creation of reinforcing ribs in thin metal sheets / O. Kapustynskiy, N. Višniakov, O. Černašėjus [et al.] // Mechanika 2019: proc. of the 24th international scientific conference, Kaunas, 17 May 2019. — P. 71–75.
12. Испытания на изгиб образцов из стали 10Г2 после лазерной закалки и легирования / А. И. Веремейчик, М. В. Нерода, Б. Г. Холодарь, М. В. Хеук // Механика машин, механизмов и материалов. — 2024. — № 3(68). — С. 71–77. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-71-77>.

13. Влияние режимов лазерной закалки на свойства стали 40X13 / О.М. Миширук, А.И. Веремейчик, О.Г. Девойно [и др.] // Вестн НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. — 2023. — Т. 68, № 2. — С. 103–112. — DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112>.
14. Wang, L. The effect of laser surface hardening on microstructure and high temperature wear resistance of H13 steel for mandrel of tube mill / L. Wang, J. Zhao, X. Fan // J. of Materials Engineering and Performance. — 2025. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09406-6>.
15. Effect of annealing on the real structure and microstructure of advanced laser processed AISI H13 tool steel / K. Trojan, V. Ocelík, N. Ganev [et al.] // Acta Polytechnica CTU Proceedings: 7th Student scientific conference on solid state physics and physics of materials. — 2018. — Vol. 17. — P. 15–19. — DOI: <https://doi.org/10.14311/APP.2018.17.0015>.

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

Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics<sup>1</sup>

E-mail: [vai\\_mrtm@bstu.by](mailto:vai_mrtm@bstu.by)

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

Vice Rector for Academic Affairs<sup>1</sup>

E-mail: [nerodamv@mail.ru](mailto:nerodamv@mail.ru)

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

Senior Researcher of the Research Part<sup>1</sup>

E-mail: [hbg@list.ru](mailto:hbg@list.ru)

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

Trainee Lecturer of the Department of Theoretical and Applied Mechanics<sup>1</sup>

E-mail: [kheuk@mail.ru](mailto:kheuk@mail.ru)

<sup>1</sup>Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus

Received January 27, 2025.

## BENDING TESTS OF 40X13 (40Kh13) STEEL SPECIMENS AFTER LASER HARDENING AND ALLOYING

*The behavior of flat specimens made of 40X13 (40Kh13) corrosion-resistant steel after laser hardening and laser alloying under bending loading was studied. The processing was performed using a continuous-action ytterbium fiber laser LK-1000 with a scanning system. Tracks 4 mm wide were applied along one or both sides of the specimen, the number of tracks varied from two to six. The tests were carried out on a Kason WDW-50 testing machine. The test results showed that the presence of laser exposure leads to a decrease in the specimen deflection achieved before failure and an increase in the level of the perceived maximum load. The test results of alloyed and hardened specimens showed a decrease in the plasticity of the material after laser processing with a simultaneous increase in the maximum perceived loads, with a more significant change in the material properties obtained with laser hardening. Failure of the specimens has a pronounced brittle nature by tearing off from the action of longitudinal normal stresses. Studies have shown that higher levels of perceived load are achieved with double-sided processing. Specific results depend on the implemented material processing modes.*

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

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-2-71-45-54>

### 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. 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>.
3. Devoyno O.G., Shvec I.V. Obespechenie resursnykh parametrov otvetstvennykh elementov mekhanicheskikh transmis-siy 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. 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.
6. Šebek M., Falat L., Kováč F., Petryshynets I., Horňák P., Girmán 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>.
  7. 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>.
  8. 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>.
  9. 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>.
  10. 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>.
  11. Kapustynskiy O., Višniakov N., Černašėjus O., Golovko L., Chayevski 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.
  12. Verameichyk A.I., Neroda M.V., Kholodar B.G., Kheuk M.V. Ispytaniya na izgib obratsov iz stali 10G2 posle lazernoy zakalki i legirovaniya [Bending tests of specimens made of steel 10G2 (10G2) after laser hardening and alloying]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2024, no. 3(68), pp. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-71-77> (in Russ.).
  13. Mishchiruk O.M., Verameichyk A.I., Devoino O.G., Neroda 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.).
  14. Wang, L., Zhao J., Fan X. The effect of laser surface hardening on microstructure and high temperature wear resistance of H13 steel for mandrel of tube mill. *Journal of materials engineering and performance*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09406-6>.
  15. Trojan K., et al. Effect of annealing on the real structure and microstructure of advanced laser processed AISI H13 tool steel. *Acta Polytechnica CTU Proceedings: 7th student scientific conference on solid state physics and physics of materials*, 2018, vol. 17, pp. 15–19. DOI: <https://doi.org/10.14311/APP.2018.17.0015>.