

УДК 621.789

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 40X13 ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ

О. М. Мищирук¹, А. И. Веремейчик², Б. Г. Холодарь³, М. В. Нерода⁴¹ Старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: purtyupolia@gmail.com² К. физ.-мат. н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vai_mrtm@bstu.by³ К. т. н., доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской части УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: hbg@list.ru⁴ К. т. н., доцент, e-mail: nerodaMV@mail.ru

Реферат

Проведено исследование зависимостей характеристик прочности и пластичности образцов из конструкционной коррозионно-стойкой стали 40X13 от различных схем лазерной поверхностной закалки и легирования с применением технологического комплекса на основе иттербиевого волоконного лазера. Для испытаний на статическое разрушение были подготовлены образцы с габаритными размерами 7 x 20 x 200 мм. На противоположных плоскостях образца с габаритными размерами 20 x 200 мм при скорости сканирования, равной 500 мм/мин, наносились от 2 до 5 дорожек, а также использовалась схема нанесения своеобразной «сетки». Для лазерного легирования образцов выбран наиболее широко распространенный вид лазерного легирования – борирование. Диаграммы зависимости возникающих в образцах напряжений (σ) от удлинения рабочей части образца (Δl) свидетельствуют о незначительном влиянии лазерной обработки на модуль упругости материала. Установлено, что разрушение обработанных образцов во всех случаях обладало признаками, характерными хрупкому разрушению (отсутствие «шейки»; небольшие деформации; ярко выраженный крупнозернистый рельеф излома, состоящий из множества блестящих граней) и невысоким уровнем разрушающих деформаций при напряжениях ниже предела прочности исходного материала. Разрушающие напряжения на обработанных образцах находились в пределах 500–600 МПа и составляли примерно 70–90 % от предела прочности образцов, не подвергавшихся обработке. Предельная упругая нагрузка материала обработанных образцов повысилась, увеличив зону их упругой работы. Полученные результаты могут служить основой для изучения взаимосвязи режимов нагрева лазерным лучом и свойств материала упрочненной зоны.

Ключевые слова: лазерная поверхностная закалка, лазерное легирование, характеристики пластичности, прочностные характеристики, конструкционная сталь 40X13.

STUDY OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF 40X13 STEEL AFTER LASER HARDENING AND ALLOYING

O. M. Mishchiruk, A. I. Verameichyk, B. G. Kholodar, M. V. Neroda

Abstract

The dependence of strength and ductility characteristics of samples made of 40X13 structural corrosion-resistant steel on various schemes of laser surface hardening and alloying was studied using a technological complex based on an ytterbium fiber laser. Samples with overall dimensions of 7 x 20 x 200 mm were prepared for static destruction tests. From 2 to 5 tracks were applied on opposite planes of a sample with overall dimensions of 20 x 200 mm at a scanning speed of 500 mm/min, and a scheme for applying a kind of "grid" was also used. The most widespread type of laser alloying, boriding, was selected for laser alloying of samples. The diagrams of the dependence of stresses (σ) arising in samples on the elongation of the working part of the sample (Δl) indicate an insignificant effect of laser processing on the elastic modulus of the material. It was found that the fracture of the treated samples in all cases had features characteristic of brittle fracture (absence of a "neck"; small deformations; pronounced coarse-grained fracture relief consisting of many shiny edges) and a low level of destructive deformations at stresses below the ultimate strength of the original material. The destructive stresses on the treated samples were within 500–600 MPa and amounted to approximately 70–90 % of the ultimate strength of the untreated samples. The ultimate elastic load of the material of the treated samples increased, increasing the zone of their elastic work. The results obtained can serve as a basis for studying the relationship between laser beam heating modes and the properties of the material of the hardened zone.

Keywords: laser surface hardening, laser alloying, plasticity characteristics, strength characteristics, structural steel 40X13.

Введение

Такие достоинства сфокусированного лазерного излучения, как бесконтактное и локализованное термическое воздействие, минимальная зона термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения, снижение уровня остаточных напряжений, минимизация коробления и повышенная дисперсность структуры [1], обуславливают замену традиционных методов термической обработки технологиями лазерной обработки поверхности.

Многочисленные публикации отечественных и зарубежных ученых [1–18] подтверждают актуальность проблем, связанных с влиянием режимов лазерной закалки на структуру и свойства различных материалов. Влиянием различных схем лазерной обработки на прочность и жесткость тонкостенных деталей, к которым предъявляются повышенные требования по устойчивости формы, занимались авторы работы [19]. В процессе исследования разработана технология нанесения на внутренней или наружной поверхности

детали (или на обе сразу) упрочняющих дорожек различной конфигурации, которые образуют в теле армирующий каркас с заданной геометрией и представляющий собой участки того же материала с более высокими значениями твердости. Установлены: оптимальное отношение твердости армирующего каркаса к твердости основы, оптимальное отношение ширины дорожек армирующего каркаса к ширине детали, оптимальное отношение глубины упрочненной зоны к толщине детали. Авторы [17] исследовали зависимости характеристик прочности и пластичности, а также микротвердости образцов из коррозионно-стойкой стали 40X13 от режимов лазерной поверхностной закалки волоконным лазером. Установлено, что разрушение обработанных образцов во всех случаях обладало признаками, характерными хрупкому разрушению, хрупкий характер с низким уровнем разрушающих деформаций при напряжениях ниже предела прочности исходного материала. При скорости движения лазера $V = 500$ мм/мин, пятне сканирования $4,0 \times 2,25$ мм и двусторонней

обработке установлено незначительное увеличение временного сопротивления относительно необработанного материала. В работе [20] проведены исследования влияния скорости лазерного сканирования при лазерной закалке и легировании излучением иттербиевого волоконного лазера мощностью 1 кВт на механические характеристики образцов из стали 10Г2. Результаты испытаний на статическое растяжение указывают на пластический характер разрушения обработанных образцов. Напряжения разрушения закаленных образцов возросли на 10–14 % при пропорциональном снижении характеристик пластичности. Напряжения разрушения борированных образцов также возросли на 10–14 % при снижении характеристик пластичности более чем в два раза. Диаграммы растяжения показали незначительное изменение модуля упругости материала образцов после лазерной закалки и более существенное при лазерном борировании по сравнению с исходным материалом.

Следует отметить, что исследования в основном заключаются в определении влияния режимов лазерной закалки на износостойкость, а проблеме влияния лазерной обработки на прочностные характеристики и характеристики пластичности материала уделяется недостаточное внимание. Анализ литературных источников показал, что среди многочисленных публикаций отечественных и зарубежных ученых недостаточно исследований, посвященных взаимосвязи схем лазерной обработки и механических свойств материала упрочненной зоны.

Методика проведения испытаний

Для определения зависимости характеристик прочности и пластичности стали 40Х13 от схем лазерной поверхностной обработки образцы подвергались лазерной закалке и легированию (таблица 1). Для этого применялся технологический комплекс на основе иттербиевого волоконного лазера. В качестве источника излучения использовался волоконный иттербиевый лазер непрерывного действия ЛК-1000 фирмы IPG (США) (тип YLR-1) с максимальной мощностью 1 кВт, длиной волны 1,06 мкм [21]. Важной особенностью данного вида лазеров является то, что их технико-экономические показатели позволяют изменять мощность излучения с очень высокой скоростью в соответствии с заданной программой.

Технологический комплекс оборудован сканирующей системой на основе 2D-сканера фирмы Ситела (РБ), которая обеспечивает многократное перемещение пятна обработки по обрабатываемой поверхности с высокой частотой в направлении, перпендикулярном направлению обработки. Многократное перемещение лазерного пятна с высокой частотой обеспечивается применением системы двух зеркал, которые согласованно совершают колебания во взаимно перпендикулярных направлениях (рисунок 1). При обработке образцов при скорости подачи координатной системы (скорости сканирования) $V = 500$ мм/мин частота сканирования соответствовала 220 Гц, а размер лазерного пятна равен 0,35 мм. Расстояние от поверхности образца до последнего дефлектора составило 450 мм.

Таблица 1 – Режимы лазерной обработки

Марка стали, размер образца	№ партии	Вид обработки	Обработка, количество дорожек, шт	Количество, шт
40Х13, 7х20х200	НО	Без обработки	–	3
	1	Борирование	С двух сторон, пять дорожек	3
	2		С двух сторон, две дорожки	3
	3		С двух сторон, «сетка»	3
	4	Закалка	С двух сторон, пять дорожек	3
	5		С двух сторон, две дорожки	3
6	С двух сторон, «сетка»		3	

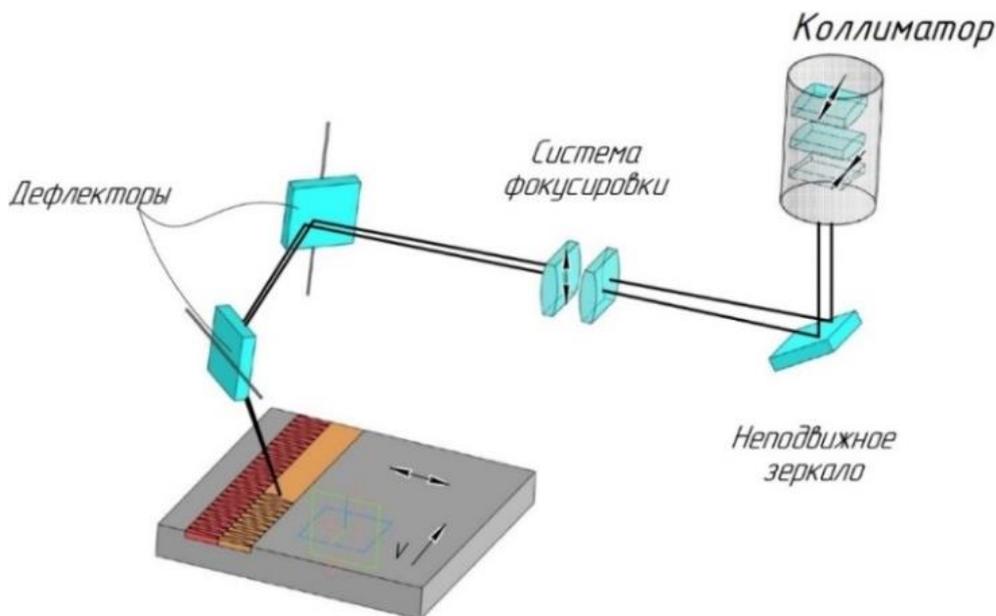


Рисунок 1 – Схема сканирующей системы

Программа движения лазерного пятна, разработанная авторами [22] и применяемая в данном технологическом комплексе, позволяет уменьшить зоны нестабильности тепловых полей, что в свою очередь обеспечивает высокое качество обрабатываемой поверхности и позволяет использовать лазерную обработку в качестве чистовой. По программе лазерный луч при скорости сканирования $V = 0$ мм/мин «отрисовывает» на поверхности образца пятно сканирования с размерами $H \times T$ (рисунок 2). Пятно сканирования может состо-

ять из различного количества «линий». При мощности излучения в 100 % лазерное пятно движется по траектории от точки А до точки В. Между точками В и С, т. е. на переходе от одной линии к другой, мощность излучения равна 0 %. Таким образом лазерное пятно перемещается до точки D, где мощность излучения вновь становится равна 0 % и лазерное пятно возвращается в точку А. При обработке образцов размер лазерного пятна составил $4 \times 2,25$ мм и включал в себя 7 линий.

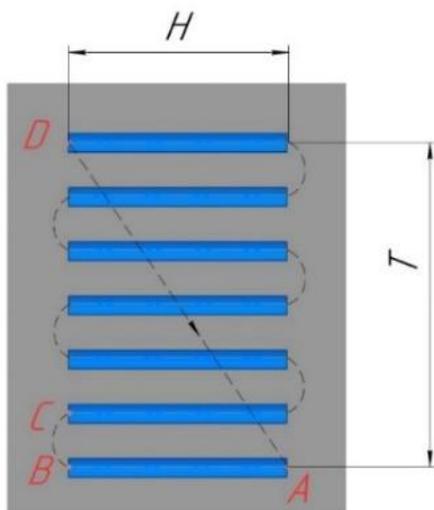


Рисунок 2 – Схема движения лазерного луча по пятну сканирования при скорости подачи $V = 0$

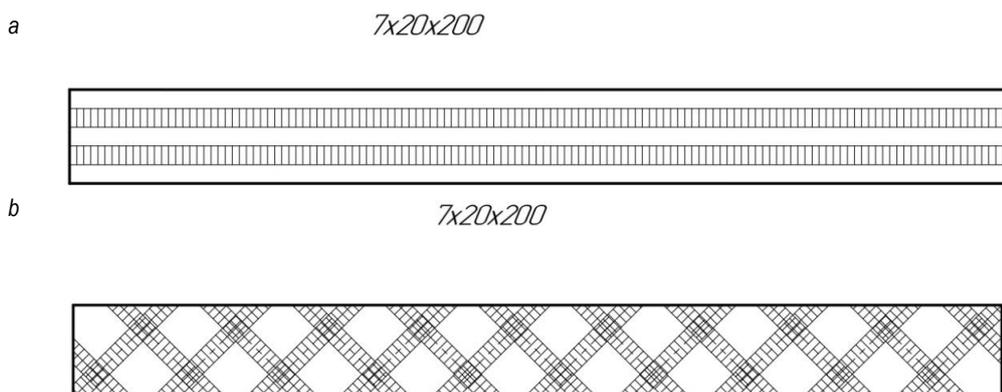
Перемещения оптической системы относительно образцов проводится с помощью координатного стола, оснащенного системой числового программного управления РУХ-4.0 (ООО «Рухсервомотор», РБ) [23]. Скорость сканирования при лазерной обработке составила $V = 500$ мм/мин.

Размеры образцов: толщина – 7 мм, ширина – 20 мм и длина – 200 мм. На противоположных плоскостях образца с габаритными размерами 20 × 200 мм наносились по 2–5 дорожек (рисунок 3а), а также использовалась схема нанесения своеобразной «сетки» (рисунок 3б). Расстояние между лазерными дорожками «сетки» составило примерно 17 мм по горизонтали. При легировании на образцы предварительно наносилась смесь бора аморфного с ацетоном и клеем БФ-4.

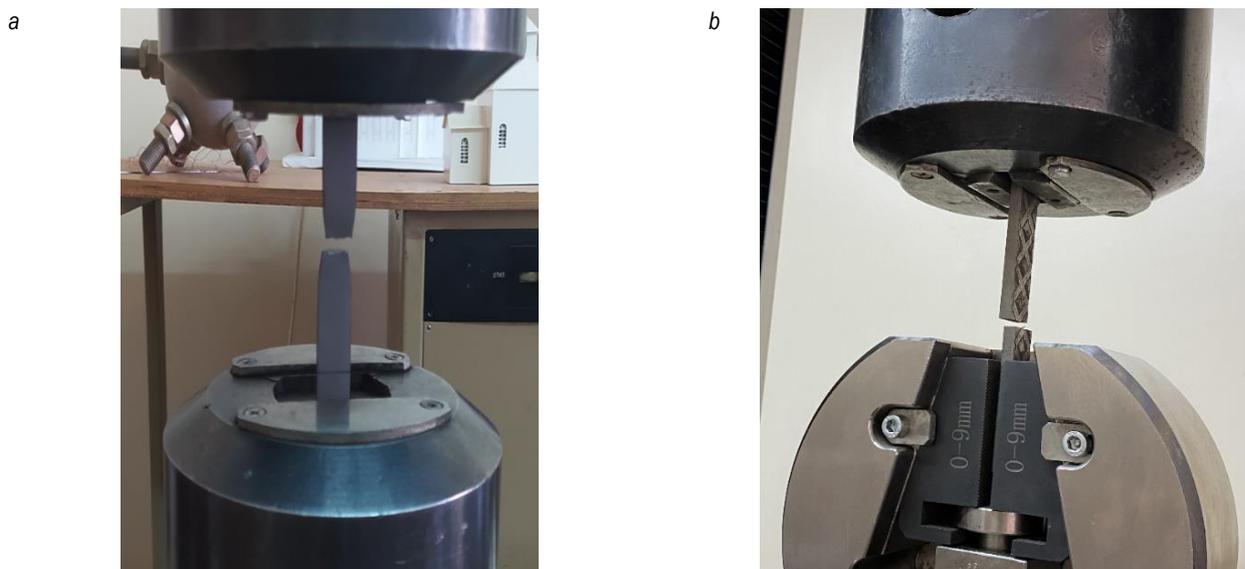
Для определения прочностных характеристик образцы испытывались на статическое растяжение согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» на машине разрывной Meitesi WDW-300 (Китай). Данная машина снабжена программным обеспечением MaxTest, которое позволяет осуществлять настройку параметров в соответствии с основными международными стандартами ISO, ASTM, DIN, EN и ГОСТ. Разрывная машина Meitesi WDW-300 внесена в реестр средств измерений Республики Беларусь и поставляется с поверкой и калибровкой.

Результаты исследований и их обсуждение

Испытания образцов на растяжение проводились при нагружении со скоростью 5 мм/мин (рисунок 4).



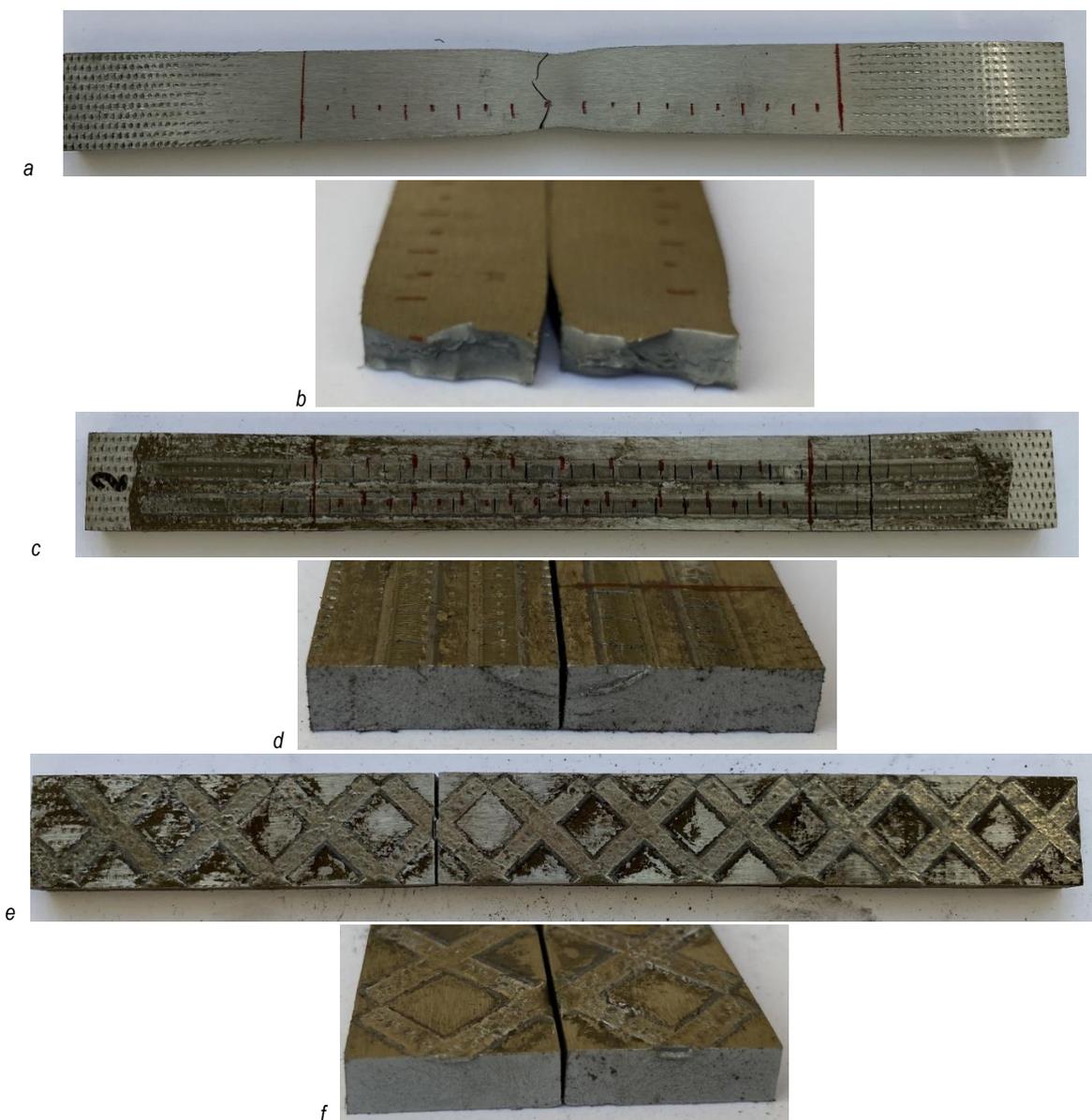
а – нанесение двух дорожек; б – нанесение «сетки»
Рисунок 3 – Схемы нанесения лазерной обработки



а – необработанный образец [17], б – образец, обработанный лазером (№ 3а)
Рисунок 4 – Испытания материала образцов на растяжение

Во время испытаний необработанные образцы (НО) разрушились в пределах расчетной длины и со всеми признаками вязкого разрушения (образование «шейки», деформации материала), соответствующими требованиям ГОСТ. Разрушение обработанных образцов обладало признаками, характерными хрупкому разрушению: отсутствие «шейки»; небольшие деформации; ярко выраженный крупнозернистый рельеф излома, состоящий из множества блестящих граней. Хрупкий характер

разрушения обработанных образцов можно объяснить образованием в процессе лазерной обработки зон измененной структуры исходного материала, которые оказывают влияние на локальное напряженно-деформированное состояние зерен материала в своей окрестности. Все испытанные образцы разрушились по сечениям, перпендикулярным направлению растягивающей нагрузки. Примеры разрушенных образцов и сечений разрушения приведены на рисунке 5.



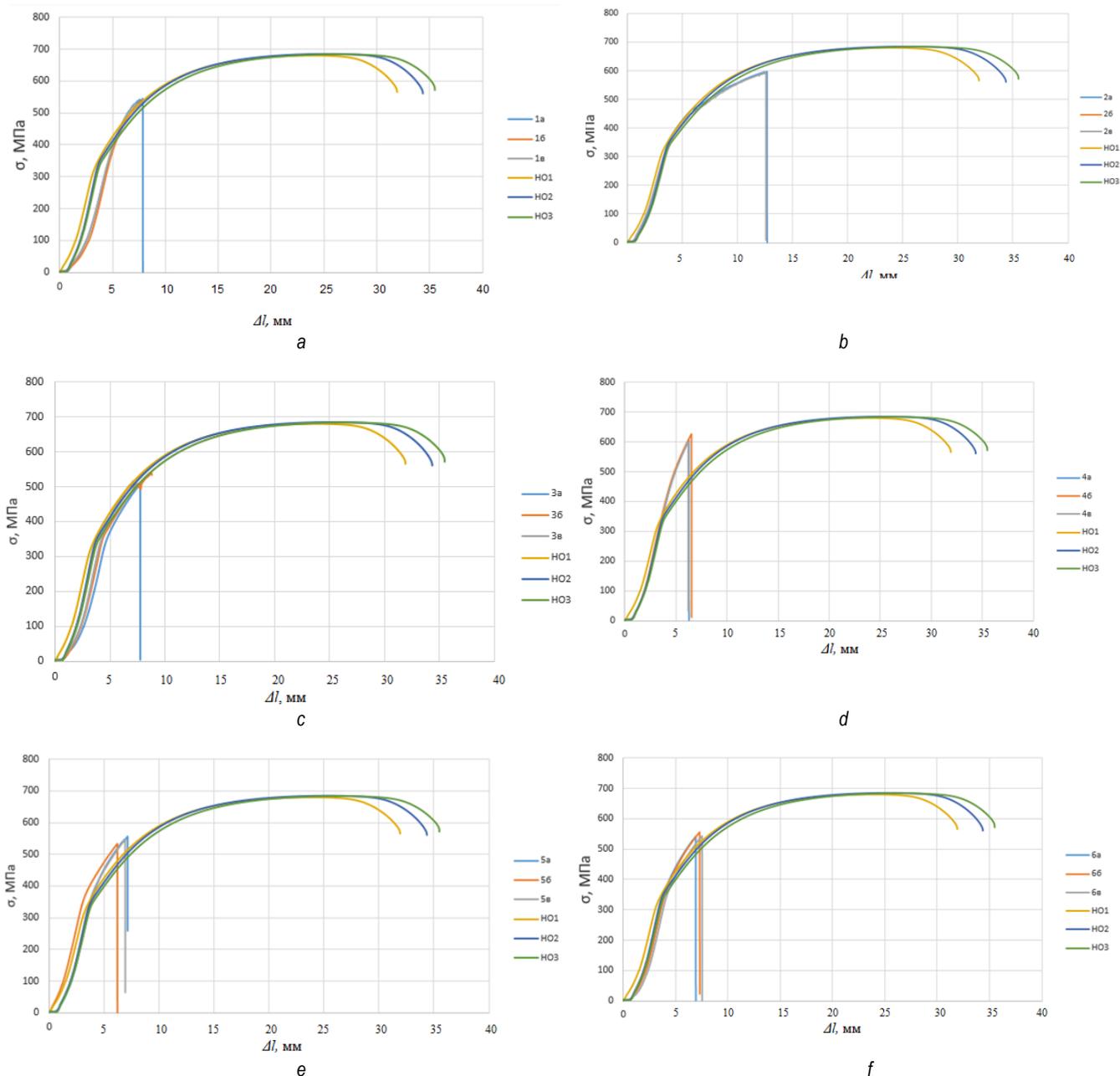
a, b – разрушение в пределах расчетной длины образца НО3; *c, d* – разрушение в зоне захватов образца 2б; *e, f* – разрушение в пределах расчетной длины образца 3а

Рисунок 5 – Разрушенные образцы (*a, c, e*) и сечения разрушения (*b, d, f*)

В результате исследований получены максимальное усилие и диаграммы зависимости продольной растягивающей силы P от удлинения рабочей части образца Δl . По результатам испытаний было определено максимальное нормальное напряжение. Данные сведены в таблицу 2.

По полученным результатам испытаний закаленных и легированных образцов построены зависимости возникающих в них напряжений σ от удлинения рабочей части образца Δl (рисунок 6) с последующим их наложением на графики образцов, не подверженных лазерной обработке. В связи с отличием формы испытываемых образцов от рекомендуемой соответствующими

стандартами и особенностями конструкции захватов испытательной машины в процессе нагружения имело место значительное поверхностное деформирование материала образцов в зоне захватов и их взаимное проскальзывание друг относительно друга (рисунок 7), что особенно заметно сказалось на начальных участках диаграмм нагружения. Поэтому построение соответствующих зависимостей напряжений σ от деформаций ϵ не проводилось. Вместе с тем, для всех образцов на диаграммах σ (Δl) видна высокая повторяемость результатов испытаний, которая, на наш взгляд, позволяет сделать некоторые общие выводы.



а – партия № 1, б – партия № 2, с – партия № 3, д – партия № 4, е – партия № 5, ф – партия № 6
 Рисунок 6 – Зависимость возникающих в образцах напряжений (σ) от удлинения рабочей части образца (Δl)



Рисунок 7 – Деформирование материала образцов в зоне захватов (образец 3а)

Диаграммы зависимости возникающих в образцах напряжений (σ) от удлинения рабочей части образца (Δl) свидетельствуют о незначительном влиянии различных схем лазерной закалки и легирования на величину модуля упругости материала, так как изменение угла наклона начального участка диаграммы мало. Для всех обработанных образцов характерен невысокий уровень разрушающих деформаций. Разрушающие напряжения на образцовых образцах находятся в пределах 500–600 МПа и составляют примерно 70–90 % от предела прочности образцов, не подвергавшихся обработке. Наиболее высокий уровень разрушающих деформаций соответствует партии № 4. Предельная упругая нагрузка материала обработанных образцов повысилась, увеличив зону их упругой работы.

Таблица 2 – Некоторые показатели при испытании плоских образцов на статическое растяжение

Номер партии	Маркировка	Начальная площадь поперечного сечения, F_0 , мм ²	Максимальное усилие, P_{max} , Н	Перемещение захватов разрывной машины при максимальной нагрузке, мм	Временное сопротивление, σ_v , Н/мм ²
НО	1	140,00	95 210	23,92	680
	2		95 870	25,92	685
	3		95 716	26,40	684
1	а	140,00	76 280	7,85	545
	б		75 112	7,65	537
	в		73 992	7,35	529
2	а	140,00	83 606	12,69	597
	б		87 776	19,75	627
	в		82 972	12,58	593
3	а	140,00	71 060	7,75	508
	б		75 528	8,79	536
	в		76 526	8,30	547
4	а	140,00	84 814	6,27	606
	б		87 702	6,52	626
	в		83 946	6,21	600
5	а	140,00	77 902	7,13	556
	б		74 688	6,19	533
	в		76 486	6,91	546
6	а	140,00	75 760	6,92	541
	б		77 806	7,29	556
	в		75 984	7,53	543

Заключение

Проведены исследования влияния различных схем лазерной закалки и легирования излучением волоконного иттербиевого лазера на механические характеристики образцов из стали 40Х13. Результаты испытаний образцов на статическое растяжение указывают на хрупкое разрушение обработанных образцов. Разрушающие напряжения закаленных образцов уменьшились на 9–26 % со значительным снижением характеристик пластичности. Диаграммы растяжения не показали изменений модуля упругости материала образцов после лазерной обработки по сравнению с исходным материалом.

Список цитированных источников

- Братухин, А. В. Особенности лазерного упрочнения оснастки для серийного производства авиационного титанового крепежа / А. В. Братухин // *Технология машиностроения : обзор.-аналит., науч.-техн. и произв. журн. / Изд. центр "Технология машиностроения"*. – 2019. – № 5. – С. 25–29.
- Ярьско, С. И. Анализ стойкости и изнашивания твердосплавного инструмента после лазерной термообработки / С. И. Ярьско // *Известия Самарского науч. центра Российской академ. наук.* – 2001. – Т. 3, № 1. – С. 27–37.
- The Effects of Laser Surface Hardening on Microstructural Characteristics and Wear Resistance of AISI H11 Hot Work Tool Steel / M. Šebek, Ladislav Falat, F. Kováč, I. Petryshynets [et al.] // *Archives of Metallurgy & Materials.* – 2017. – Vol. 62. – P. 757–762.
- 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, Issue 7–8. – P. 619–625.
- Dry sliding friction wear behaviour of high power diode laser hardened steels and cast iron / K. Sridhar, V. A. Katkar, P. K. Singh, J. M. Haake // *Surface Engineering.* – 2007. – Vol. 23. – P. 129–141.
- On the laser quenching of the groove of the piston head in large diesel engines / Q. Liu, Y. Song, Y. Yang [et al.] // *Journal of Materials Engineering and Performance.* – 1998. – Vol. 7. – P. 402–406.
- Laser surface hardening of gray cast iron used for piston ring / J. H. Hwang, Y. S. Lee, D. Y. Kim, J. G. Youn // *Journal of Materials Engineering and Performance.* – 2002. – Vol. 11. – P. 294–300.

- The influence of laser hardening on wear in the valve and valve seat contact / T. Slatter, H. Taylor, R. Lewis, P. King // *Wear.* – 2009. – Vol. 267. – P. 797–806.
- Магин, Д. Ю. Исследование структуры и свойств высокопрочной теплостойкой стали после объемной термической обработки и лазерного поверхностного упрочнения / Д. Ю. Магин, С. В. Костромин // *Тр. Нижегородского гос. техн. ун-та им. П. Е. Алексеева.* – 2013. – № 4. – С. 256–261.
- 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.*
- Влияние лазерной закалки на микроструктуру и абразивную износостойкость стали 30ХГСА / Л. Е. Афанасьева, М. В. Новоселова, И. А. Барабанова, Г. В. Раткевич // *Металлы.* – 2020. – № 1. – С. 54–58.
- A quantitative analysis of the effect of laser transformation hardening on crack driving force in steels / B. Q. Yang, K. Zhang, G. N. Chen [et al.] // *Surface and Coatings Technology.* – 2006. – Vol. 201. – P. 2208–2216.
- Experimental studies on the microstructure and hardness of laser-treated steel specimens / J. Rana, G. L. Goswami, S. K. Jha [et al.] // *Optics and Laser Technology.* – 2007. – Vol. 39. – P. 385–393.
- Tianmin, S. Impact wear behavior of laser hardened hypoeutectoid 2Cr13 martensite stainless steel / S. Tianmin, H. Meng, T. H. Yuen // *Wear.* – 2003. – Vol. 255. – P. 444–455.
- Исследование влияния параметров процесса лазерной наплавки порошка стали 316L на структуру и механические свойства образцов / И. С. Логинова, Д. П. Быковский, С. В. Адиша [и др.] // *Технология легких сплавов.* – 2016. – № 4. – С. 5–11.
- Журавель, В. М. Лазерное армирование / В. М. Журавель // *РИТМ машиностроения.* – 2018. – № 5. – С. 34–35.
- Влияние режимов лазерной закалки на свойства стали 40Х13 / О. М. Мицирук, А. И. Веремейчик, О. Г. Девойно [и др.] // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 103–112. – DOI: 10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112.

18. 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. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: А. В. Чигарев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – Вып. 34. – С. 266–270.
19. Журавель, В. М. Лазерное армирование / В. М. Журавель // РИТМ машиностроения. – 2018. – № 5. – С. 34–35.
20. 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 // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – № 3. – P. 69–74. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-132-3-69-74.
21. Скойбеда, А. Т. Лазерное упрочнение зубчатых колес из высокопрочного чугуна / А. Т. Скойбеда, А. А. Калина, О. Г. Девойно // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Гос. науч. учреждение "Объедин. ин-т машиностроения Нац. акад. наук Беларуси"; [редкол. А. А. Дюжев (председатель) и др.]. – Вып. 8. – С. 289–293.
22. Закалка крупногабаритных деталей с использованием сканирующего излучения оптоволоконного лазера с программным изменением мощности / О. Г. Девойно, В. В. Жарский, А. П. Пилипчук, В. В. Рудый // Фотоника. – 2019. – Т. 3, № 6. – С. 524–530.
23. Геометрия однослойного покрытия при лазерной наплавке с поперечным сканированием / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, Н. И. Луцко, Л. И. Пилецкая // Актуальные проблемы прочности: матер. Междунар. науч. конф., Витебск, 23–27 мая 2022 г. / под ред. В. В. Рубаника, – Минск: УП "ИВЦ Минфина", 2022. – С. 48–50.
10. Devojno, O. G. Obespechenie resursnyh parametrov otvetstvennyh elementov mekhanicheskikh transmissij s ispol'zovaniem poverhnostnyh sloev, formiruemyh lazernymi tekhnologiyami / O. G. Devojno, I. V. SHvec // Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: Mezhdunar. nauch.-tekhn. sb. / Belorusskij nac. tekhn. un-t; redkol.: A. V. CHigarev (pred. redkol.). – Minsk: BNTU, 2019. – Vyp. 34. – S. 266–270.
11. Vliyanie lazernoj zakalki na mikrostrukturu i abrazivnyuyu iznosostojkost' stali 30HGSA / L. E. Afanas'eva, M. V. Novoselova, I. A. Barabonova, G. V. Ratkevich // Metally. – 2020. – № 1. – S. 54–58.
12. A quantitative analysis of the effect of laser transformation hardening on crack driving force in steels / B. Q. Yang, K. Zhang, G. N. Chen [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2006. – Vol. 201. – P. 2208–2216.
13. Experimental studies on the microstructure and hardness of laser-treated steel specimens / J.Rana, G. L. Goswami, S. K. Jha [et al.] // Optics and Laser Technology. – 2007. – Vol. 39. – P. 385–393.
14. Tianmin, S. Impact wear behavior of laser hardened hypoeutectoid 2Cr13 martensite stainless steel / S.Tianmin, H. Meng, T. H. Yuen // Wear. – 2003. – Vol. 255. – P. 444–455.
15. Issledovanie vliyaniya parametrov processa lazernoj naplavki poroshka stali 316L na strukturu i mekhanicheskie svojstva obrazcov / I. S. Loginova, D. P. Bykovskij, S. B. Adisa [i dr.] // Tekhnologiya legkih splavov. – 2016. – № 4. – S. 5–11.
16. ZHuravel', V. M. Lazernoe armirovanie / V. M. ZHuravel' // RITM mashinostroeniya. – 2018. – № 5. – S. 34–35.
17. Vliyanie rezhimov lazernoj zakalki na svojstva stali 40H13 / O. M. Mishchiruk, A. I. Veremeichik, O. G. Devojno [i dr.] // Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk. – 2023. – T. 68, № 2. – S. 103–112. – DOI: 10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112.
18. Devojno, O. G. Obespechenie resursnyh parametrov otvetstvennyh elementov mekhanicheskikh transmissij s ispol'zovaniem poverhnostnyh sloev, formiruemyh lazernymi tekhnologiyami / O. G. Devojno, I. V. SHvec // Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: Mezhdunar. nauch.-tekhn. sb. / Belarus. nac. tekhn. un-t; redkol.: A. V. CHigarev (pred. redkol.) [i dr.]. – Minsk: BNTU, 2019. – Vyp. 34. – S. 266–270.
19. ZHuravel', V. M. Lazernoe armirovanie / V. M. ZHuravel' // RITM mashinostroeniya. – 2018. – № 5. – S. 34–35.
20. 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 // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – № 3. – P. 69–74. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-132-3-69-74.
21. Skojboda, A. T. Lazernoe uprochnenie zubchatyh koles iz vysokoprochnogo chuguna / A. T. Skojboda, A. A. Kalina, O. G. Devojno // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya: sb. nauch. tr. / Gos. nauch. uchrezhdenie "Ob"edin. in-t mashinostroeniya Nac. akad. nauk Belarusi"; [redkol. A. A. Dyuzhev (predsedatel') i dr.]. – Vyp. 8. – S. 289–293.
22. Zakalka krupnogabaritnyh detalej s ispol'zovaniem skaniruyushchego izlucheniya optovolokonного лазера s programmym izmeneniem moshchnosti / O. G. Devojno, V. V. ZHarskij, A. P. Pilipchuk, V. V. Rudyj // Fotonika. – 2019. – T. 3, № 6. – S. 524–530.
23. Geometriya odnoslojnogo pokrytiya pri lazernoj naplavke s poperechnym skanirovaniem / O. G. Devojno, M. A. Kardapolova, N. I. Lucko, L. I. Pileckaya // Aktual'nye problemy prochnosti: mater. Mezhdunar. nauch. konf., Vitebsk, 23–27 maya 2022 g. / pod red. V. V. Rubanika, – Minsk: UP "IVC Minfina", 2022. – S. 48–50.

References

1. Bratuhin, A. V. Osobennosti lazernogo uprochneniya osnastki dlya serijnogo proizvodstva aviacionnogo titanovogo krepzha / A. V. Bratuhin // Tekhnologiya mashinostroeniya: obzor.-analit., nauch.-tekhn. i proizv. zhurn. / Izd. centr "Tekhnologiya mashinostroeniya". – 2019. – № 5. – S. 25–29.
2. Yares'ko, S. I. Analiz stojkosti i iznashivaniya tverdospavnogo instrumenta posle lazernoj termoobrabotki / S. I. Yares'ko // Izvestiya Samarskogo nauch. centra Rossijskoj akad. nauk. – 2001. – T. 3, № 1. – S. 27–37.
3. The Effects of Laser Surface Hardening on Microstructural Characteristics and Wear Resistance of AISI H11 Hot Work Tool Steel / M. Šebek, Ladislav Falat, F. Kováč, I. Petryshynets [et al.] // Archives of Metallurgy & Materials. – 2017. – Vol. 62. – P. 757–762.
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, Issue 7–8. – P. 619–625.
5. Dry sliding friction wear behaviour of high power diode laser hardened steels and cast iron / K. Sridhar, V. A. Katkar, P. K. Singh, J. M. Haake // Surface Engineering. – 2007. – Vol. 23. – P. 129–141.
6. On the laser quenching of the groove of the piston head in large diesel engines / Q. Liu, Y. Song, Y. Yang [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. – 1998. – Vol. 7. – P. 402–406.
7. Laser surface hardening of gray cast iron used for piston ring / J. H. Hwang, Y. S. Lee, D. Y. Kim, J. G. Youn // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2002. – Vol. 11. – P. 294–300.
8. The influence of laser hardening on wear in the valve and valve seat contact / T. Slatter, H. Taylor, R. Lewis, P. King // Wear. – 2009. – Vol. 267. – P. 797–806.
9. Magin, D. YU. Issledovanie struktury i svojstv vysokoprochnoj teplostojkoj stali posle ob"emnoj termicheskoj obrabotki i lazernogo poverhnostnogo uprochneniya / D. YU. Magin, S. V. Kostromin // Tr. Nizhegorodskogo gos. tekhn. un-ta im. R. E. Alekseeva. – 2013. – № 4. – S. 256–261.

Материал поступил 11.02.2025, одобрен 22.02.2025, принят к публикации 03.03.2025