

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тягунов, О. А. Математические модели и алгоритмы управления промышленных транспортных роботов / О. А. Тягунов// Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2013. – Т. 5, № 5. – С. 69.
2. Околов, А. Р. Программное обеспечение промышленных роботов: учебно-методическое пособие для студентов учреждений высшего образования по специальностям 1-53 01 01 "Автоматизация технологических процессов и производств", 1-54 01 06 "Промышленные роботы и робототехнические комплексы" / А. Р. Околов, Ю. Н. Матрунчик; Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, Кафедра "Робототехнические системы". – Минск: БНТУ, 2021. – 65, [1] с.: ил., табл. – Режим доступа : <https://rep.bntu.by/handle/data/91428>.

УДК 621.7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ НА ВРЕМЕННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СТАЛИ 40X13

*Мищирук О. М., Нерода М. В., Веремейчик А. И., Холодарь Б. Г.*

*Брестский государственный технический университет,*

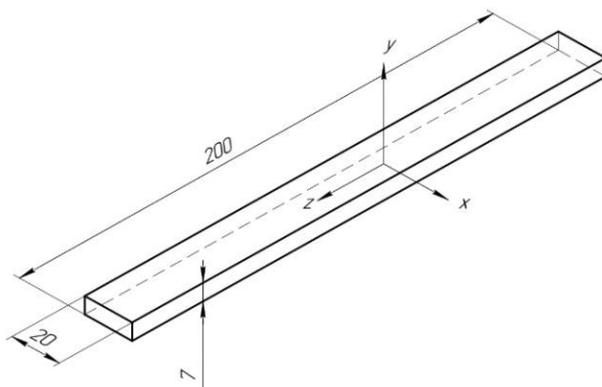
*г. Брест, Республика Беларусь*

В настоящее время сталь является основным конструкционным материалом, т. к. обладает высокими эксплуатационными характеристиками и соответствует многим экономическим требованиям. Возможность улучшения эксплуатационно-технических свойств стали за счет применения современных упрочняющих технологий является важным ее достоинством, как конструкционного материала [1]. Современные методы поверхностной обработки (плазма, ионные пучки, электронные и лазерные лучи) ориентированы на придание повышенных физико-механических характеристик поверхностному слою при сохранении неизменными свойств основного металла детали [2, 3]. Такие преимущества сфокусированного лазерного излучения, как бесконтактность и локальность теплового воздействия, минимальная зона термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения, снижение уровня остаточных напряжений, сведение к минимуму коробления, повышение дисперсности структуры и т. д., обуславливают частое применение лазерных технологий поверхностной обработки в качестве замены традиционных методов термической обработки [4].

С целью исследований влияния режимов лазерной поверхностной обработки на прочностные характеристики стали 40X13 были испытаны 18 образцов на статическое растяжение. Образцы были изготовлены при помощи водной резки и имеют размеры 7x20x200 мм (рисунок 1) [5]. Перед испытаниями образцы подвергались лазерной поверхностной обработке волоконным иттербиевым лазером мощностью 1 кВт при пяти различных режимах обработки (таблица 1). Данный вид лазера был выбран в связи с тем, что излучение с длиной волны порядка 1 мкм лучше взаимодействует с поверхностью металла по сравнению с излучением

ем CO<sub>2</sub>-лазеров, что в свою очередь повышает эффективность заковки [6]. Обработка при одном и том же режиме применялась к трем образцам одной партии, а также три образца не подвергались термической обработке. На поверхность наносились лазерные дорожки в продольном направлении образцов с двух сторон, количество которых зависело от размеров лазерного пятна.

В процессе изготовления и термообработки образцы были деформированы в продольном направлении, в результате чего незначительно изменилась форма поперечного сечения, в связи с чем их размеры получили отклонения от исходных размеров. Но так как объем материала образцов не изменился, то для последующих расчетов временного сопротивления площадь поперечного сечения обработанных образцов принималась такой же, как и у необработанных и равной 141,4 мм<sup>2</sup>.



*Рисунок 1 – Габаритные размеры образцов*

Таблица 1 – Режимы лазерной обработки

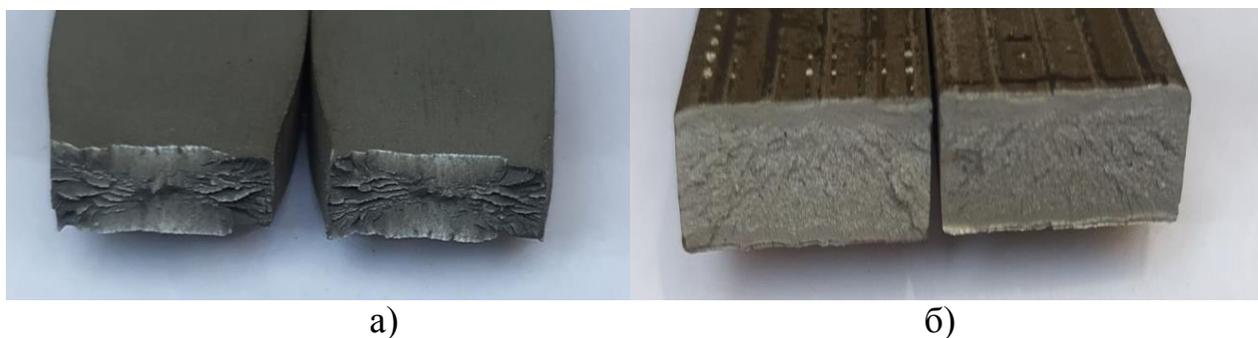
Пятно сканирования, мм	Скорость сканирования, мм/мин	Номер образца	Мощность лазера, кВт
400x225 (4x2,25) 7 дорожек	500	1а, 1б, 1в	1
	700	2а, 2б, 2в	
	1000	3а, 3б, 3в	
300x300 (3x3) 10 дорожек	700	4а, 4б, 4в	
400x225 (4x2,25) 7 дорожек		5а, 5б, 5в	

Для деталей, работающих на растяжение (сжатие), заковка должна обеспечивать полную прокаливаемость по сечению, но так как глубина зоны лазерной обработки невелика (доли миллиметра) и мала по сравнению с толщиной детали, то по глубине зоны обработки напряжение в нагруженной детали изменяется мало, его градиентом можно пренебречь, и поэтому допускаем, что оценку работоспособности детали можно проводить на примере однородного растяжения по всему ее объему. Для определения прочностных характеристик образцы испытывались на статическое растяжение согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» и проводились на разрывной машине ИР 5145-500-11 при нагружении со скоростью 5 мм/мин (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Испытания образцов материала на растяжение**

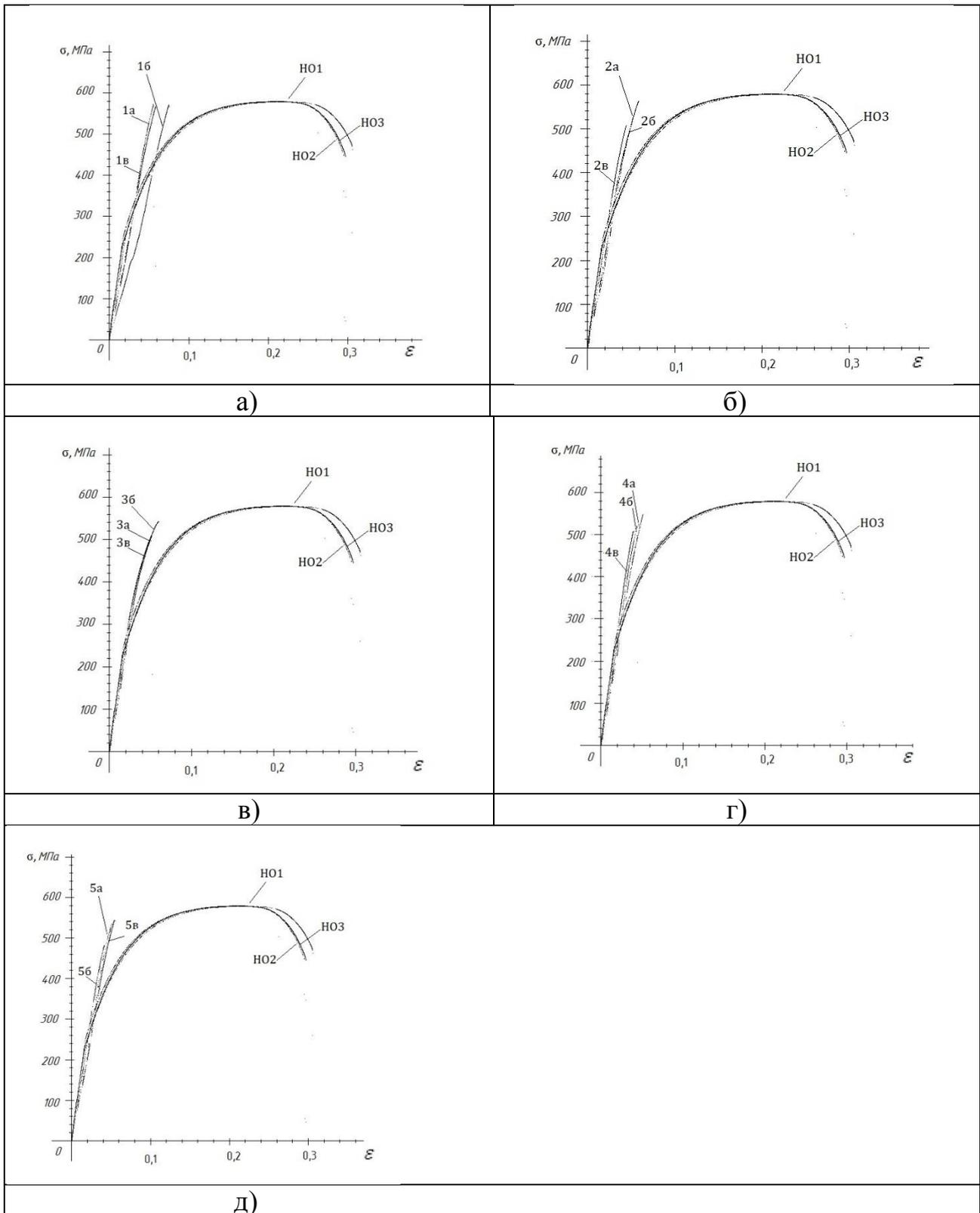
Испытания на статическое растяжение необработанных образцов (НО) происходили как для вязких металлов с образованием «шейки», уменьшением площади поперечного сечения и увеличением длины. Их разрушение произошло в пределах расчетной длины. Испытания термообработанных образцов носили хрупкий характер. Имели место небольшие деформации без образования «шейки». Все испытанные образцы разрушились по сечениям, перпендикулярным направлению растягивающей нагрузки. Плоскость разрушения всех нетермообработанных образцов перпендикулярна к поверхности образца и по толщине в ее структуре выражены три участка – средний и два поверхностных (рисунок 3), что свидетельствует о значительном наклепе поверхностных слоев.



*а) – НО2; б) – 1в*  
**Рисунок 3 – Сечения разрушенных образцов**

Хрупкое разрушение закаленных образцов произошло по границам зерен или плоскостям легкого скольжения внутри зерен. Хрупкий излом имеет зернистый рельеф, состоит из множества блестящих граней. Такой характер разрушения можно объяснить возникновением в образце зон измененной структуры исходного материала, которые оказывают влияние на локальное напряженно-деформированное состояние материала в своей окрестности. Их разрушение произошло как в пределах расчетной длины, так и за ее пределами, и у зажимов.

По результатам проведенных испытаний были построены зависимости напряжений, возникающих в образцах ( $\sigma$ ), от деформации ( $\varepsilon$ ) (рисунок 4). Для сравнения графиков выполнено их наложение на графики образцов, не подвергаемых лазерной обработке.



а) – партия № 1; б) – партия № 2; в) – партия № 3;  
 г) – партия № 4; д) – партия № 5

**Рисунок 4 – Зависимость  $\sigma$  от  $\epsilon$  образцов**

Анализ диаграмм растяжения показал незначительное влияние лазерной обработки на величину модуля упругости материала. Следует отметить значительное повышение предела текучести термообработанного материала по срав-

нению с необработанным. В ходе испытаний было определено временное сопротивление (таблица 2) для каждого образца, т. к. конструктору данный параметр необходим для определения размеров детали, а технологу – для назначения режимов обработки.

Результаты проведенных экспериментов указывают на хрупкое разрушение термообработанных образцов вследствие наличия горячих трещин от дорожек, возникших из-за больших скоростей нагрева и охлаждения. Временное сопротивление закаленных образцов из партий № 2–5 уменьшилось на 5...20 % с заметным снижением характеристик пластичности, но для образцов из партии № 1 оно незначительно увеличилось. Данный эффект предположительно связан с большей прокаливаемостью вследствие меньшей скорости термической обработки. Диаграммы растяжения показали незначительное изменение модуля упругости образцов после лазерной обработки по сравнению с необработанными.

Таблица 2 – Некоторые характеристики при испытании плоских образцов

Марка	Номер плавки	Маркировка	Временное сопротивление, $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %	Марка	Номер плавки	Маркировка	Временное сопротивление, $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
необработанные	НО	1	578,99	21,27	4x2,25 (7 дорожек) 700 мм/мин	2	а	569,94	1,29
		2	579,28	21,52			б	525,25	0,71
		3	579,07	21,52			в	522,98	1,71
4x2,25 (7 дорожек) 1000 мм/мин	3	а	524,26	1,57	4x2,25 (7 дорожек) 700 мм/мин	5	а	540,95	–
		б	556,65	2,57			б	487,34	0,86
		в	523,48	2,57			в	547,45	1,14
4x2,25 (7 дорожек) 500 мм/мин	1	а	594,70	1,29	3x3 (10 дорожек) 700 мм/мин	4	а	562,09	0,57
		б	577,30	1			б	536,99	–
		в	584,23	1			в	514,64	0,71

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мищирук, О. М. Особенности лазерного упрочнения сталей / О. М. Мищирук, М. В. Нерода, А. И. Веремейчик // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 55-летию Брест. гос. техн. ун-та, Брест, 29–30 сент. 2021 г. / Брест. гос. техн. ун-т – Брест : Изд-во БрГТУ, 2021. – С. 121–124.

2. Андрияхин, В. М. Расчет поверхностной закалки железоуглеродистых сплавов с помощью технологических CO<sub>2</sub>-лазеров непрерывного действия / В. М. Андрияхин, В. С. Майоров, В. П. Якунин // Поверхность: Физика, химия, механика. – 1983. – № 6. – С. 140–147.

3. Веремейчик, А. И. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий / А. И. Веремей-

чик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки : междунар. сб. науч. тр. / Бел. гос. ун-т транспорта. – Гомель, 2008. – Вып. 2. – С. 6–12.

4. Использование лазерных технологий упрочнения в сельскохозяйственном машиностроении / В. С. Голубев [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / Гос. науч. учреждение "Физико-технич. ин-т НАН Беларуси" ; редколлегия: А. В. Белый (главный редактор) [и др.]. – Минск, 2018. – Кн. 2: Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. С. 58–65.

5. Металлы. Методы испытаний на растяжение: ГОСТ 1497 – 84. – Взамен ГОСТ 1497 – 73; введ. 1986 – 01 – 01. – М. : Стандартиформ, 2008. – 26 с.

6. Девойно, О. Г. Моделирование поверхностной закалки с использованием сканирующего оптоволоконного лазера / О. Г. Девойно, В. В. Жврский, А. П. Пилипчук // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – Минск, 2018. – Т. 63, №4 – С. 435–443.

УДК 678.01

## **ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ**

***Овчинников Е. В.<sup>1</sup>, Хвисевич В. М.<sup>2</sup>, Жуков Ю. А.<sup>1</sup>, Веремейчик А. И.<sup>2</sup>,  
Онысько С. Р.<sup>2</sup>, Григорьева Т. Ф.<sup>3</sup>, Кочнева А. Ю.<sup>1</sup>***

*1) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,  
г. Гродно, Республика Беларусь*

*2) Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь*

*3) Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация*

Проведенный анализ литературных источников посвященный различным аспектам создания механоактивированных низкоразмерных частиц и композитов на их основе, свидетельствует о существовании значительных пробелов в области теоретического описания особенностей строения, структуры и свойств наноразмерных механоактивированных систем. Это обусловлено в большей степени тем, что в материаловедении, физике твердого тела существуют подходы, заключающиеся в применении классических представлений, принятых в физике твердого тела для анализа объектов, находящихся на границе раздела между молекулярными агрегатами и микрочастицами с характерными свойствами макроструктур. Показательными в этом отношении являются общепринятый в механохимическом материаловедении подход, согласно которому ультрамалые частицы по эффективности модифицирующего действия на окружающую среду делят на инертные и активные. Однако экспериментально установлено, что возможно изменение как состава, так и структуры данных низкоразмерных объектов, что может приводить к инверсии активности частиц,