

## Преимущества технологии лазерного термоупрочнения лемеха лесного плуга из стали 65Г

Б.Е. Луканин<sup>1, 2a</sup>, М.И. Голубев<sup>1b</sup>

<sup>1</sup> Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 1-я Институтская, 1, Мытищи, Россия

<sup>2</sup> ООО НТО «ИРЭ-Полус», пл. Введенского, 3, стр. 5, Фрязино, Россия

<sup>a</sup> boris.lukanin@yandex.ru, <sup>b</sup> golubevmi@bmstu.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0009-0008-8277-0688>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0004-9577-3264>

Статья поступила 16.08.2024, принята 20.09.2024

*В представленной статье исследуется возможность применения технологии лазерного термоупрочнения и сравнение ее с другими методами повышения прочностных и эксплуатационных характеристик лемехов плугов специального назначения (лесных плугов) из низколегированной высокоуглеродистой стали 65Г. Было выявлено, что одним из ключевых факторов, влияющих на производительность и долговечность эксплуатируемого в лесном хозяйстве оборудования, является конструкция лемеха, который считается важной составляющей одного из рабочих органов почвообрабатывающих машин — лесного плуга. Для достижения максимальной эффективности в процессе обработки почвы лесным плугом необходимо обеспечить равномерное распределение износа по всей поверхности режущей части лемеха, что позволит сохранить его исходную форму и тем самым увеличить срок службы лемеха и рабочего органа в целом. Проведенный анализ научных публикаций по исследуемой теме позволил выделить, по мнению авторов, наиболее перспективный метод повышения твердости и, как следствие, износостойкости, который может существенно продлить срок службы и повысить производительность оборудования — это термическая обработка деталей рабочих органов. Изучены доступные на данный момент способы термического упрочнения и проведен их сравнительный анализ. Поверхностная закалка проводится путем нагрева поверхности лемеха до определенной температуры и последующего быстрого охлаждения в разных закалочных средах, что приводит к образованию на поверхности закаленного слоя с высокой твердостью и износостойкостью. Авторами статьи был проведен эксперимент, в ходе которого образцы из стали 65Г закалили двумя различными способами — объемным нагревом в печи с охлаждением в воде и масле с последующим среднетемпературным отпускком и нагревом поверхности при помощи лазерного излучения с тремя разными траекториями движения лазерного луча. Проведен сравнительный анализ полученных результатов.*

**Ключевые слова:** лазерное термоупрочнение; лемех; обработка поверхности; сталь 65Г.

## Advantages of laser heat strengthening technology for a forest plow plowshare made of 65G steel

B.E. Lukanin<sup>1, 2a</sup>, M.I. Golubev<sup>1b</sup>

<sup>1</sup> Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University; 1, 1st Institutskaya St., Mytishchi, Russia

<sup>2</sup> Scientific and Technical Society "IRE-Polyus" LLC; Building 5, 3, Vvedensky Sq., Fryazino, Russia

<sup>a</sup> boris.lukanin@yandex.ru, <sup>b</sup> golubevmi@bmstu.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0009-0008-8277-0688>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0004-9577-3264>

Received 16.08.2024, 2024, accepted 20.09.2024

*The presented article explores the possibility of using laser thermal hardening technology to improve the strength and performance characteristics of plowshares made of low-alloy high-carbon steel 65G. It is revealed, that one of the key factors influencing the productivity and durability of equipment used in forestry is the design of a plowshare, which is considered an important component of one of the working bodies of tillage machines – a forest plow. To achieve maximum efficiency in the process of tillage with a forest plow, it is necessary to ensure an even distribution of wear over the entire surface of the cutting part of the plowshare, which will preserve its original shape and thereby increase the service life of the plowshare and the working body as a whole. The analysis of scientific publications on the topic under study makes it possible to identify the most promising method of increasing hardness, and as a result, wear resistance, which can significantly extend the service life and increase the productivity of equipment – this is the heat treatment of parts of working bodies. The currently available methods of thermal hardening have been studied and their comparative analysis has been carried out. Surface hardening is carried out by heating the share to a certain temperature and subsequent rapid cooling, which leads to the formation of a hardened layer on the surface with high hardness and wear resistance. An experiment is conducted in which samples made of 65G steel were tempered in two different ways: by volumetric heating in a furnace with cooling in water and oil, followed by medium-temperature tempering and heating of the surface using laser radiation with three different trajectories of the laser beam. A comparative analysis of the obtained results is carried out.*

**Keywords:** laser heat strengthening; plowshare; surface treatment, steel 65G.

**Введение.** Эволюция и развитие технологических процессов в современном мире дает возможность во многих сферах экономики использовать инновационное оборудование, которое помогает не только снизить энергозатраты, но и повысить эффективность производства. В сельском и лесном хозяйстве все чаще используются роботизированная техника и современные цифровые технологии. Тем не менее, обработка почвы остается одной из самых энергозатратных и ресурсоемких статей расходов предприятий лесотехнического комплекса. Традиционно, в лесном хозяйстве для обработки почвы используют лемешные плуги специального назначения, у которых режущие рабочие органы, лемеха, подлежат активному абразивному износу.

Лемех принимает на себя 50–60 % тягового сопротивления корпуса плуга, за счет чего быстро приходит в негодность. Скорость абразивного износа при этом составляет от 5 до 400 мкм/ч. По некоторым данным, при значениях износа лемеха до 5–7 мм (по толщине) неравномерность глубины вспашки достигает 62–68 %, а тяговое сопротивление увеличивается до 153–156 %, при этом расход горючего возрастает до 125–138 %, а производительность пахотных агрегатов падает до 52–59 % [1].

По статистическим данным предприятий лесопромышленного комплекса, для ремонта или замены одного рабочего органа требуется от 15 мин до нескольких часов. Это значит, что фактический общий ущерб от вынужденного простоя оборудования может превышать стоимость поврежденных деталей в несколько раз.

Поэтому в последнее время актуальным является вопрос увеличения срока службы рабочих органов почвообрабатывающих машин. При этом рассмотрением и изучением данного вопроса занимались многие известные ученые, такие как С.А. Соловьев, В.П. Лялякин, С.А. Сидоров, А.Т. Канаев, Н.Н. Кравченко, М.Н. Ерохин, П.А. Тополянский, В.С. Новиков, А.Е. Балановский, П.А. Киселев, В.А. Коротков, И.Н. Шило и др. [2–14].

В работах данных авторов представлены исследования, изучающие вопрос снижения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин. Повышение срока службы агрегата в целом, а также отдельных его деталей, например, лемехов лесных плугов, приводит к уменьшению количества трудочасов, затрачиваемых на замену тех или иных изношенных компонентов. Простои, возникающие при нахождении техники в зоне ремонта, приводят не только к снижению эффективности деятельности предприятия, но и к нарушению агротехнических сроков, что, в свою очередь, неизбежно приводит к потере прибыли предприятием.

Стоит отметить, что тяжелые условия эксплуатации лемехов (знакопеременные нагрузки, удары, абразивный износ, коррозия) приводят к быстрому затуплению режущих кромок, изменениям формы и размеров изделия, что в итоге влечет сокращение срока службы, увеличение времени и трудоемкости обслуживания почвообрабатывающих механизмов и в

результате снижает экономическую эффективность обработки почвы.

При эксплуатации лесных плугов почва является абразивным материалом для рабочих органов почвообрабатывающих машин. Значения абразивности почвы зависят от района возделывания. При этом, как показывает множество исследований, абразивность почвы может различаться даже в пределах одного района вспашки.

В большинстве случаев причинами отказов рабочих органов почвообрабатывающих машин при вспашке являются абразивность и твердость почвы. Основными агентами износа рабочих органов являются твердые минеральные частицы кварца и гранита, составляющие примерно 36,6–70,8 % почвы. Затем по степени распространения идут полевой шпат и слюда, а также другие минералы [15]. Соприкосновение деталей корпуса с частицами почвы различной дисперсности, абразивности и твердости приводит к изменению первоначальной формы и размеров плуга, что, в свою очередь, влечет за собой ускорение времени износа.

При этом, как показывают данные различных исследователей, почти 70 % потерь приходится на механические повреждения (15 %) и износ (55 %) [16].

Значит, чем меньше износ лемеха, тем большее количество почвы может обработать плуг, на котором он закреплен. Т. е., одной из важных характеристик лемеха является его стойкость к износу, в нашем случае к абразивному.

Понятие износа в различных сферах практического применения трибологических систем трактуется по-разному. В рамках данной статьи предложено рассматривать износ как разрушение и отделение материала, приведшего к изменению размеров и формы тела, а также к потере его массы в результате трения. При этом важно учитывать, что в данном случае износ является не характеристикой материала, из которого изготовлена деталь, а характеристикой трибологической системы, которая образуется в результате симбиоза трущегося тела (лемеха) и внешней среды (почвы).

Как правило, выход детали из строя возникает в результате ее износа, при этом преждевременный выход детали из строя чаще всего возникает в результате неравномерного износа.

Таким образом, основным способом снижения уровня потерь работоспособности и увеличения ресурса, а также повышения эффективности использования является наличие такого лемеха, у которого за счет сохранения исходной формы в ходе эксплуатации, износ лезвия будет распределен максимально равномерно по всей площади детали.

Как уже отмечалось выше, при работе лесного плуга в абразивной среде все его детали испытывают значительные динамические нагрузки. Находящиеся в земле твердые частицы в виде корней, камней либо иных почвенных уплотнений приводят к возрастанию нагрузки на лемех в несколько раз по сравнению со значениями, указанными для условий оптимальной эксплуатации. Из этого следует, что снижение износа лемеха ведет к увеличению

количества и улучшению качества обработки почвы. Таким образом, устойчивость к воздействию абразивности и твердости почвы является важнейшей ключевой характеристикой лемехов, и, соответственно, материал изготовления также должен обладать высокой износостойкостью [7; 8].

**Объекты и материалы исследования.** Как правило, лемеха производят из низколегированных, реже из легированных сталей. Из исследований, проведенных М.Н. Ерохиным и В.С. Новиковым, следует, что стали марки 45, Л53 и 65Г по таким характеристикам, как износостойкость и прочность, значительно уступают маркам 40ХС и 40Х [8; 9]. Более низкий уровень износостойкости и прочности низколегированных сталей по сравнению с легированными объясняется различным содержанием в их составе углерода и хрома.

Однако в основном лемеха производятся из стали марок 45, Л53 и 65Г. Это обусловлено тем, что стоимость стали данных марок значительно ниже стоимости легированных сталей (40ХС и 40Х) [10]. Для исследования в рамках данной статьи мы остановили свой выбор на стали марки 65Г, так как она является довольно распространенной при изготовлении лемехов. Низколегированная сталь 65Г является рессорно-пружинной, которая в своем составе имеет среднее содержание углерода 0,65 % с 1%-ным добавлением марганца. В соответствии с основной характеристикой в названии стали, она используется, в первую очередь, для создания пружин и рессор. Кроме того, применяется в машиностроении для создания деталей и компонентов, которые подвергаются высоким механическим нагрузкам, например, валы, шестерни, подшипники и шарниры. Обладает высокой твердостью, которая позволяет лемеху даже при существенных нагрузках не сломаться и не разрушиться.

Состав стали 65Г и ее основные характеристики, такие как твердость и износостойкость, соответствуют ГОСТ 14959-2016 «Межгосударственный стандарт. Металлопродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали. Технические условия».

Чтобы определить зависимость относительной износостойкости стали от указанных выше параметров, можно воспользоваться корреляционным уравнением:  $\varepsilon = 0,24X_1 + 0,07X_2 + 0,11X_3 - 3,54$ , где  $\varepsilon$  — относительная износостойкость стали;  $X_1$  — содержание углерода, %;  $X_2$  — содержание хрома, %;  $X_3$  — твердость, *HRC* [17].

Из данного уравнения следует, что рост износостойкости возрастает прямо пропорционально твердости материала. Это означает, что твердость является крайне важным показателем при выборе материала и при его обработке, а также в процессе эксплуатации лемехов лесных плугов.

Анализ результатов исследований, полученных авторами работ, позволяет выделить три основных метода, которые обеспечивают сокращение износа и повышение срока эксплуатации лемехов (табл. 1).

**Таблица 1.** Основные методы повышения износостойкости

Инновационный метод
1. Применение износостойких материалов при изготовлении лемеха
Реновационные методы
2. Применение износостойких покрытий 3. Термическая обработка или армирование поверхности лемеха

В современных условиях необходимо отдавать предпочтение реновационным методам как наиболее эффективным по стоимостным показателям и оперативности выполнения работ. В рамках данной работы рассмотрим один из реновационных методов — метод термической обработки поверхности лемеха.

Существует ряд технологий, упрочняющих детали машин с помощью воздействия высоких температур — термоупрочнение или объемная закалка. Проведенный анализ научных публикаций по исследуемой теме позволил выделить, по мнению авторов статьи, наиболее перспективный метод повышения износостойкости — это термическая обработка поверхности лемеха [18].

Для упрочнения плужных лемехов чаще всего используют несколько видов термоупрочнения (закалки): электродуговую (плазменную), газоплазменную, объемную, индукционную и лазерную, что позволяет получить на рабочей поверхности детали упрочненный слой с необходимыми параметрами.

**Методика исследования.** В 2023 г. в производственных условиях ООО НТО «ИРЭ-Полнос» (Фрязино, Московская обл.), ведущего мирового производителя лазерного оборудования, авторами статьи совместно с сотрудниками кафедры ЛТ4 Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана и при участии специалистов предприятия был выполнен комплекс исследований и экспериментов по термической обработке образцов из стали 65Г с использованием двух разных технологий с целью сравнения и выявления наиболее эффективного способа термоупрочнения лемеха лесного плуга:

- объемная закалка в печи с последующим отпуском;
- поверхностное термоупрочнение лазерным лучом.

Для проведения эксперимента горячекатаный стальной лист 65Г размером 600×1000 мм и толщиной 4 мм разрезали на 30 образцов прямоугольной формы размером 60×300 мм. Далее образцы разделили на 2 группы: часть образцов закалили методом объемного нагрева и охлаждением в воде и масле с последующим отпуском, а часть обработали лазерным излучением.

Образцы, упрочняемые по уже ставшей классической технологии объемной закалки с последующим отпуском, в свою очередь, разделили на 2 подгруппы по выбору среды охлаждения, вода или масло. Нагрев до нужной температуры, а также до температуры отпуска проводили в электропечи СНОЛ-2.2,5.2/12,5-И1. Сначала образцы из стали 65Г в течении 15–20 мин нагревали до температуры 840 °С

После этого часть образцов быстро охлаждали в воде, а часть — в масле. Затем образцы вновь нагревали в течение 60–120 мин до температуры 400 °С. После этого охлаждали на воздухе, проводя таким образом операцию отпуска. Структура стали 65Г при нагреве до 840 °С переходит в аустенит, а в дальнейшем, при быстром охлаждении, в мартенсит закалки. При этом материал становится твердым и хрупким, с сильными внутренними напряжениями. При дальнейшей термообработке среднетемпературным (средним) отпуском структура мартенсита закалки переходит в троостит отпуска, и получается сталь с высоким пределом упругости и повышенными значениями вязкости.

Далее образцы были порезаны на более мелкие части для изготовления шлифов и проведения исследования на микротвердость. Внешний вид образцов, подготовленных к исследованию на микротвердость, представлен на рис. 1.



Рис. 1. Образцы из листового металлопроката стали 65Г для исследования микротвердости

Вторую группу образцов упрочнили при помощи лазерного луча. Для обработки образцов при помощи лазерного излучения автором эксперимента были выбраны три различных оптических режима перемещения лазерного луча:

- линейный режим (траектория движения — зигзаг);
- круговой режим (траектория движения — витая пружина);
- режим «круглое пятно» (траектория движения прямая, без колебаний, в 2 прохода).

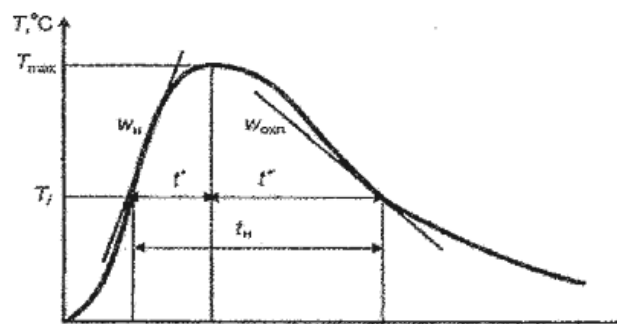
Для лазерного упрочнения было отобрано 12 образцов, поделенных на группы. Количество групп соответствовало количеству режимов движения лазера, таким образом, были сформированы три группы, по 4 образца в каждой. Затем образцы в каждой группе были дополнительно разделены на 2 подгруппы. Деление образцов на подгруппы связано с различной средой охлаждения образцов после лазерной обработки. Для охлаждения первой подгруппы средой охлаждения являлся воздух, для второй — вода.

Подбор мощности лазера автором исследования выбирался экспериментальным путем, с учетом отличительных особенностей термических циклов, характерных для лазерной обработки (рис. 2).

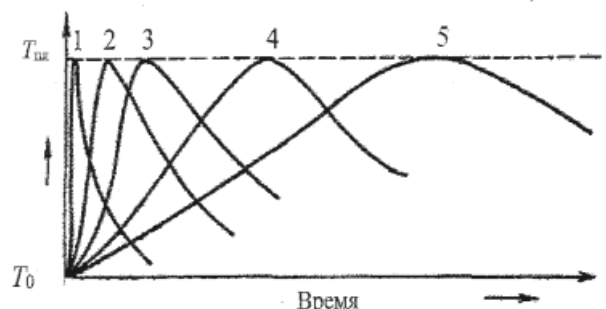
Скорость охлаждения при объемной закалке, при которой аустенит превращается в мартенсит, составляет примерно  $10^2$  °С/с, при индукционной закалке —  $10^2 \dots 10^3$  °С/с, при лазерной —  $10^4 \dots 10^5$  °С/с, т. е. на два порядка выше. Кроме того, на скорость охлаждения также влияют теплоемкость материала и масса детали.

Таким образом, высокие скорости нагрева при лазерной закалке и малые объемы нагрева поверхностного слоя приводят к высоким скоростям охлаждения и образованию фаз с мелкодисперсной структурой. Высокие скорости охлаждения приводят к более высокой дисперсности структуры и, соответственно, к повышению износостойкости поверхностного слоя [19].

Из графика, характеризующего общий вид термических циклов различных источников энергии (рис. 2), следует, что лазерные источники световой (тепловой) энергии обладают более «жесткими» термическими циклами по сравнению с термическими циклами других, в том числе концентрированных источников энергии.



а)



б)

Рис. 2. Характерный вид и основные параметры (а) термических циклов термообработки в зависимости от вида поверхностных источников нагрева (б): 1 — лазерный; 2 — плазменный; 3 — электродуговой; 4 — индукционный; 5 — при электрошлаковой сварке [14];  $T_{max}$  — максимальная температура нагрева;  $T_i$  — температура интенсивного роста зерна аустенита;  $t^i$  — температура нагрева;  $t^{ii}$  — температура охлаждения; мгновенные скорости нагрева ( $W_n$ ) и охлаждения ( $W_{охл}$ );  $t_n$  — время воздействия температуры  $T_i$  при термообработке

Поэтому после предварительного прохождения лазерного луча внимательно осматривали каждый образец для выявления следов расплавления металла. Если такие следы отсутствовали, значит, мощность лазерного излучения подобрана правильно. Шаг изменения выходной мощности лазера составлял 0,25 кВт в сторону уменьшения. Минимальное значение мощности лазерного излучения составляло 1 кВт, а максимальное — 2,25 кВт.

Упрочнение образцов происходило с использованием иттербиевого волоконного лазера

YLS-10000 [20] и оптической головки IPG D30W [21] с модулем колебания луча. Выбор таких компонентов технологической установки был обусловлен необходимостью получения нужной геометрии лазерного пятна и оптимальной плотности мощности на обрабатываемой поверхности. Следует отметить, что лазерная головка IPG D30W за счет модуля колебания позволяет задавать разные траектории движения луча, что, в свою очередь, дает возможность получить на поверхности образца пятна разной геометрической формы с равномерным распределением мощности в зоне термического воздействия. Фото лазерной головки представлено на рис. 3.



Рис. 3. Оптическая лазерная головка IPG D30W

На следующем этапе эксперимента проводили металлографические исследования образцов после проведенной термообработки. Форму зоны термического воздействия лазерного луча, микроструктуру материала, глубину закалки и состояние поверхности изучали с помощью оптического микроскопа *Olympus GX-51* с увеличением 5–1000 крат, укомплектованного цифровой видеокамерой с разрешением 12,8 млн пикселей.

Измерения микротвердости образцов проводились на универсальном микротвердомере *Durascan-70* с автоматическим анализом отпечатка индентора по методу Виккерса, в соответствии с ГОСТ 9450-76, при нагрузке 300 г и шагом измерения 100 мкм по глубине и 300 мкм по ширине.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Зависимости микротвердости по ширине и глубине при разных способах охлаждения после объемной закалки и отпуска представлены на рис. 4, где верхняя кривая — это значения микротвердости образца после закалки в воде, а нижняя — в масле.

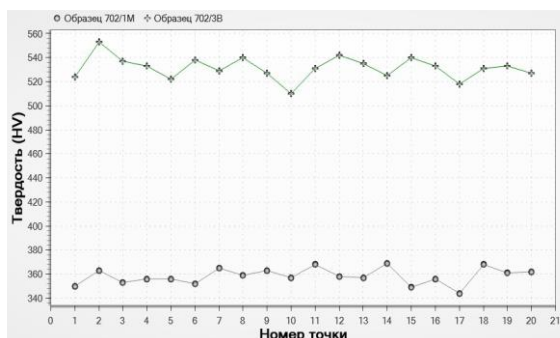
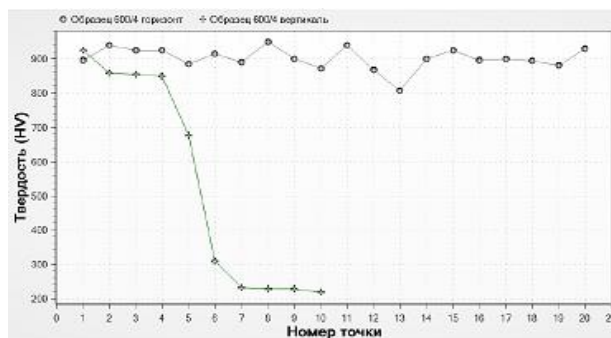


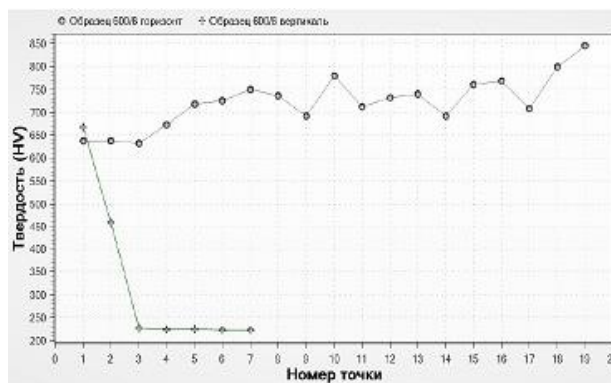
Рис. 4. Зависимость микротвердости по ширине и глубине при объемной закалке

В результате исследований (рис. 4) на микротвердость образцов, упрочненных объемной закалкой с последующим отпуском, средние значения твердости составили 530 HV для образцов, закаленных в воде, и 360 HV для закаленных в масле.

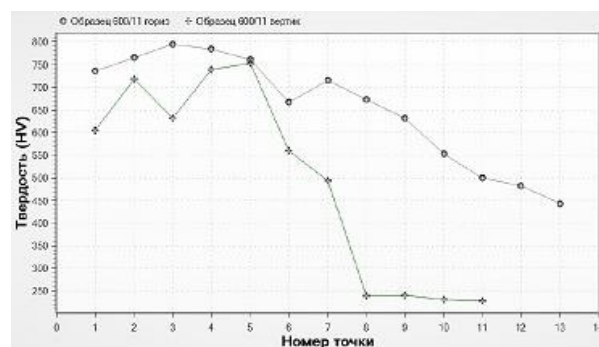
Зависимости распределения микротвердости по ширине и глубине при различных оптических режимах перемещения лазерного луча, при поверхностном термоупрочнении представлены на рис. 5.



а)



б)



в)

Рис. 5. Распределение микротвердости по ширине (горизонт) и глубине (вертикаль) при различных режимах упрочнения: а — линейный режим; б — круговой режим; в — режим «круглого пятна»

Таким образом (рис. 5), распределение микротвердости по глубине образцов при различных режимах лазерного упрочнения качественно одинаково, а именно: после некоторого равномерного

поверхностного слоя с крутым спуском вниз, в область минимальных значений, вплоть до основного металла (под-ложки), на которую лазерный луч оказывает минимальное воздействие.

Полученные в результате металлографических исследований данные представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты металлографического исследования

Режимы упрочнения	Показатели упрочнения			
	Вид зоны	Глубина, мкм	HV, ед.	Ширина, мкм
Линейный	Волнообразный, с продольным и ровным дном	612 – 630	875 – 904	11 142
Круговой	Полукруглый, сильно вытянутый по ширине	289 – 479	650 – 714	12 055
«Круглое пятно»	Соприкасающиеся полукруги (с перекрытием)	756 – 1 036	603 – 850	10 588

Как видно (табл. 2), в зависимости от траектории движения лазерного луча, глубина и форма упрочненного слоя получились разными.

Распределение микротвердости по ширине поверхности образцов после лазерного упрочнения на различных режимах имеет некоторые заметные отличия. При *линейном режиме* распределение микротвердости по упрочненной поверхности достаточно равномерно. Разброс значений HV не превышает  $\pm 1,5\%$ .

При *круговом режиме* отмечено возрастание значений HV по мере удаления от зоны первичной обработки, которое может составлять более чем в 1,3 раза. При этом достигается наибольшая ширина обработки (зоны упрочнения), равная 12 055 мм, и разброс значений HV равен примерно  $\pm 5\%$  (табл. 2).

Обработка (упрочнение) в *режиме «круглого пятна»* характеризуется тем, что наоборот, в отличие от упрочнения круговым режимом, по мере удаления от зоны первичной обработки значения HV становятся меньше в 1,85 раза. Ширина зоны упрочнения в этом случае минимальная и составляет 10 588 мм (см. табл. 1). При этом разброс значений HV наибольший и составляет примерно  $\pm 14,5\%$ .

Определение полей микротвердости после лазерного упрочнения образцов на различных режимах свидетельствует о том, что для достижения требуемой поверхностной микротвердости и глубины упрочнения необходимо учитывать также сложность формы («криволинейность» поверхности) обрабатываемых на заданный уровень свойств деталей и изделий.

Кроме того, в результате исследований особенностей формирования структуры и свойств поверхностного слоя плазменно-закаленного лемеха плуга, изготовленного из стали 65Г, проведенных А.Т. Канаевым в 2020 г., были получены результаты измерения твердости в зависимости от глубины упрочненного слоя. Изменение микротвердости происходит в диапазоне от 860 до 417–420 HV. На глубине 0,10–0,27 мм наблюдается микротвердость 860–792 HV, на глубине 0,33–0,65 мм микротвердость 750–594 HV, затем на глубине 0,78–1,12 мм значения микротвердости ограничены диапазоном 592–540 HV, на глубине 1,25–1,53 мм — 528–455 HV, далее осталась структура основного металла с твердостью 417–420 HV

[9]. Как видно из результатов эксперимента А.Т. Канаева, твердость упрочненного слоя выросла более чем в 2 раза по сравнению с твердостью исходного металла.

**Выводы.** Таким образом, сравнительный анализ значений твердости образцов из стали 65Г, полученных после обработки при помощи лазерного излучения линейным методом (максимальное значение 904 HV), с максимальным значением твердости, полученным при газоплазменной закалке (860 HV), согласно исследованиям А.Т. Канаева [9], а также значения твердости после объемной закалки и отпуска (530 HV при закалке в воде) показал следующее. Способ лазерного термоупрочнения стали 65Г при линейном режиме дает наиболее высокие значения твердости обработанного слоя, обеспечивая тем самым более высокие показатели сопротивления к абразивному износу лемеха лесного плуга. При поверхностном лазерном термоупрочнении не имеет значения, в какой закалочной среде происходит охлаждение. Также весомое преимущество лазерной термообработки по сравнению с традиционными методами термической обработки материалов — это отсутствие необходимости проведения дополнительных операций отпуска. Отпуск уменьшает уровень внутренних напряжений, но при этом понижает твердость обработанного лазером слоя. Это означает, что получение высоких физико-механических свойств после лазерного упрочнения связано с жестким термическим циклом, отличающимся высокими скоростями нагрева и охлаждения, составляющими, в среднем, 104...106 °C [22].

**Заключение.** В результате выполненных в настоящей работе исследований и экспериментов подтверждено, что лазерные источники нагрева создают более жесткий термический цикл, характеризующийся повышенными скоростями нагрева и охлаждения, что позволяет получать наиболее высокие значения твердости поверхностного слоя и мелкодисперсные структуры, являющиеся необходимыми условиями повышения износостойкости рабочей поверхности лемеха лесного плуга.

#### Литература

1. Черноиванов В.И., Близких В.В., Северный А.Э. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве. М.: Челябинск: ГОСНИТИ, ЧГАУ, 2003. 992 с.

2. Соловьев С.А., Лялякин В.П. Состояние и перспективы упрочнения и восстановления деталей почвообрабатывающих машин // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т. 115. С. 96-104.
3. Канаев А.Т., Тополянский П.А., Гуляренко А.А., Жусин Б.Т. Плазменная закалка сменных деталей рабочих органов почворежущих машин // Вестн. науки Казахского агротехнического ун-та им. С. Сейфуллина. 2018. № 1 (96). С. 150-155, 192.
4. Сидоров С.А. Технический уровень и ресурс рабочих органов сельхозмашин // Тракторы и с.-х. машины. 1998. № 3. С. 29-33.
5. Шило И.Н. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин. Минск: БГАТУ, 2010. 320 с.
6. Шовкоплас А.В. Анализ причин изнашивания дисковых рабочих органов и моделей изменения свойств почвы под их действием // Вестн. науки и образования Северо-Запада России. 2015. Т. 1, № 3. С. 1-8.
7. Кравченко Н.Н., Пузряков А.Ф., Пузряков А.А. Плазменные методы упрочнения и восстановления рабочих органов дорожно-строительных и почвообрабатывающих машин. М.: Эко-Пресс, 2013. 328 с.
8. Ерохин М.Н., Новиков В.С., Сабуркин Д.А. Выбор марки стали для лемеха плуга // Тракторы и с.-х. машины. 2008. № 1. С. 5-8.
9. Канаев А.Т., Гуляренко А.А., Тополянский П.А., Сарсембаева Т.Е. Плазменная закалка лемеха плуга из конструкционной стали 65Г // Горение и плазмохимия. 2020. Т. 18, № 2. С. 87-93.
10. Ерохин М.Н., Новиков В.С. Повышение прочности и износостойкости лемеха плуга // Вестн. ФГОУ ВПО МГАУ. 2008. № 3 (28). С. 100-107.
11. Коротков В.А. Износостойкость материалов с плазменной закалкой // Трение и износ. 2011. Т. 32, № 1. С. 23-29.
12. Киселев П.А., Булушев В.Р., Тополянский П.А. Технология восстановления плужных лемехов // Технология упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: материалы междунар. науч.-практической конф. (14-15 апр. 2016 г.). СПб., 2016. С. 36-38.
13. Канаев А.Т., Богомоллов А.В. Формирование градиентно-слоистых структур в колесной стали при плазменной закалке // Восточно-Европейский науч. журнал. 2016. № 9. С. 5-10.
14. Балановский А.Е. Основные вопросы плазменного поверхностного упрочнения металлов // Упрочняющие технологий и покрытия. 2016. № 2. С. 20-30.
15. Тельнов Н.Ф. Ремонт машин. М.: Агропромиздат, 1992. 556 с.
16. Антониншин Ю.Т. Упрочнение лемеха плуга электродуговой наплавкой // Современная сельскохозяйственная техника: исследование, проектирование, применение: материалы Междунар. науч.-практической конф. (26-28 мая 2010 г.). Минск: БГАТУ, 2010. С. 23-26.
17. Новиков В.С., Самойленко А.Н. Математическая модель зависимости износостойкости материалов от химического состава и твердости // Вестн. ФГОУ ВПО МГАУ. 2008. № 3. С. 124-129.
18. Canale L.C.F. Abrasive wear resistance of a Fe based coating containing Cr and Ni, 20-th ASM Heat Treating Society Conf. St. Louis, MO USA, 2000. P. 9-12.
19. Журавель В.М., Чирков А.М., Евстюнин Г.А. Технология лазерного термоупрочнения деталей. Владимир: Изд-во «Транзит-ИКС», 2021. 160 с.
20. Серия YLS. Иттербиевые волоконные лазеры высокой мощности [Электронный ресурс]. URL: [https://ire-polus.com/wp-content/uploads/2024/05/ipg-ire-polus\\_fiber\\_laser\\_series\\_yls.pdf](https://ire-polus.com/wp-content/uploads/2024/05/ipg-ire-polus_fiber_laser_series_yls.pdf) (дата обращения: 23.04.2024).
21. Головка для сварки FLW D30W [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ipgphotonics.com/ru/products/dostavka-izlucheniya/opticheskie-golovky/golovki-dlya-svarki/golovka-dlya-svarki-flw-d30w> (дата обращения: 23.04.2024).
22. Бiryukov В.П. Восстановление и упрочнение поверхностей лазерным излучением // Фотоника. 2009. № 3 (15). С. 14-17.
1. Chernoiyanov V.I., Blizkih V.V., Severnyj A.E. Technical maintenance and repair of machinery in agriculture. M.: Chelyabinsk: GOSNITI, ChGAU, 2003. 992 p.
2. Solov'ev S.A., Lyalyakin V.P. The state and prospects of hardening and restoration of details of tillage machines // Trudy GOSNITI. 2014. V. 115. P. 96-104.
3. Kanaev A.T., Topolyanskij P.A., Gulyarenko A.A., Zhusin B.T. Plasma hardening of replaceable parts of working bodies of soil-cutting machines // Herald of science of S. Seifullin Kazakh agrotechnical university: Multidisciplinary. 2018. № 1 (96). P. 150-155, 192.
4. Sidorov S.A. Technical level and resource of working bodies of agricultural machinery // Tractors and Agricultural Machinery. 1998. № 3. P. 29-33.
5. Shilo I.N. Improving the efficiency of parts of working bodies of agricultural machines. Minsk: BGATU, 2010. 320 p.
6. Shovkoplyas A.V. Analysis of the causes of wear of disc working organs and models of changes in soil properties under their action // Journal of Science and Education of North-West Russia. 2015. V. 1, № 3. P. 1-8.
7. Kravchenko N.N., Puzryakov A.F., Puzryakov A.A. Plasma methods of hardening and restoration of working bodies of road-building and tillage machines. M.: Eko-Press, 2013. 328 p.
8. Erohin M.N., Novikov V.S., Saburkin D.A. The choice of steel grades for the plowshare // Tractors and Agricultural Machinery. 2008. № 1. P. 5-8.
9. Kanaev A.T., Gulyarenko A.A., Topolyanskij P.A., Sarsembaeva T.E. Plasma hardening of a plowshare made of structural steel 65G // Combustion and plasmachemistry. 2020. V. 18, № 2. P. 87-93.
10. Erohin M.N., Novikov V.S. Increasing the strength and wear resistance of the plowshare // Vestnik of Moscow Goryachkin State Agroengineering University. 2008. № 3 (28). P. 100-107.
11. Korotkov V.A. Wear resistance of materials with plasma hardening // Friction and Wear. 2011. V. 32, № 1. P. 23-29.
12. Kiselev P.A., Bulushev V.R., Topolyanskij P.A. Technology of restoration of ploughshares. // Tekhnologiya uprochneniya, naneseniya pokrytij i remonta: teoriya i praktika: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (14-15 apr. 2016 g.). SPb., 2016. P. 36-38.
13. Kanaev A.T., Bogomolov A.V. Formation of gradient-layered structures in wheel steel during plasma hardening // East European Science Journal. 2016. № 9. P. 5-10.
14. Balanovskij A.E. The main issues of plasma surface hardening of metals // Strengthening Technologies and Coatings. 2016. № 2. P. 20-30.
15. Tel'nov N.F. Repair of cars. M.: Agropromizdat, 1992. 556 p.
16. Antonishin Yu.T. Strengthening of the plowshare by electric arc surfacing // Sovremennaya sel'skhozajstvennaya tekhnika: issledovanie, proektirovanie, primenenie: materialy Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (26-28 maya 2010 g.). Minsk: BGATU, 2010. P. 23-26.
17. Novikov V.S., Samojlenko A.N. Mathematical model of the dependence of wear resistance of materials on chemical composition and hardness // Vestnik of Moscow Goryachkin State Agroengineering University. 2008. № 3. P. 124-129.
18. Sanale L.C.F. Abrasive wear resistance of a Fe based coating containing Cr and Ni, 20-th ASM Heat Treating Society Conf. St. Louis, MO USA, 2000. P. 9-12.
19. Zhuravel' V.M., Chirkov A.M., Evstyunin G.A. The technology of laser thermal hardening of parts. Vladimir: Izd-vo «Tranzit-IKS», 2021. 160 p.
20. Seriya YLS. High-power Ytterbium fiber lasers [Elektronnyj resurs]. URL: [https://ire-polus.com/wp-content/uploads/2024/05/ipg-ire-polus\\_fiber\\_laser\\_series\\_yls.pdf](https://ire-polus.com/wp-content/uploads/2024/05/ipg-ire-polus_fiber_laser_series_yls.pdf) (data obrashcheniya: 23.04.2024).
21. The welding head is FLW D30W [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.ipgphotonics.com/ru/products/dostavka-izlucheniya/opticheskie-golovky/golovki-dlya-svarki/golovka-dlya-svarki-flw-d30w> (data obrashcheniya: 23.04.2024).
22. Biryukov V.P. Restoration and hardening of surfaces by laser radiation // Photonics Russia 2009. № 3 (15). P. 14-17.

References