

УДК 621.762

**А. И. Филиппов<sup>1</sup>, С. Д. Лещик<sup>2</sup>, Ю. К. Калугин<sup>3</sup>, И. В. Дубень<sup>4</sup>**<sup>1</sup>Учреждение образования «Гродненский государственный аграрный университет», ул. Терешковой, 28, 230008 Гродно, Республика Беларусь, +375 (29) 396 29 66, a.fil07@mail.ru<sup>2,3</sup>Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», ул. Ожешко, 22, 230023 Гродно, Республика Беларусь, 8 (0152) 48 27 94, <sup>2</sup>s.lesh@grsu.by, <sup>3</sup>kalugin\_jk@grsu.by<sup>4</sup>Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225401 Барановичи, Республики Беларусь, +375 (163) 64 06 73, duben\_i\_v@mail.ru

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ИЗНОС ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНТАКТИРУЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Рассмотрены особенности лазерной обработки материалов, которая представляет собой передовую технологию и позволяет значительно увеличить износостойкость деталей за счет изменения их микроструктуры, физико-химических свойств и топографии. Проведен анализ основных факторов, влияющих на снижение интенсивности поверхностного износа контактирующих деталей автомобильного транспорта, прошедших упрочняющую обработку лазерным методом. Исследованы особенности структурных изменений в поверхностном слое и их влияние на повышение износостойкости деталей, а также влияние различных факторов, таких как приработка, удельная нагрузка, скорость скольжения, на интенсивность изнашивания. В статье приведены результаты экспериментальных исследований и зависимости, полученные при испытаниях образцов из стали 40X.

**Ключевые слова:** износостойкость; поверхностный износ; изнашивание деталей; упрочнение; лазерная обработка.

Рис. 4. Библиогр.: 5 назв.

**A. I. Filippov<sup>1</sup>, S. D. Leshchik<sup>2</sup>, Yu. K. Kalugin<sup>3</sup>, I. V. Duben<sup>4</sup>**<sup>1</sup>Institution of Education “Grodno State Agrarian University”, 28 Tereshkova Str., 230008 Grodno, the Republic of Belarus, +375 (29) 396 29 66, a.fil07@mail.ru<sup>2,3</sup>Institution of Education “Yanka Kupala State University of Grodno”, 22 Ozheshko Str., 230023 Grodno, the Republic of Belarus, 8 (0152) 48 27 94, <sup>2</sup>s.lesh@grsu.by, <sup>3</sup>kalugin\_jk@grsu.by<sup>4</sup>Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225401 Baranavichy, the Republic of Belarus, +375 (163) 64 06 73, duben\_i\_v@mail.ru

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF LASER HARDENING FACTORS ON THE SURFACE WEAR OF CONTACTING PARTS OF MOTOR VEHICLES

The features of laser processing of materials are considered in this study. This advanced technology has been shown to significantly increase the wear resistance of the surface by altering its microstructure, physicochemical properties and topography. The analysis of the main factors influencing the reduction of the intensity of surface wear of contacting parts of motor vehicles that have undergone laser hardening treatment has been carried out. The study investigates the structural alterations in the surface layer and their impact on enhancing the wear resistance of components. Various factors, including run-in, specific load, and sliding speed, have been examined to understand their influence on the intensity of wear. The article presents the results of experimental studies and dependencies obtained during testing of 40X steel samples.

**Key words:** wear resistance; surface wear; wear of parts; hardening; laser processing.

Fig. 4. Ref.: 5 titles.

**Введение.** Сроки службы большинства сельскохозяйственных машин составляют 8...10 лет, что обусловлено главным образом изнашиванием деталей и коррозионными процессами. К примеру, ежегодные затраты на ремонт и обслуживание трактора составляют 20...30 % от его общей стоимости. Применение деталей, прошедших упрочняющую обработку, позволит не только сократить потребность в запасных частях, но и сэкономить значительные материальные средства.

На трибологические характеристики деталей из стали значительное влияние оказывает структура их поверхностных слоев. Именно с внешних слоев, которые подвергаются механическим воздействиям, коррозии и высокой температуре, начинается разрушение изделий автомобильной и машиностроительной промышленности. В результате потеря работоспособности оборудования происходит в первую очередь из-за поверхностного износа деталей. Типичным для автотракторной техники является нарушение зазоров между подшипниками и шейками коленвала двигателя, зубьями конических передач, а также отклонения осевых зазоров у конических подшипников, радиальных зазоров — у шариковых и роликовых подшипников.

Увеличение зазоров в гладких соединениях (например, элементах шатунно-поршневой группы, плунжерных парах, пальцах и проушинах звеньев гусениц) ведет к снижению эффективной мощности двигателя, перерасходу топлива и уменьшению коэффициента полезного действия трактора или автомобиля. Ослабление креплений соединений вызывает излишнюю вибрацию и динамические нагрузки на детали механизмов. Следствием таких процессов является нарушение соосности некоторых агрегатов. К примеру, если нарушается соосность между коленвалом двигателя трактора и первичным валом коробки передач или валом заднего моста с ведущими шестернями, это приводит к избыточному нагреву деталей и их ускоренному износу.

Таким образом, к основным факторам, влияющим на износ деталей техники, относятся температура окружающей среды, качество топлива и смазочных материалов, состав грунта под колесами машины или тракторных гусениц, равномерность нагрузки во время работы, своевременность технического обслуживания и др.

С развитием упрочняющих технологий и методов модификации структуры поверхностных слоев материалов на микро- и наноуровне роль состояния поверхности деталей в общей технологической системе значительно увеличивается. Одним из современных методов улучшения эксплуатационных свойств деталей является воздействие на поверхность металла лазерного луча [1; 2]. Происходящие изменения в структуре металла, как правило, приводят к улучшению прочностных свойств. Ряд исследований в области упрочняющего воздействия показывает различную динамику износа и подверженность факторам, ускоряющим этот негативный процесс. Цель данных исследований — установление наиболее значимых факторов, ускоряющих износ обработанных деталей автотранспортных средств, а также разработка режимов лазерной обработки, способствующих повышению долговечности и надежности ответственных деталей и узлов.

**Материалы и методы исследования.** Для проведения экспериментов выбрана конструкционная сталь 40Х, широко применяемая для изготовления ответственных деталей сельскохозяйственных автотранспортных средств. Структура поверхностного слоя, которая формируется в конструкционных легированных сталях вследствие лазерного воздействия, определяется полнотой протекания аустенитного превращения при нагревании, что, в свою очередь, зависит от таких факторов, как скорость и температура нагревания, а также время взаимодействия с первоначальной структурой материала.

При проведении исследования производилось воздействие лазерным лучом без оплавления поверхности. Эффект упрочнения в большинстве случаев такой обработки достигался за счет частичной или полной модификации структуры [3]. Лазерная модификация поверхности обычно происходит посредством ряда процессов, в числе которых изменение фазового состава, создание аморфных структур или формирование упрочняющих покрытий.

Ключевые механизмы улучшения износостойкости включают также повышение твердости за счет быстрого охлаждения расплавленного слоя (лазерное закаливание). Начальный этап этого процесса начинается при достижении точки  $A_{c1}$  на металлографической диаграмме при температуре  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  [3]. Эта критическая точка характеризует превращение перлита в аустенит (начало перекристаллизации). Достижение этого этапа упрочнения можно охарактеризовать как полную закалку материала, так и её частичное присутствие. В результате возникает слой с высоким уровнем неоднородности по глубине. При

этом ближе к поверхности формируются мартенсит и оставшийся аустенит после охлаждения из зоны однородного аустенита, а на большей глубине — зона неоднородного аустенита.

При лазерной обработке уже закалённой или отожжённой стали в соответствующих слоях наблюдается уменьшение микротвердости из-за формирования тростита, что характеризует этап отпуска. Второстепенный и последующий слои составляют зону теплового воздействия. Исследование поверхностного слоя упрочненного образца из стали 40X при скорости луча 45 мм/с и мощности излучения 800 Вт показало, что в зоне воздействия материал получает однородную структуру с мелкозернистым мартенситом.

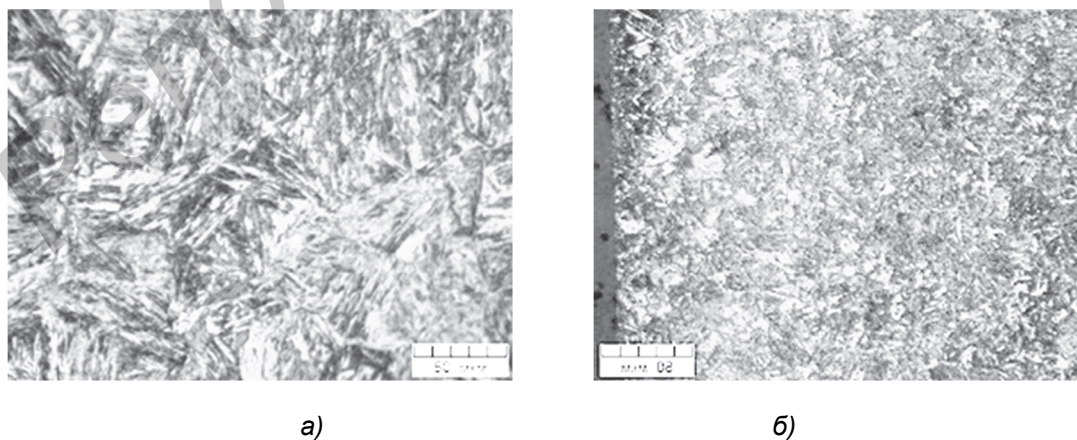
Для изучения микроструктуры нами использован металлографический комплекс на основе микроскопа Микро-Vert (Планар). Анализ структурных изменений осуществлялся с помощью программного обеспечения Image-SP. Оценка структурных изменений до и после интегрированного воздействия проводилась методом точной металлографии с увеличением в 500 и 1 000 раз на нескольких участках по периферии образца.

**Результаты исследования и их обсуждение.** В результате исследования были выявлены структурные изменения, которые определяют улучшение эксплуатационных характеристик материала. Исходная структура материала детали и ее изменения после воздействия лазерного луча представлены на снимке (рисунок 1).

Результаты воздействия продемонстрировали значительные изменения в структуре стали после лазерной модификации. Было выявлено интенсивное уменьшение размеров зёрен и формирование тонкораспределённой и однородной мартенситной структуры по краям. При этом сохраняется характерная игольчатость мартенсита, хотя она и менее выражена. Зернистость становится менее заметной по сравнению с исходным состоянием. Структура после такой обработки напоминает состояние стали после закалки и последующего отпуска. Кроме того, данные рентгенофазового анализа свидетельствуют о формировании карбидов железа Fe<sub>3</sub>C в структуре материала, что указывает на увеличение прочности поверхностного слоя.

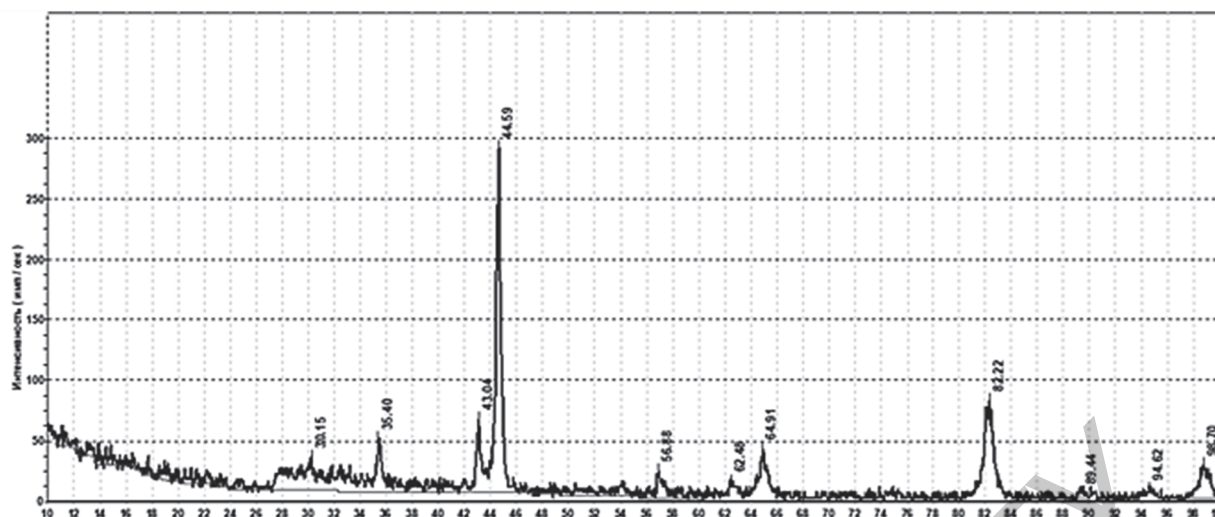
Представим результат дифракционного анализа после проведения лазерной обработки (рисунок 2).

Анализ структуры образцов после воздействия лазерного луча с помощью металлографии выявил значительные изменения в структуре металла. В зонах, подвергшихся обработке, наблюдается значительное уменьшение размера зёрен. Структура становится мелкодисперсной и равномерно распределённой по кромке. Игольчатость мартенсита на снимках после увеличения присутствует, но она менее выражена. Зёрна стали менее заметными по сравнению с исходным образцом.



а) — поверхность образца (до упрочнения);  
б) — изменения структуры после модификации лазерным излучением

**Рисунок 1. — Сравнение структурных изменений в поверхностном слое**



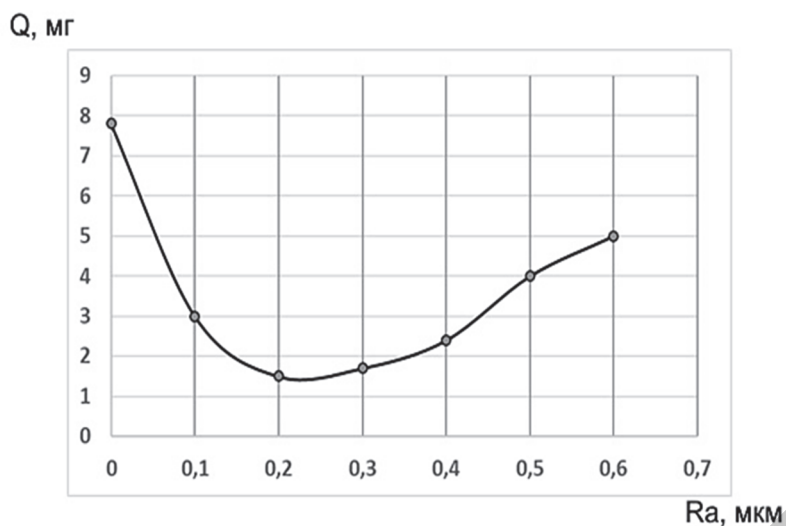
**Рисунок 2. — Характеристическая дифрактограмма металла после воздействия лазерного излучения**

Металлографический анализ проб поверхности деталей, подверженных лазерному воздействию, демонстрирует значительные трансформации в структуре металла. В частности, отмечается интенсивное уменьшение размеров зерен в областях, подвергшихся обработке. В этих зонах фиксируется формирование тонкодисперсной структуры мартенсита с равномерным распределением по периферии. При этом характерная игольчатая текстура мартенсита все еще прослеживается, хотя и становится менее выразительной.

Контроль состояния структуры в ходе лазерной термической обработки представляет собой ключевой аспект, так как различные стали и сплавы могут демонстрировать противоположные характеристики после одинаковых тепловых процедур: либо упрочнение, либо ослабление их свойств. Отличия проявляются в размерах и характере остаточных напряжений и деформаций. Изменение структуры материалов, как правило, приводит к повышению износостойкости, но на конечный результат влияют различные факторы.

Для определения интенсивности износа при воздействии различных факторов использовался весовой метод. При исследовании трибологических свойств образцов для усредненной оценки интенсивности изнашивания применялась машина трения СМЦ-2 [2; 3] и высокоточные лабораторные весы ОКБ Веста ВМ213-М-1. Измерение величины линейного износа на основе потери массы выполнялось при помощи расчетов, которые исходят из допущения о том, что процесс изнашивания протекает однородно по всей поверхности соприкосновения. Линейный показатель износа отображается как высота слоя, подверженного износу, отнесенная к единичной длине пути трения. В частности, на основе результатов экспериментальных исследований установлено, что высота микронеровностей и поверхностная твердость в значительной степени влияют на интенсивность износа поверхностного слоя контрольного образца (рисунок 3).

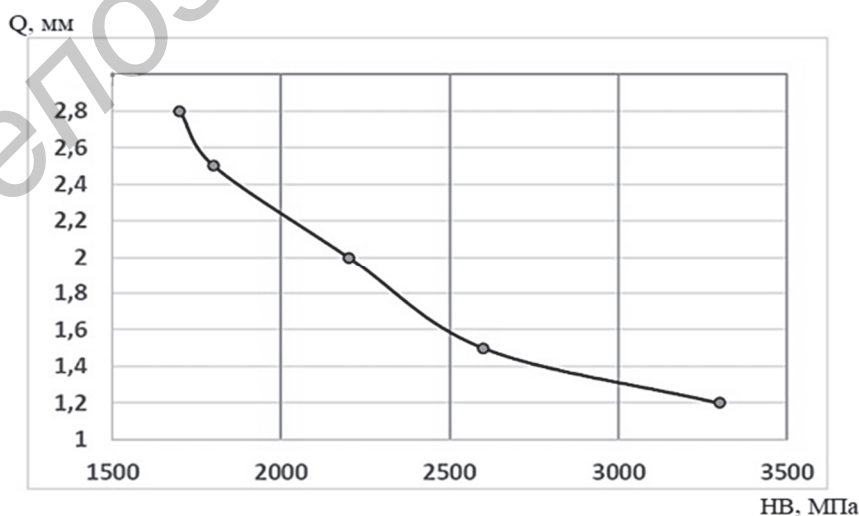
Как видно из диаграммы, повышение уровня шероховатости поверхности выше оптимального приводит к усилению износа из-за увеличения механической адгезии, откалывания и обрыва микроскопических неровностей. С другой стороны, снижение шероховатости ниже оптимального также вызывает более интенсивный износ за счет молекулярного склеивания и заедания взаимодействующих поверхностей [4; 5]. Из диаграммы следует, что оптимальные значения шероховатости обработанных материалов, определяющие минимальный износ, лежат в пределах 0,2...0,3 мкм. Такой тип изнашивания типичен для компонентов гидравлических систем и двигателей внутреннего сгорания автомобилей. Результаты экспериментальных исследований показывают значительное увеличение срока службы деталей после лазерного закалывания — в большинстве случаев до 2...3 раз по сравнению с традиционными методами обработки.



**Рисунок 3. — Влияние шероховатости поверхности на износ материала**

Процесс разрушения верхнего слоя изделия вызван абразивными частицами, которые, проникая в поверхностный слой и смещаясь по отношению к нему, вызывают пластическую деформацию, упругое вытеснение, резание и царапание металла. Степень изнашивания поверхности определяется твердостью металла и абразивных частиц, размером приложенной нагрузки и скоростью смещения. Для всех видов углеродистой и легированной структурной стали после процессов закаливания и отпуска относительное сопротивление изнашиванию  $\varepsilon$  возрастает пропорционально увеличению твердости материала детали. Для выбранной марки стали зависимость относительных показателей износа и твердости материала имеет следующий вид (рисунок 4).

Связь между твердостью и износостойкостью в значительной степени обусловлена тем, что более твердые материалы менее подвержены деформациям при контакте с другими телами. Это снижает вероятность возникновения микроскопических повреждений, являющихся основными очагами развития процессов износа. При прогнозировании сроков безотказной эксплуатации оборудования и компонентов, прошедших восстановление или промежуточное упрочнение с использованием высокоэнергетического лазерного излучения, необходимо учитывать ряд факторов.



**Рисунок 4. — Влияние поверхностной твердости металла на износ**

**Заключение.** Одним из эффективных методов повышения долговечности материалов является контроль твердости поверхностного слоя, что способствует увеличению их сопротивления механическим нагрузкам. Дальнейшие исследования этих процессов будут направлены на разработку новых технологий обработки материалов и изучение наноструктурированных покрытий в целях достижения оптимального баланса между твердостью и вязкостью. Это позволит создавать более надежные конструкции, способные выдерживать сложные эксплуатационные условия. Результаты экспериментальных исследований трибологических свойств образцов с помощью машины трения показывают значительное увеличение срока службы деталей после лазерного закаливания с оптимальным значением шероховатости обработанных материалов 0,2...0,3 мкм, определяющие уменьшение износа, до 2...3 раз по сравнению с традиционными методами обработки. Оптимальные значения поверхностной твердости при испытаниях контрольных деталей составили 2 750...3 345 МПа.

Исследования процессов износа деталей, обработанных лазерно-термическим методом, могут послужить основой для разработки новых технологий на основе матричных и сканирующих систем, обеспечивающих высокую точность контроля процесса, создания инновационных композитных материалов для наплавки, а также оптимизации параметров лазерного излучения для глубокого проникновения энергии в материал без перегрева. Использование лазера в качестве инструмента модификации поверхности открывает широкие перспективы для увеличения срока службы машинных деталей. Это имеет существенное экономическое значение, поскольку позволяет снизить затраты на ремонт и замену оборудования, а также способствует экологической оптимизации за счет уменьшения объема отходов.

#### Список цитируемых источников

1. Францевич, И. Н. Анодные оксидные покрытия на металлах и анодная защита / И. Н. Францевич ; под общ. ред. И. Н. Францевича. — Киев : Наук. думка, 1985. — 280 с.
2. Фролов, Е. Н. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя и износостойкости деталей машин и оснастки комбинированной обработкой на основе лазерного и электромеханического упрочнения : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Фролов Евгений Николаевич ; Брян. ин-т транспорт. машиностроения. — Брянск, 1991. — 128 л.
3. Суслов, А. Г. Экономичная система технологического обеспечения долговечности поверхностей трения изделий / А. Г. Суслов, И. В. Говоров, А. Н. Щербаков // Тяжелое машиностроение. — 2004. — № 5. — С. 16—18.
4. Харченков, В. С. Технологическое обеспечение износостойкости деталей машин нанесением многослойных покрытий : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / В. С. Харченков ; Брян. ин-т транспорт. машиностроения. — Брянск, 1989. — 326 л.
5. Хромов, В. Н. Упрочнение и восстановление деталей машин термоупругопластическим деформированием / В. Н. Хромов, И. К. Сенченков. — Орел : Изд-во ОГСХА, 1999. — 221 с.

Поступила в редакцию 08.04.2025.