

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Ведерникова И.И., Поletaев В.А.*

**Ключевые слова:** метод лазерного модифицирования, упрочнение, лазер, поверхностное термоупрочнение, износостойкость.

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы разработки метода упрочнения рабочих поверхностей деталей машин. Представлен метод лазерного модифицирования. Описан как сам метод, так и полученные результаты различных режимов данного метода. На основе результатов были проведены испытания и в конечном итоге был выбран режим лазерного модифицирования с наилучшими показателями твердости, прочности и износостойкости.

## APPLICATION OF LASER MODIFICATION FOR STRENGTHENING THE WORKING SURFACES OF MACHINE DETAILS

*Vedernikova I.I., Poletaev V.A.*

**Keywords:** laser modification method, hardening, laser, surface heat hardening, wear resistance.

**Abstract.** The issues of developing a method of hardening the working surfaces of machine parts. The method of laser modification is presented. Both the method itself and the results obtained from the various modes of this method are described. Based on the results, tests were carried out and in the end a laser modification mode with the best indicators of hardness, strength and wear resistance was selected.

Увеличение износостойкости готовых изделий одна из основных актуальных проблем в машиностроении. Одним из технологических решений является упрочнение поверхностного слоя изделия за счет изменения его структуры. Упрочнение поверхности может быть достигнуто различными методами: химико-термическим, плазменным, лазерным и прочими. Хотелось бы уделить особое внимание лазерному упрочнению.

Создание лазеров – совершило революцию в науке и технике. За два десятилетия после их возникновения формировались новые фундаментальные и прикладные направления физической оптики – оптическая квантовая электроника и нелинейная оптика. В настоящее время невозможно представить ни современные фундаментальные исследования, ни решение технических и технологических задач без использования лазеров. Уже сегодня степень насыщения лазерным оборудованием для всех передовых промышленных стран стала одним из важнейших, наряду с компьютеризацией, критериев индустриального развития. При этом роль флагмана в процессах освоения новых типов лазерного оборудования и технологий в промышленном производстве играет машиностроение. Это обусловлено, во-первых, общей лидирующей ролью этой отрасли в мировом научно-техническом прогрессе, а во-вторых, высочайшей технико-экономической эффективностью внедрения здесь лазерных технологий.

С помощью лазерного луча можно сделать то, чего нельзя достичь никакими другими способами. Лазерная обработка выгодна и перспективна при упрочнении деталей из стали, чугуна и цветных сплавов с минимальной

деформацией. Физико-механические свойства поверхностных слоев, упрочненных лазерным излучением, связаны с высокими скоростями нагрева и охлаждения. Упрочнение материалов лазерным излучением основано на локальном нагреве участка поверхности под воздействием излучения и последующем охлаждении этого поверхностного участка с высокой скоростью в результате теплоотвода во внутренние слои металла. Эти условия обеспечивают высокие скорости нагрева и охлаждения обрабатываемых поверхностных участков. В результате специфических тепловых процессов на поверхности обрабатываемых деталей возникает мелкодисперсная приповерхностная структура. На обрабатываемой детали образуется своеобразная скорлупа с повышенными прочностными характеристиками. Важнейшим преимуществом этой технологии является то, что поверхностное термоупрочнение на глубину 0,1-0,5 мм осуществляется за счет структурно-фазовых изменений поверхностных слоев исходного материала путем управляемого воздействия на обрабатываемую поверхность готовой детали лазерным излучением специализированного для этой технологии лазера без какой-либо наплавки, без оплавления поверхности, без нарушения макро- и микрогеометрии и, соответственно, без необходимости какой-либо последующей обработки. Широкое применение лазерная поверхностная обработка находит для повышения долговечности, надежности деталей различных машин и приборов во многих отраслях промышленности: химическом машиностроении, автомобильной промышленности, судостроении, авиастроении, текстильной и легкой промышленности и т.д.

Технологическое оборудование предприятий имеет большое количество узлов трения. Около 80% мощности машин расходуется на преодоление работы сил трения. Износ деталей является следствием работы сил трения, возникающих при взаимном перемещении трущихся поверхностей. Характер износа, интенсивность и природа изнашивания во многом зависят от вида фрикционного контакта. Скорость изнашивания деталей машин определяется в том числе и точностью и качеством их изготовления, качеством сборки и наладки оборудования, а также применением прогрессивной технологии изготовления и упрочнения деталей.

Предлагается комбинированный метод упрочнения рабочей поверхности детали из сплава Д16, представляющий собой лазерное модифицирование анодированной поверхности.

Термическое упрочнение лазерным излучением основано на локальном нагреве участка поверхности под воздействием излучения и охлаждении этого участка со сверхкритической скоростью после прекращения воздействия за счет теплоотвода во внутренние слои металла. Основной особенностью воздействия лазерного излучения на материалы является локальный характер теплового источника, обеспечивающий формирование жесткого термического цикла при поверхностной обработке с высокими скоростями перемещения источника нагрева и высокими скоростями нагрева и охлаждения материала.

Важнейшим преимуществом этой технологии является то, что поверхностное термоупрочнение на глубину 0,5-0,8 мм осуществляется за счет структурно-фазовых изменений поверхностных слоев исходного материала путем тонко управляемого воздействия на упрочняемую поверхность окончательно изготовленной детали лазерным излучением специализированного для этой технологии лазера без какой-либо наплавки, без оплавления поверхности, без нарушения макро- и микрогеометрии и, соответственно, без необходимости какой-либо последующей обработки. Благодаря возможности локального упрочнения только быстроизнашивающихся участков (а не всей детали), высокой линейной скорости обработки и автоматизации управления технологическим процессом, лазерное поверхностное термоупрочнение отличается от известных уже традиционных методов коротким технологическим циклом, оперативностью выполнения работ, относительно низкой удельной энерго-трудоматериалоемкостью и, соответственно, низкой стоимостью. Технология лазерного упрочнения может быть использована для повышения износостойкости режущих кромок вырубных штампов, ножей гильотинных ножниц, шеек коленчатых валов, грейдерных и бульдозерных ножей, червяков экструзионных установок, различных нитепроводящих и многих других деталей, работающих в условиях интенсивного многофакторного износа. Следует отметить, что лазерное упрочнение не снижает качество материала, т.к. структурно-фазовые изменения происходят только в поверхностных слоях на глубину не более 1 мм, не затрагивая при этом структуру и химический состав основной массы детали, не влияя на геометрические размеры и прочностные характеристики детали в целом. Кроме перечисленных здесь достаточно широких областей применения лазерного упрочнения, есть еще много других, где можно эффективно применить эту технологию, например, упрочнение шеек коленчатых валов, поверхностей гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания, упрочнение поверхностей прокатных валков, различных валов и осей, режущих кромок ножей, нитепроводников и других трущихся поверхностей, поверхностей различных шаровых опор, дорожек качения подшипников, зубьев шестерен, и т.д. Как видно, диапазон возможностей лазерного упрочнения очень широк как по материалам деталей, так и по их типоразмерам и назначению. Во всех этих и еще в разных других областях, внедрение оборудования и технологии лазерного упрочнения позволит получить хороший экономический эффект с быстрой окупаемостью затрат. Также имеется ряд преимуществ лазерной обработки перед традиционными технологиями [1-2]. И они очевидны:

- локальность воздействия;
- минимальные деформации детали;
- высокая концентрация энергии;
- отсутствие контакта с обрабатываемым изделием;
- возможность обработки труднодоступных мест;
- высокая степень автоматизации;

- экологическая чистота;
- высокая производительность.

В основе методов поверхностного термоупрочнения лежат три режима лазерного нагрева и сопровождающие их физические явления в материале. Первый из них – режим «образования закалочной микроструктуры», не вызывающий оплавления и какого-либо изменения параметров шероховатости поверхности, не требующей постмеханической обработки. Он предусматривает нагрев поверхностного слоя обрабатываемого материала и последующее самопроизвольное охлаждение. Второй – режим образования зоны расплава. Он отличается от первого повышенной глубиной зоны термического воздействия (ЗТВ), более выраженной неоднородностью структуры модифицированного слоя. Третий – «испарительный» режим лазерного воздействия на материал – характеризует шоковое упрочнение, требует обязательной финишной механической обработки с удалением некоторой части упрочненного слоя.

Тепловое воздействие при лазерном упрочнении регулируется в широких пределах за счет изменения параметров лазерного излучения и режимов обработки. Это обеспечивает регулирование скоростей нагрева и охлаждения металла, времени пребывания металла при высоких температурах, что позволяет получать требуемую структуру поверхностного участка и соответствующие свойства.

Технологические возможности лазерного упрочнения позволяют использовать этот процесс в качестве заключительной операции без последующей механической обработки. Причем лазерное термоупрочнение отдельных участков можно проводить после сборки конструкции или узла машины. Следует особо подчеркнуть возможность автоматизации процесса лазерного термоупрочнения. С учетом высокой производительности процесса операции лазерного модифицирования могут быть встроены в современное гибкое автоматизированное производство [3].

Режимы лазерной обработки приведены в таблице 1. Диапазон интенсивности воздействующего на поверхность излучения варьировался от 10 до 200 кВт/см<sup>2</sup>.

Табл. 1. Режимы лазерной обработки образцов сплава Д16 с покрытием

№ опыта	Режимы обработки			Размеры ЗЛВ		Величина износа, мкм (за 20 км пути трения)
	$E$ , кДж	$\Delta F$ , см	$q$ , кВт/см <sup>2</sup>	$a$ , мм	$b$ , мм	
1	5	-32	10	21	21	13
2	5	-22	20	16	16	8
3	7,5	-22	30	16	16	6
4	12,5	-22	50	16	16	15
5	10	-15	60	8,5	14,2	16
6	10	-10	110	7	12	18
7	10	-5	120	6	10	-
8	10	-2	200	5	7	-

Зависимость изнашивания модифицированного слоя от режимов лазерного воздействия приведена на рис. 1.

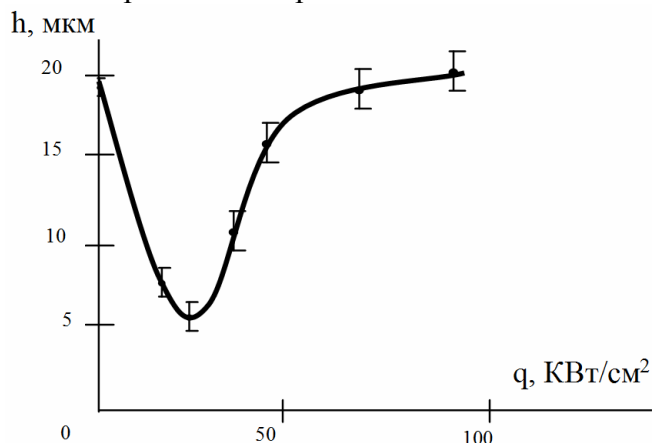


Рис. 1. Зависимость износа от интенсивности импульса (за 20 км пути трения)

Требуемые свойства поверхности при лазерном термоупрочнении получают созданием соответствующего термического цикла с заданными оптимальными параметрами, определяемыми максимальной температурой нагрева, скоростью нагрева, скоростью охлаждения, временем пребывания металла при температуре выше характерной.

Лазерную обработку образцов осуществляли импульсным излучением неодимового лазера на стекле ГОС-301 в режиме свободной генерации импульса при различной энергии накачки и степени расфокусировки  $\Delta F$ , которая влияет на плотность энергии, рассеиваемой по поверхности.

Далее проводилось исследование упрочненной поверхности. Микротвердость образцов измерялась с помощью прибора ПМТ-3 по стандартной методике [4].

Зависимость интенсивности импульса лазерного воздействия на микротвердость поверхности образцов показана на рис. 2.

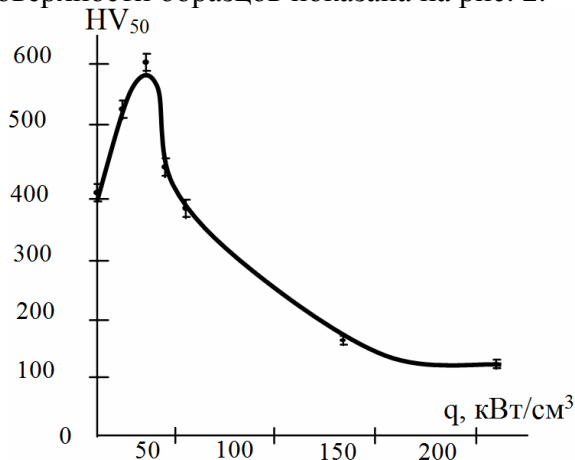


Рис. 2. Влияние интенсивности импульса на микротвердость поверхности ЗЛВ алюминиевого сплава Д16 с оксидным покрытием

Наличие зоны с повышенными механическими свойствами покрытия показало, что при обработке поверхности лазерным излучением требуемой интенсивности можно достичь упрочнения оксидного покрытия. Оптимальным режимом упрочняющей лазерной обработки является  $10 \div 15 \text{ кВт/см}^2$ . При этом максимальное увеличение микротвердости достигает 700 HV.

На рис. 3-5 приведены фото образцов с оксидным покрытием после лазерной обработки.

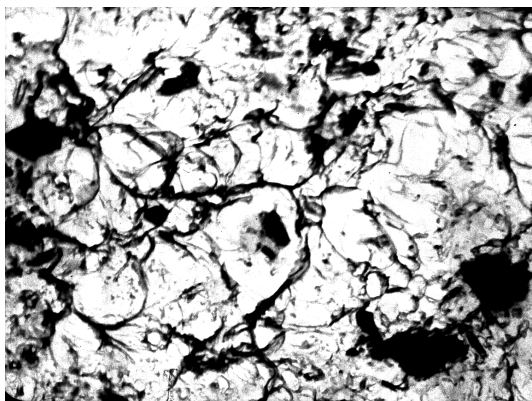


Рис. 3. Структура покрытия после анодирования:  $\times 10600$  – электронная микроскопия

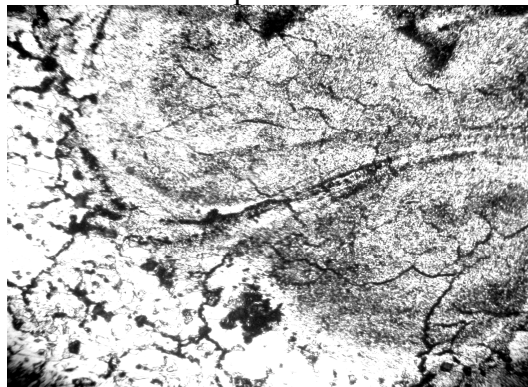


Рис. 4. Структура сплава Д16 в зоне лазерного оплавления ( $400\times$ )

При воздействии лазерного излучения интенсивностью ниже  $30 \text{ кВт/см}^2$  видимых изменений на поверхности не наблюдается. Внешние изменения начинаются при  $q$  свыше  $30 \text{ кВт/см}^2$ , поверхность становится матовой и плохо рассеивает свет. На некоторых участках поверхности темный цвет покрытия изменяется на белый, плотность и толщина покрытия уменьшаются. Это свидетельствует о начале термодеструкции покрытия (рис. 3.). При  $q$  свыше  $100 \text{ кВт/см}^2$  на поверхности образуется зона оплавления. Она имеет форму эллипсоидного кратера размерами  $3 \div 5 \text{ мм}$  с углублением по середине и натеками расплавленного металла по краям (рис. 4). Явно видны закалочные трещины.

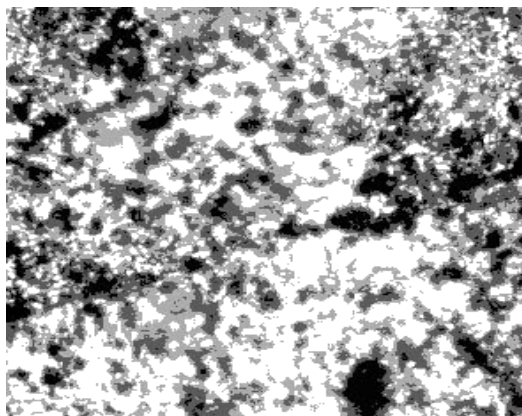


Рис. 5. Дисперсно-упрочненный слой

Структура в зоне оплавления является типичной для сплавов, закаленных из расплавленного состояния при лазерной обработке. Она представляет собой мелкие ячейки светлого поля, очерченные темным полем размером несколько микрометров (рис. 4). Степень травимости различных макроучастков расплава различна, что свидетельствует о химической неоднородности легированного слоя. Форма макроучастков указывает на конвективный характер перемешивания расплава. Фазовый состав ЗЛЛ – ячейки светлого поля –  $\alpha$ -фаза, на границах ячеек – квазиэвтектика.

Поверхность анодной пленки пористая, что снижает её износостойкость при работе в паре трения. При воздействии лазером происходит передача теплоты в глубину металла. В результате алюминий, выплавляясь, поднимается вверх по капиллярам и заливает их, что приводит к получению беспористой, прочной и износостойкой рабочей поверхности детали.

Было изучено влияние лазерного воздействия на фазовый состав покрытия с помощью методов электронной микроскопии. Установлено, что микродифрактограммы поверхности до лазерной обработки являются микродифракто-граммами поликристаллического объекта, т.е. кольцевыми.

Согласно, этим результатам структура может быть интерпретирована как ГЦК с периодом решетки  $a=4,051 \pm 0,022$ , что соответствует поликристаллическому алюминию. Других фаз, например, оксидов или гидроксидов не обнаружено. Очевидно, оксидное покрытие до обработки не имеет выраженной кристаллической решетки - оно аморфно.

Вид микродифрактограмм после лазерной обработки существенно изменяется. Все полученные микродифрактограммы точечные, что говорит о том, что порошок имеет кристаллическую структуру. Можно говорить о том, что при лазерной обработке перед его разрушением в изначально аморфном оксидном покрытии интенсивно развиваются процессы кристаллизации. Таким образом, удалось подтвердить наличие дисперсно-упрочненного слоя, формирующегося в процессе воздействия лазерного излучения на анодированную пористую поверхность.

Была проведена проверка коррозионной стойкости различных покрытий. Проверялась модель износа в присутствии электролита. Установлено, что коррозионная стойкость получаемых покрытий на образцах (анодирование, эматалирование, лазерное модифицирование) в щелочной среде и в кислой среде удовлетворительна. Разрыхление получаемых покрытий не наблюдается.

### Список литературы

1. Ведерникова И.И. Повышение долговечности прядильных камер пневмомеханических прядильных машин / И.И. Ведерникова, С.А. Егоров, И.Ф. Мутовкин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 12. – С. 39-42.
2. Ведерникова И.И. Упрочнение рабочих поверхностей деталей машин лазерным модифицированием / И.И. Ведерникова, В.А. Полетаев // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 3. – С. 19-22.
3. Ведерникова И.И. Управление процессом анодирования при изготовлении и ремонте пневмопрядильных камер // Металлообработка. – 2008. – №6. – С. 22-25.
4. Ведерникова И.И. Повышение ремонтпригодности роторов пневмопрядильных устройств / И.И. Ведерникова, С.А. Егоров. // Технология текстильной промышленности. – 2011. – № 2 (331). – С. 87-88.

### References

1. Vedernikova I.I. Increasing the durability of the spinning chambers of a pneumomechanical spinning machine / I.I. Vedernikova, S.A. Yegorov, I.F. Mutovkin // Strengthening technologies and coatings. – 2006. – № 12. – P. 39-42.
2. Vedernikova I.I. Strengthening of the working surfaces of machine parts by laser modification / I.I. Vedernikova, V.A. Poletaev // Vestnik ISPU. – 2008. – Vol. 3. – P. 19-22.
3. Vedernikova I.I. Anodizing process control in the manufacture and repair of pneumatic spinning chambers // Metalworking. – 2008. – №6. – P. 22 - 25.
4. Vedernikova I.I. Increasing the maintainability of the rotors of pneumatic-row devices / I.I. Vedernikova, S.A. Yegorov // Technology of textile industry. – 2011. – № 2 (331). – P. 87-88.

<b>Ведерникова Ирина Игоревна</b> – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой технологии машиностроения, vedernikova@tam.ispu.ru	<b>Vedernikova Irina Igorevna</b> – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Engineering Technology, vedernikova@tam.ispu.ru
<b>Полетаев Владимир Алексеевич</b> – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, poletaev@tam.ispu.ru	<b>Poletaev Vladimir Alekseevich</b> – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology, poletaev@tam.ispu.ru
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина, г. Иваново, Россия	Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, Ivanovo, Russia

Received 23.04.2019