

Скобло Т.С.,  
Мартыненко А.Д.,  
Бантковский В.А.,  
Гончаренко А.А.,  
Сайчук А.В.,  
Тихонов А.В.,  
Лысенко С.В.

Харьковский национальный  
технический университет сельского  
хозяйства имени Петра Василенка,  
г. Харьков, Украина  
E-mail: martynenko\_dm@ukr.net

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

УДК 669. 715. 621.

*Скобло Т.С., Мартыненко А.Д., Бантковский В.А., Гончаренко А.А., Сайчук А.В., Тихонов А.В., Лысенко С.В. «Использование лазерных технологий для упрочнения и восстановления изделий из сталей и сплавов»*

В настоящей работе рассмотрены: методы упрочнения рабочей поверхности гильз цилиндров ДВС, их преимущества и недостатки; материалы из которых изготавливают цилиндры двигателей мировые производители, недостатки технологии производства цилиндров из серого чугуна.

Исследовано влияние режимов лазерной обработки на структуру и фазовый состав, а также физико-механические свойства внутренней поверхности гильз цилиндров двигателя КАМАЗ. Испытаниями на износостойкость (время испытания составило  $\approx 100$ ч) темплетов, вырезанных из гильз цилиндров после лазерного термоупрочнения, установлено, что износостойкость их увеличивается в 2,2-4,5раза по сравнению с серийным вариантом упрочнения (закалка токами высокой частоты) при этом наиболее высокие результаты по износостойкости получены при упрочнении 70-80% рабочей поверхности гильзы без оплавления либо с локальным оплавлением поверхности.

Лазерную термическую обработку (ЛТО) рабочей (внутренней) поверхности гильзы осуществляли по однозаходной спирали, получаемой за счет одновременного вращения и продольного перемещения лазерного луча вдоль гильзы, обработку цилиндров производили с использованием CO<sub>2</sub>-установки непрерывного действия «Комета-2» в интервале мощности 0,8 – 1,2кВт, радиус пятна лазерного излучения составлял 2-4мм.

Предложен метод деазотирования (разложения) поверхностного слоя в деталях путем обработки лазерным лучом, который позволяет сократить объем механической обработки, а также наносить покрытие при дальнейшем восстановлении, не нарушая прямолинейности длинномерной детали.

Выполнено математическое обоснование режимов ЛТО деталей машин и оборудования для разложения слоя после химико-термического упрочнения.

На основании проведенных математических расчетов, лабораторных и экспериментальных исследований определены оптимальные параметры лазерной обработки внутренней рабочей поверхности гильзы цилиндров, как для их упрочнения, так и для проведения процесса диссоциации нитридов в деталях подлежащих восстановлению, предварительно подвергнутых азотированию.

**Ключевые слова:** лазерная термическая обработка; гильза цилиндров; стали и чугуны; деазотирование; восстановление.

*Скобло Т.С., Мартыненко О.Д., Бантковский В.А., Гончаренко О.О., Сайчук О.В., Тихонов О.В., Лысенко С.В. «Використання лазерних технологій для зміцнення та відновлення виробів зі сталей і сплавів»*

У даній роботі розглянуті: методи зміцнення робочої поверхні гільз циліндрів ДВС, їх переваги та недоліки; матеріали з яких виготовляють циліндри двигунів світові виробники, недоліки технології виробництва циліндрів з сірого чавуну.

Досліджено вплив режимів лазерної обробки на структуру і фазовий склад, а також фізико-механічні властивості внутрішньої поверхні гільз циліндрів двигуна КАМАЗ. Випробуваннями на зносостійкість (час випробування дорівнював приблизно 100годинам) зразків, вирізаних з гільз циліндрів після лазерного термозміцнення, показано, що зносостійкість їх збільшується в 2,2-4,5рази в порівнянні з серійним варіантом зміцнення (гарт струмами високої частоти) при цьому найбільш високі результати по зносостійкості отримані при зміцненні 70-80% робочої поверхні гільзи без оплавлення або з локальним опалювальним поверхні.

ЛТО робочої (внутрішньої) поверхні гільзи здійснювали по однозаходній спіралі, одержуваної за рахунок одночасного обертання і позовжнього переміщення лазерного променя вздовж гільзи, обробку

циліндрів виробляли з використанням CO<sub>2</sub>-установки безперервної дії «Комета-2» в інтервалі потужності 0,8 - 1,2кВт, радіус плями лазерного випромінювання 2-4мм.

Запропоновано метод деазотування (розкладання) поверхневого шару в деталях шляхом обробки лазерним променем, який дозволяє скоротити обсяг механічної обробки, а також наносити покриття при подальшому відновленні, не порушуючи прямолінійності довгомірної деталі.

Виконано математичне обґрунтування режимів ЛТО деталей машин і устаткування для розкладання шару після хіміко-термічного зміцнення.

На підставі проведених математичних розрахунків, лабораторних та експериментальних досліджень визначені оптимальні параметри лазерної обробки внутрішньої робочої поверхні гільзи циліндрів, як для їх зміцнення, так і для проведення процесу дисоціації нітридів в деталях, які підлягають відновленню, та попередньо підданих азотуванню.

**Ключові слова:** лазерна термічна обробка; гільза циліндрів; сталі і чавуни; деазотування; відновлення.

*Skoblo, TS, Martinenko, OD, Bantkovsky, VA, Goncharenko, OO, Saychuk, OV, Tikhonov, OV, Lysenko, S.V. “ Restoration of laser technology for hardening and restoration of products from steel and alloys ”*

In this paper, we consider: methods for hardening the working surface of cylinder sleeves of an internal combustion engine, their advantages and disadvantages; materials from which engine cylinders are manufactured by world manufacturers, demerit in the production technology of gray cast iron cylinders.

Currently, in order to increase the wear resistance of friction surfaces in modern engineering, laser heat treatment is becoming widespread. This is due to certain advantages of this method of heating compared to traditional energy sources used in the restoration and hardening of parts. These include, first of all, the possibility of a high concentration of energy per unit area (with a certain combination of LHT radiation power and laser beam speed), and the corresponding possibility of heating and cooling at ultrahigh speeds in a practically unlimited temperature range.

The influence of laser processing modes on the structure and phase composition, as well as the physicomechanical properties of the inner surface of cylinder liners of a KAMAZ engine, was investigated.

Tests for wear resistance (test time was 100hours) of templates cut out of cylinder liners after laser thermal strengthening, it was shown that their wear resistance increases 2.2-4.5 times as compared with the standard version of hardening (high-frequency quenching) the highest wear-resistance results were obtained with hardening of 70-80% of the working surface of the liner without melting or with local melting of the surface.

The LHT of the working (inner) surface of the liner was carried out using a single-turn helix obtained by simultaneously rotating and longitudinally moving the laser beam along the liner, and the cylinders were processed using a «Comet-2» continuous-wave CO<sub>2</sub> installing in the 0.8 - 1.2 power interval kW, the radius of the laser spot 2-4mm.

To obtain different power densities of laser radiation and, as a consequence, different depths of thermal influence, the linear processing speed was changed at a constant power level and the size of the radiation spot. Various hardening schemes for the inner working surface of the liner were implemented by changing the speed of the longitudinal movement of the beam in the LHT process.

A method is proposed for the diazotisation (decomposition) of the surface layer in parts by laser beam treatment, which reduces the amount of mechanical processing and also causes the coating to be applied with further restoration without disturbing the straightness of a long piece.

A mathematical substantiation of LHT modes of machine parts and equipment for layer decomposition after chemical-thermal hardening has been performed.

Based on the mathematical calculations, laboratory and experimental studies, the optimal parameters of laser treatment of the inner working surface of the cylinder liner were determined, both for their hardening and for the process of dissociation of nitrides in the parts to be restored to previously subjected to nitration.

**Keywords:** laser heat treatment; cylinder liner; steel and cast iron; recovery.

### **Актуальность проблемы**

Увеличение моторесурса двигателей внутреннего сгорания связано, в первую очередь, с повышением долговечности и надежности деталей цилиндропоршневой группы, в частности, гильз цилиндров.

Современные методы упрочнения рабочей поверхности гильз цилиндров ДВС [1]:

1) Легирование чугуновых гильз цилиндров - является одним из методов упрочнения гильз цилиндров двигателя. Методика легирования чугуна гильзы цилиндров основана на обеспечении упрочнения металлической матрицы, что происходит благодаря торможению дислокаций внедренных атомов. Такая методика

упрочнения позволяет повысить твердость поверхности гильзы при нагреве и сопротивление деформации.

2) Азотирование чугуна гильзы цилиндров - основано на образовании пластичной карбонитридной фазы, которая повышает твердость и износостойкость рабочей поверхности чугунной гильзы цилиндров. Недостатком азотирования чугуна гильзы цилиндров является плохая приработка во время эксплуатации, что ведет к ухудшению шероховатости поверхности гильз. Следовательно, применение азотирования чугуна гильз цилиндров двигателей, которые работают в значительно запыленной среде, не является особо эффективной.

3) Сульфидирование и фосфатирование чугуна гильзы цилиндров.

Сульфидирование образует на поверхности гильзы цилиндров прочный слой сернистого железа, который обладает хорошими характеристиками, обеспечивающими низкий коэффициент трения, высокую износостойкость, хорошую приработку.

Недостатком сульфидирования чугуна гильзы цилиндров является образования коррозии с высокой вероятностью повреждаемости при эксплуатации.

4) Поверхностное упрочнение пластической деформацией чугуна гильзы цилиндров.

Пластическое деформирование основано на применении пластичности материала. Обработка пластическим деформированием позволяет повысить износостойкость, твердость, коррозионную устойчивость, усталостную прочность материала за счет удаления микротрещин и рисок на поверхности.

5) Закалка гильз цилиндров - основана на использовании токов высокой частоты и обеспечивает упрочнение на глубину до 2,5 мм. Такой способ закалки обеспечивает повышение твердости материала до 38-48HRC. Глубина упрочнения при закалке гильз цилиндров двигателя дает возможность производить их обработку под ремонтные размеры, что является преимуществом этого способа, с точки зрения продления рабочего ресурса восстановленной детали.

Используемая в настоящее время для упрочнения гильз цилиндров закалка токами высокой частоты (ТВЧ) не обеспечивает необходимой долговечности деталей и, кроме того, связана с большой неоднородностью свойств и высоким процентом брака вследствие растрескивания и деформации деталей в процессе обработки. Недостатком закалки гильз цилиндров токами высокой частоты является высокая вероятность возникновения трещин и геометрической деформации. Для уменьшения вероятности возникновения нежелательных дефектов подбирают оптимальные параметры обработки, определяющие продолжительность и температуру нагрева, а также интенсивность охлаждения детали. Для устранения недостатков закалки ТВЧ в качестве источника тепла применяют и лазерный луч большой мощности.

Из сказанного выше следует, что для обработки чугунных гильз цилиндров необходимо использовать такие альтернативные методы упрочнения, которые обеспечивают высокое качество восстановления поверхности и необходимые ее прочностные характеристики.

Гильзы из нелегированного чугуна не обеспечивают необходимой долговечности двигателей, особенно при их работе в тяжёлых условиях эксплуатации, когда усиливается процесс абразивного износа или возрастает тепловое воздействие на поверхность трения. Для повышения их износостойкости в гильзы вставляют нирезистовые вставки, которые изготавливают из аустенитного чугуна, легированного большим количеством никеля. Хотя это способствует к некоторому увеличению износостойкости деталей ЦПГ, однако существует ряд факторов, которые ограничивают их применение: этот материал может быть использован только для вставок в верхнюю часть цилиндров, т.к. он нетехнологичен при обработке. Кроме

того, использование чугунов с высоким содержанием Ni во многих случаях нецелесообразно и с экономической точки зрения тоже. Поэтому, в последнее время конструкторы и исследователи отказываются от практики применения нирезистовых вставок, предпочитая сплошной материал тела гильзы.

Фосфористые чугуны отличаются повышенным (0,3–1,0 %) содержанием фосфора (P) и имеют в структуре разорванную (при 0,3–0,6 % P) или замкнутую (при 0,6–1,0 % P) сетку фосфидной эвтектики. Содержание легирующих элементов в этих чугунах (табл. 1) такое же, как и в аналогичных низкофосфористых чугунах [2].

Таблица 1

Химический состав чугунов, используемых для изготовления гильз цилиндров автомобильных двигателей

Марка двигателя (чугуна), страна (фирма) производитель	Химический состав, %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	V	Mo
GKN (В. Британия), 5	3,2	2,0	0,65	0,2	-	0,4	-	-	-	-	-
GKN (В. Британия), 11	3,4	2,5	0,65	0,18	-	0,3	0,25	-	-	-	0,4
GKN (В. Британия), 28	3,2	1,9	0,65	0,25	-	-	-	0,8	0,04	-	-
ЗМЗ-53 (СНГ), С Ч 24-44	3,1-3,4	2,2-2,4	0,7-1,2	0,18-0,25	∅0,12	0,2-0,35	0,15-0,35	-	-	-	-
ЗИЛ-130 (СНГ), СЧ 18-36	3,2-3,6	1,9-2,4	0,7-1,2	0,2-0,3	∅0,12	0,2-0,35	∅0,35	-	-	-	-
Caterpillar (США)	3,2	2,17	0,73	-	-	0,25	-	0,23	0,03	0,04	-
САМАТЗ U (Япония)	3,29	2,16	0,72	0,07	-	0,33	0,32	0,55	0,02	0,05	0,16
ЯМЗ-236,-238 (СНГ)	3,2-3,5	2,1-2,6	0,6-0,8	∅0,2	∅0,12	0,3-0,45	∅0,12	0,15-0,4	∅0,08	-	-
КамАЗ-740 (СНГ)	3,1-3,4	1,9-2,5	0,6-0,9	∅0,2	∅0,12	0,25-0,5	0,15-0,4	0,25-0,4	∅0,12	-	-

Продолжение таблицы 1

AE Franse (Франция) , 38C	2,8-3,5	1,7-2,5	0,5-1,0	0,35- 0,65	0,1	0,2-0,5	-	-	-	-	-
Тев.- Thompson (Германия) , A62	3,2-3,5	1,8-2,2	0,6-1,0	0,3-0,5	0,07	0,2-0,5	-	-	-	-	-
Тев.- Thompson (Германия) , A82	3,2-3,5	1,8-2,2	0,6-1,0	0,3-0,5	0,07	0,2-0,5	0,3-0,6	-	-	-	-
ЗИЛ-130 (СНГ), КМЗ	3,1-3,5	1,8-2,5	0,5-1,0	0,4	0,15	0,25- 0,6	0,3	0,3	-	-	-
NPR (Япония) CI(Cu,Cr)	3,0-3,7	1,4-2,5	0,5-1,0	0,5-1,0	0,12	0,2-0,5	-	0,2-0,5	-	-	-
Тев.- Thompson (Германия) , A92	3,8-4,3	1,0-1,4	0,1-0,4	0,1-0,4	0,04	0,2-0,4	-	0,4-0,8	-	-	0,4
ЗМЗ-2401 (СНГ)	3,3-3,7	2,2-2,6	0,5-0,7	0,3- 0,45	0,1	0,5- 0,75	0,15- 0,5	0,5-0,8	0,15	-	-
ДУЙЦ (Германия )	3,57	1,9	0,70	0,45	-	0,33	0,13	0,32	-	-	-
FIAT (Италия)	3,30	2,25	0,67	0,53		0,41	0,17	0,40	0,03	-	0,43
NPR(Япон ия) CI(Ni,Cr, Mo)	3,0-3,7	1,4-2,5	0,5-1,0	0,2-0,5	0,12	0,5-1,2	0,15- 0,25	-	-	-	0,25

Между тем, лабораторные испытания и производственная практика показывают, что наибольшей износостойкостью обладают гильзы, полученные из легированного серого чугуна. Влияние химического состава и микроструктуры на механические свойства чугуна обстоятельно исследовано и на основе этого сложились определённые взгляды: при легировании и модифицировании чугунов, их металлической матрицы, которая упрочняется и меньше пластически деформируется при трении; имеет повышенные антифрикционные и прочностные свойства, которые определяются строением металлической основы и графита; а он является своеобразным индикатором микростроения чугуна и позволяет судить о качестве и свойствах материала для определённых условий трения. Однако, что касается влияния этих параметров на изнашивание чугуна, то здесь единой точки зрения не существует. Для повышения качества легированных чугунов, кроме методов плавки, также важны точное (при помощи средств автоматизации) выдерживание параметров кристаллизации и строгий контроль химического состава шихты и жидкого металла. Именно их сочетание, а также модифицирование дают возможность получать различные марки чугунов с заданными свойствами из одного базового.

Следует заметить, что по химическому составу материалы гильз цилиндров двигателей, произведенные в зарубежных, а также в странах СНГ и отечественных, используемые специализированными фирмами, различаются незначительно.

Таким образом, опыт применения серых чугунов для гильз цилиндров показывает, что наибольший эффект в повышении надёжности работы деталей определяется комплексным легированием чугуна такими элементами как Cr, Ni, Mo, Cu в оптимальном соотношении с основными элементами. Главное при этом – достижение такого уровня свойств легированного слоя, который в процессе трения способен в диапазоне рабочих режимов двигателя обеспечить образование на поверхности защитных вторичных слоёв. Необходимое условие – способность этих слоёв противостоять развитию схватывания, локализовать разрушения в весьма малых объёмах вторичных структур и иметь положительную реакцию на ужесточение режимов трения в цилиндре двигателя без возникновения катастрофических форм изнашивания.

В настоящее время для повышения износостойкости поверхностей трения в современном машиностроении широкое распространение получает высокоэффективный метод упрочнения – лазерная термическая обработка (ЛТО). Это обусловлено определенными преимуществами этого способа нагрева по сравнению с традиционными источниками энергии, применяемыми при восстановлении и упрочнении деталей. К ним следует отнести прежде всего возможность высокой концентрации энергии на единицу площади (при определенном сочетании мощности излучения ЛТО и скорости перемещения лазерного луча), и соответствующая возможность нагрева и охлаждения со сверхвысокими скоростями в практически неограниченном интервале температур. Возможность осуществления локального нагрева и упрочнения в труднодоступных участках обеспечивает интенсивный отвод тепла в основную массу обрабатываемой детали вследствие теплопроводности, что обеспечивает прохождение закалочных процессов и отсутствие общей деформации и коробления деталей в процессе обработки при сохранении свойств сердцевины.

Упрочнение поверхности с использованием энергии лазерного луча осуществляется в нескольких направлениях. Наиболее распространенным является лазерная закалка, основанная на нагреве тонкого поверхностного слоя материала и перевода его в высокотемпературное фазовое состояние (для железоуглеродистых сплавов – аустенитное) или жидкое состояние с последующим скоростным охлаждением за счет теплоотвода в ненагретую часть детали.

Одним из эффективных методов повышения износостойкости деталей, особенно чугунных, является лазерная термическая обработка, обеспечивающая в поверхностных слоях материала свойства, не достижимые при других, ставших традиционными методами упрочнения поверхностей деталей.

### **Анализ последних исследований**

Зарубежный и отечественный опыт применения ЛТО в промышленности показывает, что при обработке ответственных деталей массового и крупносерийного производства, особенно в автомобилестроении, транспортном и сельскохозяйственном машиностроении достигаются высокие показатели надёжности и значительный экономический эффект [3 - 5]. В качестве примеров можно привести закалку чугунных гильз и коленчатых валов, поршней и распределительных валов двигателей внутреннего сгорания, дорожек подшипников

качения, обработку различного инструмента, легирование и восстановление режущих поверхностей сельскохозяйственных машин, оборудования перерабатывающих производств и др. И хотя, в настоящее время, лазерная обработка является более дорогостоящей (по сравнению с другими методами упрочнения), в ряде случаев выигрыш от ее использования намного превосходит затраты. В связи с чем, в настоящее время, число выпускаемых в различных странах лазерных установок и комплексов постоянно возрастает [5-7].

Технологический процесс лазерной обработки не загрязняет окружающую среду, улучшает условия труда на производстве, легко поддается механизации и автоматизации, позволяет резко увеличить производительность труда за счет высокой скорости реализации процесса ЛТО [5, 7].

### **Формулирование цели**

Повышение надежности и долговечности двигателей внутреннего сгорания неразрывно связано с повышением износостойкости деталей цилиндропоршневой группы, и в первую очередь - гильз цилиндров. Используемая в настоящее время для упрочнения гильз цилиндров двигателя КАМАЗ закалка ТВЧ не обеспечивает необходимой долговечности детали и, кроме того, сопровождается высоким процентом брака вследствие растрескивания и значительной деформации детали в процессе обработки.

Известные достоинства лазерной термической обработки, и *имеющийся практический опыт* ее использования для упрочнения деталей машин и инструмента [1, 5, 7], позволяют предположить возможность ее использования для повышения износостойкости гильз цилиндров двигателя КАМАЗ.

Несмотря на то, что в настоящее время опубликовано большое количество работ о влиянии ЛТО на различные материалы с конкретными рекомендациями по выбору оптимальных режимов обработки [3, 5, 7], использование лазерного излучения в каждом конкретном случае требует детальной и глубокой проработки. Поскольку, при внедрении ЛТО наряду с энергетическими и достигаемыми характеристиками излучения важное значение имеют особенности упрочняемого материала, а так же конфигурация детали и условия ее работы, необходимо не только определить оптимальные для данного материала параметры лазерной обработки, но и выбрать определенные схемы упрочнения детали, разработать специальную оснастку, которая бы позволила на практике реализовать разработанные схемы и режимы ЛТО.

Объектом исследования является внутренняя поверхность гильз цилиндров, которая изготавливается из различных материалов и разработка технологического процесса восстановления рабочей поверхности.

### **Цель работы**

Это разработка метода лазерного термоупрочнения деталей из сталей и чугунов, математическое обоснование и экспериментальное подтверждение параметров ЛТО с целью повышения их износостойкости.

На основании вышеизложенного сформулированы основные задачи исследований:

- провести комплексные материаловедческие исследования по влиянию непрерывного лазерного излучения на структуру, фазовый состав и физико-механические свойства низколегированного серого чугуна, используемого для изготовления гильз цилиндров двигателя КАМАЗ;

- на основании исследований и сравнительных испытаний определить оптимальные параметры ЛТО и схему упрочнения рабочей поверхности гильзы цилиндров, обеспечивающих упрочнение детали на глубину не менее 0,3мм, сравнить эффективность ЛТО и закалки ТВЧ;

- провести обработку внутренней поверхности азотированной гильзы, математически и экспериментально обосновать эффект деазотирования поверхностного слоя.

Методический подход к исследованиям. С использованием методов оптической и растровой электронной микроскопии, рентгеновского фазового анализа и тензометрии, измерения твердости и микротвердости, а также испытаний на износостойкость оценено влияние непрерывного лазерного излучения на структуру и физико-механические свойства специального низколегированного серого чугуна гильз цилиндров двигателя КАМАЗ. Определены оптимальные параметры ЛТО, обеспечивающие получение упрочненных слоев глубиной не менее 0,3мм без оплавления поверхности, обладающих высокой твердостью и износостойкостью.

Методика металлографического анализа и измерения твердости и микротвердости:

Образцы для металлографического анализа вырезали из опытных гильз цилиндров, подвергнутых упрочнению лазерным излучением с последующей механической обработкой хонингованием.

Шлифы для металлографического анализа изготавливали вырезанием образцов в сечении, перпендикулярном упрочненной поверхности поперек дорожки ЛТО, кроме того, оценивали структурообразование на поверхности, упрочненной лазерной обработкой материала.

Для выявления структуры упрочненного слоя использовали следующие травители:

- 4%-ый раствор азотной кислоты ГОСТ 701-78 в этиловом спирте ГОСТ 18300-87 (ниталь);

- 4%-ый раствор пикриновой кислоты в этиловом спирте ГОСТ 18300-87.

Травление производили нахолодно в течение 3-5 с.

Оценку микроструктуры производили на оптическом микроскопе МИМ-8 при увеличениях 70, 340 (400) и 1000 крат.

Микротвердость структурных составляющих исследуемых материалов измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,49 и 0,98Н (50 и 100гс) по стандартной методике (ГОСТ 9450-76). Измерение микротвердости на образцах по глубине зоны лазерного воздействия проводили с шагом 0,05мм.

Определение твердости слоев лазерного упрочнения производили по методу Виккерса (ГОСТ 2999-75) на приборе ТП-7Р-1 при нагрузке 49Н (5кгс) и времени выдержки под нагрузкой 30с. Измерение твердости осуществляли на поверхности образцов, вырезанных из гильз цилиндров после ЛТО и окончательной механической обработки хонингованием. Отпечатки формировали по центру дорожки лазерного упрочнения. Замеры производили на 5 дорожках в разных зонах гильзы (в верхней части, по центру и в нижней).

Упрочнение проводили на специализированной СО<sub>2</sub> лазерной установке непрерывного действия «Комета-2» и технологическом модуле для упрочнения внутренней поверхности гильз цилиндров ЛТК-3 «Климат».



**Результаты исследования**

Поставленная в работе задача по ЛТО гильз цилиндров двигателя КАМАЗ потребовала применения целого ряда методов и методик упрочнения, а также различных подходов в исследованиях материала.

В работе рассмотрен специальный низколегированный серый чугун, используемый для изготовления гильз цилиндров двигателя КАМАЗ, химический состав которого приведен в табл. 1, а также жаропрочная сталь 20Х1М1Ф1ТР (табл. 2), которая используется при производстве штоков в узлах парораспределения турбин, и она работает в более жестких условиях эксплуатации (штоки проработали в атмосфере пара с температурой  $\approx 5400\text{C}$  и давлении пара на стопорный клапан штока, при закрытом его положении, - около 1200кН).

Таблица 2

**Химический состав стали 20Х1М1Ф1ТР**

<b>Содержание компонентов в исследуемых пробах образцов стали 20Х1М1Ф1ТР ( старое название ЭИ182 ) в %</b>	
<b>C</b>	0,17- 0,24
<b>Si</b>	до 0,35
<b>Mn</b>	до 0,5
<b>Ni</b>	до 0,5
<b>S</b>	до 0,03
<b>P</b>	до 0,03
<b>Cr</b>	0,9 - 1,4
<b>Mo</b>	0,8 - 1,1
<b>V</b>	0,7 - 1
<b>Ti</b>	0,05- 0,12
<b>B</b>	до 0,005
<b>Fe</b>	~95

<p><b>Класс:</b> Сталь жаропрочная релаксационностойкая. <b>Используется в промышленности:</b> крепежные детали с рабочей температурой до 580<sup>0</sup>С.                  Свойства и способ упрочнения:  <b>Термообработка:</b> Закалка 980<sup>0</sup>С, масло, Отпуск 700<sup>0</sup>С, 5 - 7ч,  <b>Твердость материала:</b> = 22-23 НВ  <b>Температура критических точек:</b> Ас<sub>1</sub> = 800 - 830 , Ас<sub>3</sub>(Ас<sub>м</sub>) = 890 - 930</p>	
---	--

Для отработки параметров процесса ЛТО было отобрано 6 гильз. В табл. 3 приведены результаты химического анализа материала исследуемых гильз. Установлено, что он отличается и относительно требований стандарта. Как видно из таблицы, для всех гильз характерно несколько пониженное по сравнению с требованиями содержание марганца и хрома, а также повышенное - серы.

Химический состав серого чугуна опытных гильз цилиндров

Вариант упрочнения (№ гильзы)	Содержание компонентов, %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni+Cu	Ti	P	S	Fe
Базовое (среднее значение)	3,26	2,08	0,59	0,22	0,50	0,02	0,09	0,018	остальное
1	3,03	2,10	0,62	0,22	0,58	0,02	0,09	0,025	- « -
2	3,23	2,03	0,57	0,20	0,58	0,02	0,09	0,025	- « -
3	3,31	2,13	0,68	0,22	0,47	0,02	0,09	0,025	- « -
4	2,93	1,95	0,67	0,20	0,50	0,02	0,09	0,036	- « -
5	3,06	2,20	0,72	0,20	0,59	0,02	0,09	0,035	- « -
6	2,99	2,32	0,62	0,20	0,45	0,02	0,09	0,031	- « -

Структура чугуна всех исследуемых гильз представляет собой перлитную металлическую матрицу, в которой равномерно располагаются включения графита пластинчатой формы (рис. 1).

Микроструктура материала гильз оценивалась по ГОСТ 3443, а результаты оценки приведены в табл. 4.



а)



б)

Рис.1. Микроструктура низколегированного серого чугуна гильз цилиндров двигателя КАМАЗ. Травление ниталом: а – х340; б – х1000

Методика лазерной термической обработки

Лазерную термическую обработку гильз цилиндров производили с использованием CO<sub>2</sub>-установки непрерывного действия «Комета-2» в интервале мощности 0,8 – 1,2кВт.

ЛТО рабочей (внутренней) поверхности гильзы осуществляли по однозаходной спирали, формируемой за счет одновременного вращения и продольного перемещения лазерного луча вдоль гильзы.

Необходимый радиус пятна лазерного излучения регулировался фокусным расстоянием (перемещением фокусирующей линзы) и при обработке составлял 2-4 мм.

Для получения различной плотности мощности лазерного излучения и как следствие - различной глубины термического влияния изменяли линейную скорость обработки при неизменном уровне мощности и размере пятна излучения. Различные схемы упрочнения внутренней рабочей поверхности гильзы реализовали за счет изменения скорости продольного перемещения луча в процессе ЛТО. Режимы ЛТО исследуемых гильз, приведенные в табл. 5.

Таблица 4

Результаты металлографического анализа материала опытных гильз цилиндров двигателя КАМАЗ (черт. 444-00.4) по ГОСТ 3443-87

Составляющая структура	Исследуемый параметр	Шкала (ГОСТ 3443)	Балл
Графит	форма включений графита	1А	ПГФ1, ПГФ3/(ПГФ4)
	размер (длина)	1Б	ПГд25 ПГд90 (ПГд180)
	распределение	1В	ПГр1, ПГр3 (ПГр7)
	количество	1Г	ПГ6, ПГ10
Перлит	содержание	6А	П (ФО)... П96 (Ф4)
	дисперсность	8	ПД0.5; ПД1.0 (ПД1.4)
Фосфидная эвтектика	строение	9А	ФЭ3, ФЭ4
	распределение	9Б	ФЭр1
	площадь включений	9Г	ФЭп2000...ФЭп13000

Таблица 5

Режимы ЛТО исследуемых гильз цилиндров (радиус пятна при ЛТО - 2мм)

Вариант упрочнения (№ гильзы)	Мощность лазерного излучения, кВт	Скорость обработки, мм/с	Скорость продольного перемещения луча, мм/с	Относительная площадь упрочнения, $S_{упр}/S_{общ}$ , %
1	0,95 – 1,00	20	0,20	68
2	0,80 – 0,85	10	0,10	70
3	0,85 – 0,90	13	0,22	45
4	0,90 – 1,00	10	0,12	65
5	1,00 – 1,05	20	0,14	100
6	1,00 – 1,05	20	0,18	80

Как видно из таблицы, гильзы, упрочненные по режимам 1, 2 и 4, за счет изменения скорости обработки имеют различную глубину упрочнения при практически одинаковой площади обработанной поверхности (65-70%). Необходимо также отметить, что при обработке по режиму 4 наблюдали оплавление поверхности гильзы по всей ширине дорожки лазерного излучения. При обработке по режиму 2 оплавление происходило лишь по центру дорожки, а при обработке по режиму 1 оплавления поверхности почти не происходило. Таким образом, на этих гильзах реализованы три различных способа лазерной обработки: с оплавлением поверхности, с частичным оплавлением поверхности и без него на поверхности. Гильзы, обработанные по режимам 3, 5 и 6, по способу лазерной обработки аналогичны гильзе, обработанной по режиму 1, т.е. без оплавления поверхности, однако они отличаются от последней различной площадью упрочнения. Таким образом, на гильзах, обработанных по режимам 1, 3, 5 и 6, реализованы различные схемы лазерного упрочнения.

Базой для сравнения выбрана гильза, упрочненная по серийной технологии (базовая) с закалкой ТВЧ, глубина закаленного слоя у которой составляла 1,5 – 2,0 мм при 100%-ом заполнении рабочей поверхности гильзы.

После ЛТО была произведена окончательная механическая обработка гильз хонингованием до размера окончательно готовой детали, припуск под ЛТО составлял 0,1 мм на сторону.

В табл. 6 приведены результаты испытаний на износостойкость (время испытания составило  $\approx 100$ ч). Темплеты, для исследований вырезали из гильз цилиндров

двигателя КАМАЗ после лазерного термоупрочнения. Из приведенных данных видно, что ЛТО во всех случаях обеспечивает повышение износостойкости рабочего слоя зеркала гильз цилиндров. Кроме того значительно превосходящую износостойкость серийных деталей, закаленных ТВЧ. Наиболее высоким сопротивлением изнашиванию обладают гильзы, обработанные без оплавления либо с локальными зонами оплавления рабочей поверхности. Важным результатом является и то, что при работе в паре с деталями упрочненными ЛТО существенно уменьшается износ и сопряженного контртела – хромированного поршневого кольца (табл. 6).

Таблица 6

Результаты испытаний на износостойкость образцов при различных вариантах упрочнения рабочей поверхности

Вариант упрочнения (№ гильзы)	Состояние поверхности после ЛТО	Относительная площадь упрочнения, $S_{упр}/S_{общ.}$ , %	Суммарный износ J мкм	Соотношение износов $J_{сер} / J_{лто}$
Базовый вариант (ТВЧ)	ТВЧ	100	9,59	1
1	без оплавления	68	2,56	3,75
2	частичное оплавление	70	4,04	2,37
3	без оплавления	45	4,47	2,15
4	оплавление	65	2,46	3,90
5	без оплавления	100	2,08	4,61
6	без оплавления	80	2,01	4,77

Математическое обоснование способа и параметров восстановления лазерным лучом деталей, предварительно подвергнутых химико-термической обработке

Эффективность упрочнения лазерной термической обработкой определяется, прежде всего, двумя основными параметрами: плотностью мощности излучения и временем его воздействия излучения на каждую точку поверхности. Изменяя мощность и время воздействия лазерного излучения на обрабатываемые участки поверхности, можно получить широкий спектр структурных состояний, которые, в свою очередь, определяют физико-механические свойства поверхностных упрочненных слоев материала.

Выбор оптимальных параметров процесса ЛТО гильз цилиндров двигателя КАМАЗ осуществляли, исходя из требований технического задания: получить слой лазерного упрочнения глубиной не менее 0,3мм, что определяется максимально допустимым износом гильзы в процессе эксплуатации двигателя. При этом твердость должна быть не ниже 500HV, что определяет максимальную износостойкость. Кроме того, выбор оптимальных параметров ЛТО должен сочетаться с наиболее эффективным использованием основного и вспомогательного оборудования [7, 8].

Ряд деталей сельскохозяйственных машин и оборудования для повышения износостойкости и обеспечения высокого уровня твердости подвергают химико-термической обработке – азотированию, цементации, нитро-цементации. В процессе их эксплуатации и изнашивания такой упрочненный слой частично сохраняется, что при восстановлении любым методом наращивания не позволяет получить качественного слоя. Удаление упрочненного слоя путём механической обработки уменьшает эффективное сечение и снижает усталостную прочность детали. Поэтому наиболее целесообразным является разложение перед последующим нанесением покрытий, или повторном упрочнении, ранее сформированных и частично сохранившихся фаз.

В работе выполнено математическое обоснование режимов разложения такого слоя методом ЛТО, которые подтверждены и экспериментальными исследованиями. Технология восстановления деталей, подвергнутых химико-термической обработке, предполагает предварительное удаление азотированного слоя с помощью лазерной термообработки путем нагрева поверхностного слоя на глубину формирования переходной зоны (до 0,2-0,5мм) до температуры диссоциации нитридов и карбонитридов. По данным проведенных исследований, последнее достигается при температуре  $\geq 550^{\circ}\text{C}$ .

Рассматривали поверхностную лазерную термообработку с помощью  $\text{CO}_2$ -лазера по технологии, при которой луч перемещается по поверхности вращающейся детали (типа тела вращения) вдоль ее оси. При этом зона лазерного упрочнения на поверхности будет перемещаться по винтовой линии, и при заданном шаге (поперечная подача – шаг обработки должен быть равен диаметру сфокусированного лазерного луча – 3-5мм) обеспечивается термообработка всей заданной поверхности.

Наиболее сложным процессом является обработка, с формированием зоны разупрочнения, внутренней поверхности детали типа втулки. Этот пример подробно рассмотрен с использованием положений теоретической физики в нашей работе [9].

В качестве геометрической модели был выбран полый цилиндр, ограниченный двумя коаксиальными цилиндрическими поверхностями. Используя принцип относительности, считали: процесс обработки является установившимся, отсутствует зависимость между температурой детали и ее теплопроводностью; луч лазера – постоянным (отсутствует неоднородность в распределении плотности мощности по диаметру лазерного пятна) и неподвижным, а цилиндр – совершающим сложное движение: вращательное относительно оси и поступательное вдоль нее [7-11]. Для расчетов выбрали цилиндрическую систему координат  $r, \theta, z$  (рис. 2) с осью, совпадающей с осью цилиндра (втулки). В рассматриваемом случае движущейся среды (т.е. перемещающейся втулки) уравнение теплопроводности имеет вид 4.1 с учетом конвективных процессов (во внутренней части втулки) [9-12].

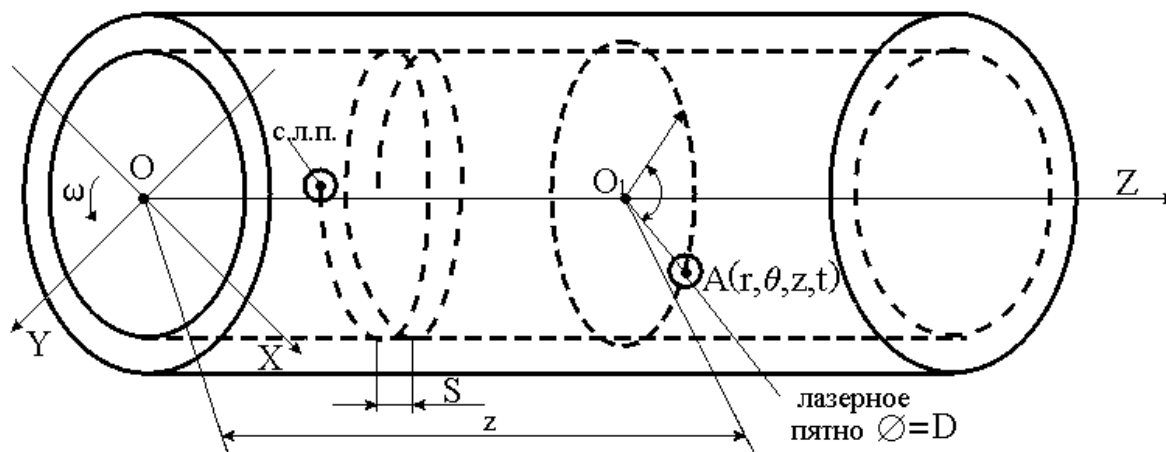


Рис.2. Схема для расчета режимов лазерной термообработки

$$\frac{D}{Dt} T - \chi \nabla^2 T = 0, \quad (1)$$

где  $\frac{D}{Dt}$  - субстанциональная производная;

$T$  – температура во внутренних точках цилиндра;

$\chi$  - коэффициент температуропроводности;

$\nabla^2$  - оператор Лапласа.

Температуру  $T$  отсчитывали от окружающей среды (температура воздуха внутри помещения  $T_b=20^{\circ}\text{C}$ ). После ряда математических преобразований, была получено [9, 10, 11] математическое выражение (2), описывающее влияние основных параметров ЛТО на процесс термической обработки и диссоциацию нитридов в стали.

$$\Delta = b - r = \left\{ \frac{1}{1 + \frac{2}{\pi} \left[ \frac{1}{\pi} \frac{1}{b} + \sqrt{2} \pi^{3/4} \sqrt{\frac{b}{D}} \sqrt{\frac{n}{\chi}} \right] (b-a)} - \frac{\pi \lambda D^2 T(r, \theta, z)}{4k\rho(b-a)} \right\} (b-a) \quad (2)$$

где  $b$  – наружный диаметр обрабатываемой втулки,  $b=3,25 \times 10^{-2}\text{м}$ ;

$r$  – радиус втулки, на глубине которого происходит диссоциация нитридов, м;

$a$  - внутренний диаметр обрабатываемой втулки,  $a=2,2 \times 10^{-2}\text{м}$ ;

$D$  – диаметр лазерного пятна на поверхности детали,  $D=4\text{мм}$ ;

$n$  – число оборотов детали при обработке,  $n=0,29 \text{ 1/с}$ ;

$\chi$  - коэффициент температуропроводности,  $\chi=5,96 \cdot 10^{-6}\text{м}^2/\text{с}$

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала втулки,  $\lambda=24,7\text{Вт/м}^{\circ}\text{К}$ ;

$k$  – коэффициент поглощения материалом лазерного луча,  $k=0,9$ ;

$\rho$  – плотность материала,  $\rho=7,83\text{г/см}^3$ ;

$T(r, \theta, z)$  - температура (под зоной упрочнения лазерным лучом на поверхности детали) на глубине  $\Delta = b - r$  при принятом выше условии, что  $T_0$  – температура окружающей среды (воздуха) равна нулю.

Для наиболее полного разложения продуктов предварительного химико-термического упрочнения требовалось использовать другие параметры обработки – больший диаметр лазерного луча и другую скорость обработки.

При  $T_0 \neq 0$  очевидно имеем:  $T_d(r, \theta, z) = T(r, \theta, z) + T_0$

где  $T_d(r, \theta, z)$  - действительная температура внутри втулки, при температуре окружающей среды (воздуха) не равной нулю.

Таким образом, находим:  $T(r, \theta, z) = T_d(r, \theta, z) - T_0$ ,

Полагая, что значение  $T_d(r, \theta, z)$  является равным температуре разложения азотированного поверхностного слоя детали, т.е.  $T_d(r, \theta, z) = 625^{\circ}\text{C}$ , и используя средние величины параметров разупрочнения при лазерной обработке (мощность излучения лазерного потока  $P=1,15 \times 10^3\text{Вт}$ ), входящих в (2) находим из него:

$$\Delta = b - r = 5,2 \cdot 10^{-4}\text{м} = 0,52\text{мм},$$

где  $\Delta$  - толщина слоя, разложившегося азотированного слоя в результате ЛТО детали.

Экспериментально выявлено, что процесс ЛТО сопровождается потрескиванием и газовой выделением.

#### Экспериментальные исследования по оценке диссоциации нитридов

Для определения эффективных параметров обработки, направленных на регулирование процесса разложения нитридов с учетом состояния штока после эксплуатации, провели лабораторные исследования на  $\text{CO}_2$  лазерной установке. Обрабатывали детали типа втулка с диаметром наружной поверхности 66мм. Исследовали влияние режимов и параметров обработки при постоянном диаметре

лазерного пятна  $D=4\text{мм}$ , которые приведены в табл. 7. Мощность лазерного излучения изменяли в пределах 1,0-1,3кВт, а скорость вращения детали –  $n=1-3\text{мин}^{-1}$ .

Качество обработанной поверхности хорошее и при диссоциации нитридов не требуется последующей механической обработки. Использование лазерной обработки перед последующим нанесением покрытия обеспечивает локальный нагрев и не приводит к разупрочнению сердцевины, что особенно важно для длинномерных деталей типа – шток, которые подвергаются сложной термической обработке.

Из приведенных данных видно, что наиболее эффективными, не изменяющими качества поверхности, являются режимы 1-7. Независимо от мощности излучения при 1об/мин (режимы обработки 8-10) отмечается нарушение качества поверхности за счет ее оплавления и появления шероховатости, что при дальнейшем использовании детали для нанесения, компенсирующего износ покрытия не приемлемо.

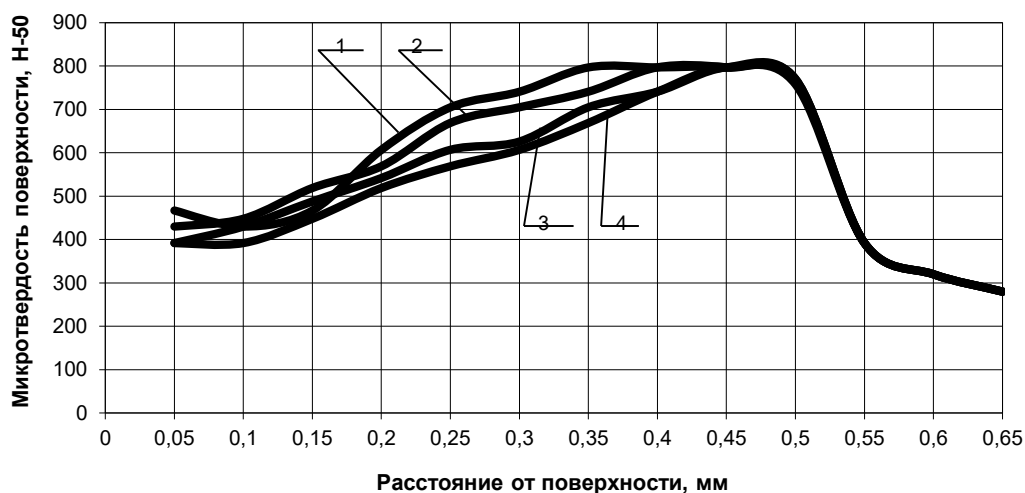
Следует отметить, что измерение твердости по HRC не в полной мере характеризует состояние обработанной поверхности. Это связано с получением тонкого слоя, который продавливается при испытании и вносит существенный вклад в результаты структурообразования исходной матрица. Для подтверждения степени разложения нитридов и оценки глубины деазотирования провели исследования макро- и микроструктуры, а также определение микротвердости.

Таблица 7

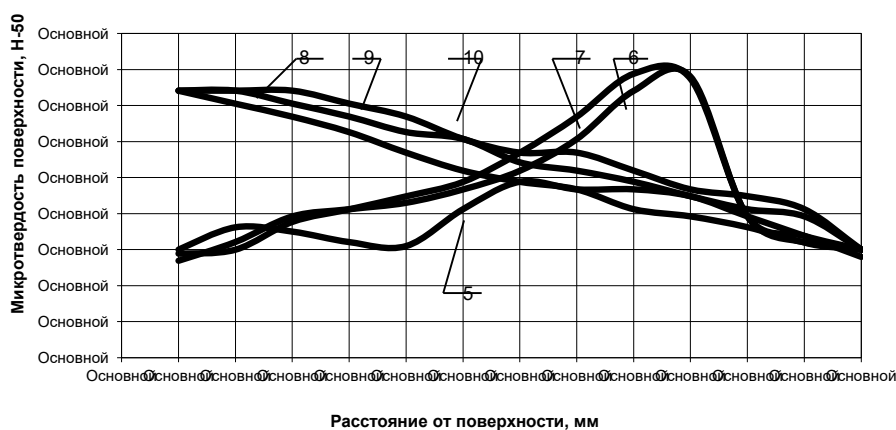
Параметры обработки и характер разупрочненной поверхности

№ п/п режима	Мощность излучения лазерного источника, Р, кВт	Число оборотов детали, n, об/мин	Средняя твердость поверхности, HRC	Характеристика обработанной поверхности	Ширина зоны разупрочнения за один оборот детали, мм (диаметр лазерного пучка – 4мм)
1.	1	3	72	Без изменения качества	3,5
2.	1,1	3	72	То же	3,5
3.	1,2	3	71	-//-	3,5
4.	1,3	3	69	-//-	4
5.	1,3	2	68	Матированная	4
6.	1,1	2	68	То же	4
7.	1,0	2	68	-//-	4
8.	1,1	1	60	Оплавление, без видимой шероховатости	4,5
9.	1,2	1	55	То же	5
10.	1,3	1	52	Оплавление с появлением шероховатости	6

Данные таблицы подтверждают, что режимы 8-10 приводят к оплавлению поверхностного слоя детали. Микротвердость при такой обработке высокая Н-50-669-741, что соответствует процессу оплавления с последующей закалкой из жидкого состояния. При обработке по остальным режимам твердость существенно снижается (рис. 3) и соответствует степени деазотирования (Н-50-269-467).



а)



б)

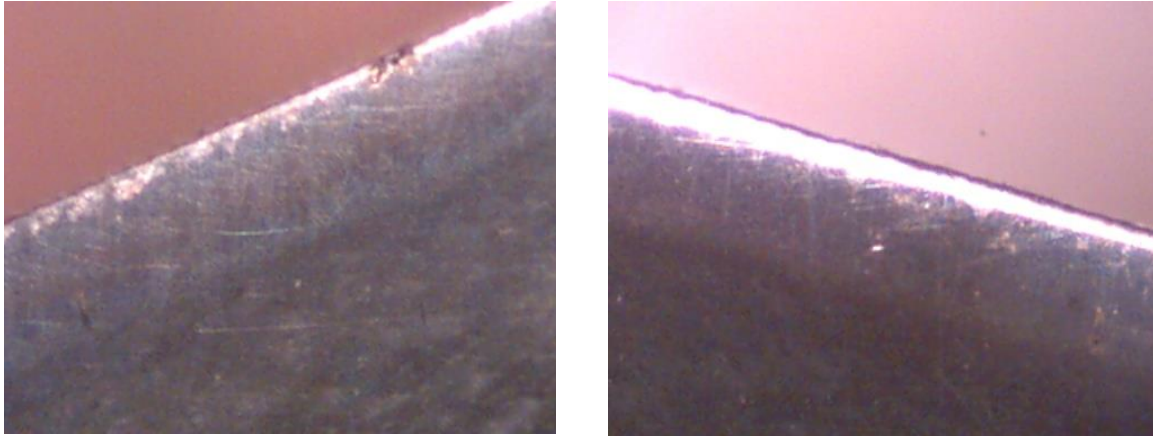
**Рис.3. Распределение микротвердости по сечению слоя после различных режимов лазерной обработки: а – по режимам 1-4; б – по режимам 5-10.**

Как показали ранее проведенные нами исследования [9, 10, 11], с увеличением числа оборотов при обработке и с уменьшением диаметра детали до 40мм, снижение твердости в разупрочненном слое зависит от плотности мощности (6,0-11,0КВт/см<sup>2</sup>) и она изменялась более существенно – в пределах от 56,6 до 26HRC.

Проведенными исследованиями выявлено, что при обработке лазерным лучом необходимо обеспечивать глубину деазотированного слоя не менее 17-20мкм для формирования качественной переходной зоны при последующем нанесении покрытия. Исследования макроструктуры при увеличениях в 10 и 60раз (рис. 4) подтвердили результаты оценки глубины деазотированного слоя по изменению микротвердости.

В участках с оптимальными параметрами обработки четко просматривается формирование светлой деазотированной зоны (рис. 5), а в оплавленных выявлена пористость и она характеризуется грубым строением. Характерная микроструктурная картина, полученная при различных режимах обработки полностью соответствует макроструктурным исследованиям и оценке микротвердости (рис. 6).

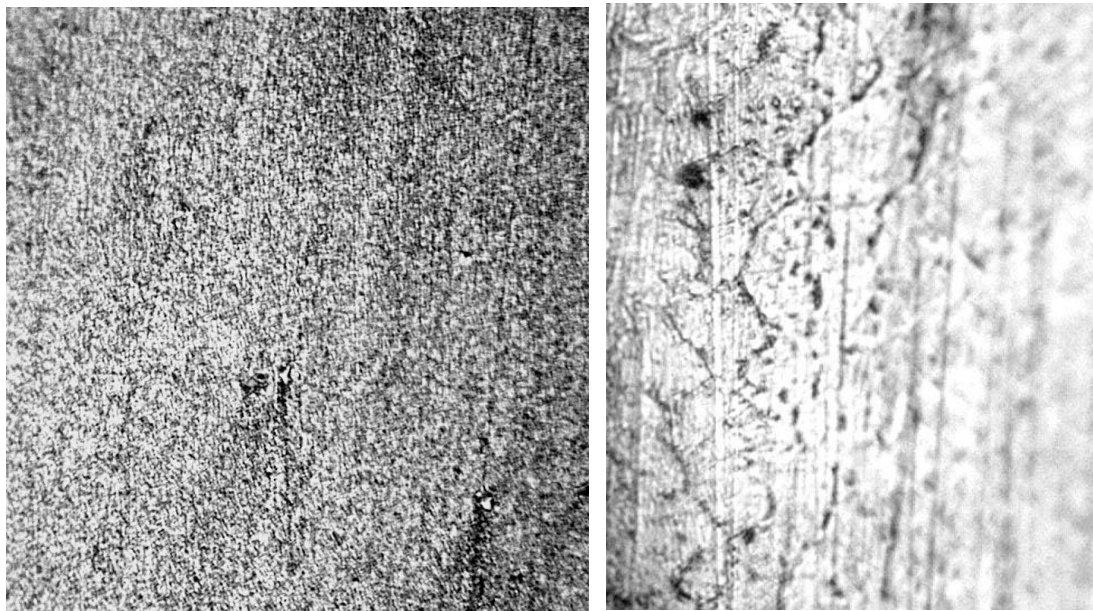




а)

б)

Рис.4. Макроструктура сечения поверхности детали после различных режимов лазерной обработки:  $\times 60$ ; а) режим –1; б) режим – 5



а)

б)

Рис.5. Микроструктура поверхности детали:  $\times 500$ ; а) – до обработки; б) – после обработки лазерным лучом.

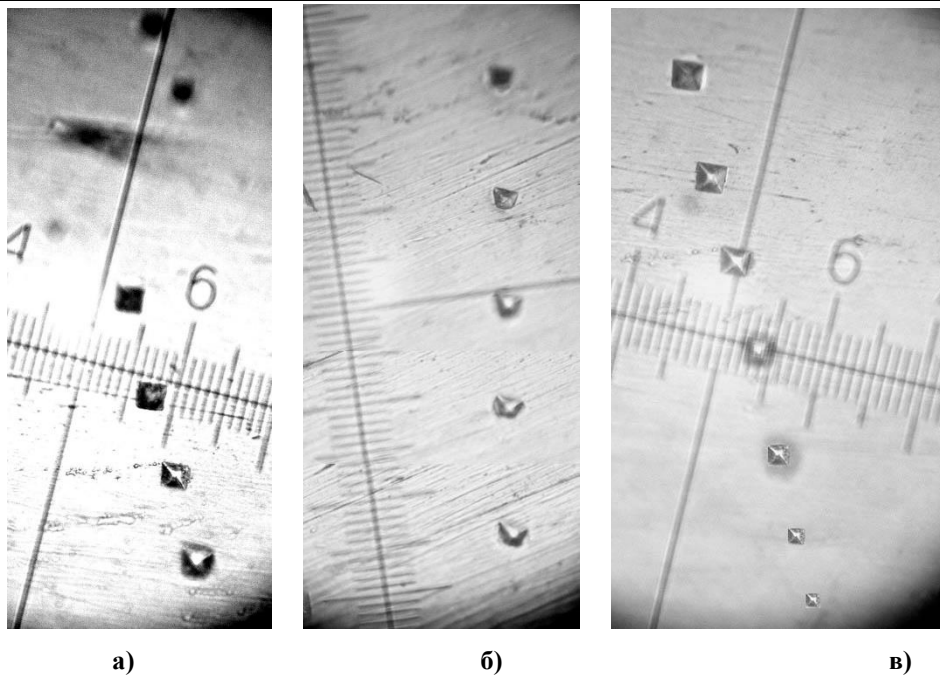


Рис.6. Распределение микротвердости в поверхности детали после различных режимов обработки:  $\times 500$ ; а – режим – 1; б – режим - 5; в – режим –10.

Проведенные исследования позволяют в зависимости от степени разложения нитридов на поверхности детали после эксплуатации использовать различные параметры обработки для обеспечения одинакового качества и твердости всей детали перед нанесением нового покрытия.

### Выводы

В данной работе рассмотрены различные области использования лазерных технологий для материалов – сталей и сплавов (чугунов), направленных на повышение их эксплуатационной стойкости, а также при восстановлении деталей с предварительным упрочнением химико-термической обработкой.

Данные лабораторных испытаний показали, что износостойкость гильз цилиндров, упрочненных лазерной обработкой, увеличивается в 2,2-4,5раза по сравнению с серийным вариантом упрочнения (закалка токами высокой частоты). При этом наиболее высокие результаты по износостойкости получены при упрочнении 70-80% рабочей поверхности гильзы без оплавления либо с локальным оплавлением поверхности в зоне воздействия лазерного луча.

Предложен метод деазотирования (разложения) поверхностного слоя в деталях путем обработки лазерным лучом, который позволяет сократить объем механической обработки, а также наносить покрытие при дальнейшем восстановлении, не нарушая прямолинейности длинномерной детали.

Выполнено теоретическое обоснование режимов и параметров восстановления ЛТО деталей для разложения слоя после химико-термического упрочнения. В основу расчетов принято уравнение теплопроводности, решение которого в зависимости от параметров лазерной обработки, позволяет определить эффективные параметры обработки: температуру и глубину зоны термической обработки (закалки) и в частности для стали 20X1M1Ф1TP.

В этом случае важным является и использование лазерной обработки для разложения азотированного слоя при дальнейшем восстановлении такой детали.

Предложенная технология показала, что оптимальными параметрами для диссоциации нитридов, являются - 625<sup>0</sup>С и 0,50-0,55мм соответственно.

Экспериментальные исследования подтвердили справедливость полученных расчетов. Установлено, что слой, в котором осуществляется диссоциация нитридов, находится в пределах 0,17- 0,54мм и ее начало происходит при температуре ≈550<sup>0</sup>С.

Установлено, что диссоциация нитридов сопровождается падением микротвердости до Н<sub>-50</sub> -269-464 (начальная Н<sub>-50</sub>-780-800). Экспериментально определена связь между параметрами обработки и степенью диссоциации нитридов, что позволяет обеспечивать однородность свойств неравномерно изнашиваемой поверхности детали перед её восстановлением.

#### Список использованных источников

1. Захаров Ю. А., Рыбакова Л. А. Основные способы упрочнения рабочей поверхности гильз цилиндров двигателей автомобилей // *Молодой ученый*. — 2015. — №2. — С. 157-160.

2. //www.autoezda.com/studentsauto/1242-tipu-materialov.html

3. Соловых Е.К. Тенденции повышения работоспособности гильз цилиндров ДВС / Е.К.Соловых // *Проблеми трибології (Problems of tribology)*. – Хмельницький: ХНУ, –2009. –№ 2. –С.47–57.

4. Иващенко С.Г., Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Шержуков И.Г., Тридуб А.Г. Анализ качества и износа гильз цилиндров дизелей зарубежного производства //"*Механизация и электрификация сельского хозяйства*" / М.:1997, № 7. С. 29...30

5. Сідашенко О.І., Тіхонов О.В., Скобло Т.С., Мартиненко О.Д., та ін.. *Практикум з ремонту машин. Загальний технологічний процес ремонту та технології відновлення і зміцнення деталей машин. Том 1.* / За ред. О.І. Сідашенко О.І., О.В.Тіхонова. Навчальний посібник. Харків: ТОВ «Пром-Арт». – 2018. - 416с.

6. Мартыненко А.Д., Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Авак Э.А., Слоновский Н.В. Упрочнение втулок гидронасосов из алюминиевых сплавов // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. - 1995. - № 11. – С.24-25.

7. Аулін В.В. Визначення технологічних параметрів лазерної обробки деталей з урахуванням специфіки впливу променя на конструкційні матеріали / В.В. Аулін, О.Й. Мажейка, Є.К. Солових // *Вісник інженерної академії України*. –2002. –№ 2. –С.30–41.

8. Арсенин В.Я. Методы математической физики и специальные функции. - М.: Наука, 1984. – 380с.

9. Мартыненко А.Д., Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Слоновский Н.В. Способ восстановления и упрочнения деталей лазерным лучом. // *Сб. науч. тр.: Підвищення надійності відновлюємих деталей машин. Вып. 4.* - Харьков: ХГТУСХ, 2000. – С.82-87.

10. Мартыненко А.Д., Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Науменко А.А., Слоновский Н.В. Метод восстановления длинномерных деталей, предварительно подвергнутых химико-термической обработке // *Труды 5-ої Міжнарод. науч.- прак. конф. "Фізическіе і комп'ютерніе технологи в народном хозяйстве"*. – Харьков: ХНПК "ФЭД". 2002. – С. 367-371.

11. Мартыненко А.Д., Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Слоновский Н.В. Математическое обоснование режима лазерной обработки деталей,

предварительно подвергнутых химико-термической обработке для повышения прочности восстанавливаемых покрытий // *Вестник Национального технического университета "ХПИ". Сб. науч. тр. тем. вып. "Динамика и прочность машин"*. Вып. 10. Т.2. – Харьков: НТУ "ХПИ". 2002. - С. 138-160.

12. Костюк, Г.И. Поглощение энергии лазерного излучения поверхностью обрабатываемого материала / Г.И. Костюк, Н.В. Руденко // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып.4(55). – Х., 2008. – С. 137 – 147.

### *References*

1. Zaharov Ju. A., Rybakova L. A. Osnovnye sposoby uprochnenija rabochej poverhnosti gil'z cilindrov dvigatelej avtomobilej // *Molodoj uchenyj*. — 2015. — №2. — S. 157-160.

2. //www.autoezda.com/studentsauto/1242-tipu-materialov.html

3. Solovyh E.K. Tendencii povyshenija rabotosposobnosti gil'z cilindrov DVS / E.K.Solovyh // *Problemi tribologii (Problems of tribology)*. –Hmel'nic'kij: HNU,–2009. –No 2. –S.47–57.

4. Ivashhenko S.G., Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Sherzhukov I.G., Tridub A.G. Analiz kachestva i iznosa gil'z cilindrov dizelej zarubezhnogo proizvodstva // "Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva" / М.:1997, № 7. S. 29...30

5. Sidashenko O.I., Tihonov O.V., Skoblo T.S., Martinenko O.D., ta in.. *Praktikum z remontu mashin. Zagal'nij tehnologichnij proces remontu ta tehnologii vidnovlennja i zmicnennja detalej mashin. Tom 1.* / Za red. O.I. Sidashenko O.I., O.V.Tihonova. Navchal'nij posibnik. Harkiv: TOV «Prom-Art». – 2018. - 416s.

6. Martynenko A.D., Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Avak Je.A., Slonovskij N.V. Uprochnenie vtulok gidronasosov iz aljuminievyh splavov // *Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*. - 1995. - № 11. – S.24-25.

7. Aulin V.V. Vznachennja tehnologichnih parametriv lazernoї obrobki detalej z urahuvannjam specifiky vplivu promenja na konstrukcijni materiali / V.V. Aulin, O.J. Mazhejka, Є.K. Solovih // *Visnik inzhenernoї akademii Ukraїni*. –2002. – № 2. –S.30–41.

8. Arsenin V.Ja. *Metody matematicheskoj fiziki i special'nye funkcii*. - М.: Nauka, 1984. – 380s.

9. Martynenko A.D., Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Slonovskij N.V. Sposob vosstanovlenija i uprochnenija detalej lazernym luchom. // *Sb. nach. tr.: Pidvishhennja nadijnosti vidnovljuemih detalej mashin. Vyp. 4.* - Har'kov: HGTUSH, 2000. – S.82-87.

10. Martynenko A.D., Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Naumenko A.A., Slonovskij N.V. Metod vosstanovlenija dlinnomernyh detalej, predvaritel'no podvergnutyh himiko-termicheskoj obrabotke // *Trudy 5-oj Mezhdunar. nach.- prak. konf. "Fizicheskie i komp'juternye tehnologi v narodnom hozjajstve"*. – Har'kov: HNPK "FJeD". 2002. – S. 367-371.

11. Martynenko A.D., Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Slonovskij N.V. Matematicheskoe obosnovanie rezhima lazernoj obrabotki detalej, predvaritel'no podvergnutyh himiko-termicheskoj obrabotke dlja povyshenija prochnosti vosstanavlivaemyh pokrytij // *Vestnik Nacional'nogo tehnicheskogo universiteta "HPI"*. Sb. nach. tr. tem. vyp. "Dinamika i prochnost' mashin". Vyp. 10. Т.2. – Har'kov: NTU "HPI". 2002. - S. 138-160.

12. Kostjuk, G.I. Pogloshhenie jenergii lazernogo izluchenija poverhnost'ju obrabatyvaemogo materiala / G.I. Kostjuk, N.V. Rudenko // Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov: sb. nauch. tr. Nac. ajerokosm. un-ta im. N.E. Zhukovskogo «NAI». – Vyp.4(55). – H., 2008. – S. 137 – 147.