

- па; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № а20060760; заявл. 20.07.2006; опубл. 28.02.2009. – 2009.
19. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки: пат. 15021 РБ, МПКВ24В39/02 / А.М. Довгалев, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков, С.А. Сухоцкий; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № а20091610; заявл. 13.11.2009; опубл. 30.10.2011.
20. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки: пат. 15022 РБ, МПКВ24В39/02. / А.М. Довгалев, С.А. Сухоцкий, Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирепа; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № а20091853; заявл. 23.12.2009; опубл. 30.10.2011.
21. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки: пат. 2068769 РФ, МКИ6В24В39/02 / А.М. Довгалев (РБ). – № 4733445/08; заявл. 28.08.89; опубл. 10.11.96, Бюл. № 31. – 4с.; ил.
22. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки: пат. 2068764 РФ, МКИ В24В39/02 / А.М. Довгалев (РБ). – № 4698344/08; заявл. 31.05.89; опубл. 10.11.96, Бюл. № 31. – 4с.; ил.
23. Инструмент для поверхностного пластического деформирования: пат. 2047471 РФ, МКИ6В24В39/02 / А.М. Довгалев (РБ). – №4855342/08; заявл. 27.07.90; опубл. 10.11.96, Бюл. № 31. – 4с.; ил.
24. Инструмент для упрочняющей обработки: пат. 2068768 РФ, МКИ В24В39/02 / А.М. Довгалев (РБ). – № 4732048/08; заявл. 22.08.89; опубл. 10.11.96, Бюл. № 31. – 4с.; ил.

Материал поступил в редакцию 05.11.12

DOVGALEV A.M. Magnetic and Dynamic Strengthening of Inside Surfaces of Long Pneumatic and Hydraulic Cylinders

The article deals with designs of individual magnetic and dynamic tools with magnetic and electromagnetic drives of deforming balls, which are intended for finishing and strengthening treatment of inner surfaces of cylinders.

УДК 621.983.044

Попова Ж.А.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ

При открытой рыночной экономике расширение промышленного производства невозможно без решения проблем повышения качества и конкурентоспособности выпускаемых машин. Одной из важных задач при обеспечении качества машин является повышение эксплуатационных показателей их деталей. Эти показатели определяются параметрами качества поверхностного слоя. Прочностные свойства, обеспечивающие работоспособность материалов в условиях эксплуатации конкретных изделий, составляют конструктивную прочность металлов. Повысить прочность металлов – это значит продлить жизнь машин, оборудования, уменьшить их массу, улучшить надежность, повысить долговечность, экономичность и снизить металлоемкость.

Надежность металлов оценивается рядом критериев. Порог хладноломкости является важнейшей характеристикой склонности металлов к хрупкому разрушению. Необходимо иметь значительный температурный запас вязкости. Долговечность деталей машин во многом лимитируется износом, являющимся результатом трения, возникающего между их контактирующими поверхностями при относительном движении. Износ зависит от многих параметров качества поверхностного слоя, поэтому важно знать возможности управления комплексом этих параметров в процессе обработки, включая геометрические, механические, физические и химические структурные свойства. Известно, что до 70% причин выхода из строя машин и механизмов связано с износом узлов трения. Все современные методы упрочнения металлов направлены на создание условий торможения дислокаций за счет увеличения их плотности, взаимодействия дислокаций с атомами легирующих элементов, измельчения блоков, образования дисперсионных частиц карбидов, нитридов и т.п. К наиболее прогрессивным методам упрочнения металлов и долговечности деталей машин относят ультразвуковую обработку, магнитную обработку, облучение частицами высокой энергии, лазерную обработку, высокие давления и т. д. Следовательно, одним из направлений обеспечения улучшения надежности и долговечности деталей машин является повышение износостойкости этих деталей, которое может быть достигнуто путем применения новых технологий обработки металлов и сплавов [1].

Целью данной работы является исследование влияния электромагнитного поля на изменения структуры и свойств деталей машин из стали марки 35ХГТ, применяемых в машиностроении, и обоснование эффективности применения магнитно-импульсной обработки (МИО) для упрочнения металлических изделий. Основными факто-

рами, определяющими воздействие магнитно-импульсной обработки (МИО) на металлические материалы, являются:

- ✓ непосредственное магнитное воздействие (намагничивание, перемагничивание, магнитострикция);
- ✓ ток проводимости, индуцированный переменной во времени составляющей магнитного поля;
- ✓ силовое воздействие магнитного поля на индуцированный электрический ток;
- ✓ джоулево тепловыделение;
- ✓ электронно-пластический эффект, обусловленный движением электронов и их взаимодействием с дислокациями, вызывающий снижение сопротивления деформированию и повышение пластичности металлов;
- ✓ упругие и пластические деформации [2].

Для общего случая падения плоской волны на плоскую поверхность металла значения напряженностей электрического и магнитного полей соответственно имеют вид:

$$E_x = E_0 \exp \left[-\frac{2\pi x}{c \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} \right] \cos \left(2\pi ft - \frac{2\pi x}{c \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} \right),$$

$$H_x = H_0 \exp \left[-\frac{2\pi x}{c \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} \right] \cos \left(2\pi ft - \frac{2\pi x}{c \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} - \frac{\pi}{4} \right),$$

где c – скорость света;

ρ – удельное электросопротивление;

μ – магнитная проницаемость;

f – частота колебаний [3].

При проникновении плоской электромагнитной волны в металл (рис. 1) уменьшается амплитуда напряженности электрического и магнитного полей, меняются фазы колебаний, фаза магнитного поля отстает от фазы электрического поля на $\pi/4$. С переходом к глубинным слоям металла количество поглощенной энергии убывает:

Попова Ж.А., преподаватель кафедры оборудования и автоматизации производства Барановичского государственного университета. Беларусь, БарГУ, 225404, Брестская обл-ть, г. Барановичи, ул. Войкова, 21.

$$\frac{4\pi}{\sqrt{\rho}} = \frac{2}{d},$$

где d – глубина проникновения магнитного поля в металл.

В слое $x = d$ поглощается 86,5% всей энергии, переданной в металл. Величина d зависит от констант материала и частоты электромагнитных колебаний

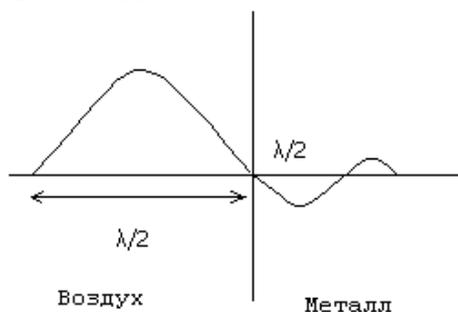


Рис. 1. Схема проникновения плоской электромагнитной волны в металл

Дальнейшие исследования показали, что под действием импульсного магнитного поля возникает ударная волна, которая, распространяясь вглубь образца, вызывает упрочнение внутренних слоев. Разупрочнение материала может быть связано с поверхностным разогревом образцов под действием индуцированного тока. С ростом величины разрядного тока уменьшается величина скин-слоя, а, следовательно, увеличивается плотность тока и повышается температура на поверхности обрабатываемого материала. Если отсутствует видимая деформация, то можно считать, что упрочнение внутренних слоев обусловлено в первую очередь распространением ударной волны. Магнитно-импульсная обработка вызывает необратимые структурные изменения в обрабатываемом материале. Сущность новой технологии магнитно-импульсного упрочнения состоит в том, что при магнитно-импульсном воздействии вещество изменяет свои физические и механические свойства. Улучшения свойств у ферро-магнитных материалов, прошедших магнитно-импульсную обработку, достигается за счет направленной ориентации свободных электронов вещества внешним полем, вследствие чего увеличивается тепло- и электропроводность материала детали. Взаимодействие импульсного магнитного поля с деталью из токопроводящего материала происходит тем интенсивнее, чем выше структурная и энергетическая неоднородность вещества. Поэтому, чем выше концентрация поверхностных и внутренних напряжений в металлических деталях, тем больше вероятность локальной концентрации в их микровихревой внешней поля, которые нагревают участки вокруг кристаллов напряженных блоков и неоднородностей структуры материала [4]. Для определения напряженного состояния детали необходимо учитывать физико-механические характеристики материала, тепловой эффект и геометрию зон контакта детали. На рисунке 2 показан график зависимости уровня внутренних напряжений детали от амплитуды значений ударного импульса.



Рис. 2. График зависимости уровня внутренних напряжений детали от амплитудных значений ударного импульса

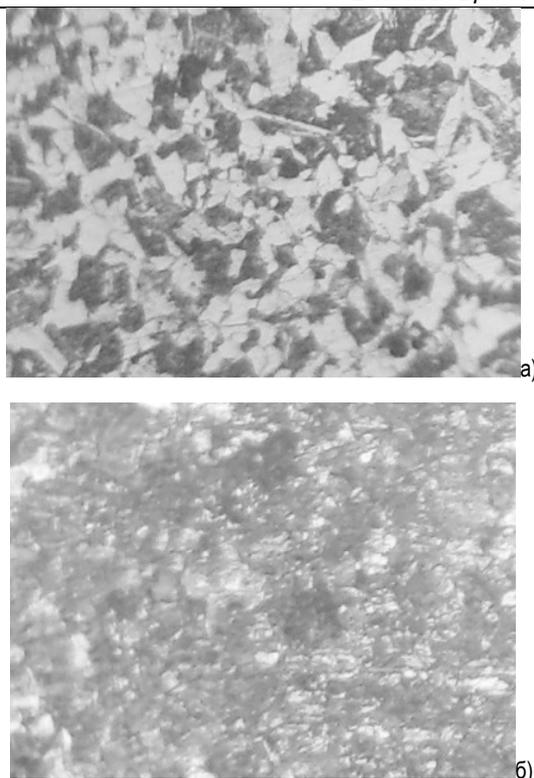
Анализируя полученные результаты, следует отметить, что увеличение значения амплитудных значений ударного импульса ведет за собой увеличение значения внутренних напряжений детали. Поэтому для увеличения стойкости работы деталей машин необходимо снизить величину внутренних напряжений в детали. Для снижения величины внутренних напряжений детали был применен метод магнитно-импульсного упрочнения. После магнитно-импульсного упрочнения уровень внутренних напряжений снизился на 20%.

Для изучения структуры металла проводили эксперимент, где были выбраны образцы из конструкционной стали 35ХГТ, которые имеют феррито-перлитную структуру с признаками видманштетта. Твердость образцов до обработки составляла в среднем 197 НВ. Был приготовлен шлиф поверхностей. Место в шлифе для проведения прицельной металлографии помечалось тремя отпечатками микротвердости, по которым можно идентифицировать определенное место в шлифе. Было проведено травление и фотографирование шлифа образцов в исходном состоянии. После этого проводилась магнитно-импульсная обработка. Обработку проводили на специальной магнитно-импульсной установке для упрочняющей обработки стальных изделий, Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси. Магнитно-импульсная установка представляет собой генератор импульсного тока (ГИТ), состоящий из емкостного накопителя электрической энергии (высоковольтной конденсаторной батареи), рабочего органа, (индуктора) и коммутирующего устройства (высоковольтного управляемого разрядника). С помощью разрядника производится разряд конденсаторной батареи на индуктор. В рабочей зоне индуктора импульсное магнитное поле наводит в находящейся в нем металлической заготовке вихревые токи. В результате взаимодействия токов индуктора и заготовки возникают мощные механические усилия, оказывающие давление как на заготовку, так и на индуктор. Под действием давления происходит упругое обжатие образцов, изменяющее их структуру и прочностные свойства. Емкостный накопитель заряжается до необходимой для данной технологической операции энергии с помощью зарядного устройства. Рабочие разряды накопителя производятся при помощи устройства поджига, включающего разрядник. В индуктор вставлялись образцы, которые подвергались обработке энергией различной мощности. Условия обработки образцов из стали 35 ХГТ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Условия обработки образцов из стали 35 ХГТ

Номер образца	Энергия, кДж	Количество импульсов
1	1,6	1
2	Необработанный	Необработанный
3	6,6	5
4	1,6	1
5	6,6	4
6	6,6	2
7	4	8
8	4	6
9	4	4
10	4	2

После магнитно-импульсной обработки были выполнены фотографии структур на металлографическом микроскопе модели МЕТАМ ЛВ при увеличении 100 раз, (рис. 3), а затем проводились измерения микротвердости на микротвердомере ПМТ-3. Результаты испытаний представлены в таблице 2.



а) в исходном состоянии; б) после обработки магнитным полем
Рис. 3. Микроструктура образцов (образец 9) из стали 35ХТ

Сравнение микроструктур до и после воздействия магнитным полем позволяет выделить изменения характерных структурных групп. Основные результаты воздействия магнитного поля на структуру стали 35ХГТ сводятся в следующем. Изменение твердости и структуры происходит по контуру цилиндрической поверхности образцов на определенную глубину. Глубина измененного слоя зависит от энергии и количества импульсов. Наблюдается две явно выраженные области (рис. 3):

- ✓ с измененной структурой, которая имеет однородное мелкозернистое строение. Повышенную твердость данной области можно объяснить образованием структуры сорбитообразного перлита в поверхностном слое;
- ✓ область основного металла с феррито-перлитной структурой. Кроме этого, происходит измельчение зерна в поверхностных слоях образцов и исчезает видманштеттная структура;
- ✓ устраняются участки различной травимости, связанные по видимому с неоднородностью структуры образцов.

С увеличением энергии и количества импульсов увеличивается глубина упрочненного слоя (таблица 2).

Таблица 2. Влияние мощности импульса электромагнитного поля на твердость и глубину упрочненного слоя

Материал образцов	Мощность импульса, кДж	Глубина упрочненного слоя, мкм	Микротвердость упрочненного слоя, НV	Твердость неупрочненных образцов, НВ
Сталь 35 ХГТ	1	0,020	210	163
	1	0,020	199	160
	1	0,030	200	162
	2	0,040	229	162
	2	0,045	235	163
	3	0,040	230	163
	4	0,055	235	164
	4	0,060	243	165
	4	0,060	245	163

Максимальная микротвердость поверхностного слоя стали 35ХГТ в данном случае достигалась при энергии 4 кДж и 4 импульсах. Увеличение числа импульсов до пяти приводит к возрастанию микротвердости примерно на 15%. При увеличении энергии и количества импульсов увеличивается амплитуда пропускаемого через образец тока, что приводит к существенному перегреву металла в области микродефектов. При этом возможны процессы неконтролируемого роста размеров зерна и нарушение когерентности между карбидами и матрицей. Кроме этого, менее интенсивно протекают процессы возврата свойств сплава.

Структура и свойства сталей в большей степени зависят от содержания в них углерода и так называемых постоянных примесей. Наиболее отчетливо влияние углерода проявляется в изменении механических свойств сталей. Структура стали после медленного охлаждения состоит из двух фаз – феррита и цементита. Содержание цементита в ней прямо пропорционально содержанию углерода в сплаве. Поскольку феррит пластичен, а цементит тверд и хрупок, прочность и твердость стали с ростом содержания углерода растут, а ударная вязкость, характеристики пластичности, плотности стали, электропроводность, теплопроводность и магнитная проницаемость снижаются. При этом повышается хладноломкость стали. При содержании углерода выше 1% прочность вновь начинается снижаться, так как выделяющейся на границах зерен вторичный цементит образует сплошную сетку хрупкого разрушения из-за концентрации напряжений на границах зерен. После магнитно-импульсной обработки в образцах из стали 35ХГТ не происходит выгорания углерода и других элементов, а также окисления поверхности изделия. Для получения заданной твердости целесообразно применять стали с содержанием углерода более 0,4% [5].

Основными легирующими элементами конструкционных сталей являются марганец, кремний, хром и никель. Титан, вольфрам, молибден, ванадий, бор и другие легирующие элементы в сталь вводят в сочетании с хромом, никелем и марганцем для дополнительного улучшения свойств. В конструкционной стали 35ХГТ содержится 0,8–1,1% (Mn) марганца, 0,17–0,32% (Si) кремния, 1,0–1,3% (Cr) хрома и 0,03–0,09% (Ti) титана. После магнитно-импульсной обработки стали 35ХГТ механические свойства стали выше. Особенно сильно повышается предел текучести, относительное сужение и ударная вязкость. Это объясняется тем, что стали с легирующими элементами обладают меньшей критической скоростью закалки, а следовательно, лучшей прокаливаемостью. Кроме того, после магнитно-импульсной обработки они имеют более мелкое зерно и более дисперсные структуры. Чем выше в стали концентрация легирующих элементов, тем выше ее прокаливаемость. Однако следует иметь в виду, что по достижению необходимой для данного сечения прокаливаемости дальнейшее увеличение в стали легирующих элементов можно не улучшить, а напротив, ухудшить механические, технологические свойства стали. Так, увеличение содержания в стали хрома или марганца до 1,0% практически не влияет на порог хладноломкости. Марганец устраняет также вредные сернистые соединения железа, растворяется в феррите и цементите. Марганец заметно влияет на свойства стали, повышая прочность и некоторые другие свойства. Кремний замедляет процесс отпуска мартенсита и после магнитно-импульсной обработки, стали, содержащие кремний имеют высокую вязкость. Легирующий элемент, титан, в стали 35ХГТ в небольшом количестве (до 0,05–0,15%) образует труднорастворимые в аустените карбиды, измельчает зерно, что понижает порог хладноломкости, повышает работу распространения трещины и уменьшает чувствительность к концентраторам напряжений. При большом содержании этих элементов прокаливаемость и сопротивление стали к хрупкому разрушению уменьшается из-за выделения большого количества карбидов. Легирующие элементы существенно повышают прочность стали после магнитно-импульсной обработки, упрочняя ферритную основу (в том числе и за счет сохранения большей плотности дефектов строения) и увеличивая дисперсности карбидных частиц. Наиболее сильно упрочняют сталь Cr и Si. В связи с этим конструкционные стали с легирующими элементами после магнитно-импульсной обработки будут обладать большой прочностью, но меньшей пластичностью [6].

В результате проведения теоретических и экспериментальных работ доказано, что при воздействии сильного электромагнитного поля происходят довольно существенные структурные изменения в металлических изделиях, приводящие к упрочнению. При увеличении мощности импульса электромагнитного поля от 1 до 5 кДж для образцов из стали 35ХГТ глубина упрочненного слоя увеличилась в среднем в 1,5 раза, а микротвердость – до 235–245 НВ, что говорит о перспективности данного метода для упрочняющей обработки стальных изделий. Проходя через проводящий металл, склонный к структурным и фазовым превращениям, импульсный электрический ток действует в первую очередь на элементы структуры, обладающие избыточной запасной энергией, на области со скоплениями дислокаций, примесных атомов, вакансий и т.д., вызывая необратимые физико-химические процессы в металле, которые еще недостаточно изучены. Изучение этих процессов и управление ими может привести к необходимому качеству материалов – повышенной твердости (за счет дисперсионного твердевания), вязкости (за счет получения мелкого зерна), прочности, пластичности, износостойкости. Вместе с тем, высокая технологичность и экологичность магнитных методов воздействия делает их перспективными в плане создания на их базе разнообразных технологий обработки металлов и сплавов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дриц, М.Е. Технология конструкционных материалов и материаловедение / М.Е. Дриц, М.А. Москалев. – Мн.: Высш. шк., 1990. – 447 с.
2. Исследование эффектов обработки сильным импульсным магнитным и электрическими полями на пластические и физико-механические свойства материалов для машино- и приборостроения: отчет о НИР / Фонд фундаментальных исследований РБ; Физико-технический институт НАН РБ. Проект №Т94-367, № ГР. 19942666. – Минск, 1997.
3. Кидин, И.Н. Термическая обработка стали при индукционном нагреве / И.Н. Кидин. – М., 1950. – 316 с.
4. Счастливец, В.М. Электронно-микроскопическое исследование структуры кристаллов мартенсита, зародившихся под действием импульсного магнитного поля / В.М. Счастливец [и др.] // Физика металлов и материаловедение. – 1981. — Т. 51. – Вып. 4. – С. 773–782.
5. Пинчук, Л.С. Материаловедение и конструкционные материалы // Л.С. Пинчук, В.А. Струк, Н.К. Мышкин, А.И. Свириденко – Мн.: Высш. шк. – 461с.
6. Лахтин, Ю.М. Материаловедение и термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин. – М., 1984. – 360 с.

Материал поступил в редакцию 15.04.12

POPOVA Zh.A. Features of physical and mechanical changes of structural steels properties after magnetic-pulse treatment

The objective of this research is to study phase and structural transformations and mechanical properties of structural steel 35 HGT exposed to a pulsed electric current and to develop the technology to improve the durability of machine parts.

In the article analyzes experimental researches of the effects of electromagnetic fields to change the structure and properties of steel 35 HGT used in machine building, and substantiates the efficiency of magnetic-pulse treatment for hardening of metal products.

This article describes experimental studies.

УДК 67.017

Кострицкий В.В., Лисовский А.Л.

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ

Введение. Совершенствование двигателей внутреннего сгорания (ДВС) связано с повышением мощности и снижением расхода топлива. Эти мероприятия обеспечиваются впрыскиванием бензина в цилиндры, регулированием фаз газораспределения, уменьшением рабочего объема и применением высокого наддува [1]. Форсирование ДВС связано с повышением эксплуатационных характеристик: давления в камере сгорания, числа оборотов коленчатого вала, удельной мощности на единицу массы двигателя. Все эти методы в различной мере повышают механические и тепловые нагрузки на детали ДВС. Особенно актуальна проблема снижения трения в трибосопряжениях ДВС. При испытаниях бензиновых ДВС по новому европейскому циклу около 20% топлива расходуется на преодоление трения. Для дизелей эти расходы еще больше [2]. Потери на трение связаны с изнашиванием ДВС. Перевод высокооборотных дизелей на тяжелое топливо приводит к повышению износа цилиндропоршневой группы (ЦПГ) в 2 раза [3]. Исходя из этих условий, научно-технический прогресс постоянно ищет новые технологические приемы упрочнения ЦПГ, в частности, гильз цилиндров с целью существенного улучшения основных технологических свойств: твердости, износостойкости, теплостойкости, коррозионной и адгезионной стойкости. Все эти перечисленные свойства должны позволить сократить затраты на производство и увеличить производительность труда, при этом с точки зрения экономики должны использоваться материалы с меньшим количеством легирующих элементов.

Одним из таких технологических приёмов является упрочнение

поверхностного слоя гильзы цилиндра за счёт изменения его химического состояния или структуры. Упрочнение поверхности может быть достигнуто различными методами, а именно – химико-термической, плазменной, лазерной обработкой и др. Все эти методы применяются в промышленности, каждый из которых имеет свои особенности, преимущества и недостатки. В рамках этой статьи мы рассмотрим последний вариант – лазерное упрочнение.

Работоспособность гильзы цилиндра ДВС во многом определяет ресурс ЦПГ и всего двигателя. Если поршень ДВС относится к быстроремонтируемым деталям, то замена и восстановление гильзы связано с существенно большими затратами. Общая тенденция к снижению массы двигателей привела к тому, что блок цилиндров изготавливается почти исключительно из алюминиевых сплавов [1]. Кроме преимуществ в снижении веса, в снижении трудоемкости изготовления, преимущество алюминиевого блока заключается в лучших условиях охлаждения ДВС за счет высокой теплопроводности алюминиевых сплавов. Поэтому возникла тенденция применения блоков цилиндров из легкого металла с различными втулками. Необходимость применения втулок вызвана низкой износостойкостью алюминиевого сплава в трибосопряжениях ЦПГ [4].

В случае применения в алюминиевом блоке стальных и чугунных гильз остается вечная проблема повышения износостойкости и прочности. Качественно новым методом упрочнения поверхности гильз является лазерная обработка. В течение последних трёх – пяти лет появились мощные газовые лазеры, обеспечивающие в

Кострицкий Виталий Владимирович, инженер, аспирант кафедры технологии конструкционных материалов Полоцкого государственного университета.

Лисовский Александр Леонидович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой технологии конструкционных материалов Полоцкого государственного университета.

Беларусь, ПГУ, 211440, Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина 29.