

УДК 620.179.16:62-135

## СТРУКТУРНАЯ И АКУСТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИИ МАТЕРИАЛА ЛОПАТОК ТУРБОКОМПРЕССОРА

© 2014 Ю. П. Тарасенко, Л. А. Кривина, Е. А. Мотова, Н. Е. Никитина

Институт проблем машиностроения Российской академии наук,  
г. Нижний Новгород

Объектами исследований являются рабочие лопатки из нержавеющей жаропрочной стали ЭИ961 (13X12H2B2MФ) шестой и восьмой ступеней ротора турбокомпрессора двигателя ДЖ59Л в постэксплуатационном состоянии и они же – после термического отпуска. Предметами исследования являются параметр собственной акустической анизотропии и коэффициент структурной анизотропии карбидной фазы материала турбокомпрессорных лопаток в состоянии после эксплуатации и последующего термического отпуска. Цель работы: показать перспективность ультразвукового эхо-импульсного метода – как неразрушающего метода контроля структуры материала непосредственно на изделии – как на стадии выходного контроля при изготовлении и ремонте лопаток, так и в состоянии после эксплуатации. Анализ структуры материала лопаток проведён методами оптической металлографии с использованием программного обеспечения «GoodGrains.» и ультразвукового эхо-импульсного метода неразрушающего контроля. Методом оптической металлографии установлено, что в материале перовой части лопаток в постэксплуатационном состоянии присутствует карбидная фаза игольчатой формы с высокой степенью анизотропии, являющаяся признаком деградации микроструктуры. Отмечено положительное влияние термического отпуска на однородность распределения карбидной фазы в материале рабочих лопаток ротора ТКВД. Выявлена корреляционная связь между параметром акустической анизотропии и коэффициентом металлографической анизотропии включений карбидной фазы материала лопаток. Эхо-импульсный неразрушающий метод контроля структуры дает перспективные возможности его применения на любой стадии выходного контроля непосредственно на изделии.

*Турбокомпрессор высокого давления (ТКВД), компрессорные лопатки, ультразвуковой эхо-импульсный метод, акустическая анизотропия, структурная анизотропия.*

### Введение

На современном этапе развития машиностроения, когда техника становится всё более сложной, выборочный контроль ответственных деталей, работающих в тяжёлых эксплуатационных условиях, становится недостаточным, так как в полной мере не может гарантировать высокую работоспособность и надёжность. Акустические методы неразрушающего ультразвукового контроля хорошо зарекомендовали себя в диагностике дефектов, нарушающих сплошность конструкционного материала, но практически не используются для исследований неоднородностей микроструктуры конструкционных материалов. Однако ультразвуковой эхо-импульсный метод неразрушающего контроля может быть весьма перспективным при оценке структурной неоднородности конструкционного материала, особенно на

заключительной стадии изготовления ответственных деталей, таких как рабочие лопатки ТКВД.

### Методика исследований

Объектами экспериментальных исследований являются рабочие лопатки из нержавеющей жаропрочной стали ЭИ961 (13X12H2B2MФ) шестой и восьмой ступеней ротора ТКВД двигателя ДЖ59Л в постэксплуатационном состоянии и они же – после термического отпуска.

Для проведения исследования микроструктуры материала рабочих лопаток применён метод металлографического анализа с использованием растрового оптического микроскопа «Неофот-32». Для определения коэффициента структурной анизотропии карбидной фазы использовано программное обеспечение GoodGrains. Коэффициент структурной анизотропии

находили, используя отношения размеров включений карбидной фазы вдоль их длины и ширины:

$$C = \frac{d_{cp}}{l_{cp}}, \quad (1)$$

где  $l_{cp}$  – средний продольный размер;  $d_{cp}$  – средний поперечный размер карбидной фазы.

Термический отпуск (ТО) проводился в лабораторной электропечи при температуре 600°C в течение двух часов с последующим охлаждением испытуемых деталей на воздухе [1].

Акустические измерения проведены эхо-импульсным неразрушающим методом с использованием акустического стенда на базе серийного прибора И2-26 [2], а также пьезоэлектрического преобразователя сдвиговых волн частотой 9 МГц, размером 8x8 мм. При применении сдвиговых волн важной характеристикой является относительная разница скоростей сдвиговых волн взаимноперпендикулярной поляризации. При возникновении напряжений или пластической деформации вдоль определённого направления в материале скорости сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперёк этого направления, будут различны. Выбранный безразмерный параметр – величина акустической анизотропии материала – может служить количественной характеристикой структурных изменений в нём [3]. Также этот параметр в определённой степени показывает наличие текстуры и размеров зёрен различных структурных составляющих.

Для лопаток шестой и восьмой ступеней проведены прецизионные (с погрешностью 0,01 мкс) измерения задержек в материале импульсов сдвиговых волн, поляризованных вдоль (направление 1) и поперёк (направление 2) оси лопатки. Контролю подвергалась зона пера лопатки у галтели, подверженная при эксплуатации наибольшим рабочим нагрузкам. Им-

пульсы распространялись по нормали к поверхности лопатки, несколько раз «прозвучивая» толщину детали. На основании прецизионных измерений задержек импульсов в материале вычислены параметры собственной акустической анизотропии материала лопаток в точке контроля:

$$a_0 = \frac{t_2 - t_1}{t_{cp}} \times 100\%, \quad (2)$$

где  $t_1$  – задержка импульса сдвиговой волны, поляризованной вдоль оси лопатки;  $t_2$  – задержка импульса сдвиговой волны, поляризованной поперёк оси лопатки.

Как принято в неразрушающем контроле, величина задержки отсчитывалась от первого отражённого импульса. Точность определения величины  $a_0$  по результатам измерения временного интервала между первым и третьим эхо-импульсами составила 0,3 %.

### Результаты исследований

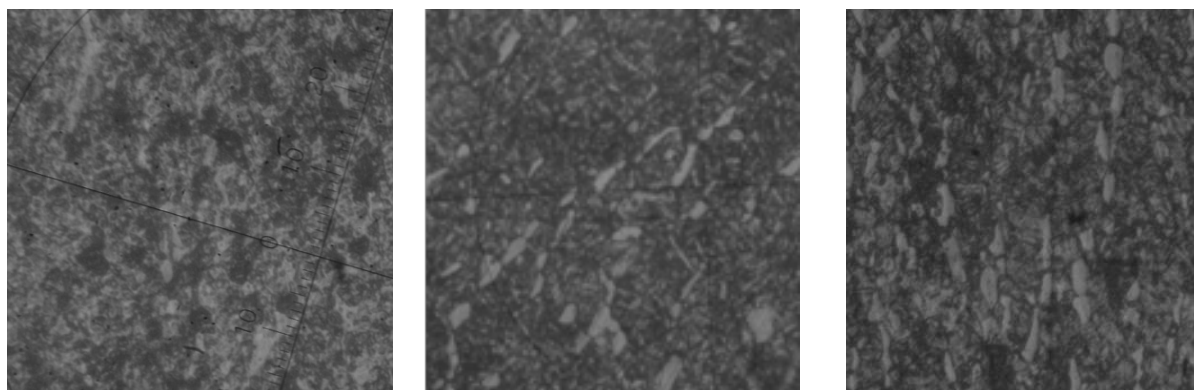
На рис. 1 представлены фотографии внешнего вида рабочей лопатки шестой ступени ротора турбокомпрессора высокого давления двигателя ДЖ59Л в постэксплуатационном состоянии (рис. 1, а), а также после последующего термического отпуска и механической обработки (рис. 1, б).

На рис. 2 приведены фотографии микроструктуры материала замковой части, торцевой части пера, а также части пера, вырезанной из галтели, лопатки шестой ступени после эксплуатации. Материал замка имеет микроструктуру, характерную для сплава ЭИ 961 с однородным распределением фаз.

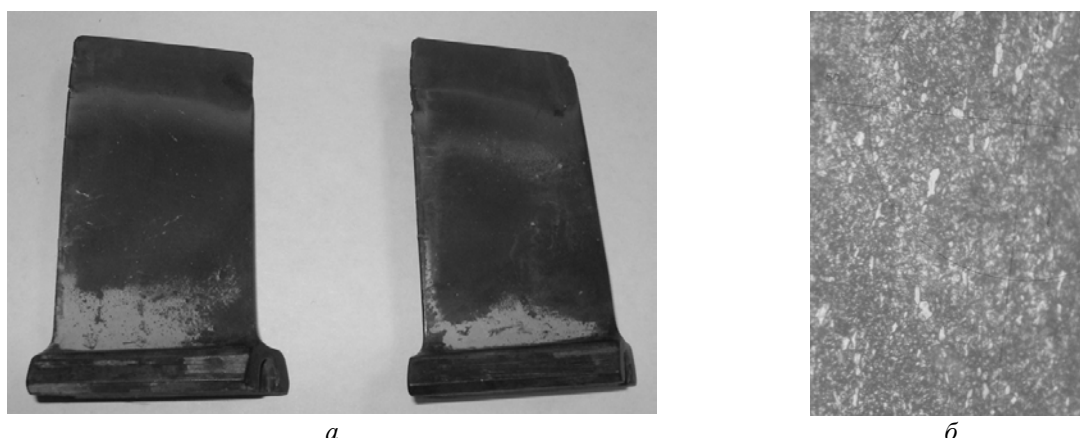
На рис. 3 представлены фотографии внешнего вида рабочей лопатки восьмой ступени непосредственно после эксплуатации (рис. 3, а) и микроструктура материала на торце пера лопатки (рис. 3, б).



*а* *б*  
 Рис. 1. Внешний вид рабочей лопатки ТКВД шестой ступени:  
*а* – после эксплуатации; *б* – после термической и механической обработок



*а* *б* *в*  
 Рис. 2. Микроструктура материала лопатки шестой ступени после эксплуатации:  
*а* – замковая часть (x500); *б* – торцевая часть пера (x500); *в* – перовая часть лопатки у галтели (x500)  
 (вертикальное направление на снимках соответствует продольному направлению перовой части лопатки)



*а* *б*  
 Рис. 3. Лопатка ТКВД восьмой ступени:  
*а* – внешний вид после эксплуатации; *б* – структура на торце пера лопатки (x500)  
 (вертикальное направление на снимках соответствует продольному направлению перовой части лопатки)

Структура для лопаток шестой и восьмой ступеней идентична. По всей длине пера лопатки наблюдается наличие строчной карбидной фазы (игл), вытянутой в поперечном направлении. Их длина варьируется от 4 до 10 мкм, а ширина - от 0,5 до 2 мкм для лопаток шестой ступени, для лопаток восьмой ступени соответственно 2,5-4,5 мкм и 0,8-1,2 мкм. Можно предположить, что в процессе эксплуатации в результате длительного воздействия рабочих напряжений и повышенных температур произошла структурная деградация материала, так как в материале замковой части лопатки «игольчатой» карбидной фазы не наблюдается (рис. 2, а).

На рис. 4 показана характерная микроструктура материала лопаток шестой и восьмой ступеней после термического отпуска.

В микроструктуре стали ЭИ961 после термического отпуска карбидные включения приобрели более округлую форму, но следы игольчатой карбидной фазы сохранились во всех исследуемых образцах, при этом длина «иголок» уменьшилась в среднем в 2,5 раза для лопаток шестой ступени и в 1,2 раза для лопаток восьмой ступени.

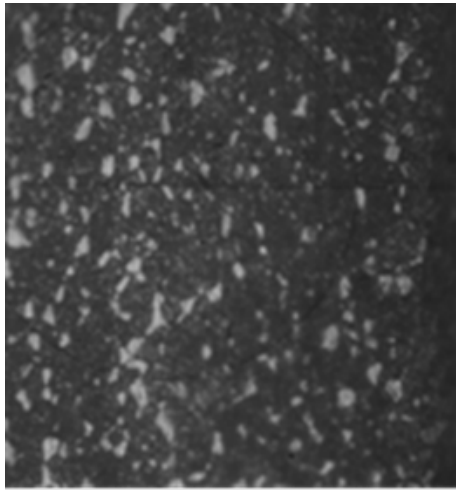
В табл. 1 приведены результаты определения параметра акустической анизотропии и размеров карбидной фазы в материале лопаток двух ступеней. После термообработки в лопатках шестой и восьмой ступеней наблюдается снижение величины  $a_0$ , что может быть связано с изменением формы включений карбидной фазы. В лопатках 6.1, 8.2, для которых размер карбидной фазы после ТО наименьший, уровень акустической анизотропии самый низкий.

На рис. 5, 6 приведены гистограммы параметра структурной анизотропии, определённой по размерам карбидной фазы, и параметра акустической анизотропии в материале лопаток шестой и восьмой ступеней после ТО.

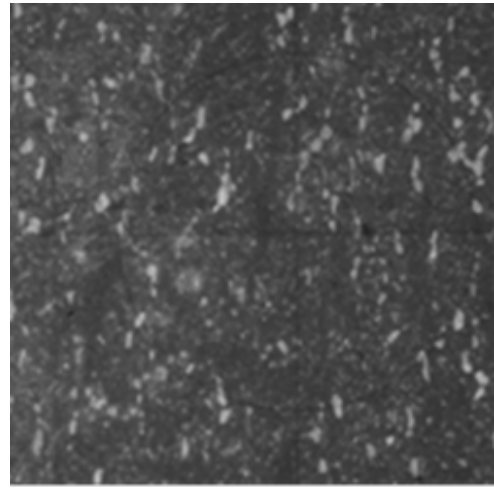
Следует отметить, что величина акустической анизотропии является интегральным параметром, в который вносят вклад разные структурно-фазовые составляющие. По результатам экспериментов обнаружена корреляция между параметром акустической анизотропии и коэффициентом анизотропии карбидной фазы, определённым методом оптической металлографии, для лопаток после термообработки.

Таблица 1. Параметр акустической анизотропии и размеры карбидной фазы в материале лопаток в постэксплуатационном состоянии и после ТО

№ образца лопатки	$a_0, \%$ в постэксплуатационном состоянии	$a_0, \%$ после ТО	Размеры карбидной фазы, после ТО	
			длина, мкм	ширина, мкм
6.1	0,90	0,05	1 - 3	0,5 - 1
6.2	0,44	0,17	2,2 - 4	1 - 2,2
6.3	1,4	0,55	2 - 4	2 - 3
8.1	1,65	0,44	2 - 4	1 - 2,5
8.2	1,13	0,05	1,8 - 3	0,2 - 1
8.3	1,3	0,96	2,5 - 3	1,8 - 2,2

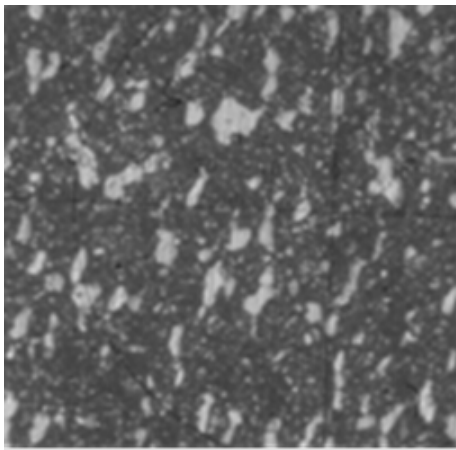


образец 6.1

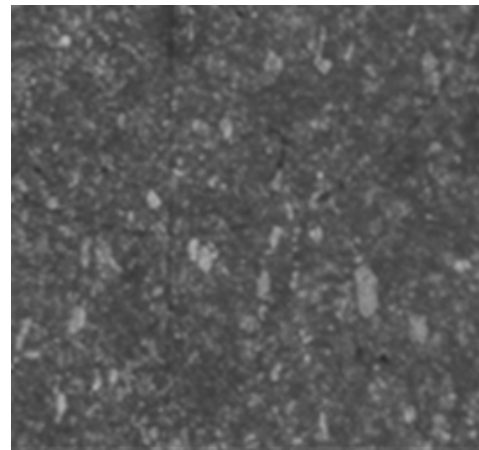


образец 6.2

а



образец 8.1



образец 8.3

б

Рис. 4. Микроструктура материала лопаток после термического отпуска:  
а – шестая ступень (x500); б – восьмая ступень (x500)  
(вертикальное направление на снимках соответствует  
продольному направлению перовой части лопатки)

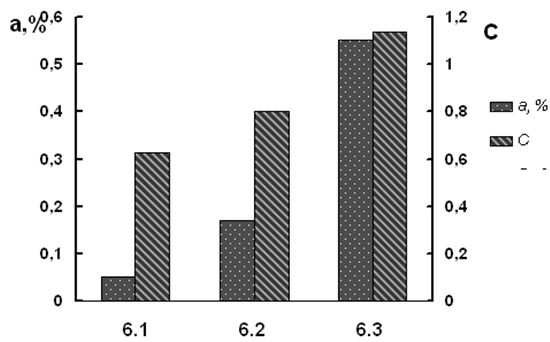


Рис. 5. Коэффициент анизотропии размеров карбидной фазы и параметр акустической анизотропии для лопаток шестой ступени после термического отпуска

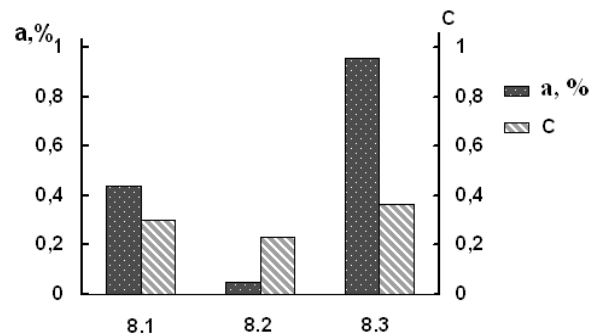


Рис. 6. Коэффициент анизотропии размеров карбидной фазы и параметр акустической анизотропии для лопаток восьмой ступени после термического отпуска

### Выводы

1. Методом оптической металлографии установлено, что в материале перовой части лопаток в постэксплуатационном состоянии присутствует карбидная фаза игольчатой формы с высокой степенью анизотропии, являющаяся признаком деградации микроструктуры.

2. Выявлена корреляционная связь между параметром акустической анизотропии и коэффициентом металлографии

ческой анизотропии включений карбидной фазы материала лопаток.

3. Отмечено положительное влияние термического отпуска на однородность распределения карбидной фазы в материале рабочих лопаток ротора ТКВД.

4. Показаны перспективные возможности применения ультразвукового эхоимпульсного метода в качестве неразрушающего метода контроля структуры материала непосредственно на изделии, как на стадии выходного контроля при изготовлении и ремонте лопаток, так и в состоянии после эксплуатации.

### Библиографический список

1. Царёва И.Н., Бердник О.Б., Кривина Л.А., Фель Я.А. Оценка технического состояния рабочих лопаток компрессора из сплава ЭИ961 энергетической установки ГТЭ-45-3 // Прикладная механика и технологии машиностроения: сб. науч. тр. Н. Новгород: Интелсервис, 2013. № 22 (1). С. 37-42.

2. Моничев С.А., Никитина Н.Е. Ультразвуковой эхо-метод исследования

упругих свойств твёрдых тел. Препринт № 24-04-03 / Нф ИМАШ РАН. Н. Новгород, 2004. 22 с.

3. Мотова Е.А., Никитина Н.Е., Тарасенко Ю.П. О возможности диагностики компрессорных лопаток по параметрам затухания и скорости ультразвука // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 4. С. 88-95.

### Информация об авторах

**Тарасенко Юрий Павлович**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: [npktribonika@yandex.ru](mailto:npktribonika@yandex.ru). Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

**Кривина Людмила Александровна**, научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: [npktribonika@yandex.ru](mailto:npktribonika@yandex.ru). Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

**Мотова Елена Алексеевна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: [npktribonika@yandex.ru](mailto:npktribonika@yandex.ru). Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

**Никитина Надежда Евгеньевна**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: [npktribonika@yandex.ru](mailto:npktribonika@yandex.ru). Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

## STRUCTURAL AND ACOUSTIC ANISOTROPY OF TURBOCOMPRESSOR BLADE MATERIAL

© 2014 Y. P. Tarasenko, L. A. Krivina, E. A. Motova, N. Ye. Nikitina

Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Science  
Nizhny Novgorod, Russian Federation

The investigation is concerned with working compressor blades of the sixth and eighth stages of the turbo-compressor rotor of the ДЖ59Л engine made of stainless ЭИ961 (13X12H2B2MФ) heat-resistant steel in a post-operation state and the same blades after tempering. The objects of research are the parameter of intrinsic acoustic anisotropy and the structural anisotropy factor of the carbide phase of material of turbo-compressor blades in post-operation state and subsequent tempering.

The aim of the study is to show that the ultrasonic echo technique holds promise as a method of nondestructive control of the material structure directly on the product both at the stage of output control in the production and repair of blades, and in the post-operation state.

The analysis of the blade material structure is carried out using the methods of optical metallography with the use of the "GoodGrains" software and ultrasonic echo technique of nondestructive control.

Using the method of optical metallography it was established that a carbide phase of acicular shape is present in the material of blade airfoil with a high degree of anisotropy, which indicates the degradation of microstructure in the post-operation state. Positive influence of tempering on the uniformity of carbide phase distribution in the material of rotor blades is noted.

Correlation between the parameter of acoustic anisotropy and the metallographic anisotropy factor of inclusions of a carbide phase in the blade material is revealed.

The echo technique of nondestructive control of structure shows great promise for application at any stage of output control directly on a product.

*High-pressure turbo-compressor, compressor blades, ultrasonic echo technique, acoustic anisotropy, structural anisotropy.*

### References

1. Tsarova I.N., Berdnik O.B., Krivina L.A., Fel Ya.A. Otsenka of technical condition of working shovels of the compressor from an alloy of EI961 of the power GTE-45-3 installation // Sbornik nauchnykh trudov «Prikladnaya mekhanika i tekhnologii mashinostroeniya». No. 22 (1). Nizhniy Novgorod: Intelservis Publ., 2013. P. 37-42. (In Russ.)
2. Monichev S.A., Nikitina N.Ye. Ultrazvukovoy echo method of research of elastic properties of solid bodies. Pre-print No. 24-04-03 / Nf of IMASH Russian Academy of Sciences. N. Novgorod, 2004. 22 p.
3. Motova E.A., Nikitina N.E., Tarasenko Y.P. Concerning the possibility of examining compressor blades according to attenuation and speed of ultrasound // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2013. V. 42, no. 4. P. 335-340.

### About the authors

**Tarasenko Yury Pavlovich**, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Head of laboratory, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: [npktribonika@yandex.ru](mailto:npktribonika@yandex.ru). Area of Research: tribology, physics of

plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

**Krivina Lyudmila Aleksandrovna**, research assistant, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: [npktribonika@yandex.ru](mailto:npktribonika@yandex.ru). Area of Research: strengthening and recov-

ery technologies, plasma coatings, material physics, tribology, physics of plasma.

**Motova Elena Alekseevna**, Candidate of Science (Engineering), senior research associate, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: [npktribonika@yandex.ru](mailto:npktribonika@yandex.ru). Area of Research: strengthening and recovery technologies, plasma coatings, material physics, tribology, physics of plasma.

**Nikitina Nadezhda Evgenyevna**, Doctor of Science (Engineering), Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: [npktribonika@yandex.ru](mailto:npktribonika@yandex.ru). Area of Research: strengthening and recovery technologies, plasma coatings, material physics, tribology, physics of plasma.