

УДК 621.785.5

DOI: 10.12737/article\_5971dbf8eb2259.94178701

Б.М. Бржозовский, д.т.н.,

Е.П. Зинина, д.т.н.,

В.В. Мартынов, д.т.н.

(ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)

E-mail: v\_martynov@mail.ru

## Технологии улучшения поверхностных свойств геометрически сложных изделий воздействием низкотемпературной плазмы\*

*Представлены технологии, обеспечивающие улучшение поверхностных свойств сложнопрофильных изделий воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда. Технологии упрочнения и формирования на поверхности пассивирующей пленки рассмотрены на примере изделий из металлических материалов. Технология улучшения шероховатости поверхности рассмотрена на примере изделий из металлических и неметаллических материалов. Показано, что для достижения максимально возможного улучшения поверхностных свойств изделий необходима разработка специальной оснастки.*

**Ключевые слова:** сложнопрофильное изделие; поверхность; свойства; улучшение; низкотемпературная плазма; технологии; микротвердость; шероховатость.

B.M. Brzhozovsky, D. Eng.,

E.P. Zinina, D. Eng.,

V.V. Martynov, D. Eng.

(FSBEI HE "Gagarin State Technical University of Saratov", 77, Polytechnicheskaya Str., Saratov 410054)

## Improvement technologies of surface properties in products with complex geometry by low-temperature plasma impact

*Technologies ensuring the surface properties improvement of complex-profile products by the impact of low-temperature plasma of a combined discharge are shown. The technologies of strengthening and a passivating film formation on the surface are considered by the example of metal products. The technology of surface roughness improvement is considered by the example of metal and non-metal products. It is shown that for the achievement of maximum possible improvement of surface properties in products the development of special equipment is necessary.*

**Keywords:** complex-profile product; surface; properties; improvement; low-temperature plasma; technologies; micro-hardness; roughness.

Улучшение свойств рабочих поверхностей изделий представляет собой конкретную научную и практическую проблему [1 – 5], от решения которой во многом зависит результативность их использования. Существуют различные подходы к решению этой проблемы [6 – 14], поскольку изделия изготавливаются из различных материалов, работают в различных условиях и выполняют различные функции.

В Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. на протяжении 30 лет ведутся работы по созданию и совершенствованию технологий для улучшения поверхностных свойств изделий воздействием низкотемпературной плазмы

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00030).

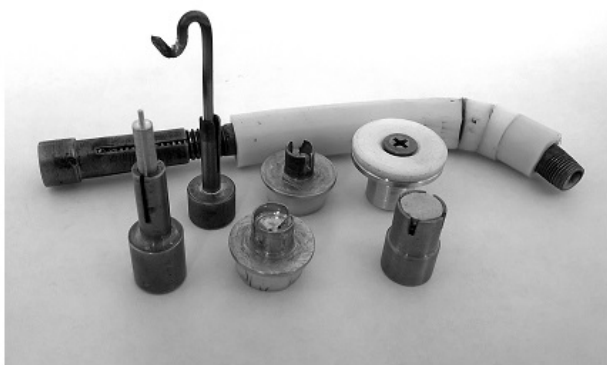
комбинированного разряда. Основными объектами технологического воздействия были изделия из металлических материалов и сплавов, а основной целью воздействия – упрочнение в различной степени их поверхностного слоя и формирование переходного слоя (подслоя) с целью улучшения связи упрочненного слоя с материалом основы. Разработанная технология упрочнения реализовывалась по результатам выполнения следующих действий [15].

Предварительно очищенное и обезжиренное в горячем трихлорэтилене  $\text{CICH}=\text{CCl}$  изделие устанавливалось в соответствующую оправку (рис.1), закрепляемую в держателе. В случае обработки небольших изделий в дополнение к оправке используют удлинители. Поверхность

оправки и часть поверхности изделия, не подлежащая обработке, изолировались двумя слоями тонкой фторопластовой ленты, и изделие располагалось в рабочей камере технологической установки по координатам, соответствующим его типу и размеру. Затем камера герметизировалась и откачивалась до предельного давления, равного 10 Па, после чего производился напуск технологического газа ( $N_2$ ) до давления, равного 300 Па, включался блок питания, обеспечивающий подачу на изделие положительного потенциала требуемой величины, и блок питания генератора СВЧ-энергии.



а)



б)

Рис. 1. Базовая (а) и специальная (б) оснастка

При плавной регулировке анодного тока магнетрона обеспечивалась подача в камеру обработки СВЧ-мощности, необходимой для поджига плазмы.

Для каждого типа изделий координата положения, давление, потенциал, СВЧ-мощность и время обработки устанавливались с учетом их массы, геометрии и марки материала с целью обеспечения требуемой скорости нагрева, определяющей эффективность воздействия частиц плазмы на обрабатываемую поверхность с точки зрения степени ее упрочнения.

По окончании обработки изделие остывало

в защитной среде, и после разгерметизации рабочей камеры извлекалось из держателя.

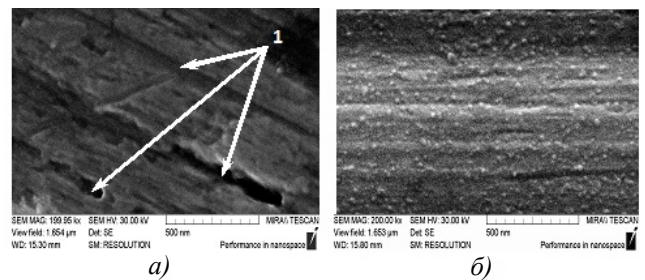
Анализ результатов упрочнения изделий различного целевого назначения по представленной технологии, выполненный с использованием аналитического комплекса на базе растрового электронного микроскопа (РЭМ) TESCAN MIRA\LMU (рис. 2, а) показал:

– образование на поверхности равномерно распределенных сплошных (или точечных) структур, которые могут быть определены как пленка (или островковая пленка), появление которой связано с изменением химического состава поверхности в результате ее взаимодействия с ионизированной в плазме газовой средой;

– в поверхностном слое:

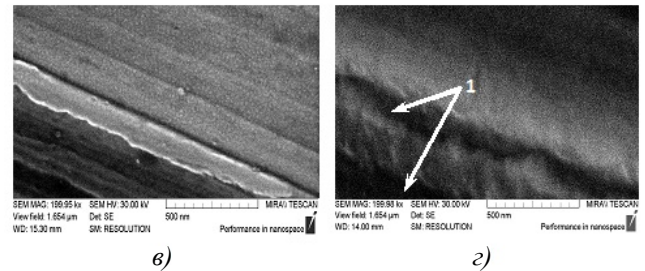
1) образование многочисленных наночастиц шаровидной формы с размерами 20...50 нм, расположенных поверх следов от механической и абразивной обработки (рис. 2, б). Это свидетельствует, во-первых, об их более позднем появлении, во-вторых, о достижении в них температуры плавления, и последующем резком охлаждении, что возможно только при воздействии плазмы;

2) изменение химического состава, вызванное либо взаимодействием газовой среды с поверхностью с образованием химических соединений типа оксидов или нитридов, либо растворением карбидов (например, у инструментальных сталей), либо образованием сложных карбидов (например, у титановольфрамкобальтовых твердых сплавов).



а)

б)



в)

г)

Рис. 2. РЭМ-изображения исходной поверхности (а) и поверхностей после плазменного воздействия с положительным (б), отрицательным (в) потенциалами смещения и без потенциала смещения (г):

1 – следы от механической обработки

Материалы опытно-промышленной эксплуатации изделий, упрочненных в соответствии с представленной технологией, на примере металлорежущего инструмента из вольфрамо- и титановольфрамокобальтовых твердых сплавов представлены в табл. 1 [15]. Они позволили

установить, что упрочнение приводит к изменению механизма износа режущих кромок. Износ приобретает характер постепенного истирания передней и задней поверхностей до состояния, при котором происходит потеря устойчивости режущего клина.

**1. Обобщенные результаты стойкостных испытаний модифицированного режущего инструмента из твердого сплава**

№ п/п	Вид инструмента	Обрабатываемый материал	Увеличение стойкости, раз
1	Резец с напайной пластиной из сплава T15K6	Сталь 10864-ВИ	4,0...5,0
2	Фреза пазовая из сплава BK6OM	Пластмасса с абразивным наполнителем	4,0
3	Сборный резец с пластинами из сплава T15Ta3K6	Сталь 45ГСФ	1,4
4	Сборные резцы с пластинами из сплава RX-10	Стали 40X, 20X13, 30XГСА, сплав Д16Т	1,5...2,0
5		Сталь 30XГСА	2,3...2,7
6		Сталь 35XГСЛ	2,0
7		Сталь 30XГСА	1,2
8	Цельная фреза из сплава RX-10	Сталь 35XГСЛ	1,8...3,0
9	Сборный резец с пластиной из сплава T15K6	Сталь ШХ-15	1,8...3,7
10	Сборные резцы с пластинами из сплава T15K6 и покрытием TiN	Сталь ШХ-15	4,0...4,5
11	Сборные резцы с пластинами из сплава CT35M	Стали 15XФ и 40XН2МА	1,2...1,6

Анализ разработанной технологии с позиций физики процессов взаимодействия электромагнитного и электростатического полей в рабочей камере позволил установить, что и поверхностные, и, особенно, объемные изменения связаны с подачей на изделие положительного потенциала. Это легло в основу модификации исходной технологии (назовем ее базовой) в направлении подачи на изделие перед началом обработки отрицательного потенциала. Результаты апробации технологии позволили зафиксировать образование на поверхности изделий равномерно распределенных точечных структур с размерами элементов, в среднем 12...15 нм (рис. 2, в), т.е. той же островковой пленки. При этом увеличение времени воздействия плазмы приводило к увеличению размеров элементов; для обработки требовалось в 1,6 раза больше СВЧ-мощности, поскольку в противном случае плазма вокруг образца не формировалась.

Логическим завершением анализа базовой технологии стала ее модификация в направлении проведения обработки без подачи потенциала на изделие. Результаты показали, что в этом случае образование новых структур ни

на поверхности, ни в поверхностном слое не происходит, а имеет место лишь очищение поверхности от фрагментов органических соединений и «сглаживание» следов от технологических воздействий (рис. 2, г) вследствие притупления микронеровностей и/или снижения их высоты. Но это означает улучшение шероховатости обработанной таким способом поверхности, подтвержденное проведением исследований с помощью двухлучевого микроскопа МИС-11 и методики, специально разработанной для проведения измерений на криволинейных поверхностях.

В табл. 2 представлены результаты этих исследований на примере режущего инструмента из инструментальной стали Р6М5.

Результаты исследований шероховатости послужили основой для оценки возможностей улучшения поверхностных свойств изделий из неметаллических материалов, в частности, из стекла различных марок. Основной проблемой при этом стала разработка оснастки, обеспечивающей, с одной стороны, закрепление изделия, с другой – формирование плазменного облака вокруг него. Разработка велась с позиций выполнения следующих условий:

– оснастка должна иметь минимум один выступающий металлический элемент, выполняющий функции концентратора силовых линий электромагнитного и электростатического полей при формировании плазменного облака;

– оснастка должна обеспечивать возможности различной пространственной ориентации изделия в рабочей камере.

**2. Шероховатость поверхности режущих кромок режущего инструмента из стали Р6М5 до и после воздействия низкотемпературной плазмы комбинированного разряда**

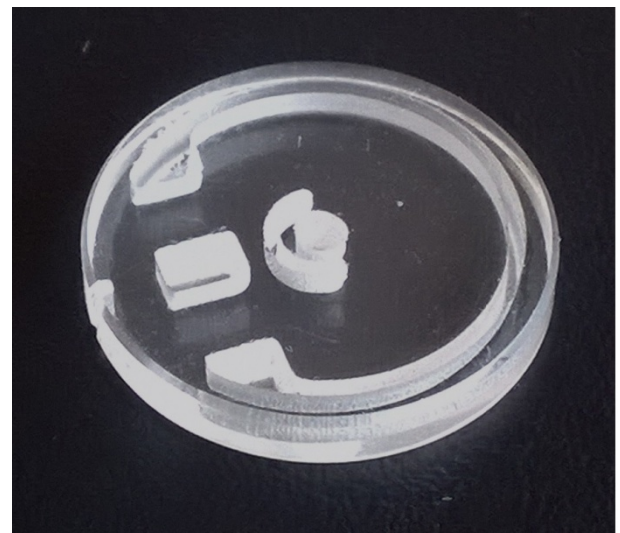
№ п/п	Тип инструмента	Шероховатость по Ra, мкм		Уменьшение Ra, раз
		исходная	после обработки	
Метчики				
1	M5	0,68	0,20	3,4
2		0,41	0,14	2,9
3		0,50	0,22	2,3
4	M6	0,33	0,19	1,7
5		0,21	0,18	1,1
6	M8	0,40	0,06	6,6
7		0,47	0,09	5,1
8		0,24	0,12	1,9
9	M8 TiN	0,20	0,19	0,9
10		0,48	0,16	3,0
	M8	0,40	0,12	3,3
	M8	1,10	0,46	2,3
Сверла				
11	∅ 4,1	0,55	0,15	3,7
12	∅ 4,1	0,34	0,11	3,4
13	∅ 4,1	0,36	0,15	2,4

Значения потенциала и СВЧ-мощности при этом выбираются так, чтобы обеспечить условия только для поджига плазмы.

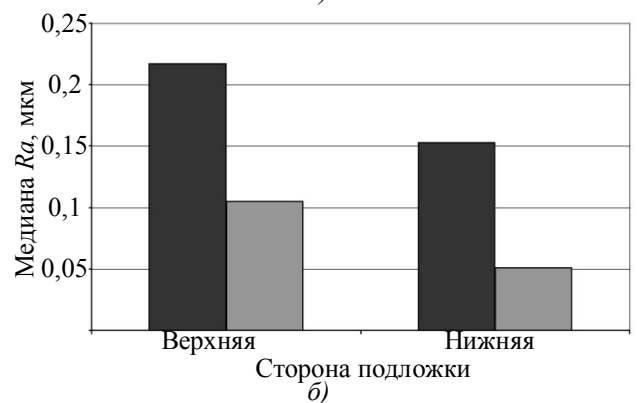
В качестве примера на рис. 3, а показана пластина из кварцевого стекла КУ-1 диаметром 15,6 мм, плазменное воздействие на которую в течение 4 мин при реализованной схеме позиционирования в рабочей камере обеспечило улучшение шероховатости поверхностей в 2 и 3 раза (рис. 3, б).

На рис. 4, а показан набор микролинз диаметром 2 мм и высотой 2 мм, состоящих из двух марок оптических стекол серии ВО, а на рис. 4, б в приведены полученные на микроскопе БИОЛАМ-И изображения поверхностей линзы после механической полировки и плазменного воздействия. Хорошо видно, что плазменное воздействие устраняет, во-первых, дефекты в виде недополированных дорожек, возникающие при воздействии абразивной

среды, во-вторых, точечные дефекты, связанные с неоднородностью физико-механических свойств стекол, причем результаты эти распространяются на все линзы, входящие в набор. Это означает, что одновременная обработка обеспечивает воспроизводимость результатов с вероятностью большей, чем обработка каждого изделия в отдельности. Особенно это касается мелкогабаритных изделий, где установка и позиционирование являются наиболее трудоемкими. Говоря иначе, в этом случае приобретает актуальность создание технологии групповой обработки, основной специфической особенностью которой является применение оснастки, которая в данном случае не может быть универсальной, поэтому требует проведения дополнительных проектно-конструкторских работ.



а)



**Рис. 3. Пластина из кварцевого стекла КУ-1 (а) и результаты измерения шероховатости ее поверхностей до (темные) и после (светлые) плазменного воздействия (б)**

В качестве примера на рис. 5 представлены образцы оснастки, разработанные для групповой обработки хирургических игл диаметром 0,9 мм и деталей часов с диаметром оси 0,5 мм.



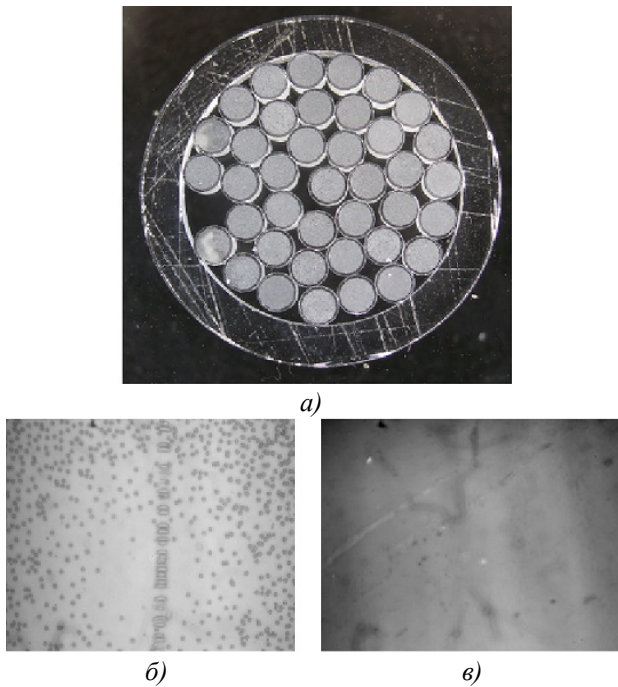


Рис. 4. Набор микролинз в оправке (а) и вид поверхности микролинзы (×400) после полировки на абразивных порошках (б) и плазменного воздействия (в)

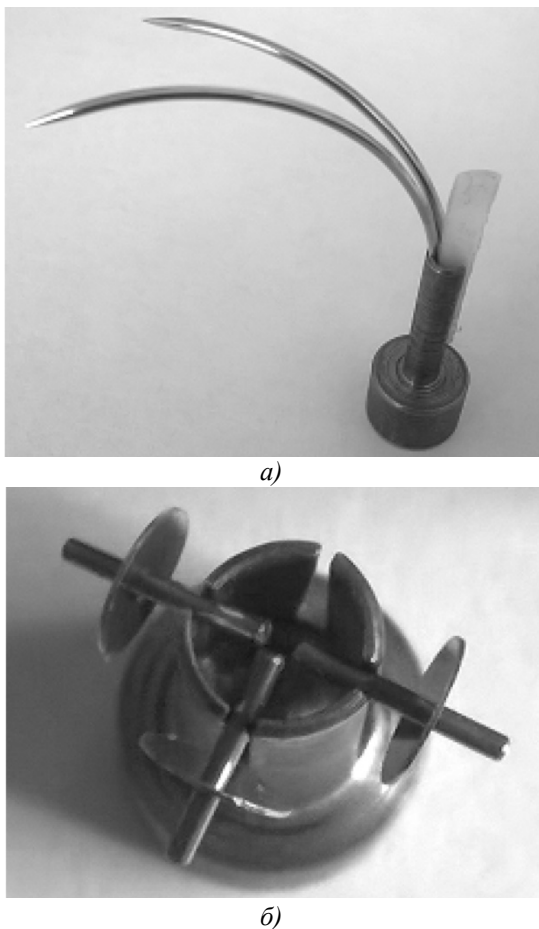


Рис. 5. Примеры оснастки для групповой обработки мелкоразмерных заготовок:  
а – хирургических игл; б – деталей часов

### Выводы:

1. Низкотемпературное плазменное воздействие на геометрически сложные изделия позволяет улучшать различные свойства их рабочих поверхностей только при условии разработки специальных технологий, учитывающих особенности протекающих в плазме физических процессов.

2. Разработка технологий должна базироваться на максимальном учете индивидуальных особенностей конструкции и условий эксплуатации изделий.

3. Ключевым моментом разработки технологий является проектирование и изготовление оснастки, поскольку она в значительной степени определяет максимальное улучшение поверхностных свойств изделий.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Верещака, А.С., Лыткин, Д.Н. Влияние субстрата работоспособность режущего инструмента с покрытием // *Металлообработка*. – 2017. – №1. – С. 23–28.
2. Безъязычный, В.Ф., Фоменко, Р.Н. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей ГТД // *Металлообработка*. – 2017. – №1. – С. 16–22.
3. Григорьев, С.Н. Как повысить надежность режущего инструмента // *ТехноМИР*. – 2004. – №3(21). – С. 53–57.
4. Лашманов, В.И. Повышение износостойкости инструмента // *ПРО инструмент*. – 2002. – №18. – С. 16–18.
5. Кожина, Т.Д., Волков, С.А., Соколов, Н.Н. Технологическое обеспечение высокоэффективного производства лопаток компрессора стратегической линейки промышленных газотурбинных двигателей // *Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева*. – 2017. – №1. – С. 20–24.
6. Блинков, И.В., Волхонский, А.О., Аникин, В.Н., Скрылева, Е.А. Мультислойные наноструктурные покрытия TiAlN/ZrNbN/CrN, полученные методом Arc-PVD, для режущего твердосплавного инструмента // *СТИН*. – 2012. – №5. – С. 18–24.
7. Шулов, В.А., Пайкин, А.Г., Теряев, А.Д., Быценко, О.А. и др. Нанесение эрозионно стойких нанопокровов системы Ti-Si-B, содержащих тах-фазу, на поверхность деталей из сплава Ti6Al14V вакуумно-плазменным методом с сепарацией плазмы от капельной фазы // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2008. – №12. – С. 23–25.
8. Ли, И.П., Рухляда, Н.Я. Создание поверхностных структур с заданными свойствами с помощью концентрированных потоков частиц // *Физика и химия обработки материалов*. – 2005. – №1. – С. 61–65.
9. Верещака, А.С., Григорьев, С.Н., Ким, В.А. Научные технологии упрочнения инструмента // *Научные технологии в машиностроении*. – 2013. – № 6(24).

– С. 19–24.

10. **Зайдес С.А., Нго Као Кыонг.** Новые технологические возможности отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // *Научные технологии в машиностроении.* – 2017. – №3(69). – С. 25–31.

11. **Шеховцева, Е.В.** Электроэрозионная обработка как технологический инструмент обеспечения рабочих свойств поверхностного слоя зубчатых колес // *Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева.* – 2017. – №1. – С. 52–56.

12. **Смыслов, А.М., Смыслова, М.К., Мухин, В.С.** Ионно-имплантационное и вакуумно-плазменное модифицирование поверхности лопаток компрессоров ГТД // *Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева.* – 2017. – №1. – С. 133–137.

13. **Таминдаров, Д.Р., Плотников, Н.В., Смыслов, А.М.** Электролитно-плазменное полирование лопаток компрессора из титановых сплавов // *Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева.* – 2017. – №1. – С. 141–144.

14. **Балановский, А.Е., Ву Ван Гюи.** Технологическое повышение качества поверхности деталей с плазменной цементацией // *Научные технологии в машиностроении.* – 2017. – №3(69). – С. 16–25.

15. **Бржозовский, Б.М., Бровкова, М.Б., Зинина, Е.П., Мартынов, В.В., Плешакова, Е.С.** Технология и оборудование для синтеза нанокompозитных ионно-плазменных покрытий на рабочих поверхностях геометрически сложных изделий // *Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева.* – 2017. – №1. – С. 216–222.

## REFERENCES

1. Vereshchaka, A.S., Lytkin, D.N. Substrate influence upon working capacity of cutter with coating // *Metal Working.* – 2017. – №1. – pp. 23–28.

2. Beziyazychny, V.F., Fomenko, R.N. Technological support of operation properties of GTE parts // *Metal Working.* – 2017. – №1. – pp. 16–22.

3. Grigoriev, S.N. *How to Improve Cutter Reliability* // *TechnoMIR.* – 2004. – №3(21). – pp. 53–57.

4. Lashmanov, V.I. *Tool Wear-resistance Increase* // *PRO Tool.* – 2002. – №18. – pp. 16–18.

5. Kozhina, T.D., Volkov, S.A., Sokolov, N.N. Technological support of high-performance production of compressor blades of strategic line of industrial gas turbine engines // *Bulletin of Soloviyov RSATU.* – 2017. – №1. – pp. 20–24.

6. Blinkov, I.V., Volkhonsky, A.O., Anikin, V.N., Skryleva, E.A. Multi-layer nano-structural coatings TiAlN/ZrNbN/CrN obtained by Arc-PVD method for hard-alloy tool // *STIN.* – 2012. – №5. – pp. 18–24.

7. Shulov, V.A., Paikin, A.G., Teryaev, A.D., Bytsenko, O.A. et al. Application of erosion-resistant nano-coatings of Ti–Si–B system having max-phase on surface of parts made of alloy Ti6Al14V by vacuum-plasma method with plasma separation from drop phase // *Strengthening Technologies and Coatings.* – 2008. – №12. – pp. 23–25.

8. Lee, I.P., Rukhlyada, N.Ya. Formation of surface structures with specified properties using concentrated particles flows // *Physics and Chemistry of Material Working.* – 2005. – №1. – pp. 61–65.

9. Vereshchaka, A.S., Grigoriev, S.N., Kim, V.A. Science intensive technologies of tool strengthening // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2013. – №6(24). – pp. 19–24.

10. Zaides S.A., Ngo Kao Kyong. New technological possibilities of finish-strengthening by surface plastic deformation // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2017. – №3(69). – pp. 25–31.

11. Shekhovtseva, E.V. Electro-erosion working as technological tool ensuring operation properties of surface layer of cog-wheels // *Bulletin of Soloviyov RSATU.* – 2017. – №1. – pp. 52–56.

12. Smyslov, A.M., Smyslova, M.K., Mukhin, V.S. Ionic-implantation and vacuum-plasma modification of compressor blade surfaces in GTE // *Bulletin of Soloviyov RSATU.* – 2017. – №1. – pp. 133–137.

13. Tamindarov, D.R., Plotnikov, N.V., Smyslov, A.M. Electrolytic-plasma burnishing of compressor blades made of titanium alloys // *Bulletin of Soloviyov RSATU.* – 2017. – №1. – pp. 141–144.

14. Balanovsky, A.E., Vu Van Gui. Quality technological increase of parts surfaces with plasma carbonization // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2017. – №3(69). – pp. 16–25.

15. Brzhozovsky, B.M., Brovkova, M.B., Zinina, E.P., Martynov, V.V., Pleshakova, E.S. Technology and equipment for synthesis of nano-composite ionic-plasma coatings on operation surfaces of geometrically-complex products // *Bulletin of Soloviyov RSATU.* – 2017. – №1. – pp. 216–222.

*Рецензент д.т.н. П.Ю. Бочкарев*

