

## К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ

А. А. Мингажева

gafarova.vika@bk.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 13.04.2021

**Аннотация.** Рассмотрен эксплуатационно-технологический подход к наследованию и взаимной трансформации физико-механической и микрогеометрической неоднородности поверхностного слоя детали в процессе приработки в условиях трения. Выдвинута и доказана гипотеза о возможности повышения износостойкости детали за счет обеспечения однородных физико-механических и микрогеометрических свойств ее поверхностного слоя при использовании упрочняющей обработки, учитывающей эффект наследования свойств поверхностного слоя. Проведен сравнительный анализ образцов, полученных традиционным и предложенным способами азотирования. Предложен способ азотирования, включающий подготовку поверхности методами сухого электрополирования и ионной имплантации.

**Ключевые слова:** износ; трение; поверхность; микрогеометрия; наследование; однородность; электрополирование; ионная имплантация; активирование; азотирование.

### ВВЕДЕНИЕ

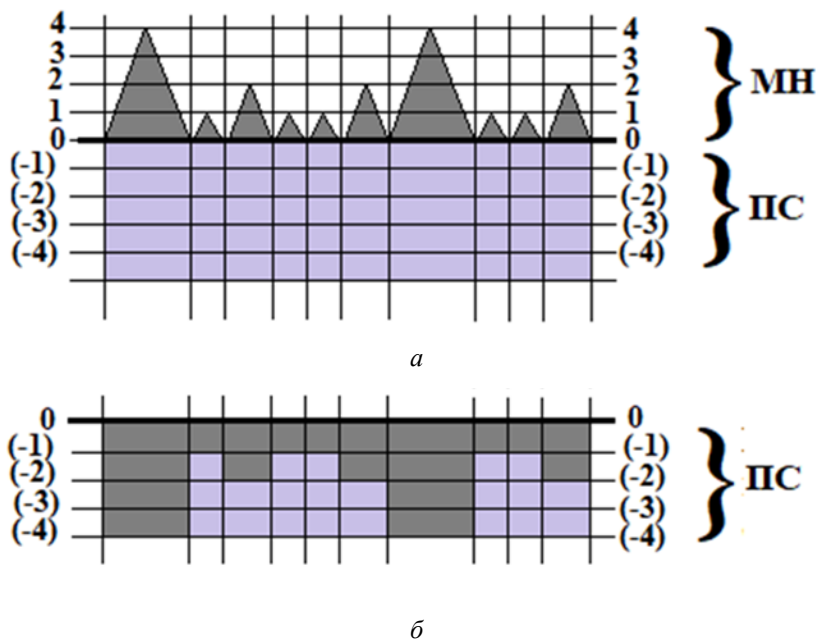
В процессе эксплуатации детали запускается механизм изнашивания, в значительной степени зависящий от исходного состояния его поверхностного слоя (ПС), формирование свойств которого начинается с технологического процесса изготовления детали [1–3]. При этом к одному из основных параметров качества ПС детали, влияющим на его износостойкость можно отнести шероховатость поверхности и физико-механическую неоднородность материала ПС [2, 4]. Рассматриваемые виды неоднородностей ПС деталей являются инициаторами возникновения очагов разрушения поверхности детали, практически при всех видах трения (трения качения, качения с проскальзыванием, трения-скольжения) [1–3]. В этой связи, установление (определение, раскрытие) закономерностей эксплуатационно-технологического наследования свойств ПС детали с целью формирования при изготовлении детали оптимальных, для данных условий работы трибосистемы ее эксплуатационных характеристик, является актуальной задачей.

### СХЕМЫ НАСЛЕДОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПС

Рассмотрим следующие схемы изменения состояния ПС в условиях трения.

Предположим, что материал обладает однородными физико-механическими свойствами, а поверхность имеет неоднородную микрогеометрию (шероховатость) (рис. 1, а).

В процессе приработки, при механическом взаимодействии пары трения происходит разрушение исходного рельефа [1, 2, 5–7]. При этом в результате такого взаимодействия формируется ПС материала с неоднородными физико-механическими свойствами (рис. 1, б) [1–3].

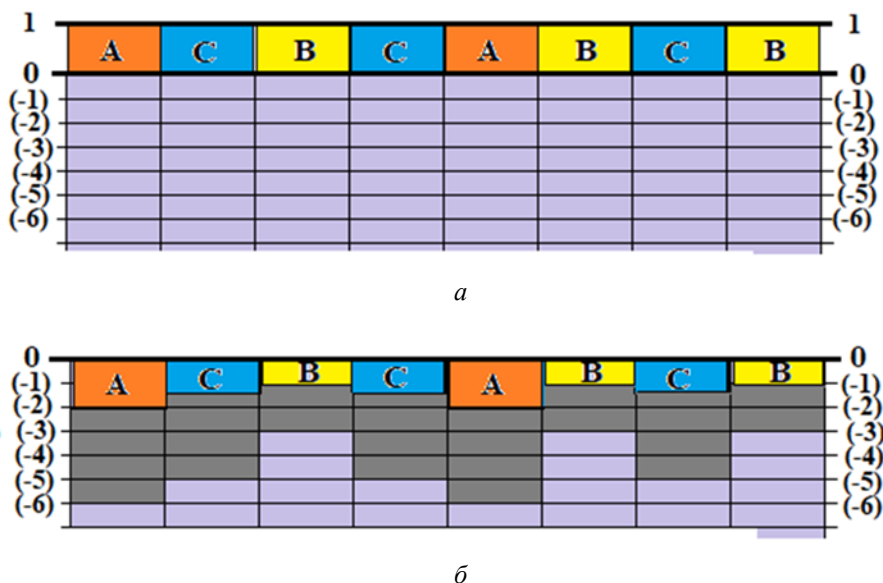


**Рис. 1.** Схема формирования (наследования) физико-механической неоднородности материала ПС детали в процессе приработки ее поверхности с неоднородным микрорельефом:

*а* – исходное состояние поверхности детали; *б* – состояние поверхности после приработки (равновесная шероховатость); МН – микронеоднородность; ПС – поверхностный слой; 0-0 – равновесная шероховатость

Несмотря на то, что в процессе приработки происходит сглаживание поверхности, и равновесная шероховатость не зависит от исходной [1], в определенной степени происходит трансформация микрогеометрической неоднородности в физико-механическую неоднородность, т.е. происходит наследование свойств ПС детали [1, 2, 4].

Предположим также, что ПС материала имеет идеальную поверхность, но не однороден по физико-механическим свойствам, например, в результате присутствия в нем различных по свойствам фаз (рис. 2, *а*).



**Рис. 2.** Схема формирования (наследования) физико-механической неоднородности в процессе приработки поверхности с неоднородным структурно-фазовым составом:  
*а* – исходное состояние поверхностного слоя детали; *б* – состояние поверхностного слоя после приработки;  
 1-1 – исходная поверхность детали; 0-0 – поверхностный слой после приработки

Предположим также, что структурные составляющие ПС имеют различную способность к деформации (например, структура А – практически не деформируется, структура В – деформируется на 50 %, а структура С – на 25 %). Неоднородность свойств структурных составляющих будет оказывать на нижележащие слои материала (в данном случае примем, что материал нижележащих слоев однороден по физико-механическим свойствам) различное воздействие, что приведет к формированию неоднородного по физико-механическим свойствам ПС материала детали (рис. 2, б).

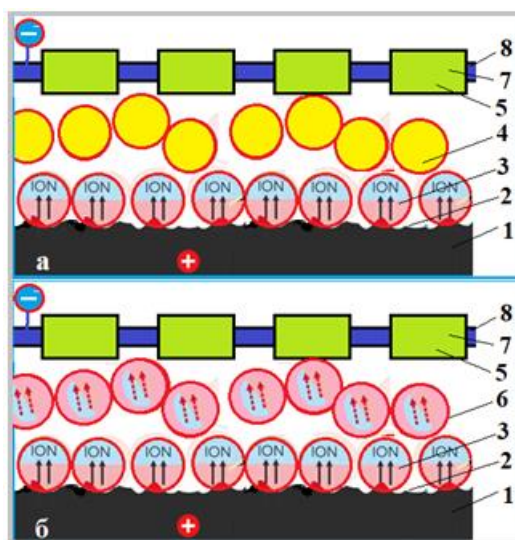
Несмотря на то, что реальная картина взаимодействия пар трения гораздо сложнее, а также учитывая синергизм взаимодействия различного вида и рода неоднородностей ПС детали, необходимо отметить, что уменьшение исходной микрогеометрической и физико-механической неоднородностей ПС детали, как правило, благотворно отражается на его эксплуатационных характеристиках, поскольку тот или иной вид неоднородности тех или иных свойств ПС приводит к возникновению очагов разрушения.

С целью повышения износостойкости деталей используют различные методы упрочнения, в том числе ионное модифицирование и химико-термическую обработку [8, 9]. Однако, упрочняющая обработка, без учета характера однородности ПС не устраняет очагов разрушения [2, 3, 5].

*Рабочая гипотеза.* Исходя из рассмотренных схем формирования и наследования рассматриваемых неоднородностей в ПС детали, можно сделать предположение, что минимизация шероховатости поверхности детали, формирование однородных физико-механических свойств ПС детали, а также использование защитно-упрочняющей обработки, выполненной с учетом эффекта влияния неоднородности свойств ПС, должны в значительной степени повысить износостойкость детали.

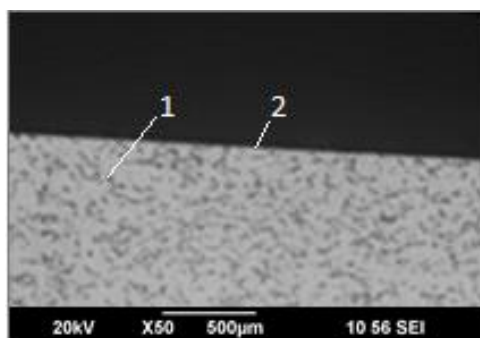
Использование механических методов снижения шероховатости поверхности детали, таких как шлифование и полирование приводит к формированию физико-механической неоднородности ПС [4], поэтому их применение малоэффективно. Химические и электрохимические методы в жидком электролите, включая технологию электролитно-плазменного полирования, приводит к образованию структурно-фазовой неоднородности поверхности [10, 11]. Наиболее перспективным методом, с рассматриваемой точки зрения, является метод ионного уноса материала микронеровностей, реализуемый технологией сухого электрополирования (рис. 3) [12].

Указанная технология [12] при удалении микровыступов с обрабатываемой поверхности детали практически не оказывает влияния на структуру ПС материала (рис. 4).



**Рис. 3.** Схема процесса обработки методом СЭП:

*а* – начало процесса; *б* – установившийся процесс; 1 – деталь; 2 – микровыступы; 3 – гранулы, взаимодействующие с материалом детали; 4 – пассивные гранулы; 5 – электрод (катод); 6 – активные гранулы; 7 – электроизолированные участки электрода; 8 – неэлектроизолированные участки катода [12]



**Рис. 4.** Микрофотография поверхности детали после обработки методом СЭП:  
1 – основной материал детали; 2 – поверхность детали

С точки зрения упрочняющей обработки, хорошо себя зарекомендовали способы, основанные на химико-термической обработке (ХТО), ионном азотировании (ИА), ионной имплантации (ИИ) [8, 9]. Однако, пассивные методы ХТО и ИА усиливают физико-механическую неоднородность ПС, а активные, к которой относится высокоэнергетическая ИИ, позволяют уменьшить физико-механическую неоднородность тонкого слоя материала непосредственно на поверхности детали, поскольку имеют незначительную глубину внедрения ионов (1–3 мкм) [8].

В то же время, возможность активации процессов ХТО, на основе сочетания ИИ и ХТО, позволяет обеспечить более высокую физико-механическую однородность поверхности детали [13–15].

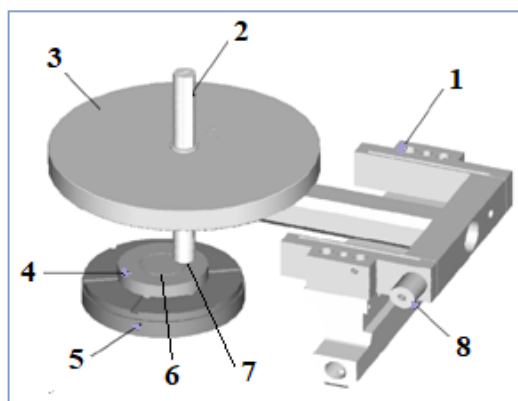
#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью проверки выдвинутой гипотезы были проведены следующие исследования.

По две партии образцов (по 5 штук образцов в каждой группе партии) из стали ДИЗ9 (16ХЗНВФМБ) (табл. 1) и стали 30ХГСА (табл. 2) подверглись упрочняющей обработке по следующей схеме.

Первая партия: первая группа – «Механическое полирование (МП)», вторая группа – «МП + ионная имплантация азотом (ИИА)», третья группа – «МП + ионное азотирование (ИА)», четвертая группа – «МП + ИИА + ИА»; вторая партия: первая группа – «Сухое электрополирование (СЭП)», вторая группа – «СЭП + ИИА», третья группа – «СЭП + ИА», четвертая группа – «СЭП + ИИА + ИА».

Трибологические испытания были проведены на машине трения (High-Temperature Tribometer, CSM Instruments, Швейцария). Методика исследований строилась по схеме шарик-диск (рис. 5) в соответствии с международным стандартом ASTM G99-959 и DIN50324. После испытания производилась оценка износа образца. Измерение силы трения проводилось с помощью датчика силы трения. Количественная оценка износостойкости образца проводилась по размерному коэффициенту износа. В качестве контртела использовался шарик диаметром 3 мм из стали ШХ15.



**Рис. 5.** Схема испытаний на износ:

1 – упругая рама; 2 – держатель контртела (шарика); 3 – груз; 4 – образец; 5 – держатель образца; 6 – дорожка износа; 7 – шарик; 8 – датчик измерения тангенциальной силы

Результаты износа образцов приведены в табл. 1 и 2.

Для легированной стали ДИЗ9 использование для активации поверхности ИИА с последующей ИА позволило повысить износостойкость почти в три раза, а замена МП на СЭП – повысить износостойкость азотированного слоя в десять раз при схеме обработки «СЭП + ИИА + ИА» по сравнению с традиционной технологией по схеме «МП + ИА» (табл. 1).

Подобная картина наблюдалась и для легированной стали 30ХГСА: активация поверхности ИИА позволила повысить износостойкость азотированного слоя при МП в два раза, а при замене МП на СЭП – более чем в пять раз по сравнению с азотированием по схеме «МП + ИА» (табл. 2).

В то же время использование ИИ позволяет повысить износостойкость образцов из сталей ДИЗ9 и 30ХГСА по сравнению с их исходным состоянием, приблизительно в 3–4 раза, однако, по сравнению с обработкой по схеме СП + ИИА + ИА, где также используется ИИА, уступает почти на два порядка (табл. 1 и 2).

Таблица 1

**Износостойкость образцов из стали ДИЗ9 после различных видов упрочняющей обработки при условиях износа:  $T = 1,5$  часа,  $F = 8$  Н,  $V = 5$  см/с**

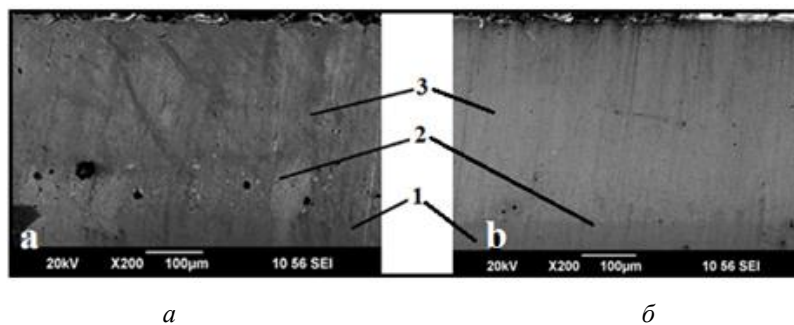
№ партии образцов	Материал образца	Вид обработки	Потеря массы, $\Delta m \cdot 10^{-4}$ , Г
1	ДИЗ9	МП	302
2		МП + ИИА	86
3		МП + ИА	35
4		МП + ИИА + ИА	12
5		СП	313
6		СП + ИИА	78
7		СП + ИА	19
8		СП + ИИА + ИА	3

Металлографические исследования образцов показали, что при схеме «СЭП + ИИА + ИА» формируется однородный азотированный слой, в то время как при использовании механического полирования наблюдается более высокая неоднородность структуры аналогичного слоя (рис. 6).

Таблица 2

**Вторая серия образцов. Износостойкость стальных образцов после различных видов упрочняющей обработки при условиях износа:  $T = 1,5$  часа,  $F = 10$  Н,  $V = 15$  см/с**

№ партии образцов	Материал образца	Вид обработки	Потеря массы, $\Delta m \cdot 10^{-4}$ , Г
Первая партия образцов второй серии			
1	30ХГСА	МП	454
2		МП + ИИА	106
3		МП + ИА	67
4		МП + ИИА + ИА	33
Вторая партия образцов второй серии			
1	30ХГСА	СП	443
2		СП + ИИА	98
3		СП + ИА	41
4		СП + ИИА + ИА	12



**Рис. 6.** Микрофотографии азотированного слоя образцов из стали ДИЗ9:  
*а* – по схеме «МП + IIIA + IA»; *б* – по схеме «СЭП + IIIA + IA» (1 – основной материал;  
 2 – граница «основа-азотированный слой»; 3 – азотированный слой)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выдвинута и экспериментально доказана гипотеза о возможности значительного повышения износостойкости азотированного слоя с использованием технологии азотирования, учитывающей при формировании ПС механизм взаимной трансформации физико-механической и микрогеометрической неоднородности.

Предложен новый способ азотирования легированных сталей на основе обеспечения физико-механической и микрогеометрической однородности материала ПС деталей при азотировании с использованием сухого электрополирования и ионно-имплантационной активации ПС.

Проведенные экспериментальные исследования образцов показали увеличение износостойкости сталей ДИЗ9 и 30ХГСА приблизительно от 5 до 10 раз при использовании для подготовки ПС деталей сухого электрополирования с последующей ионной имплантацией азотом и ионным азотированием.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с. [ I. V. Kragelsky, M. N. Dobychin, V. S. Kombalov, *Friction and Wear: Calculation Methods*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1977. ]
2. Гаркунов Д. Н. Триботехника (износ и безызносность): учебник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: МСХА, 2001. 616 с. [ D. N. Garkunov, *Tribotechnics (wear and tear): Textbook. 4th ed., reprint. and additional*, (in Russian). Moscow: MSHA, 2001. ]
3. Фёдоров С. В. Основное уравнение трения и износа // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 4 (3). С. 888–891. [ S. V. Fedorov, "The basic equation of friction and wear", (in Russian), in *Izvestiya Samarского научного центра Rossijskoj akademii nauk*, vol. 13, no. 4 (3), pp. 888-891, 2011. ]
4. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А. М. Дальский [и др.]. М.: МАИ, 2000. 364 с. [ A. M. Dalsky, et al., *Process Inheritance in Machinery Manufacturing*, (in Russian). Moscow: MAI, 2000. ]
5. Белого В. А., Лудемы К., Мышкина Н. К. Трибология. Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. М.: Машиностроение, 1993. 454 с. [ V. A. Bely, K. Ludemy, N. K. Myshkina, *Tribology. Study and Applications. Experience of the USA and CIS Countries*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1993. ]
6. Сычев С. В., Фадин Ю. А. Формирование рельефа поверхности при трении // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 6. С. 30–33. [ S. V. Sychev, Yu. A. Fadin, "Formation of surface relief under friction", (in Russian), in *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie*, vol. 55, no. 6, pp. 30-33, 2012. ]
7. Андреев Ю. С., Медунецкий В. В. Исследование изменения микрорельефа поверхностей в процессе их трения скольжения // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 9. С. 30–34. [ Yu. S. Andreev, V. V. Medunetskiy, "Study of surface micro-relief change under sliding friction", (in Russian), in *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie*, vol. 55, no. 9, pp. 30-34, 2012. ]
8. Зацепин Д. А. Ионная модификация функциональных материалов. Екатр.: УрФУ, 2014. 104 с. [ D. A. Zatsepin, *Ion modification of functional materials*, (in Russian). Yekaterinburg: UrFU, 2014. ]
9. Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. М. Химико-термическая обработка. М.: Metallurgiya, 1985. 265 с. [ Yu. M. Lakhtin, B. M. Arzamasov, *Chemical Heat Treatment*, (in Russian). Moscow: Metallurgiya, 1985. ]
10. Грилихес С. Я. Электрохимическое и химическое полирование: теория и практика. Влияние на свойства металлов. Л.: Машиностроение, 1987. 232 с. [ S. Ya. Grilikhes, *Electrochemical and Chemical Polishing: Theory and Practice. Influence on Metals Properties*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1987. ]

11. **Плотников Н. В., Смыслов А. М., Таминдаров Д. Р.** К вопросу о модели электролитно-плазменного полирования поверхности // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 4 (57). С. 90–95. [ N. V. Plotnikov, A. M. Smyslov, D. R. Tamindarov, "On the model of electrolyte-plasma surface polishing", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 4 (57), pp. 90-95, 2013. ]

12. **Мингажев А. Д., Криони Н. К., Мингажева А. А.** Способ электрополирования металлической детали // Патент РФ № 2700226. Оpubл. 13.09.2019. Бюл. № 26. [ A. D. Mingazhev, N. K. Krioni, A. A. Mingazheva, "Method of Part Electric Polishing", (in Russian), Patent RF 2700226, 2019. ]

13. **Способ** химико-термической обработки детали из легированной стали / Н. К. Криони [и др.] // Патент РФ № 2559606. Оpubл. 10.08.2015. Бюл. № 22. [ N. K. Krioni, et al., "Method for Chemical Thermal Treatment of Alloy Steel Parts", (in Russian), Patent RF 2559606, 2015. ]

14. **Способ** химико-термической обработки детали из легированной стали / Н. К. Криони [и др.] // Патент РФ № 2627551. Оpubл. 08.08.2017. [ N. K. Krioni, et al., "Method for Chemical Thermal Treatment of Alloy Steel Parts", (in Russian), Patent RF 2627551, 2017. ]

15. **Криони Н. К., Мингажева А. А., Кононова А. Ю.** Повышение износостойкости стальных деталей азотированием с высокоэнергетической активацией поверхности // VI Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва, 10–13 ноября 2015). М.: ИМЕТ РАН, 2015. С. 496–497. [ N. K. Krioni, A. A. Mingazheva, A. Yu. Kononova, "Increasing the durability of steel parts with highnitriding surface activation", (in Russian), in *VI International Conference "Deformation and Fracture of Materials and Nanomaterials"*, Moscow, 2015, pp. 496-497. ]

#### ОБ АВТОРЕ

**МИНГАЖЕВА Алиса Аскарровна**, ассист. каф. «Технология машиностроения» УГАТУ. Дипл. инж.-технолог (УГАТУ, 2010). Готовит дис. о повышении износостойкости трибосистем из легированных сталей азотированием при активации поверхностного слоя на основе учета закономерностей изнашивания.

#### METADATA

**Title:** The study of how part surface layer inherits operational and process properties under friction.

**Author:** A. A. Mingazheva

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** gafarova.vika@bk.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 4 (94), pp. 3-9, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The part wear resistance under friction depends on many factors. They are related to the part surface material state, surface roughness and working conditions. The part surface layer undergoes significant, uneven elastic and plastic deformations during operation. These deformations lead to changes in its physical and mechanical properties. Then the parts surface layer inherits the properties of its previous states.

**Key words:** wear; friction; surface layer; uniformity; surface layer; ion entrainment; electropolishing; ion implantation; activation; ion nitriding.

**About author:**

**MINGAZHEVA, Alisa Askarovna**, Assist. of the Dept. of Mechanical Engineering Technology USATU. Dipl. Tech. Engineer (USATU, 2010). Preparing a dissertation on Increasing Wear Resistance of Tribosystems Made of Alloyed Steels by Nitriding when Activating the Surface Layer based on Wear Patterns.