

УДК 621.785.532, P.A.C.S. 68.49.Sf

**Increasing the wear resistance of machine parts by nitriding
with complex surface preparation**

**Повышение износостойкости деталей машин азотированием
с комплексной подготовкой поверхности**

*N. K. Krioni *, A. A. Mingazheva
Н. К. Крюни *, А. А. Мингажева*

Ufa State Aviation Technical University, K. Marx Str. 12, Ufa, 450008, Russia

* nkrioni@mail.ru

Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12

* nkrioni@mail.ru

ABSTRACT

At the moment, the active development of new technologies often involves the operation of machines and mechanisms at increased loads. This, in turn, can lead to an intensification of the wear process of parts and, subsequently, to a loss of stability in the operation of structures as a whole. The search for ways to increase the resistance of surfaces to wear is currently the most relevant area of materials science. Parts that experience significant surface stresses are subjected to surface hardening to increase fatigue resistance. Among the applied methods of surface hardening are mechanical, thermal, chemical-thermal, laser hardening, ion implantation and others. The wearing process is accompanied by changes in the state of the material of the surface layer, the properties of which are formed during the manufacturing stage. An increase in the homogeneity of the properties of the hardened material of the surface layer leads to an increase in the wear resistance of the part. An important stage in the finishing of the part is the preparation of the surface for hardening processing. The use of the method of ion entrainment of material from the surface of the workpiece for its polishing provides a high degree of homogeneity of the material surface, increases the efficiency of subsequent activation of the surface by ion implantation and provides a uniform nitrided layer, which makes it possible to increase the wear resistance of the part by approximately three times compared to traditional nitriding. In this work, we consider the effect of preliminary treatment of samples by dry electropolishing on the wear resistance of samples from a number of industrially applied steels. It is shown that a decrease in the degree of roughness can increase the wear resistance of samples by several times.

KEYWORDS

Wear; friction; surface layer; uniformity; ion entrainment; electropolishing; ion implantation; activation; ion nitriding.

АННОТАЦИЯ

В настоящий момент активное развитие новых технологий зачастую предполагает работу машин и механизмов при повышенных нагрузках. Это, в свою очередь, может приводить к интенсификации процесса изнашивания деталей и, впоследствии, потере устойчивости работы конструкций в целом. Поиск способов повышения сопротивляемости поверхностей износу в настоящий момент является актуальнейшим направлением науки о материалах. Детали, испытывающие значительные напряжения на поверхности для повышения сопротивления усталости, подвергаются поверхностному упрочнению. Среди применяемых методов поверхностного упрочнения можно выделить: механический, термический, химико-термический, лазерную закалку, ионную имплантацию и другие. Процесс изнашивания деталей сопровождается изменениями состояния материала поверхностного слоя, свойства которого закладываются на стадии изготовления. Повышение однородности свойств упрочненного материала поверхностного слоя (ПС) приводит к повышению износостойкости детали. Важным этапом финишной обработки детали является подготовка поверхности под упрочняющую обработку. Использование метода ионного уноса материала с поверхности обрабатываемой детали для ее полирования обеспечивает высокую степень однородности материала ПС, повышает эффективность последующей активации поверхности ионной имплантацией и обеспечивает равномерный азотированный слой, что позволяет повысить износостойкость детали приблизительно в три раза по сравнению с тра-

диционным азотированием. Рассматривается влияние предварительной обработки образцов методом сухого электрополирования на износостойкость образцов из ряда применяемых в промышленности сталей и показано, что снижение степени шероховатости может в несколько раз повысить устойчивость образцов к износу.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Износ; трение; поверхностный слой; однородность; ионный унос; электрополирование; ионная имплантация; активирование; ионное азотирование.

Введение

Износ подвижных сопряжений и поверхностей деталей в условиях трения является одной из основных причин выхода из строя машин и оборудования. Процесс изнашивания деталей сопровождается изменениями состояния материала поверхностного слоя (ПС), свойства которого закладываются на стадии изготовления [1–3]. Исследование закономерностей изнашивания, а также изменений, происходящих при этом в материале ПС, являются весьма актуальными задачами.

Состояние ПС готовой детали, формируемое при его изготовлении, определяет ее износостойкость [1–3]. В этой связи целью настоящей работы является повышение износостойкости детали за счет использования комплексной подготовки ПС детали перед финишной упрочняющей обработкой.

Кроме того, в работе учитывается эффект взаимной трансформации микрогеометрической (МГ) и физико-механической (ФМ) неоднородности ПС детали в условиях трения износа.

В процессе работы в условиях трения ПС детали претерпевает упругие и пластические деформации, приводящие к изменению его физико-механических свойств, с проявлением эффекта наследования свойств его предыдущих состояний [1–3].

Одними из основных характеристик ПС являются его МГ и ФМ неоднородности, от значений которых зависит износостойкость изделия [2, 5]. Указанные виды неоднородностей ПС деталей являются причинами возникновения очагов разрушения детали при всех видах трения (трения качения, каче-

ния с проскальзыванием, трения-скольжения) [1–3].

В условиях трения износа существует определенная взаимосвязь между изменениями, происходящими со значениями МГ и ФМ неоднородностей [1–4]. Это позволяет принять следующую модель процесса взаимной трансформации МГ и ФМ неоднородностей.

При работе пары трения происходит разрушение исходного рельефа и формируется новое состояние ПС, характеризующееся изменением ФМ неоднородности [1–3]. В процессе приработки происходит сглаживание поверхности и равновесная шероховатость практически не зависит от исходной [1]. Однако, действие эффекта эксплуатационного наследования свойств поверхности приводит к трансформациям МГ в ФМ неоднородность [2–4].

Структурные составляющие материала ПС деталей обладают различной способностью к упруго-пластической деформации. Это приводит к формированию в материале ПС неравномерного упрочненного слоя с различным распределением износостойких свойств по поверхности детали.

Хотя реальная картина взаимодействия пар трения гораздо сложнее и проявляется синергизм взаимодействия различного вида и рода неоднородностей ПС детали, в то же время, уменьшение исходной МГ и ФМ неоднородностей ПС детали, как правило, благотворно отражаются на его эксплуатационных характеристиках [1–4].

Механизм изнашивания с учетом взаимной трансформации МГ и ФМ неоднородностей материала ПС можно представить в виде следующей модели (рис. 1).

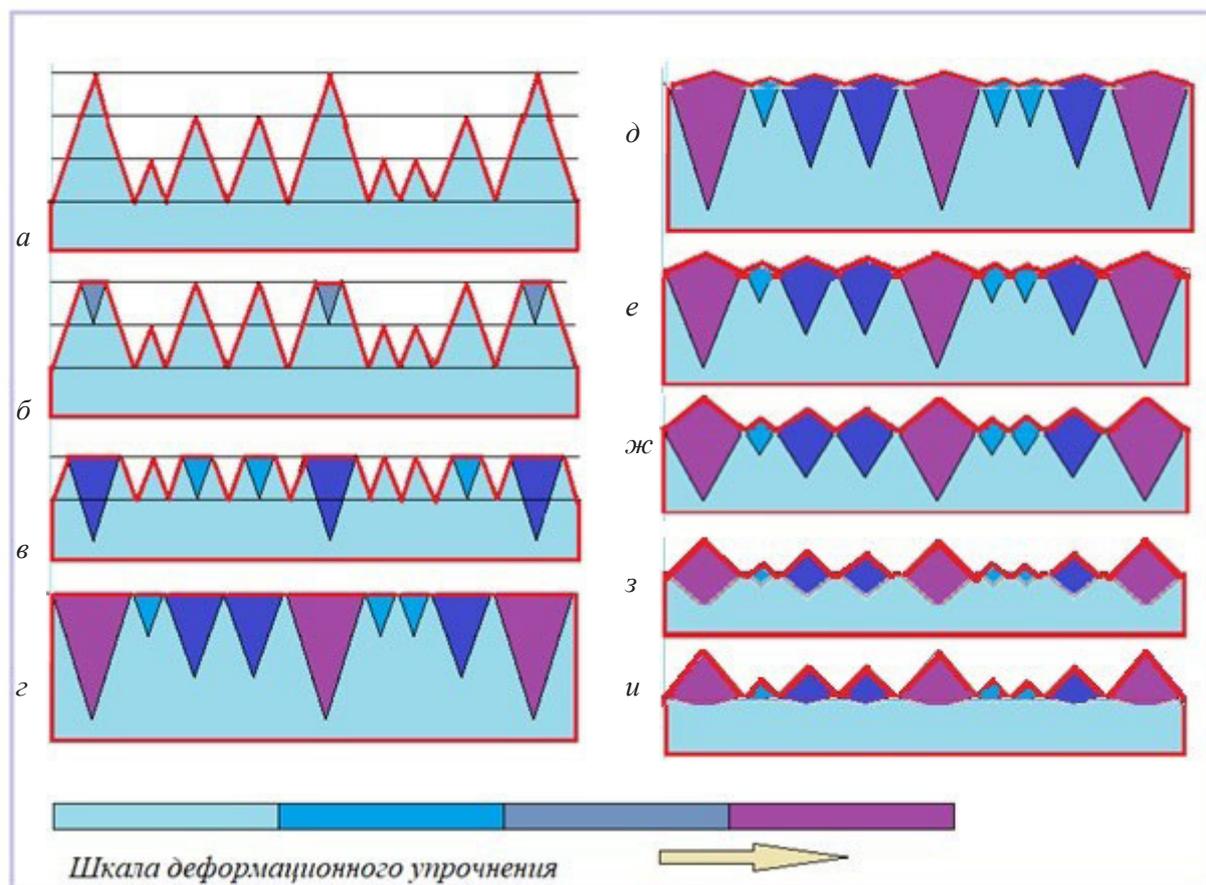


Рис. 1. Модель процесса приработки в условиях трения с учетом эффектов упрочнения и неравномерного износа поверхности (за один цикл):

а–г – трансформация микрогеометрической неоднородности поверхности в физико-механическую неоднородность в результате неравномерного (в связи с последовательным осуществлением контактов выступов различного размера) действия деформационного упрочнения; д–и – обратный переход физико-механической неоднородности в микрогеометрическую в результате неравномерного износа участков поверхности, имеющих различную степень упрочнения

Fig. 1. Model of the running-in process under friction conditions, taking into account the effects of hardening and uneven wear of the surface (in one cycle):

а–г – transformation of the microgeometric inhomogeneity of the surface into physical and mechanical inhomogeneity as a result of the uneven (due to the sequential implementation of contacts of protrusions of different sizes) action of strain hardening; д–и – reverse transition of physical and mechanical inhomogeneity to microgeometric as a result of uneven wear of surface areas with different degrees of hardening

Предложенная модель процесса приработки в условиях трения (рис. 1), учитывающая взаимную периодическую трансформацию МГ (шероховатости) поверхности в ФМ неоднородность и обратно, объясняет часто встречающуюся на практике закономерность процесса приработки поверхности деталей в

процессе трения [1–4] и объясняет влияние трансформации указанных видов неоднородности ПС деталей на их низкую износостойкость. Очевидно, что предложенная модель (рис. 1) процесса приработки имеет некоторую аналогию с «законом затухающих колебаний» (рис. 2).

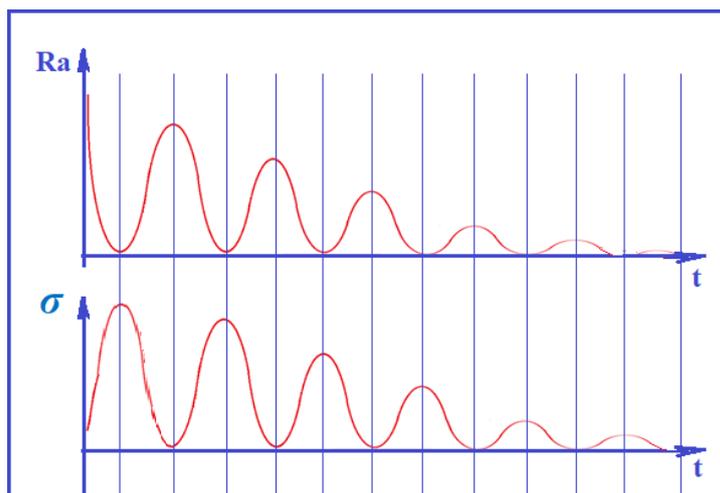


Рис. 2. Ассиметричный характер изменения МГ неоднородности (Ra) относительно ФМ (σ) при их взаимной трансформации в «затухающем» режиме при эксплуатации детали в условиях трения

Fig. 2. The asymmetric nature of the change in the MG inhomogeneity (Ra) relative to the FM (σ) during their mutual transformation in the “damped” mode during the operation of the part under friction conditions

С целью повышения износостойкости деталей используют различные методы упрочнения, в том числе ионное модифицирование и химико-термическую обработку [6]. Однако, упрочняющая обработка без учета факторов, связанных с МГ и ФМ однородностью ПС увеличивает время, необходимое для приработки поверхности детали, что приводит к снижению ряда эксплуатационных характеристик последней и, в частности, к снижению износостойкости, поскольку эффект, связанный с неоднородностью свойств ПС, пролонгируется и на дальнейший процесс эксплуатации детали [2, 3, 6]. В этой связи выбор методов финишной упрочняющей обработки является весьма актуальной задачей.

Исходя из рассмотренной выше модели (рис. 1), можно предположить, что минимизация шероховатости поверхности детали, формирование однородных ФМ свойств ПС детали, а также использование упрочняющей обработки, выполненной с учетом минимизации параметров МГ и ФМ неоднородностей ПС, приведут к повышению износостойкости детали [1–4].

Практический опыт показывает, что использование механических методов уменьшения шероховатости поверхности детали, таких как шлифование и полирование приводит к формированию значительной ФМ неоднородности ПС [4, 5], поэтому их применение малоэффективно.

Химические и электрохимические методы в жидком электролите, включая технологию электролитно-плазменного полирования, приводит к образованию структурно-фазовой неоднородности поверхности [6–12]. Наиболее перспективным методом, на наш взгляд, является технология полирования, основанная на методе ионного уноса материала микронеровностей, реализуемый технологией сухого электрополирования (СЭП). Указанная технология СЭП при обработке детали практически не изменяет состояние материала его ПС. На рис. 3 представлены поверхности образца после СЭП (рис. 3, а) и после СЭП + ионная имплантация азотом (ИИ) + ионное азотирование (ИА) (рис. 3, б).

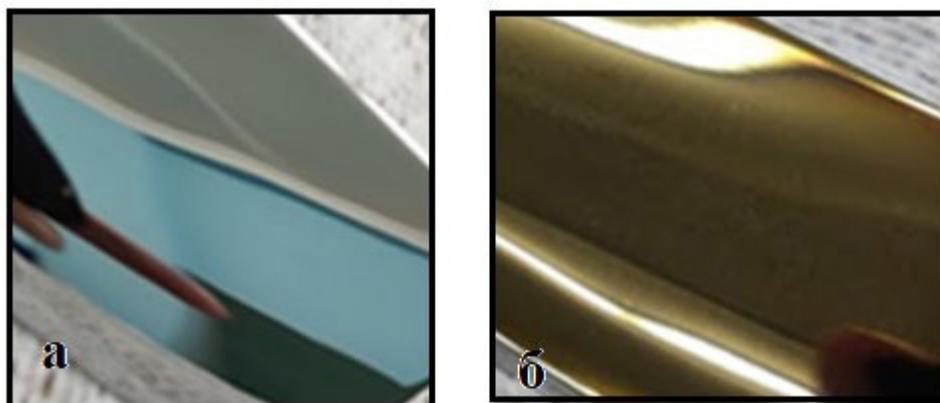


Рис. 3. Поверхности образцов:
a – с подготовкой поверхности методом СЭП; б – с упрочняющей обработкой по схеме СЭП + ИИА + ИА

Fig. 3. Sample surfaces:
a – with surface preparation by dry electropolishing; b – with hardening treatment according to the scheme dry electropolishing ion nitriding + ion implantation

В качестве упрочняющей обработки хорошо себя зарекомендовали способы, основанные на химико-термической обработке (ХТО), ионном азотировании (ИА), ионной имплантации (ИИ) [6, 7]. Однако, пассивные методы ХТО и ИА усиливают ФМ неоднородность ПС, а активные, к которой относится высокоэнергетическая ИИ, позволяют значительно уменьшить ФМ неоднородность ПС, но имеют незначительную глубину внедрения ионов [7, 10, 11].

Материал и методика исследований

В данной работе, с целью оценки влияния различных вариантов подготовки ПС материала перед упрочняющей обработкой на износостойкость деталей, были проведены следующие исследования.

По две партии в трех сериях образцов: первая серия образцов – сталь 16ХЗНВФМБ (табл. 1), вторая серия образцов – сталь 30ХГСА (табл. 2) и третья серия образцов – сталь 38Х2МЮА (табл. 3), по 5 штук образцов в каждой партии 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».

Обработка методами СЭП, СЭП + ИИА, СЭП + ИА, СЭП + ИИА + ИА проводилась по технологиям, основанным на разработках авторов [10–12].

Стали марок 16ХЗНВФМБ, 38Х2МЮА и 30ХГСА были выбраны в связи с их применением для изготовления нагруженных шестерней, валов и других деталей ГТД.

Процесс ионного азотирования производили на установке «Эльтропульс» (Германия). Сухое электрополирование производили на модернизированной установке модели DryLyte 100 (Испания).

Трибологические испытания были проведены на машине трения (High-Temperature Tribometer, CSM Instruments, Швейцария) по схеме «шарик–диск».

Результаты и их обсуждение

Результаты трибологических испытаний образцов приведены в табл. 1–3.

Таблица 1
Table 1

Первая серия образцов. Износостойкость стальных образцов после различных видов упрочняющей обработки при условиях износа: T = 2,0 час, F = 10 Н, V = 15 см/с

The first series of samples. Wear resistance of steel samples after various types of hardening treatment under wear conditions: T = 2.0 hours, F = 10 H, V = 15 cm/s

<i>№ партии образцов / Sample batch number</i>	<i>Материал образца / Sample material</i>	<i>Вид обработки / Treatment type</i>	<i>Потеря массы, Δm 10⁴, Г / Weight loss, Δm 10⁴, G</i>
Первая партия образцов первой серии / The first batch of samples of the first batch			
1	16ХЗНВФМБ / 16HZNVFMB	МП / Mechanical polishing (MP)	384
2		МП + ИИА / MP + nitrogen ion implantation (НИ)	92
3		МП + ИА / MP + ionic nitriding (IN)	45
4		МП + ИИА + ИА / MP + НИ + IN	18
Вторая партия образцов первой серии / The second batch of samples of the first batch			
1	16ХЗНВФМБ / 16HZNVFMB	СЭП / Dry electropolishing (DE)	391
2		СЭП + ИИА / DE + nitrogen ion implantation (НИ)	78
3		СЭП + ИА / DE + ionic nitriding (IN)	23
4		СП + ИИА + ИА / DE + НИ + IN	5

Таблица 2
Table 2

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

Second series of samples. Wear resistance of steel samples after various types of hardening treatment under wear conditions: T = 1.5 hours, F = 10 H, V = 15 cm/s

<i>№ партии образцов / Sample batch number</i>	<i>Материал образца / Sample material</i>	<i>Вид обработки / Treatment type</i>	<i>Потеря массы, Δm 10⁴, Г / Weight loss, Δm 10⁴, G</i>
Первая партия образцов второй серии / The first batch of samples of the second series			
1	30ХГСА / 30HGSA	МП / Mechanical polishing	454
2		МП + ИИА / MP + nitrogen ion implantation (НИ)	106
3		МП + ИА / MP + ionic nitriding (IN)	67
4		МП + ИИА + ИА / MP + НИ + IN	33
Вторая партия образцов второй серии / The second batch of samples of the second batch			
1	30ХГСА / 30HGSA	СЭП / Dry electropolishing (DE)	443
2		СЭП + ИИА / DE + nitrogen ion implantation (НИ)	98
3		СП + ИА / DE+ ionic nitriding (IN)	41
4		СП + ИИА + ИА / DE + НИ + IN	12

Третья серия образцов. Износостойкость стальных образцов после различных видов упрочняющей обработки при условиях износа: T = 2,0 час, F = 10 Н, V = 5 см/с

Third series of samples. Wear resistance of steel samples after various types of hardening treatment under wear conditions: T = 2.0 hours, F = 10 Н, V = 5 cm/s

<i>№ партии образцов / Sample batch number</i>	<i>Материал образца / Sample material</i>	<i>Вид обработки / Treatment type</i>	<i>Потеря массы, $\Delta m 10^4, Г /$ Weight loss, $\Delta m 10^4, G$</i>
Первая партия образцов третьей серии / The first batch of samples of the third series			
1	30ХМЮА	МП / Mechanical polishing	233
2		МП + ИИА / MP + nitrogen ion implantation (NII)	62
3		МП + ИА / MP + ionic nitriding (IN)	34
4		МП + ИИА + ИА / MP + NII + IN	17
Вторая партия образцов третьей серии / The second batch of samples of the third series			
1	30ХМЮА	СП / Dry electropolishing (DE)	241
2		СЭП + ИИА / DE + nitrogen ion implantation (NII)	54
3		СП + ИА / DE + ionic nitriding (IN)	22
4		СП + ИИА + ИА / DE + NII + IN	6

Результаты испытаний на износостойкость показали (табл. 1–3), что подготовка поверхности образцов методом сухого электрополирования с последующей ионно-имплантационной активацией поверхности и ионным азотированием, позволяет повысить износостойкость для образцов из стали 16ХЗНВФМБ более чем в 3 раза (табл. 1), а для образцов из стали 30ХГСА и стали 38Х2МЮА – почти в 3 раза (табл. 2, 3).

Выводы

1. В процессе эксплуатации детали запускается механизм изнашивания, в значительной степени зависящий от исходного состояния его поверхностного слоя, формирование свойств которого начинается с технологического процесса изготовления детали.

2. Поверхностный слой детали в процессе эксплуатации претерпевает значительные неравномерные упругие и пластические деформации, приводящие к изменению его физико-механических свойств, с проявлением

эффекта наследования свойств его предыдущих состояний.

3. В процессе приработки детали микро-неровности его поверхности подвергаются силовому воздействию и изменяют его физико-механическое состояние, трансформируя величину геометрического размера микро-неровностей в соответствующее им по величине и характеру изменение значений физико-механических свойств.

4. Уменьшение исходной микрогеометрической и физико-механической неоднородностей ПС детали, способствует повышению его эксплуатационных характеристик.

5. Минимизация шероховатости поверхности детали, формирование однородных физико-механических свойств поверхностного слоя детали, а также использование защитно-упрочняющей обработки, выполненной с учетом эффекта влияния неоднородности свойств ПС, приводят к повышению износостойкости детали.

6. Наиболее перспективным методом предварительной обработки поверхности детали перед ионным азотированием является метод сухого электрополирования с последующей ионно-имплантационной активацией поверхности.

Подготовка поверхности образцов методом сухого электрополирования с последующей ионно-имплантационной активацией поверхности и ионным азотированием позволяет повысить износостойкость образцов из сталей 16ХЗНВФМБ, 30ХГСА и 38Х2МЮА приблизительно в 3 раза.

Список литературы

1. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
2. Гаркунов Д. Н. Триботехника: учебник для студентов вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.
3. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А. М. Дальский и др.; под ред. А. М. Дальского. М.: МАИ, 2000. 364 с.
4. Польцер Г., Майссиер Ф. Основы трения и изнашивания. Пер с нем. О. Н. Озерского, В. Н. Пальянова; под ред. М. Н. Добычина. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
5. Трибология. Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ / под ред. В. А. Белого, К. Лудемы, Н. К. Мышкина. М: Машиностроение. Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. 454 с.
6. Химико-термическая обработка: учебное пособие для вузов / Ю. М. Лахтин, Б.М. Арзамасов. М.: Metallurgy, 1985. 265 с.
7. Grant W. A., Williams J. S. The modification of surface layers by ion implantation // *Sci. Prog. Oxf.* 1976. V. 63, No. 249. P. 27–64.
8. Bhaduria N., Pandey S., Pandey P. M. Wear and enhancement of wear resistance – A review // *Materials Today: Proceedings.* 2020. V. 26. Part 2. P. 2986–2991. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.616.
9. Wear resistance and cutting performance of high-speed steel ball nose end mills related to the initial state of tool surface / A. S. Chauhan et al. // *Wear.* 2021. V. 472–473. P. 203711. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203711.
10. Effect of Ozone Oxidation and Modification with a Carbon Framework on the Tribotechnical Characteristics of a Plastic Lubricant / I. I. Emaev et al. // *Journal of Friction and Wear.* 2018. V. 39, No. 5. P. 388–393. DOI: 10.3103/S1068366618050070.
11. Study of the Tribotechnical Properties of a Cutting Tool Made of Sintered Powder Tool Materials / N. K. Krioni et al. // *Journal of Friction and Wear.* 2018. V. 39, No. 1. P. 12–18. DOI: 10.3103/S1068366618010099.
12. Experimental Study on Wear Resistance of AISI 347 Treated With Salt Bath Nitriding and Gas Nitriding Processes-A Review / S. K. Singh et al. // *Materials Today: Proceedings.* 2019. V. 18. Part. 7. P. 2717–2722. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.134.