

## КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

*Леонид Михайлович Акулович<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор,  
e-mail: leo-akulovich@yandex.ru;*

*Леонид Ефимович Сергеев<sup>1</sup>, кандидат технических наук,  
доцент кафедры;*

*Сергей Константинович Дубновицкий<sup>2</sup>, магистр технических наук,  
аспирант кафедры, директор;*

*Виктория Васильевна Шабуня<sup>1</sup>, ассистент кафедры*

*<sup>1</sup> Белорусский государственный аграрный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь;*

*<sup>2</sup> Пинский индустриально-педагогический колледж – филиал  
Брестского государственного технического университета,  
г. Пинск, Республика Беларусь*

**Реферат.** В результате коррозии металлические изделия теряют свои ценные технические свойства, поэтому важное значение имеет поиск способов ее замедления. Коррозионная стойкость деталей машин определяется показателями качества их поверхностей, которые формируются в основном на финишных операциях обработки. Перспективными способами финишной обработки поверхностей деталей становятся способы, основанные на использовании эластичной связки или незакрепленного абразива, к которым относится магнитно-абразивная обработка МАО. (Цель исследования) Обосновать эффективность магнитно-абразивной обработки деталей из легированных сталей для повышения их коррозионной стойкости по сравнению с токарной обработкой и шлифованием. (Материалы и методы) Экспериментальные исследования проводили на образцах колец подшипников (материал ШХ15 ГОСТ801-78) и закаточных роликов (материал Х12М ГОСТ 5950-73) после токарной обработки, шлифования и МАО. В ходе эксперимента кольца подшипника погружались в 20 процентный водный раствор NaCl при температуре 20 градусов Цельсия на 288 часов, закаточные ролики – в 10 процентный водный раствор NaCl при температуре 20 градусов Цельсия на 336 часов. При оценке коррозионной стойкости использовали качественные показатели – изменение внешнего вида поверхности металла. (Результаты и обсуждение) Сравнили интенсивность развития коррозии образцов в зависимости от времени погружения их в раствор после токарной обработки, шлифования и МАО. Сопоставили топографические характеристики поверхности после разных способов финишной обработки. Установили, что МАО обеспечивает наименьшую шероховатость поверхностей, что повышает их коррозионную стойкость. (Выводы) Магнитно-абразивная обработка повышает коррозионную стойкость поверхности внутреннего кольца подшипника в 1,83 раза, а закаточного ролика в 1,5 раза, при этом морфология и состав ФАП не оказывают существенного влияния на коррозионную стойкость.

**Ключевые слова:** кольца подшипников, закаточный ролик, магнитно-абразивная обработка.

*Для цитирования:* Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Дубновицкий С.К., Шабуня В.В. Коррозионная стойкость деталей из легированных сталей после магнитно-абразивной обработки // Технический сервис машин. N.1. С. 104-112

## **CORROSIVE RESISTANCE OF THE ALLOYED STEEL DETAILS AFTER MAGNETIC ABRASIVE MACHINING**

*Leonid M. Akulovich<sup>1</sup>, Dr.Sc.(Eng.), professor,  
e-mail: leo-akulovich@yandex.ru;*

*Leonid E. Sergeev<sup>1</sup>, Ph.D.(Eng.), associate professor;  
Sergey K. Dubnovitsky<sup>2</sup>, master of technical Sciences,  
post-graduate student, director;*

*Victoria V. Shabunya<sup>1</sup>, assistant professor*

*<sup>1</sup>Belarusian state agrarian technical University, Minsk, Republic of Belarus;*

*<sup>2</sup>Pinsk industrial pedagogical College-branch of Brest state technical  
University, Pinsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** As a result of corrosion metal products lose the valuable technical properties that is why searching the ways of its deceleration is important. Corrosion resistance of automobile details is defined by the quality indicators of their surfaces, which are generally formed during the time of finishing processing operations. Perspective ways of finishing processing of the detail surfaces are the ways based on the use of an elastic adhesive or three-body abrasion to which magnetic abrasive machining refers. (Purpose of research) Proving the efficiency of magnetic abrasion machining of the alloyed steel details for increasing their resistance to corrosive attack. (Materials and methods) Experimental studies were conducted on the race rings (material ShH15 state standard specification 801-78) and seaming rolls (material H12M state standard specification 5950-73) samples after turning, grinding and magnetic abrasive machining. During the experiment the race rings were immersed in 20% aqueous NaCl solution at a temperature 20°C for 288 hours, the seaming rolls – in 10% aqueous NaCl solution at a temperature 20°C for 336 hours. When assessing the corrosive resistance the quality indicators were used – the changing visual appearance of the metal surface. (Results and discussion) The intensity of the corrosion development of the samples were compared depending on their immersion in solution time after turning, grinding and magnetic abrasive machining. Topographical features of surface after different ways of finishing processing were also equated. It was determined that magnetic abrasive machining provides the smallest roughness of surface that in its turn increases its resistance to corrosion attack. (Conclusions) Magnetic abrasive machining increases the corrosive resistance of a surface of an inner race by 1,83 times, and a seaming roll by 1,5 times, at the same time the morphology and structure of ferro abrasive powder have no significant effect on resistance to corrosive attack.

**Keywords:** race rings, seaming roll, magnetic abrasive machining.

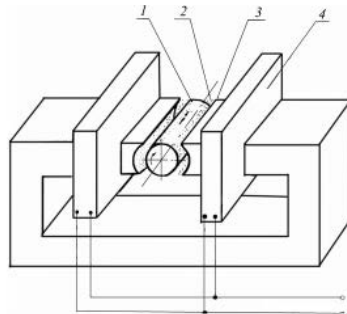
**For citation:** Akulovich L.M., Sergeev L.E., Dubnovitsky S.K., Shabunya V.V. Corrosion resistance of alloy steel parts after magnetic abrasive treatment. Technical service of machines. 2019. N.1. 104-112 (In Russian).

**Введение.** В результате коррозии металл теряет свои физико-механические свойства (прочность, пластичность), вследствие чего выходят из строя

оборудование, машины, механизмы, разрушаются металлические конструкции. Полностью предотвратить коррозию металлов невозможно, поэтому единственным путем борьбы с ней является поиск способов ее замедления [1].

В настоящее время борьбу с коррозией ведут сразу в нескольких направлениях – пытаются изменить среду, в которой работает металлическое изделие, повлиять на коррозионную устойчивость самого материала, предотвратить контакт между металлом и агрессивными веществами внешней среды. Коррозионную стойкость сталей можно повысить введением в их состав специальных легирующих элементов, нанесением защитных покрытий, пассивацией и т.п. [1]. Коррозионную стойкость деталей машин определяют показателями качества их поверхностей, которые формируются в основном на финишных операциях обработки. Показатели качества поверхности могут также зависеть и от предшествующих операций, т.к. при механической обработке имеет место технологическая наследственность [2, 3]. Одним из основных показателей качества поверхностей, влияющих на коррозионную стойкость, является шероховатость поверхности.

Рабочие поверхности деталей машин в зависимости от способа обработки имеет разную шероховатость [4]. Финишные способы обработки обеспечивают наименьшую шероховатость поверхностей, что повышает их коррозионную стойкость. В связи с этим возникает задача определить влияние шероховатости поверхностей, полученных разными способами обработки, на коррозионные свойства. Рассмотрим это влияние на примере внутреннего кольца подшипника и закаточного ролика. Классические способы финишной обработки поверхностей колец подшипников и закаточных роликов: шлифование, суперфиниширование [4, 5]. Указанные виды обработки сопровождаются рядом факторов (тепловые, износ абразивного инструмента и др.), которые приводят к снижению точности обработки, а также вызывают изменение физико-механических свойств поверхностного слоя, в частности, за счет появления неоднородности структуры и твердости [6, 7].



*Рис. 1. Схема МАО наружных поверхностей тел вращения:*

*1 – обрабатываемая деталь; 2 – ферроабразивный порошок (ФАП); 3 – полюсные наконечники электромагнита; 4 – электромагнит*

Эти факторы существенно снижают качество поверхностей деталей, и, как следствие, коррозионную стойкость. Одними из перспективных способов финишной обработки поверхностей деталей являются способы, основанные на использовании эластичной связки или незакрепленного абразива, к которым и относится магнитно-абразивная обработка (МАО) (рис. 1) [8]. Данный спо-

соб прост в осуществлении, экологически чист, обеспечивает высокое качество обработанных поверхностей деталей и существенное повышение их сопротивляемости износу, коррозии и механическим нагрузкам, обладает высокой производительностью и успешно конкурирует с процессами химической и электрохимической обработки [8, 9].

**Цель исследования** – обоснование эффективности магнитно-абразивной обработки деталей из легированных сталей для повышения их коррозионной стойкости по сравнению с токарной обработкой и шлифованием.

**Материалы и методы.** Экспериментальные исследования проводили на образцах колец подшипников (материал ШХ15 ГОСТ801-78) и закаточных роликов (материал Х12М ГОСТ 5950-73) после токарной обработки, шлифования и магнитно-абразивной обработки. МАО проводили на станке модели СФТ 2.150.00.00.000. Параметры и режимы МАО: магнитная индукция  $B=1Тл$ ; скорость резания  $V_p=2,5 м/с$ ; скорость осцилляции  $V_o=0,2 м/с$ ; амплитуда осцилляции  $A=1 мм$ ; коэффициент заполнения зазора  $k_z=1$ ; величина рабочего зазора  $\delta=1 мм$ ; время обработки  $t=120 с$ . Для МАО поверхности внутреннего кольца подшипника использовали ФАП – на основе боридов железа, зернистостью  $\Delta=100/160$  мкм, а для обработки поверхности закаточного ролика  $\square$  Ж15КТ на основе карбида титана ТУ 6-09-03-483-81, зернистостью  $\Delta=100/160$  мкм. Смазочно-охлаждающее технологическое средство (СОТС) – СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5% водный раствор. Исходная шероховатость поверхности кольца подшипника и закаточного ролика  $Ra_1=0,8-1 мкм$ . Морфология и форма частиц ФАП на основе боридов железа близка к ромбической форме и показана на рисунке 2а. Морфология и форма частиц ФАП на основе карбида титана близка к сферической форме и показана на рисунке 2б. Полученные данные по показателям коррозионной стойкости сравнивали с аналогичными параметрами при шлифовании [7].

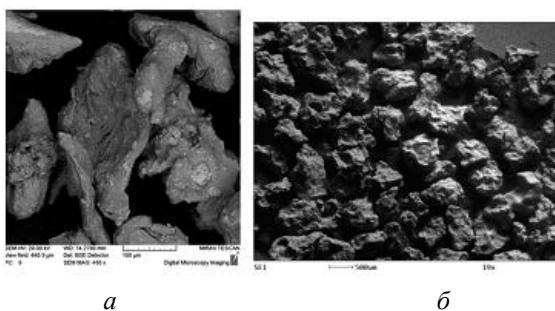


Рис. 2. Морфология ферроабразивного порошка на основе боридов железа: а) увеличение  $\times 100$  и Ж15КТ; б) увеличение  $\times 500$

Методика проведения эксперимента по определению коррозионной стойкости обработанных поверхностей внутреннего кольца подшипника включала ускоренные испытания при периодическом или полном погружении в 20%-й водный раствор NaCl при температуре 20°C на 288 часов, а закаточного ролика  $\square$  в 10%-й водный раствор NaCl при температуре 20°C на 336 часов. Для оценки коррозионной стойкости использовали качественные показатели, такие как изменение внешнего вида поверхности металла [10]. При этом визуально оценивали цвет, потускнение поверхности; наличие и распределение видимых коррозионных дефектов и др. Для определения количества и местоположения дефектов применяли сетку-шаблон с квадратами 5×5 мм,

изготовленную из пластика, которую накладывали на испытуемый образец.

**Результаты и обсуждения.** На рисунках 3, 4 представлены фотографии колец подшипников и закаточного ролика, которые подвергались испытаниям на коррозионную стойкость. На фотографиях прослеживается кинетика развития коррозии на испытуемых образцах, обработанных методом MAO (рис. 3б, 3в, 3г, 4б, 4в).



Рис. 3. Образцы внутреннего кольца подшипника, обработанного методом MAO и подвергнутого испытанию через определенное время: а – до начала эксперимента; б – через 120 часов; в – через 192 часа; г – через 288 часов

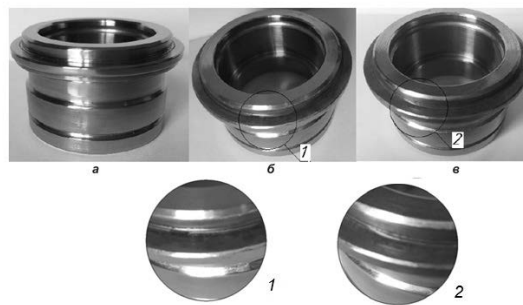
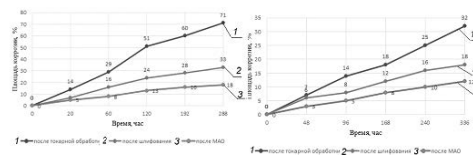


Рис. 4. Образцы закаточного ролика, обработанного методом MAO и подвергнутого испытанию через определенное время: а – до начала эксперимента; б – через 48 часов; в – через 336 часов; 1, 2 – очаги коррозии

Интенсивность развития коррозии представлена графиками зависимостей при различных методах обработки (рис. 5). Вместе с тем на развитие коррозии может оказывать влияние технологическая наследственность, поэтому в исследованиях учитывали и интенсивность коррозии после токарной обработки.



а)

б)

Рис. 5. График интенсивности развития коррозии образцов в зависимости от времени погружения их в раствор: а) – кольца подшипника; б) – закаточного ролика

В процессе обработки деталей на их поверхности формируются неровности □ отклонения от геометрической формы (волнистость, шероховатость и др.), которые и определяют топографию поверхности. Топография обработанных поверхностей зависит от способа механической обработки, геометрии инструмента, режимов резания. На рисунке 6 представлены топографии поверхностей после токарной обработки (рис. 6а), после шлифования (рис. 6б) и МАО (рис. 6в).

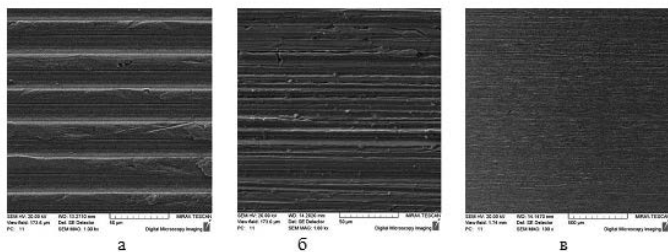


Рис. 6. Топографии поверхностей исследуемых образцов: а) – после токарной обработки; б) – после шлифования; в) – после МАО (увеличение  $\times 50$ )

На рисунке 7 представлены профилограммы поверхностного слоя после шлифования и МАО.

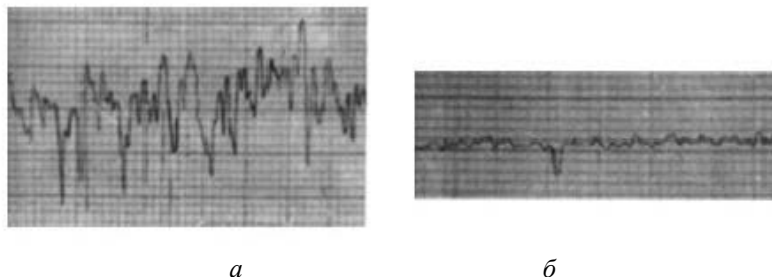


Рис. 7. Профилограммы поверхностного слоя кольца подшипника: а) – после шлифования; б) – после МАО

На поверхности после токарной обработки (рис. 6а) остались неровности в виде впадин и гребешков. Шероховатость поверхности зависит от режимов обработки, геометрии режущей кромки инструмента и т.д.

Гистограмма (рис. 8а) показывает распределение высот неровностей, близкое к гауссовскому, что подтверждается также значениями асимметрии.

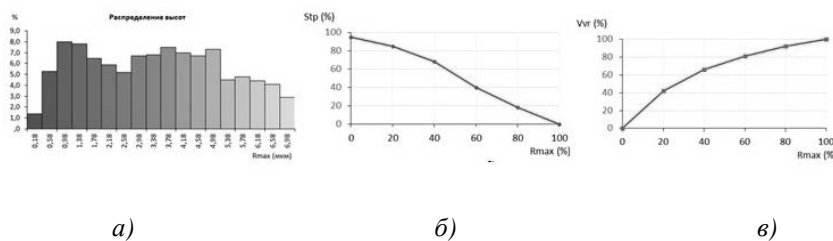


Рис. 8. Топографические характеристики поверхности после токарной обработки: а) – гистограмма распределения высот; б) – опорная кривая поверхности; в) – маслоспособность

Значение параметра Ra при точении может варьироваться весьма существенно, поскольку оно зависит от формы режущей кромки резца, глубины резания и отношению подачи к частоте вращения заготовки [11].

Как видно из графиков маслостойкости (рис. 8в), при трении такой поверхности происходит достаточно быстрое удаление гребешков неровностей (до 50% от общей высоты), после чего наступает некоторая стабилизация. Впадины, возникающие в образце, достаточно узкие и строго ориентированы поперек направлению движения инструмента [11].

Характер неровностей и профилограмма поверхности после шлифования (рис. 6б, 7а) представляет собой множество параллельно расположенных царапин, произведенных абразивными зёрнами, находящимися на периферии шлифовального круга. Зёрна, участвующие в процессе шлифования, имеют разную степень износа, что приводит к неоднородности получаемой шероховатости поверхности. Новые зёрна, не подвергнувшиеся износу, производят резание поверхности. Поскольку инструмент для правки шлифовальных кругов придает поверхности шлифовального круга ярко выраженную направленную структуру, то совместно с траекторией движения шлифовального круга это определяет анизотропность получаемой поверхности (рис. 9). Особенностью шлифования является наличие на поверхности четко выраженных впадин. Данные впадины создаются острыми зёрнами, копирующими свой профиль на поверхность. График опорной кривой обработанной поверхности приведен на рисунке 9б.

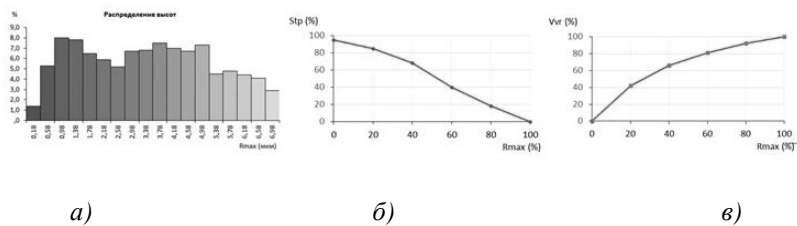


Рис. 9. Топографические характеристики поверхности после шлифования: а) – гистограмма распределения высот; б) – опорная кривая поверхности; в) – маслостойкость

Поскольку шлифовальный круг вращается с высокой скоростью, индивидуальные контактные взаимодействия накладываются друг на друга и совмещаются, включая резание, адгезионный и абразивный износ, пластическую деформацию и трещинообразование, одновременно происходящие на всей обрабатываемой поверхности. Следствием такого комплексного взаимодействия является близкая к гауссовской структура поверхности с редкими впадинами, оставляемыми единичными абразивными зёрнами [11].

В процессе MAO поверхность формируется частицами ФАП приблизительно равного размера, контактирующими с поверхностью в различных местах и под произвольным углом. Количество единичных взаимодействий, приходящихся на участок поверхности, определяет глубину образующейся на нем впадины. Характер неровностей и профилограмма поверхности после MAO (рис. 6в, 7б) имеет случайный характер не только по площади, но и по амплитуде.

Гистограмма распределения высот (рис. 10а) показывает гауссовскую природу поверхности. Опорная кривая поверхности (рис. 10б) имеет плав-

ный переход от зоны незначительного контакта в зону развитого контакта, что является полезным ее свойством с точки зрения трибологии [11].

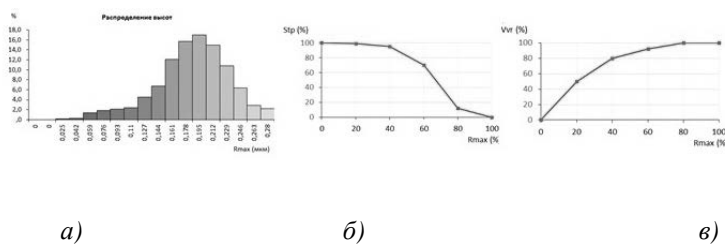


Рис. 10. Топографические характеристики поверхности после MAO: а) – гистограмма распределения высот; б) – опорная кривая поверхности; в) – маслосъемность

После MAO на поверхности остаются единичные микровпадины. Они имеют случайные координаты по горизонтали и размеры, однако их форма приблизительно одинакова. Это показывает одновременно множественный характер взаимодействий и случайное их распределение [11].

**Выводы.** В ходе исследований установлено, что образец кольца подшипника после MAO, выдержавший 228 часов испытаний в 20% растворе NaCl, имеет 18% коррозионных поражений на поверхности (коррозия была выявлена лишь на рабочем участке внутреннего кольца подшипника), а образец закатоchnого ролика, выдержавший 336 часов испытаний в 10% растворе NaCl, имеет 12% коррозионных поражений на поверхности. Анализ результатов эксперимента показывает, что MAO повышает коррозионную стойкость поверхности внутреннего кольца подшипника в 1,83 раза, а закатоchnого ролика в 1,5 раза, при этом морфология и состав ФАП не оказывают существенного влияния на коррозионную стойкость.

### Библиографический список

1. Михайловский Ю.Н. Атмосферная коррозия металлов и методы их защиты. М.: Металлургия. 1989. 101 с.
2. Горленко О.А. Технологическое обеспечение геометрических параметров качества поверхности на основе учета закономерностей технологической наследственности. В кн.: Метрология и свойства обработанных поверхностей. М.: Изд-во стандартов. 1977. 171 с.
3. Яцерицын П.И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных деталей. Минск: Наука и техника. 1971. 210 с.
4. Зрунек М. Противокоррозионная защита металлических конструкций. М.: Машиностроение. 1984. 135 с.
5. Яцерицын П.И., Цокур А.К., Еременко М.Л. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей. Минск: Наука и техника. 1973. 179 с.
6. Захаров О.В. Технология и оборудование бесцентрового суперфиниширования: учеб. пособие. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т. 2007. 96 с.
7. Игнатьев С.И. Обеспечение качества обработки поверхностей качения колец подшипников на основе контроля динамического состояния шлифовальных станков по стохастическим характеристикам виброакустических колебаний: автореф. дис.канд.техн.наук. Саратов: Саратовский государственный технический университет. 2001.



8. Барон Ю.М. *Технология абразивной обработки в магнитном поле*. Л.: Машиностроение. 1975. 128 с.
9. Кожуро Л.М., Чемисов Б.П. *Обработка деталей машин в магнитном поле*. Минск: Наука и техника. 1995. 232 с.
10. *Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости ГОСТ 9.908-85*. Введ. 01.01.1987. М.: ИПК Издательство стандартов. 1999. 17 с.
11. Порошин В.В. *Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей*. М.: Машиностроение-1. 2007. 196 с.

### References

1. Mikhailovsky Yu.N, *Atmospheric corrosion of metals and methods of their protection*. Moscow: Metallurgy. 1989. 101.
2. Gorlenko O. *Technological support of geometrical quality parameters of a surface on the basis of the account of laws of technological heredity*. Moscow: Publishing Standards. 1977. 171.
3. Yascheritsyn P.I. *Technological heredity and operational properties of polished parts*. Minsk: Science and technology. 1971. 210.
4. Zrunek M. *Corrosion protection of metal structures*. Moscow: Mechanical engineering. 1984. 135.
5. Yascheritsyn P.I., Tsokur A.K., Eremenko M.L. *Thermal phenomena during grinding and properties of treated surfaces*. Minsk: Science and Technology. 1973. 179.
6. Zakharov O.V., *Technology and equipment of centripetal superfinishing: Textbook*. Saratov: Sarat. state tech. Univ. of Illinois. 2007. 96.
7. Ignatiev S.I., *Maintenance of quality of processing of surfaces of rolling of bearings of rings on the basis of control of dynamic condition of grinding machines on stochastic characteristics of vibroacoustic oscillations, author's abstract Dis ... Cand.techn. Science*. Saratov: Saratov State Technical University. 2001.
8. Baron Yu.M., *Technology of abrasive treatment in a magnetic field*. Leningrad: Mechanical engineering. 1975. 128.
9. Kzhuro L.M., Chemezov B.P. *Machining of machine parts in a magnetic field*. Minsk: Science and Technology. 1995. 232.
10. *Uniform anti-corrosion and aging system. Metals and alloys. Methods of determination of corrosion and corrosion resistance parameters GOST 9.908-85*. Moscow: IPK Publishing Standards. 1999. 17.
11. Poroshin V.V. *Fundamentals of complex control of surface topography of parts*. Moscow: Mechanical Engineering-1. 2007. 196.