

УДК 621.922.079
DOI 10.17513/snt.39730

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕД НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ИМПРЕГНИРОВАННОГО АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Носенко В.А., Исаева А.А., Ших А.А., Васильев А.В.

*Волжский политехнический институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,
Волжский, e-mail: vladim.nosenko2014@yandex.ru*

Повышение режущей способности шлифовальных кругов в результате импрегнирования в поры инструмента специальных химических соединений является одним из наиболее доступных и эффективных методов. В качестве импрегнаторов используются различные группы веществ. В работе представлена новая группа импрегнаторов – газообразователи, специальные химические соединения, способные выделять в зоне резания газообразные продукты, обладающие высокой проникающей способностью и химической активностью. Показаны закономерности изменения массы анализируемых химических соединений и тепловые эффекты, возникающие в процессе нагрева, в том числе в присутствии порошка обрабатываемого металла. Исследования выполнены на шлифовальных кругах из традиционных абразивных материалов (карбид кремния марки 64С и электрокорунд марки 24А), связка инструмента – керамическая. Составы импрегнаторов вводили в поры круга методом свободного капиллярного поднятия. Сушку инструмента осуществляли при комнатной температуре. Эффективность действия импрегнаторов определяли на операции плоского врезного шлифования при обработке заготовок из сплава ВТ6 и подшипниковой стали. Установлено, что в результате воздействия температуры шлифования образование газообразных продуктов разложения импрегнаторов наблюдается на протяжении всего периода обработки. Концентрация газов в зоне шлифования не превышает установленные нормативы. Показано влияние импрегнаторов на составляющие силы резания, износ инструмента, шероховатость и морфологию обработанной поверхности. На основе результатов рентгеноспектрального микроанализа дана оценка влияния импрегнирования на интенсивность переноса материала абразивного инструмента на поверхность обрабатываемого металла. Даны рекомендации по выбору газообразователей в качестве импрегнаторов абразивного инструмента.

Ключевые слова: титановый сплав, сталь, шлифование, газообразователи, импрегнирование, показатели процессов

THE EFFECT OF CHEMICALLY ACTIVE GASES ON THE PERFORMANCE OF IMPREGNATED ABRASIVE TOOLS

Nosenko V.A., Isaeva A.A., Shikh A.A., Vasilev A.V.

*Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Volzhsky,
e-mail: vladim.nosenko2014@yandex.ru*

Increasing the cutting ability of grinding wheels by impregnating the pores of the tool with special chemical compounds is one of the most accessible and effective methods. Various groups of substances are used as impregnators. The paper presents a new group of impregnators – gas formers, special chemical compounds capable of releasing gaseous products with high penetrating ability and chemical activity in the cutting zone. Regularities of changes in mass of the chemical compounds analyzed and thermal effects arising in the process of heating are shown, including the presence of machined metal powder. Researches were carried out on grinding wheels made of traditional abrasive materials (silicon carbide of 64C grade and electrocorundum 24A grade), tool bond – ceramic. Impregnator compositions were introduced into the pores of the wheel by free capillary elevation. Drying of the tool was carried out at room temperature. Efficiency of impregnators action was determined on the operation of plunge plunge grinding when processing workpieces made of VT6 alloy and bearing steel. It is established that as a result of the effect of grinding temperature, the formation of gaseous products of impregnator decomposition is observed throughout the entire period of machining. The concentration of gases in the grinding zone does not exceed the established standards. The influence of impregnators on the components of cutting force, tool wear, roughness and morphology of the machined surface is shown. Based on the results of X-ray microanalysis the influence of impregnation on the intensity of transfer of the abrasive tool material to the surface of the machined metal is evaluated. Recommendations for selection of gas formers as impregnators of abrasive tools are given.

Keywords: titanium alloy, steel, grinding, gas formers, impregnation, process indicators

В настоящее время большое внимание уделяется изысканию путей улучшения эксплуатационных свойств абразивного инструмента. Появилось большое количество работ, анализирующих технологии подачи минимального количества смазки в зону

резания в воздушном потоке (САМQL) [1, 2]. Известно использование в качестве импрегнаторов специальной группы веществ (порофоров), способных выделять при термическом разложении газообразные продукты [3].

Импрегнирование, то есть насыщение пор круга специальными веществами, является одним из наиболее доступных и экономичных способов совершенствования стандартного абразивного инструмента [4]. Большое значение уделяют подбору необходимых материалов, используемых в качестве импрегнаторов. Материалы должны обладать определенным набором свойств, в частности способностью проникать в поры круга и удерживаться там при вращении абразивного инструмента, не оказывать вредного воздействия на связку, снижать коэффициент трения зерна с обрабатываемым материалом и интенсивность адгезионного взаимодействия, не оказывать негативного влияния на окружающую среду и др. [5].

Особое внимание уделяется газовым СОТС, обладающим высокой проникающей способностью. Показаны перспективы использования органических химических соединений, в составе которых содержатся химические элементы IV–VII групп Периодической системы [6]. Особый интерес представляют вещества, способные выделять при температуре шлифования химически активные газовые среды. Большая проникающая способность газовой фазы в совокупности с высокой реакционной способностью химически активных элементов будет способствовать снижению интенсивности взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемым материалом и окажет положительное влияние на эксплуатационные свойства абразивного инструмента.

Цель работы заключалась в улучшении эксплуатационных показателей импрегнированных шлифовальных кругов в результате использования в качестве импрегнаторов порофоров, образующих в зоне резания химически активные газовые среды.

Материалы и методы исследования

Импрегнирование шлифовальных кругов осуществляли методом свободного капиллярного поднятия растворов или расплавов химических соединений. Сушку шлифовальных кругов выполняли на воздухе при комнатной температуре. Инструменты закрепляли на оправке и медленно вращали на протяжении первоначального этапа сушки. Изучение влияния температуры на изменение массы предполагаемых импрегнаторов и тепловые эффекты происходящих реакций выполняли на дериватографе модели Q-1500 D фирмы «MOM». Погрешность определения показателей дериватографа: температура – 3%, изменение массы анализируемых продуктов – 5%.

Эксплуатационные показатели абразивных инструментов определяли при шли-

фовании на станке с ЧПУ модели Smart-B1224III [7]. В качестве обрабатываемых материалов использовали титановый сплав ВТ6 и подшипниковую закаленную сталь ШХ15. Металлы существенно различаются по механическим свойствам и интенсивности взаимодействия с абразивными материалами. Поэтому для шлифования сплава ВТ6 использовали абразивный инструмент из карбида кремния зеленого марки 64С, для шлифования стали ШХ15 – абразивный инструмент из электрокорунда белого марки 24А. Охлаждение осуществляли препаратом «Авазол» (ТУ 0258-001-34705841-95), концентрация 3% и раствором кальцинированной соды, концентрация 0,3%. Износ абразивного инструмента определяли микронным индикатором часового типа Micron ИЧ-1, артикул 61168, цена деления 0,001 мм, диапазон измерения от 0 до 1 мм, предел допускаемой погрешности $\pm 0,005$ мм. Суммарная погрешность измерения износа с учетом погрешности прибора 7–9%. Мощность N определяли на этапе установившегося шлифования по касательной составляющей силы резания Pz : $N = PzV$, где V – скорость шлифования. Составляющую силы резания измеряли силоизмерительным комплексом, состоящим из динамометра Amti MC36-1000UP [8], усилителя Amti Mini AMP MSA6 [9], внешнего модуля АЦП E14 140 [10] и ПО «PowerGraph» [11]. Статистическую обработку данных выполняли ПО «Peaks» [12]. Суммарную погрешность мощности принимали равной суммарной погрешности определения составляющей силы резания не более 8%. Шероховатость обработанной поверхности измеряли профилометром Mitutoyo SurfTest SJ-410 [13], инструментальная погрешность – 3%, суммарная погрешность параметра Ra не превышала 10%. Образование газообразных продуктов при разложении импрегнаторов непосредственно в зоне шлифования фиксировали на газоанализаторе модели ГАНК-4 [14], пределы основной относительной погрешности измерений $\pm 20\%$. Датчик анализатора размещали на расстоянии 100 мм от зоны шлифования.

Морфологию и химический состав шлифованной поверхности исследовали на растровом двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D LoVac [15].

Результаты исследования и их обсуждение

Сера и хлор являются наиболее активными элементами из VI и VII групп Периодической системы. По справочным данным в качестве предполагаемых импрегнаторов выбраны тетраметилтиурамдисульфид

(ТМТД) и дитиодиморфолин (ДТДМ) хлористый аммоний (ХА), серноокислый аммоний (СА), гексахлорпаракисилол (ГХК).

Быстрее всего процесс разложения начинается у веществ ТМТД и ДТДМ, значимая потеря массы и эндотермическая реакция разложения соответствуют интервалу 160–240°C для ТМТД и 180–290°C – для ДТДМ (рис. 1, а).

Распад ГХК начинается при 200°C, при 270 °С остаток массы вещества составляет 32%. Большая часть массы продукта разложилась с выделением газообразных продуктов. В интервале 270–500 °С процесс разложения замедляется, остаточная масса вещества составляет около 5%. Реакции разложения исследуемых веществ относятся к экзотермическим процессам.

Для определения реакционной способности выделяющихся газов при взаимодействии с обрабатываемыми металлами проводили дериватографические исследования импрегнаторов с порошком железа (рис. 1, б). Исходный массовый состав смеси 50/50.

При нагревании порошка железа без смешивания с импрегнаторами в интервале 310–360°C его масса увеличивается

на 2% (рис. 1, а), реакция экзотермическая. Смесь ГХК+Fe разлагается с потерей 20% массы при температуре около 240 °С. Масса железа при данной температуре не изменяется, масса ГХК составляет 50% (рис. 1, а). Таким образом, оставшиеся 5% смеси (50% Fe + 25% ГХК) являются продуктами взаимодействия железа и газов, выделившихся при термораспаде ГХК.

Дальнейшие исследования проводили с ГХК, ДТДМ и ТМТД, являющимися наиболее химически активными при взаимодействии с металлом. Предельная растворимость веществ в растворителях (табл. 1) обусловлена их максимально возможной концентрацией в растворе. Содержание импрегнаторов в кругах зависит от объема пор в инструменте и удельного веса импрегнатора.

Интенсивность разложения импрегнаторов определяли непосредственно при шлифовании по концентрации продуктов газов Cl₂ и SO₂ в зоне обработки. В зависимости от числа проходов газовый анализатор фиксирует образование газовых продуктов разложения импрегнаторов. При увеличении подачи в два раза концентрация хлора возрастает почти пропорционально (рис. 2, а).

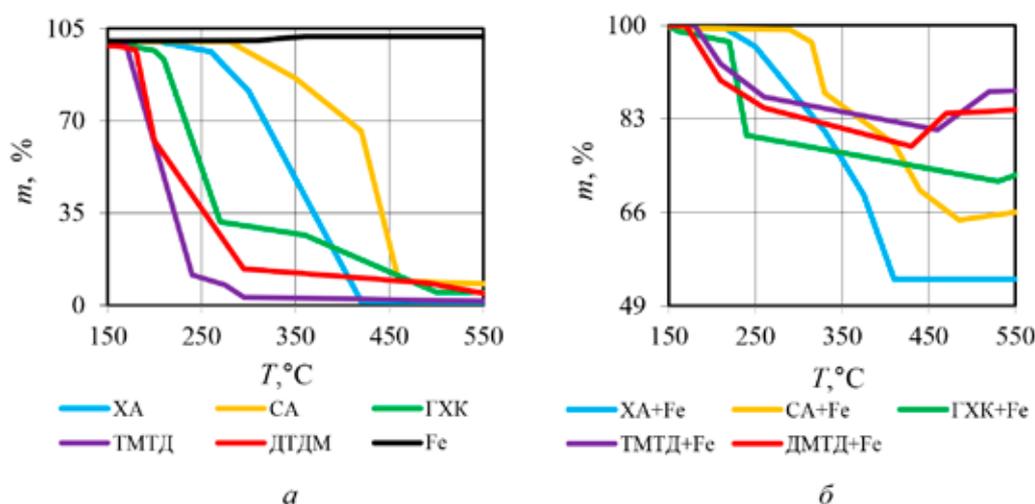


Рис. 1. Потеря массы импрегнаторов (а) и смеси импрегнаторов с порошком железа (б) в зависимости от температуры нагрева

Таблица 1

Характеристика импрегнаторов

Импрегнатор	Предельная растворимость, %	Содержание импрегнатора в кругах, %	
		электрокорунд белый	карбид кремния
ГХК	38	7	4,9
ТМТД	5	1,8	1,6
ДТДМ	7	0,8	0,7

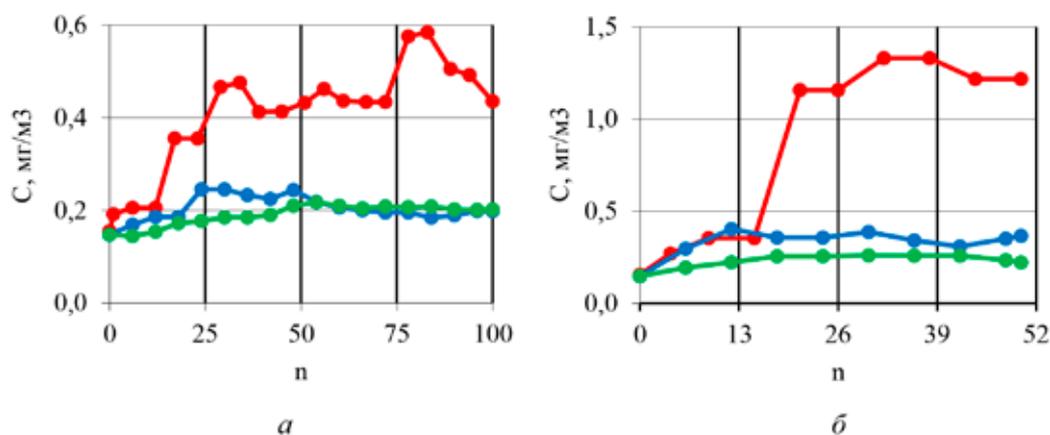


Рис. 2. Закономерность изменения концентрации в зоне шлифования C газообразных продуктов разложения импрегнаторов в зависимости от числа проходов n : а – 0,005 мм/х; б – 0,010 мм/х; ● – ГХК; ● – ТМТД; ● – ДТДМ

При шлифовании стали ШХ15 газообразование при шлифовании инструментом с ГХК более значительное (на рис. 2 не показано), что обусловлено большим содержанием импрегнатора в кругах из электрокорунда (табл. 1).

Выделение SO_2 при разложении ТМТД и ДТДМ, как и выделение хлора при разложении ХА, осуществляется на каждом проходе заготовки. При шлифовании с радиальной подачей 0,005 мм/х (рис. 2, а) концентрация образующихся при разложении ТМТД и ДТДМ газообразных продуктов приблизительно одинакова и составляет около 0,2 мг/м³. Концентрация хлора, образующегося при разложении ГХК, начиная с 25-го прохода колеблется в интервале 0,4–0,6 мг/м³, что в два раза выше по сравнению с импрегнаторами ТМТД и ДТДМ. С увеличением радиальной подачи абразивного инструмента в 2 раза интенсивность образования газообразных продуктов разложения импрегнаторов возрастает: ДТДМ – на 30%, ТМТД – на 50–60%. Концентрация ГХК в зоне шлифования на 20-м проходе поднимается свыше 1 мг/м³. Интенсивность газообразования импрегнатора ГХК по сравнению с ТМТД и ДТДМ возрастает в 3–4 раза. На расстоянии 50 см от заготовки концентрация газов снижается в 10 раз.

Различная интенсивность образования газообразных продуктов разложения импрегнаторов в определенной степени обусловлена содержанием газообразователей в абразивных инструментах. Например, в кругах из карбида кремния исходная массовая доля импрегнаторов возрастает в пропорции ДТДМ:ТМТД:ГХК = 1:2:7. Почти в такой же пропорции изменяется исходная массовая

доля импрегнаторов ДТДМ и ТМТД в кругах из электрокорунда (табл. 2).

Эксплуатационные испытания импрегнированных абразивных инструментов представлены отношениями значений параметров базового круга к соответствующим значениям параметров абразивных инструментов, импрегнированных ГХК (табл. 2). Наибольшее влияние импрегнатор ГХК оказал на износ инструмента, по сравнению с базовым кругом износ импрегнированного инструмента при шлифовании титанового сплава и стали снижен в 1,5–1,6 раза. Параметр шероховатости Ra обработанных поверхностей титанового сплава и стали уменьшен в 1,3–1,4 раза, мощность шлифования снижается в среднем на 20%. Изменение подачи на глубину шлифования в диапазоне 0,005–0,010 мм/х не оказывает принципиального значения на эффективность рассмотренных показателей процесса. Следует отметить большое влияние импрегнатора на параметр Ra при шлифовании титанового сплава.

В связи с высокой адгезионной активностью титанового сплава импрегнатор ГХК оказывает значимое влияние на морфологию обработанной поверхности (рис. 3). При шлифовании базовым инструментом обработанная поверхность имеет значительные неровности и налипсы металла (рис. 3, а). Введение в поры круга препарата ГХК уменьшает не только шероховатость обработанной поверхности. Значимо снижается интенсивность адгезионного взаимодействия зерен карбида кремния с титановым сплавом. Обработанная поверхность становится более чистой, хорошо различимы отдельные царапины, оставленные вершинами зерен абразивного инструмента.

Таблица 2

Влияние импрегнатора ГХК на относительные значения мощности резания $N_6/N_{и}$, износа инструмента $h_6/h_{и}$ и шероховатости обработанной поверхности $Ra_6/Ra_{и}$ и при шлифовании титанового сплава и подшипниковой стали

мм/х	$N_6/N_{и}$		$h_6/h_{и}$		$Ra_6/Ra_{и}$	
	ВТ6	ШХ15	ВТ6	ШХ15	ВТ6	ШХ15
0,005	1,2	1,3	1,6	1,5	1,4	1,3
0,010	1,2	1,2	1,5	1,5	1,5	1,3

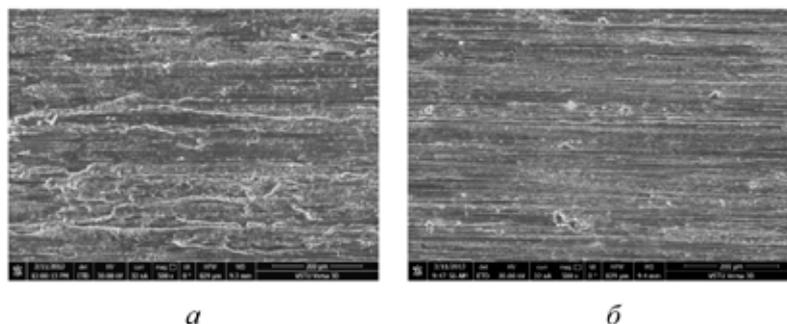


Рис. 3. Морфология поверхности титанового сплава ВТ6:
 а – обработка серийным кругом характеристики 64CF60K7V;
 б – обработка кругом той же характеристики после введения препарата ГХК

Химический состав поверхности титанового сплава после шлифования базовым кругом характеристики 64CF60K7V и после введения в поры круга препарата ГХК определяли методами рентгеноспектрального анализа в микрообъемах (диаметр электронного зонда 50 нм) и сканированием по площади. Установлено, что атомная доля содержания кремния после шлифования базовым кругом в среднем на 20% больше по сравнению с концентрацией, полученной после шлифования инструментом, импрегнированным ГХК.

Закключение

При разложении импрегнаторов образуются газовые продукты: хлор Cl_2 – при разложении гексахлорпаракисила (ГХК), сернистый газ SO_2 – при разложении тетраметилтиурамдисульфида (ТМТД) и дитиодиморфолина (ДТДМ). Наиболее активное газообразование происходит при разложении ТМТД. Например, при температуре 240 °C от вещества ТМТД остается около 11% массы, ДТДМ – 45%, от ГХК – 30%; при температуре 270 °C от вещества ТМТД остается около 9% массы, ДТДМ – 35%, от ГХК – 70%.

Из рассмотренных трех импрегнаторов наиболее эффективным является гексахлорпаракисил (ГХК). Методом свободного

капиллярного поднятия в поры абразивного инструмента средней структуры из карбида кремния и электрокорунда может быть введено соответственно около 5 и 7% массовых долей импрегнатора от массы абразивного инструмента.

В результате воздействия температуры резания в зоне шлифования образуются газовые продукты разложения импрегнатора. Выделение газообразных продуктов происходит на каждом проходе заготовки при касании абразивного инструмента. После 25-го прохода с подачей 0,005 мм/х на расстоянии 100 от шлифовального круга, импрегнированного ГХК, средняя концентрация хлора около 0,5 мг/м³, средняя концентрация SO_2 при шлифовании кругами, импрегнированными ТМТД и ДТДМ, около 0,2 мг/м³.

С увеличением подачи в два раза интенсивность газовой выделений возрастает при шлифовании кругами, импрегнированными ТМТД и ДТДМ, на 50–60%, импрегнированными ГХК – в 3–4 раза.

Применение абразивных инструментов из карбида кремния и корунда на керамической связке средних структур, импрегнированных ГХК, при шлифовании сплава ВТ6 и стали ШХ15 снижает износ инструмента на 50%, параметр шероховатости обработанной поверхности Ra – на 40%,

мощность шлифования – на 20%. Интенсивность переноса материала абразивного инструмента из карбида кремния при шлифовании сплава ВТ6 уменьшается на 20%.

Список литературы

1. Gaofeng Zhang, Wenbin Ma, Tiejun Song, Cezhi Du, Zhenyu Wang, Gang He, Hua Xie, Tao Jiang. CA-MQL grinding of zirconia engineering ceramics under precompressive stress // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 126. P. 1–10. DOI: 10.1007/s00170-023-11416-y.
2. Ge Wu, Guangxian Li, Wencheng Panm, Raja Izamshah, Xu Wang, Songlin Ding. Experimental investigation of eco-friendly cryogenic minimum quantity lubrication (CMQL) strategy in machining of Ti-6Al-4V thin-wall part // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 357. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131993.
3. Nosenko V.A., Mitrofanov A.P., Naumov A.G. Chemical reaction of impregnators in an abrasive tool with metal blanks // *Russian Engineering Research*. 2014. Vol. 34. P. 649–652. DOI: 10.3103/S1068798X14100116.
4. Kaplonek W., Nadolny K., Sutowska M., Mia M., Pimenov D.Y., Gupta M.K. Experimental Studies on MoS₂-Treated Grinding Wheel Active Surface Condition after High-Efficiency Internal Cylindrical Grinding Process of INCONEL Alloy 718 // *Micromachines*. 2019. Vol. 10. P. 255. DOI: 10.3390/mi10040255.
5. Островский В.И. Импрегнированный абразивный инструмент. М.: НИИМаш, 1983. 72 с.
6. Nosenko V.A., Krutikova A.A. Improving Abrasive Tool Cutting Properties with the Use of Impregnators that Emit Chemically Active Gas Media During Thermal Decomposition // *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 19, Is. 5. P. 2041–2045. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.070.
7. Носенко В.А., Белухин Р.А., Фетисов А.В., Морозова Л.К. Испытательный комплекс на базе прецизионного профишлифовального станка с ЧПУ CHEVALIER модели SMART-B1224 III // *Известия ВолгГТУ*. 2016. № 5 (184). С. 35–39.
8. Force Torque Sensors. MC36. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.amti.biz/product/mc36/#specifications> (дата обращения: 03.08.2023).
9. Amti Mini AMP. Strain Gage Amplifier. [Электронный ресурс]. URL: <https://manualzz.com/doc/30805589/msa-6-mini-amp>. (дата обращения: 03.08.2023).
10. E14-140. Руководство пользователя. [Электронный ресурс]. URL: <http://autex.spb.su/automation/lcard/e14-140.pdf> (дата обращения: 03.08.2023).
11. ПО «PowerGraph». Аналого-цифровые преобразователи. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.powergraph.ru/soft/> (дата обращения: 03.08.2023).
12. Обработка результатов тарировки и измерения сил шлифования: свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2009615802 Рос. Федерация / Носенко В.А., Даниленко М.В., Белухин Р.А., Носенко С.В., Митрофанов А.П.; ВолгГТУ. зарег. 16.10.2009.
13. SJ-410 – Portable Surface Roughness Tester. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mitutoyo.com/products/form-measurement-machine/surface-roughness/sj-410-portable-surface-roughness-tester> (дата обращения: 03.08.2023).
14. Газоанализатор универсальный ГАНК-4. Руководство по эксплуатации. Разработчик ООО «НПО ПРИБОР». 110 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://gank4.uz/upload/iblock/0ab/...pdf> (дата обращения: 31.07.2023).
15. Versa 3D™ DualBeam™ Versatility for demanding 3D characterization, prototyping and in situ research needs [Электронный ресурс]. URL: <https://www.microscop.ru/uploads/VERSA3D.pdf> (дата обращения: 01.08.2023).