

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.9

doi: 10.30987/2782-5957-2025-11-4-11

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СОСТАВА ПОЛИМЕРНОГО КОМПАУНД-ПРОТЕКТОРА НА АБРАЗИВЕ ДЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ ПОД ВОДОЙ

Геннадий Валерьевич Барсуков¹, Ольга Геннадьевна Кожус^{2✉}, Антон Владимирович Петрухин³, Максим Геннадьевич Литовченко⁴, Елизавета Алексеевна Тинякова⁵

^{1,2,3,4,5} Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орел, Россия

¹ awj@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0436-4429>

² okozhus@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5942-652X>

³ antosha.petrukhin@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-4798-8224>

⁴ yamaks123@bk.ru

⁵ grtea2017@yandex.ru

Аннотация

Представлены результаты теоретического исследования энергетических характеристик межмолекулярного взаимодействия полимерного раствора с поверхностью абразива для обоснования выбора состава компаунд-протектора на абразиве для гидроабразивного резания под водой. Установлены варианты взаимодействия полимерного раствора и абразива в зависимости от их свойств, а также условий окружающей среды. Используя значение угла смачивания между раствором полимера и поверхностью абразива, с учетом плотности получены выражения для определения энергетических параметров, характеризующих адгезионную связь их молекул. Получено уравнение силы взаимодействия молекул, расположенных на поверхности взаимодействия раствора полимера с поверхностью абразива по известным коэффициентам по-

верхностного натяжения и значению краевого угла смачивания. Применение предложенных математических зависимостей дает возможность подобрать тип полимера, который обеспечит формирование равномерного покрытия на абразиве и его прочность. Приведены экспериментальные данные, полученные при определении краевого угла смачивания растворами полимеров PVAC, PC, CA и PF на поверхности подложки, изготовленной из Al₂O₃. Сделаны расчеты энергетического состояния молекул на границе раздела двух фаз и работы адгезии. Определены типы полимеров для нанесения на абразив в установке с псевдооживленным слоем и сделаны рекомендации по их применению.

Ключевые слова: абразив, гидроабразивное резание, компаунд-протектор, оболочка, покрытие, смачивание, полимер.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания проект № 1024112000014-2-1.2.1;2.3.1 (FSGN-2025-0001).

Ссылка для цитирования:

Барсуков Г.В. Обоснование выбора состава полимерного компаунд-протектора на абразиве для гидроабразивного резания под водой / Г.В. Барсуков, О.Г. Кожус, А.В. Петрухин, М.Г. Литовченко, Е.А. Тинякова // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 11. – С. 4-11. doi: 10.30987/2782-5957-2025-11-4-11.

Original article

Open Access Article

JUSTIFICATION OF CHOOSING THE COMPOSITION OF A POLYMER COMPOUND PROTECTOR ON AN ABRASIVE FOR HYDROABRASIVE CUTTING UNDER WATER

Gennady Valeryevich Barsukov¹, Olga Gennadyevna Kozhus^{2✉}, Anton Vladimirovich Petrukhin³, Maksim Gennadyevich Litovchenko⁴, Elizaveta Alekseevna Tinyakova⁵

^{1,2,3,4,5} Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

¹ awj@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0436-4429>

² okozhus@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5942-652X>

³ antosha.petrukhin@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-4798-8224>

⁴ yamaks123@bk.ru

⁵ grtea2017@yandex.ru

Abstract

The results of a theoretical study of energy characteristics of intermolecular interaction of the polymer solution with the abrasive surface are presented to justify the choice of an abrasive compound protector for hydroabrasive cutting under water. The types of interactions of the polymer solution with the abrasive depending on their properties, as well as on the environmental conditions are found. Using the value of the wetting angle between the polymer solution and the abrasive and taking into account the density formulas are obtained to determine energy characteristics defining the adhesion bond of their molecules. An equation of interaction force of molecules located on the surface of the polymer solution with the abrasive surface is obtained according to the known coefficients of surface

tension and the value of the wetting angle. The application of the proposed mathematical dependencies makes it possible to select the type of polymer that will ensure the formation of a uniform coating on the abrasive and its strength. Experimental data are presented which were obtained at certain wetting angles PVAC, PC, CA, and PF polymer solutions on the support surface made of Al₂O₃. The energy condition of molecules at the interface of the two phases and the work of adhesion are calculated. Polymer types for coating the abrasive are defined in the installation with a fluidized bed and some recommendations are made.

Keywords: abrasive, hydroabrasive cutting, compound-protector, shell, coating, wetting, polymer.

Funding: the paper is funded by the government project № 1024112000014-2-1.2.1;2.3.1 (FSGN-2025-0001).

Reference for citing:

Barsukov GV, Kozhus OG, Petrukhin AV, Litovchenko MG, Tinyakova EA. Justification of choosing the composition of a polymer compound protector on an abrasive for hydroabrasive cutting under water. *Transport Engineering*. 2025;11:4-11. doi: 10.30987/2782-5957-2025-11-4-11.

Введение

В процессе выполнения подводно-технических операций резка материалов играет ключевую роль. Осуществление резки под водой представляет собой одну из труднейших задач, обусловленную специфическими условиями, значительно осложняющими данный процесс.

Высокая скорость охлаждения обрабатываемого металла препятствует его равномерному нагреву, а ограниченное пространство для работы и недостаточная видимость снижают эффективность действий оператора.

На сегодняшний день в подводной технике при выполнении различных подводно-технических работ применяются резки различных типов (газовые, лазерные), циркулярные и цепные пилы, перфораторы, сверлильные и фрезерные головки.

Опыт многолетнего применения традиционного оборудования для подводных работ выявил, что эти методы резки под водой нередко оказываются неэффектив-

ными. Причиной тому являются заклинивание режущих инструментов и чрезмерный нагрев обрабатываемой области, что делает невозможным выполнение поставленных задач.

Еще одним фактором, влияющим на эффективность резания под водой, является неопределенность, возникающая при проведении работ. Зачастую заранее неясно, с каким именно типом материала придется иметь дело, какова будет его толщина и какие потенциальные препятствия могут появиться в ходе выполнения задачи.

Поэтому задача разработки новых методов резки, реализуемых в подводных условиях и обладающих универсальностью к обрабатываемому материалу и геометрии реза, является чрезвычайно актуальной.

Для преодоления вышеперечисленных проблем, возможно, применить технологию гидроабразивной резки (ГАР). Она позволяет резать конструкции, изготов-

ленные из разнообразных материалов, а также осуществлять их сложноконтурное резание, например, для подготовки к сварке или созданию отверстий. В основе этого процесса лежит применение специального сопла, формирующего гидроабразивную струю, движущуюся со сверхзвуковой скоростью до 1000 м/с при давлении, достигающем 400 МПа.

На сегодняшний день известны исследования, посвященные применению ГАР в подводных условиях, а также обработке материалов затопленными струями. Например, компания «Chukar Waterjet» (США) является производителем и консультантом по применению подводного гидроабразивного оборудования сверхвысокого давления для выполнения технического обслуживания объектов под водой и выполнении спасательных работ [1].

Однако развитие технологии ГАР для подводной резки требует серьезной научной адаптации из-за специфики использования в затопленном состоянии, а ее практическое применение выдвигает специфические требования к системе подачи воды и абразива, параметрам соплового блока и др. Вода, попадающая в систему подачи абразива, смачивает его, в результате чего абразивная смесь становится вязкой. Такая смесь приводит к закупорке системы подачи абразивной суспензии в сопле и процесс резки останавливается. Использование шлангов высокого давления для подачи воды с поверхности на гидроабразивную режущую головку под водой становится сложной задачей. Шланги высокого давления стоят дорого, они тяжелые, а внутреннее трение абразивной суспензии о стенки шланга приводит к снижению эффективности резки.

В настоящее время при выполнении различных подводно-технических работ и для освоения ресурсов Мирового океана успешно применяются обитаемые и необитаемые подводные аппараты. Это позволяет преодолеть возникшие технические проблемы и открывает новые возможности для оснащения подводного технического средства мобильным оборудованием для гидроабразивного резания под водой. Российскими учеными в МГТУ им. Н.Э. Бау-

мана разработана мобильная гидроабразивная установка для резания под водой, даны практические рекомендации по структуре и условиям ее функционирования, по назначению конструктивных параметров струеформирующего тракта, по выбору технологических параметров реализации процесса подводной гидроабразивной резки [2, 3].

Однако реализовать в полной мере потенциал по использованию мобильных гидроабразивных установок, особенно в подводных условиях, оказалось затруднительно из-за того, что поток абразива под давлением и водной суспензии оказывает сильное эрозионное воздействие на трубопроводы, клапаны и фитинги, фокусирующую трубку сопла, используемые в системе. Их замена и ремонт под водой затруднителен, а в ряде случаев невозможен. Поэтому, актуальными и имеющими важное научное и практическое значение являются исследования, направленные на получение нового эффективного абразивного материала для гидроабразивного резания под водой, позволяющего сохранить конструктивные элементы мобильной установки.

Решить эту проблему можно путем применения абразивных частиц, имеющих полимерное защитное покрытие (компаунд-протектор), что позволяет при гидроабразивной резке значительно увеличить эксплуатационный период компонентов и агрегатов гидроабразивной системы, подвергающихся воздействию гидроабразивного потока в ходе работы [4, 5]

Формирование оболочки путем нанесения покрытия на твердые частицы в настоящее время нашло широкое применение. Данный процесс востребован в фармацевтике, пищевой отрасли, косметологии, а также в производстве удобрений. Этот метод позволяет создавать продукты с улучшенными свойствами и контролируемым высвобождением активных веществ [6].

Для нанесения оболочки на частицы часто используют метод распыления вещества в псевдооживленном слое, в котором, благодаря восходящему потоку воздуха, твердые частицы перемещаются относи-

тельно друг друга. Раствор, предназначенный для формирования покрытия, распыляется непосредственно на псевдооживленные частицы. В процессе обработки капли раствора подсыхают и оседают на поверхности частиц, создавая послойное нарастание покрытия.

Однако распыление раствора полимера в псевдооживленном слое характеризуется сложной динамикой частиц, включающей многочисленные взаимодействия. Наряду с теплообменом и высушиванием происходят непрерывные столкновения между отдельными частицами, что усложняет процесс нанесения покрытия. Эти факторы, в совокупности с прочими процессами, способны вызывать неоднородность наносимого покрытия, формировать дефекты в виде разрывов и провоцировать растрескивание материала.

Это является существенным недостатком использования таких защитных пленок на абразиве для резания под водой. Находясь в водной среде длительное время, защитная оболочка набухает и отслаивается от поверхности абразива из-за диффундирующей в нее через микротрещины и разрывы воды.

Для формирования сплошного и прочного адгезионного слоя полимера на абразиве важно, чтобы наносимый раствор обладал хорошей смачивающей способно-

Основная часть

Уровень смачивания абразива обусловлен значением угла смачивания, образующегося на границе раздела фаз.

Зная плотность раствора полимера и поверхности абразива, находящихся в контакте, измерив угол смачивания между ними, можно установить энергетические параметры, характеризующие адгезионную связь их молекул и обосновать выбор состава полимерной оболочки (компаунд-протектора) на абразиве.

Запишем выражение для определения работы адгезии [7]:

$$w_{12} = \frac{U_{12}}{\pi r_2^2}, \quad (1)$$

стью по отношению к поверхности частицы и быстро испарялся после нанесения.

В зависимости от свойств полимерного раствора и абразива, а также условий окружающей среды возможны следующие варианты взаимодействия:

– силы, действующие между молекулами раствора полимера, характеризуются высокой интенсивностью, обусловленной их взаимным притяжением, а с молекулами абразива связь слабая. В этом случае поверхность абразива плохо смачивается раствором полимера, что будет сопровождаться образованием капель с минимальной площадью контакта.

– силы, действующие между молекулами раствора полимера и поверхностью абразива, взаимодействуют активно, жидкость растекается по поверхности из-за ее хорошей смачиваемости.

Для первого варианта молекулы раствора полимера неспособны установить связь с поверхностью абразива посредством адгезии, а для второго варианта такая связь возможна.

Таким образом, для обеспечения адгезии растворенного полимера к поверхности абразива, на которую оно наносится, требуется, чтобы раствор, используемый для этой цели, обладал способностью смачивать данную поверхность.

где U_{12} – энергия взаимодействия между соприкасающимися молекулами полимерного раствора и поверхности абразива; r_2 – расстояние между молекулами полимерного раствора (рис. 1).

Таким образом, зная энергетические характеристики межмолекулярного взаимодействия полимерного раствора с поверхностью абразива, можно сделать оценку силы сцепления между ними.

Так как на связь между молекулами раствора полимера и поверхности абразива влияют окружающие их вблизи поверхности молекулы, запишем выражение для определения средней энергии взаимодействия в следующем виде:

$$U_{12} = \frac{n_1}{r_1^3} \cdot \int_0^{r_1} dz' \cdot \int_0^{r_2} dx \cdot x \cdot V_{12}(\sqrt{x^2 + (z_0 + z')^2}) + \frac{n_2}{r_2^3} \cdot \int_0^{r_2} dz' \cdot \int_0^{r_1} dx \cdot x \cdot V_{12}(\sqrt{x^2 + (z_0 + z')^2}), \quad (2)$$

где $V_{12}(r)$ – потенциальная энергия, обусловленная взаимным расположением и силами притяжения или отталкивания

между молекулами; z_0 – среднее расстояние между молекулами (рис. 1).

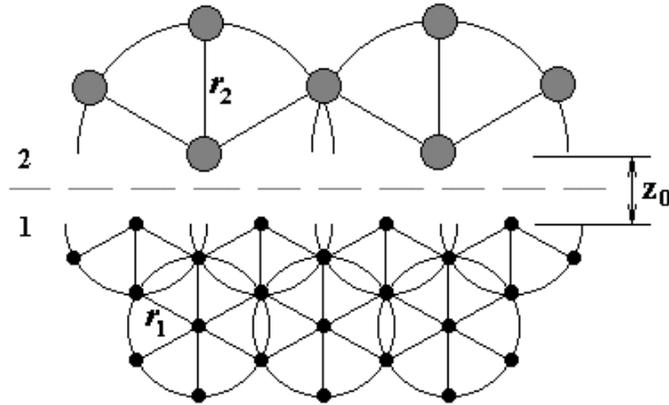


Рис. 1. Схема контакта раствора полимера с поверхностью абразива
Fig. 1. Contact diagram of the polymer solution with the abrasive surface

Упростим анализ глубинного распределения молекул, находящихся в поверхностном слое материала в уравнении (2) приняв, что $r_1 \ll z_0$:

$$U_{12} \approx \frac{n_1}{r_1^2} \cdot \int_0^{\infty} V_{12}(\sqrt{x^2 + z_0^2}) \cdot x \cdot dx. \quad (3)$$

Соотношение между краевым углом смачивания и коэффициентом поверхностного натяжения может быть выражено следующим уравнением:

$$\sigma_{12} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_1\sigma_2 \cos \theta}, \quad (4)$$

где σ_1 , σ_2 – коэффициенты поверхностного натяжения (рис. 2).

Представим уравнение адгезионной работы в следующем виде:

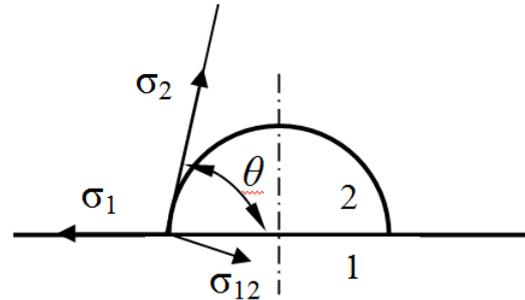


Рис. 2. Определение угла смачивания на границе раздела фаз раствора полимера с поверхностью абразива

Fig. 2. Determination of the wetting angle at the interface of the phases of the polymer solution with the abrasive surface

$$w_{12} = \sigma_1 + \sigma_2 - \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_1\sigma_2 \cos \theta}. \quad (5)$$

Откуда можно сделать оценку силы взаимодействия молекул, расположенных на поверхности взаимодействия раствора полимера с поверхностью абразива по известным коэффициентам поверхностного натяжения и значению краевого угла смачивания.

Запишем выражение для определения среднего межмолекулярного расстояния:

$$r = 3 \sqrt{\frac{\mu}{\rho N_a}}, \quad (6)$$

где N_a – число Авогадро; ρ – плотность вещества; μ – молярная масса вещества.

Тогда запишем уравнение для определения энергии взаимодействия молекул раствора полимера с молекулами абразива в следующем виде:

$$U_{12} = \pi \left(\frac{\mu_2}{\rho_2 N_A} \right)^{2/3} \left(\sigma_1 + \sigma_2 - \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_1\sigma_2 \cos\theta} \right). \quad (7)$$

Энергию взаимодействия, возникающую на границе соприкосновения молекул

$$V_{12} = \pi \left(\frac{\mu_1}{\rho_1 N_A} \right)^{2/3} \left(\sigma_1 + \sigma_2 - \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_1\sigma_2 \cos\theta} \right), \quad (8)$$

раствора полимера с молекулами абразива, представим следующей формулой:

$$V_2 = \frac{q_2}{n_2} \cdot \frac{\mu_2}{N_a}, \quad (13)$$

где n_2 – число прилегающих молекул жидкости, находящихся на линии соприкосновения; r_2 – расстояние между молекулами раствора полимера; q_2 – удельная температура парообразования раствора полимера.

Запишем уравнение (4) в следующем виде:

$$2\sigma_1\sigma_2 \ll \sigma_1^2 + \sigma_2^2:$$

$$\sigma_{12} \approx \sigma_1 + \sigma_2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} (1 + \cos\theta), \quad (9)$$

$$w_{12} \approx \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} (1 + \cos\theta). \quad (10)$$

Если $\sigma_2 \ll \sigma_1$, то:

$$\sigma_{12} \approx \sigma_1 - \sigma_2 \cos\theta, \quad (11)$$

$$w_{12} \approx \sigma_2 (1 + \cos\theta). \quad (12)$$

Представим среднюю энергию, возникающую при взаимодействии пар молекул в области контакта раствора полимера с абразивом, в виде следующего выражения:

Определим коэффициент поверхностного натяжения по следующему уравнению [8]:

$$\sigma_2 \approx \frac{q_2}{2\pi} \left(\frac{\mu_2 \rho_2^2}{N_A} \right)^{1/3}. \quad (14)$$

Откуда можно установить энергетические параметры, характеризующие адгезионную связь молекул раствора полимера и абразива, зная их плотности, определив экспериментально угол смачивания между ними и удельную температуру парообразования по следующим зависимостям:

$$w_{12} \approx \frac{q_2}{2\pi} \left(\frac{\mu_2 \rho_2^2}{N_A} \right)^{1/3} (1 + \cos\theta), \quad (15)$$

$$U_{12} = \frac{q_2 \mu_2}{2N_A} (1 + \cos\theta), \quad (16)$$

$$V_{12} = \frac{q_2}{2N_A} \left(\mu_1^2 \mu_2 \frac{\rho_2^2}{\rho_1^2} \right)^{1/3} (1 + \cos\theta). \quad (17)$$

Измерив, краевой угол смачивания различных растворов полимеров на пластине из Al_2O_3 , по выражениям (15) и (16) проведены расчеты энергетического

состояния молекул на границе раздела двух фаз U_{12} и работы адгезии w_{12} (таблица).

Таблица

Расчетные данные об энергетическом состоянии молекул на границе раздела двух фаз раствора полимера и абразива

Table

Calculated data on the energy state of molecules at the interface of two phases of a polymer solution and an abrasive

Раствор полимера		Краевой угол θ , град.	Значения характеристик адгезионной связи	
Полимер	Растворитель		U_{12} , Дж/м ²	w_{12} , Дж/м ²
PVAC	C ₂ H ₆ O	34	2,2	3,8
PC	C ₂ H ₅ —CH ₃	86	0,12	0,29
CA	CH ₃ —CO—CH ₃	59	1,1	3,1
PF	C ₂ H ₆ O – 60%	70	0,31	0,63

Заключение

Зная энергетические характеристики межмолекулярного взаимодействия полимерного раствора с поверхностью абразива, сделана оценка силы сцепления между

ними. Установлено, что силы, действующие между молекулами растворов полимеров PC и PF, характеризуются высокой интенсивностью, а с молекулами поверх-

ности абразива связь слабая. Их нанесение будет сопровождаться образованием капель и приведет к дефектам полимерной оболочки на абразивном зерне. Наилучший результат показал полимер PVAC. Однако, данный материал характеризуется восприимчивостью к увеличению объема (набуханию) при контакте с влагой. Это существенный недостаток, так как есть определенные ограничения на условия длитель-

ного хранения рабочей смеси абразива с жидкостью, в которую входят абразивные зерна с покрытием для гидроабразивного резания под водой. Поэтому для применения гидрофобных полимерных материалов рекомендуется предварительно химически обработать поверхность абразива для увеличения прочности сцепления разнородных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Maslin E. Subsea waterjet cutting goes ultra-deep and ultra-high pressure. *Offshore Engineer*. 2013. URL: <https://www.oedigital.com/news/457402-subsea-waterjet-cutting-goes-ultra-deep-and-ultra-high-pressure> (accessed 12 September 2025).
2. Mugla D.R., Galinovskiy A.L., Kobernik N.V. Selection of Rational Technological Modes and Parameters of Underwater Waterjet Cutting. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. pp. 267-276. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_29.
3. Илюхина А. А., Колпаков В. И., Вельтишев В. В. Обоснование конструктивных параметров составного струеформирующего сопла для мобильных установок подводной гидроабразивной резки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2021. № 4 (733). С. 30-39. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-4-30-39.
4. Barsukov G.V., Kozhus O.G., Shorkin V.S., Stepanov Y.S. Obtaining the dependences of the

- contact of the composite abrasive material with the nozzle walls, which reduces the wear of the focusing tube of the waterjet installation // *Materials Science Forum*. – Trans Tech Publications Ltd. 2021, T. 1031. P. 160–165.
5. Barsukov G.V., Kozhus O.G., Danilchenko S.G., Petrukhin A.V., Titov D.I., Selemenev K.F. Analysis of the properties of the fluidized bed during the formation of the abrasive-polymer compound for waterjet cutting. *Key Engineering Materials*. 2022. T. 910 KEM. P. 144-149.
6. Барсуков Г.В., Кожус О.Г., Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю. Особенности нанесения полимера на поверхность абразивного зерна для повышения эффективности гидроабразивного резания // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: научно-технический журнал*. – Орел: Изд-во ОГУ им. И.С. Тургенева. 2021. №3 (346). С. 86-92.
7. Зимон А. Д. Адгезия пленок и покрытий – М.: Химия. 1977. с. 352.
8. Gutkin M.Y. Misfit stress relaxation in composite nanoparticles // *International Journal of Engineering Science*. 2012. Vol. 61, Special Issue. pp. 59-74.

REFERENCES

1. Maslin E. Subsea waterjet cutting goes ultra-deep and ultra-high pressure. *Offshore Engineer* [Internet]. 2013 [cited 2025 Sep 12];38: 82-84. Available from: <https://www.oedigital.com/news/457402-subsea-waterjet-cutting-goes-ultra-deep-and-ultra-high-pressure>.
2. Mugla DR, Galinovskiy AL, Kobernik NV. Selection of Rational Technological Modes and Parameters of Underwater Waterjet Cutting. In: Radionov A, Kravchenko O, Guzeev V, Rozhdestvenskiy Y, editors. *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering* [Internet]; 2018; Springer: Lecture Notes in Mechanical Engineering: 267-276. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_29.
3. Ilyukhina AA, Kolpakov VI, Veltishchev VV. Engineered estimate of the design parameters of a built-up jet-forming nozzle for mobile underwater

- waterjet cutting systems. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering* 2021;4(733):30-39. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-4-30-39.
4. Barsukov GV, Kozhus OG, Shorkin VS, Stepanov YS. Obtaining the dependences of the contact of the composite abrasive material with the nozzle walls, which reduces the wear of the focusing tube of the waterjet installation. *Materials Science Forum*. – Trans Tech Publications Ltd. 2021;1031: 160–165.
5. Barsukov GV, Kozhus OG, Danilchenko SG, Petrukhin AV, Titov DI, Selemenev KF. Analysis of the properties of the fluidized bed during the formation of the abrasive-polymer compound for waterjet cutting. *Key Engineering Materials*. 2022;910 KEM:144-149.
6. Barsukov GV, Kozhus OG, Shorkin VS, Frolenkova LYu. Features of polymer deposition on the surface of abrasive grains to increase the efficiency of waterjet cutting. *Fundamental and*

Applied Problems of Technics and Technology. 2021;3(346):86-92.

7. Zimon AD. Adhesion of films and coatings. Moscow: Khimiya. 1977.

8. Gutkin MY. Misfit stress relaxation in composite nanoparticles. International Journal of Engineering Science. 2012;61:59-74.

Информация об авторах:

Барсуков Геннадий Валерьевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Передовые производственные технологии», Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, тел. +79103088240.

Кожус Ольга Геннадьевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Передовые производственные технологии», Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, тел. +79102668598.

Петрухин Антон Владимирович – стажер-исследователь научно-исследовательской лабора-

тории «Передовые производственные технологии», Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, тел. +79208166698.

Литовченко Максим Геннадьевич – стажер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Передовые производственные технологии», Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, тел. +79536198453.

Тинякова Елизавета Алексеевна – лаборант научно-исследовательской лаборатории «Передовые производственные технологии», Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, тел. +79035538488.

Barsukov Gennady Valeryevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher at the Advanced Production Technologies Research Laboratory, Orel State University named after I.S. Turgenyev, phone: +79103088240.

Kozhus Olga Gennadyevna – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Advanced Production Technologies Research Laboratory, Orel State University named after I.S. Turgenyev, phone: +79102668598.

Petrukhin Anton Vladimirovich – Research Trainee at the Advanced Production Technologies Research

Laboratory, Orel State University named after I.S. Turgenyev, phone: +79208166698.

Litovchenko Maksim Gennadyevich – Research Trainee at the Advanced Production Technologies Research Laboratory, Orel State University named after I.S. Turgenyev, phone: +79536198453.

Tinyakova Elizaveta Alekseevna – Laboratory Assistant at the Advanced Production Technologies Research Laboratory, Orel State University named after I.S. Turgenyev, phone: +79035538488.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 08.10.2025; одобрена после рецензирования 09.10.2025; принята к публикации 27.10.2025. Рецензент – Нагоркин М.Н., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 08.10.2025; approved after review on 09.10.2025; accepted for publication on 27.10.2025. The reviewer is Nagorkin M.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.