

УДК 621.921

Оценка времени насыщения жидкостью абразива с полимерным компаунд-протектором для гидроабразивного резания под водой при нарушении однородности покрытия*

Г.В. Барсуков¹, А.Л. Галиновский², В.С. Шоркин¹,
О.Г. Кожус¹, С.Н. Ромашин¹

¹ ОГУ им. И.С. Тургенева

² МГТУ им. Н.Э. Баумана

Evaluation of the saturation time of a liquid abrasive with a polymer protective compound for underwater waterjet cutting in the event of a coating barrier failure

G.V. Barsukov¹, A.L. Galinovsky², V.S. Shorkin¹,
O.G. Kozhus¹, S.N. Romashin¹

¹ Orel State University named after I.S. Turgenev

² Bauman Moscow State Technical University

Гидроабразивное резание предназначено для выполнения подводно-технических работ в рамках решения специальных задач. Но износ струеформирующего сопла снижает эффективность резания и требует замены в тяжелых условиях. В целях увеличения срока службы деталей установки для гидроабразивного резания предложено использовать абразивные зерна, покрытые полимерной защитной пленкой (компаунд-протектором). Однако у такой защитной пленки имеется недостаток — находясь в водной среде длительное время, она набухает из-за диффундирующей в нее воды. Набухание происходит вследствие диффузии молекул воды в покрытие и заполнения ими имеющихся в нем микротрещин. Предложена математическая модель, позволяющая рассчитывать суммарный относительный объем микротрещин в покрытии и время его заполнения диффундирующими молекулами воды. Приведен пример расчета этих характеристик с помощью предложенной модели.

EDN: DSTXJY, <https://elibrary/dstxjy>

Ключевые слова: гидроабразивное резание, износ сопла, полимерный компаунд-протектор, абразивные зерна, полимерное покрытие, время насыщения

Waterjet cutting technology is used for underwater engineering work to solve specific problems. However, wear of the jet-forming nozzle reduces cutting efficiency and requires replacement under severe conditions. The authors of this article propose using abrasive grains coated with a polymer protective film (compound protector) in waterjet cutting, which will significantly increase the service life of waterjet cutting components. However, there is a drawback to using such protective films: when exposed to water for extended periods, the protective coating of the abrasive grain swells due to water diffusing into it. This swelling occurs due to the diffusion of water molecules into the coating and their filling of existing

* Работа выполнена в рамках государственного задания (проект № 1024112000014-2-1.2.1;2.3.1 (FSGN-2025-0001)).

microcracks. This article presents a mathematical model for calculating the total relative volume of microcracks in the coating and the time it takes for diffusing water molecules to fill it. The use of the model is illustrated by an example calculation of these characteristics.

EDN: DSTXJY, <https://elibrary/dstxjy>

Keywords: waterjet cutting, nozzle wear, polymer protective compound, abrasive grains, polymer coating, saturation time

Гидроабразивное резание (ГАР) представляет собой эффективный метод выполнения подводных операций. ГАР позволяет разрезать на части затонувшую технику и оборудование для их дальнейшего подъема, обслуживать под водой объекты, представляющие техногенную опасность, а также добывать редкоземельные ресурсы [1, 2].

Однако износ струеформирующего сопла при подводном ГАР снижает эффективность резания и требует замены, которая предполагает подъем всего оборудования и последующую точную установку для возобновления ГАР [3].

В связи с этим разработка инновационного абразивного материала с полимерным защитным покрытием — полимерным компаунд-протектором (ПКП) для подводного ГАР является актуальной задачей. Открывается перспектива формирования особых условий для ГАР под водой. С одной стороны, можно защитить фокусирующую трубку от износа, используя полимерное покрытие [4], а с другой — существенно увеличить эффективность резания гидроабразивной струей, применяя абразивы повышенной твердости.

Постановка проблемы. Основным способом формирования полимерного покрытия на частицах абразива является инкапсуляция в псевдооживленном слое. Он заключается в нанесении распыленного полимерного жидкого состава на абразив с последующим удалением влаги, для чего абразивные частицы постоянно движутся в потоке нагретого воздуха. Вертикальный подъем частиц внутри установки начинается при их попадании в воздушный поток, который поступает через отверстия, расположенные в ее нижней части. В процессе распыления микрокапли полимера оседают и подсыхают на поверхности абразива, формируя многослойную структуру. Этот процесс происходит при поддержании оптимального состояния псевдооживления и контролируемой сушки [5].

Однако существует недостаток таких защитных полимерных пленок — наличие опреде-

ленных ограничений на условия длительного хранения рабочей смеси, в состав которой входят абразивные зерна с покрытиями. Готовая абразивная суспензия не может находиться долго в воде, хотя в ряде случаев это оказывается необходимым. Находясь в водной среде продолжительное время, защитная оболочка абразивного зерна набухает из-за диффундирующей в нее воды. Все это приводит к разрушению ПКП под действием внешних механических воздействий, существенно меньших, чем было запланировано и рассчитано для хранения в сухих условиях [6].

Изучение процессов растворения и набухания полимерных материалов в воде показало, что после сушки водонерастворимых полимеров, например полистирола в сушильном шкафу при температуре $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$ в течение одного часа [7], его масса не изменилась, что указывает на его нерастворимость в воде.

Поэтому насыщение жидкостью абразива с ПКП происходит в основном путем накопления молекул воды в порах, пустотах и микротрещинах покрытия, попадающих туда в процессе диффузии из окружающей частицу среды сквозь толщу оболочки.

Цель работы — с помощью математического моделирования рассчитать продолжительность процесса заполнения микродефектов полимерного покрытия на абразивной частице молекулами воды, проникающими в структуру материала.

Характеристики полимерной оболочки, а именно ее морфология и наличие пор на поверхности абразивной частицы, определяются режимными условиями процесса нанесения покрытия. При низкой температуре сушки капли полимера высыхают медленно и скапливаются на поверхности абразива, а затем кристаллизуются, образуя дискретные участки. При высокой температуре структура покрытия заметно ухудшается, что связано с увеличением количества высушенных капель полимера, выпадающих в виде порошка. Качество и равномерность пленочного покрытия на абразиве

зависят не только от температуры сушки, но и от характеристик распыления полимера — скорости и вязкости [8].

Таким образом, реальная поверхность абразива с ПКП всегда будет содержать большое количество пор и микротрещин, причем их суммарный объем меньше, чем в сплошной части покрытия. Продолжительность абсорбции жидкости полимерным покрытием на абразивных частицах зависит от размера микроскопических трещин и пор. Следовательно, важно построить модели, позволяющие рассчитывать относительный объем микротрещин, имеющих в материале покрытия (его поврежденность), и период времени, за который в процессе хранения абразива для ГАР под водой с полимерной защитной оболочкой насыщается жидкостью, учитывая потенциальную неоднородность покрытия.

Моделирование неоднородности полимерного покрытия на абразиве. Будем учитывать, что абразивное зерно и материал его покрытия не являются сплошными из-за наличия сети микротрещин и пор, которые с течением времени заполняются молекулами воды, диффундирующими туда сквозь сплошные участки. Материалу энергетически выгоднее иметь нарушения сплошности, чем не иметь их, даже при отсутствии внешних воздействий. Предполагаем, что нагрузка, которую вызывает дефектность, является внутренней, порожденной притяжением находящихся на большом расстоянии друг от друга атомов и молекул материала (описывается потенциалами Лекнарда — Джонса, Морзе и т. д. [9]) без внешнего воздействия на абразивную частицу.

С учетом этого построена нелокальная модель сплошного материала, частицы которого взаимодействуют аналогичным образом [10]. Так как потенциалы межатомных и межмолекулярных сил известны, можно рассчитать материальные параметры потенциалов, используемых этой моделью, а значит, и внутренних сил, которые приводят к появлению микротрещин.

Согласно классической теории упругости, не учитывающей нелокальные силы, в окрестностях вершин трещин при незначительных изменениях внешних воздействий энергия упругих деформаций стремится к бесконечности, что не дает возможности количественно оценить рост трещин из-за энергетических из-

менений [11]. Нелокальная модель сплошного материала позволяет исключить этот недостаток в описании трещин, так как использует их описание Г.И. Баренблаттом [12], которое учитывает взаимодействие берегов трещин с помощью нелокальных сил. При этом принято, что берега трещины плавно смыкаются на ее контуре.

Рассмотрим абразивную частицу с ПКП — тело B , размеры которого намного выше, чем у содержащихся в нем трещин, вследствие чего его можно считать бесконечно большим. Размеры микротрещин считаем известными (метод их определения описан в работе [13]). Сеть микротрещин (см. рисунок) в теле B характеризует непрерывная и дифференцируемая скалярная функция $\omega(\mathbf{R})$, описывающая его поврежденность (функция поврежденности).

Пусть ΔB — представительная (репрезентативная) частица дискретно-непрерывной среды B , занимающая область $\Delta\Lambda$ с объемом ΔV и центром инерции в точке $\mathbf{R}$, в которой находится и центр микротрещины. Тогда значение $\omega(\mathbf{R})$ определяется в этой точке.

Каждая представительная частица (см. рисунок) содержит внутри себя единственную трещину $\mathcal{Z}$, ее поверхностный слой ΔB_A , где сосредоточена поверхностная энергия берегов трещины, и не возмущенную наличием трещины часть ΔB_θ .

Эти объекты занимают соответственно области $\Delta\Lambda_{\mathcal{Z}}$, $\Delta\Lambda_A$ и $\Delta\Lambda_B$ с объемами $\Delta V_{\mathcal{Z}}$,

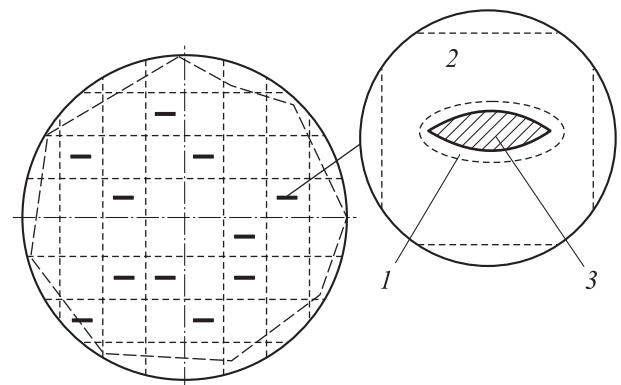


Схема деления абразива с ПКП на репрезентативные частицы ΔB (выделены штриховой линией):

- 1 — область $\Delta\Lambda_A$ (площадь боковой поверхности S_A), занятая поверхностным слоем трещины ΔB_A , в котором напряженно-деформированное состояние возмущено трещиной (имеет толщину h_{eff} области $\Lambda_{\mathcal{Z}}$);
- 2 — область $\Delta\Lambda_\theta$, занятая той частью ΔB_θ материала частицы ΔB , которая не возмущена наличием в ней трещины;
- 3 — область $\Lambda_{\mathcal{Z}}$, занятая трещиной (материал в ней отсутствует)

ΔV_A и ΔV_B так, что выполняются следующие соотношения:

$$\Delta \Lambda = \Delta \Lambda_{\Sigma} \cup \Delta \Lambda_A \cup \Delta \Lambda_{\vartheta};$$

$$\Delta B_{\omega} = \Delta B_{\vartheta} \cup \Delta B_A; \quad \Delta V = \Delta V_{\Sigma} + \Delta V_A + \Delta V_{\vartheta}.$$

Предполагаем, что объем материала поверхностного слоя ΔV_A намного меньше объема трещины ΔV_{Σ} (поверхностный слой трещин очень тонкий):

$$\frac{\Delta V_A}{\Delta V_{\Sigma}} \ll 1.$$

Поврежденностью представительной частицы ΔB будем считать отношение

$$\omega = \frac{\Delta V_{\Sigma}}{\Delta V}, \quad (1)$$

а ее целостностью

$$\vartheta = \frac{\Delta V_{\vartheta} + \Delta V_A}{\Delta V}.$$

Введенные величины обладают очевидным свойством:

$$\omega + \vartheta = 1.$$

Потенциальная энергия ΔW частицы ΔB после образования в ней трещины в стационарном состоянии складывается из энергии ΔW_{ϑ} невозбужденной части ΔB_{ϑ} и энергии $W_s S_A$ (W_s — поверхностная энергия) возбужденных появлением свободной границы берегов трещины площадью поверхности S_A (или длиной L_A — для плоской трещины):

$$\Delta W = w_{\vartheta} \Delta V_{\vartheta} + W_s S_A. \quad (2)$$

В основу расчета величин $w_{\vartheta} \equiv w_0$ и W_s положена модель упругой среды, описанная в работах [13, 14], откуда получаем следующие выражения:

- для объемной плотности потенциальной энергии

$$w = \int_{\Lambda} \Phi^{(2)} dV_2 + \int_{\Lambda} dV_2 \int_{\Lambda} \Phi^{(3)} dV_3; \quad (3)$$

- для поверхностной энергии

$$W_s = h_{eff} w(0),$$

где $\Phi^{(2)}$, $\Phi^{(3)}$ — коэффициенты пропорциональности, зависящие от расстояний между взаимодействующими частицами; dV_2 , dV_3 — объемы взаимодействующих частиц; h_{eff} — эффективная толщина материала покрытия с

постоянными, но отличными от объемных значений свойствами.

Слагаемое $W_s S_A$ в выражении (2) характеризует энергию частицы ΔB^* . Занимаемая ею область является объединением областей, занятых трещиной и поверхностным слоем. Ее объем $\Delta V^* = \Delta V_{\Sigma} + \Delta V_A$, а внутренность занята трещиной, т. е. пуста, вся масса распределена по поверхностному слою. Вместо этой частицы будем рассматривать ту же частицу, но с равномерно распределенной по области $\Delta \Lambda_{\Sigma} \cup \Delta \Lambda_A = \Delta \Lambda^*$ с объемом $\Delta V_{\Sigma} + \Delta V_A = \Delta V^*$ объемной плотностью энергии w^* так, что выполняется соотношение

$$(\Delta W^* = W_s S_A \equiv w^* \Delta V^* \approx w^* \Delta V_{\Sigma}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta W = \Delta W_{\vartheta} + \Delta W_{\omega} \approx w_{\vartheta} \Delta V_{\vartheta} + w_{\omega} \Delta V_{\Sigma}.$$

Тогда можно записать

$$w = \omega w_{\omega} + \vartheta w_{\vartheta} = \omega w_{\omega} + (1 - \omega) w_{\vartheta}. \quad (4)$$

В выражении (4) величины w_{ω} и w_{ϑ} зависят от поврежденности ω . Найдем эти зависимости.

Плотность $w_{\vartheta} \equiv w_0$ определяется выражением (3) при условии, что деформаций в материале нет.

Делая замену $\Delta V_{\vartheta} = \vartheta \Delta V$, получаем связь w_{ϑ} с парным и тройным потенциалами, которую необходимо использовать при определении связи средней по области $\Delta \Lambda$ плотности потенциальной энергии с помощью следующих выражений:

$$dW^{(2)} = \Phi^{(2)} dV dV_2;$$

$$dW^{(2)} = \Phi^{(2)} dV dV_2 dV_3;$$

$$\Phi^{(2)} = \Phi_0^{(2)} \varphi^{(2)}(\beta L_{12});$$

$$\Phi^{(3)} = \Phi_0^{(3)} \varphi^{(2)}(\beta L_{12}) \varphi^{(2)}(\beta L_{13}),$$

где $\Phi_0^{(2)}$, $\Phi_0^{(3)}$ и β — материальные параметры, значения которых определяются через параметры Ламе; L_{12} , L_{13} — расстояния между парно взаимодействующими частицами (1, 2) или между группой из трех частиц (1, 2, 3).

При вычислении интегралов область интегрирования необходимо считать бесконечно протяженной ($\Lambda_{\vartheta} \rightarrow \infty$), чтобы учесть, что в область Λ_{ϑ} попадают все материальные частицы ΔB среды, которые образовывали бесконечно большое тело B .

Связь w_{ϑ} с парным и тройным потенциалами приобретает следующий вид:

$$w_{\vartheta} = \vartheta \int_{-\infty}^{\infty} \Phi^{(2)} d(\Delta V) + \vartheta^2 \int_{-\infty}^{\infty} d(\Delta V) \int_{-\infty}^{\infty} \Phi^{(3)} d(\Delta V) = \\ = \vartheta D^{(2)} + \vartheta^2 D^{(3)},$$

где $D^{(2)}$ и $D^{(3)}$ — потенциальная энергия парных и тройных взаимодействий частиц dB , расположенных в единице объема тела B со всеми другими его частицами,

$$D^{(2)} = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi^{(2)} d(\Delta V);$$

$$D^{(3)} = \int_{-\infty}^{\infty} d(\Delta V) \int_{-\infty}^{\infty} \Phi^{(3)} d(\Delta V).$$

Плотность распределения

$$w_{\omega} = W_s \frac{S_A}{\Delta V},$$

где

$$W_s S_A = \int_{\Delta \Lambda^*} [w_{\infty} - \Delta w] d(\Delta V^*).$$

Здесь интегрируемая функция является кусочно-непрерывной. Внутри области $\Delta \Lambda_3$ она равна нулю, на границе областей $\Delta \Lambda_A$ и $\Delta \Lambda_3$ она скачком изменяется от нуля до половины объемной плотности w_{∞} потенциальной энергии в невозмущенной части тела B , а затем уменьшается, стремясь к нулю.

Делая замену $d(\Delta V^*) = \omega d(\Delta V)$, получаем учитывающее примерное равенство $\Delta V^* \approx \Delta V_3$ окончательное выражение для плотности распределения

$$w_{\omega} = \frac{\omega}{\Delta V_3} \int_{\Delta \Lambda^*} [w_{\infty} - \Delta w] d(\Delta V) = D_3 \omega.$$

Конкретный вид зависимости Δw от расстояния h до границы пограничного слоя строится на основании работы [15].

Тогда выражение (4) можно представить как

$$w = \omega w_{\omega} + (1 - \omega) w_{\vartheta} = \\ = \omega^2 D_3 + (1 - \omega)^2 D^{(2)} + (1 - \omega)^3 D^{(3)}. \quad (5)$$

Для тех материалов, у которых влияние тройных взаимодействий их частиц на внутреннюю потенциальную энергию меньше, чем влияние на нее парных взаимодействий, последним слагаемым в выражении (5) можно пренебречь. Тогда эта зависимость получает вид имеющей минимум параболы. Поврежденность в точке минимума определяется как

$$\omega = \omega_{\min} = \frac{1}{1 + (D_3 / D^{(2)})}. \quad (6)$$

Значение поврежденности, вычисленное по формуле (6), должно удовлетворять условию $0 < \omega_{\min} < 1$.

Метод определения времени насыщения. При заполнении трещин на полимерной оболочке абразива молекулами воды они должны пройти через слой материала оболочки между свободной поверхностью и трещиной толщиной h за время T .

Молекулы воды поступают в трещину без какого-либо влияния на процесс вхождения пограничного слоя ее берега (этим влиянием пренебрегаем). После этого молекулы остаются в объеме трещины и не покидают его до тех пор, пока полностью не заполнят. Прилежащие к берегу трещины молекулы-диполи из-за его лиофильности прилипают к нему, создавая двойной электрический слой, отрицательные заряды которого расположены со стороны пространства трещины. Процесс налипания не препятствует продолжению диффузии других молекул внутрь трещины до ее полного заполнения. После этого начинается движение (диффузия) молекул, пришедших через слой воды в трещину в окружающую среду. Допускается, что молекулы, налипшие на стенки трещины, не препятствуют приходу и уходу, так как совершают движение вдоль стенок.

Одномерный диффузионный поток через единицу площади сечения тела, перпендикулярного скорости их движения, вычисляем по формуле

$$J = -D \frac{\partial n}{\partial x} = -D n_0 \frac{\partial}{\partial x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) = \\ = -D n_0 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\xi}^{\infty} e^{-\vartheta^2} d\vartheta \right) = -\frac{2D n_0}{\sqrt{\pi}} \frac{\partial \xi}{\partial x} (-e^{-\xi^2}) = \\ = \frac{2D n_0}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{2\sqrt{Dt}} e^{-\left(\frac{x^2}{4Dt}\right)} = n_0 \sqrt{\frac{D}{\pi}} \frac{1}{\sqrt{t}} e^{-\left(\frac{x^2}{4Dt}\right)},$$

где D — коэффициент диффузии молекул воды в ПКП; n — текущее количество молекул воды в единице объема; n_0 — концентрация диффундирующих молекул воды; ξ — функция ошибок Гаусса,

$$\operatorname{erfc} \xi = \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right).$$

Количество молекул, проходящих через эту площадь за произвольное время t , находим по выражению

$$\aleph(t) = \int_0^t J(t) dt.$$

Следовательно, необходимое для насыщения покрытия количество молекул пройдет расстояние h за время T , что определяется соотношением

$$\aleph(T) = n_0 \sqrt{\frac{D}{\pi}} \int_0^T \frac{1}{\sqrt{t}} e^{-\left(\frac{h^2}{4Dt}\right)} dt = n_0 \sqrt{\frac{D}{\pi}} I(T).$$

Здесь

$$\int_0^T \frac{1}{\sqrt{t}} e^{-\left(\frac{h^2}{4Dt}\right)} dt = I(T) = \int_0^T \frac{1}{\sqrt{t}} e^{-\left(\frac{\alpha^2}{t}\right)} dt,$$

где

$$\alpha = \frac{h}{2\sqrt{D}}.$$

При $x = h$ делаем следующие преобразования для вычисления интеграла:

$$\aleph(T) = n_0 \sqrt{\frac{D}{\pi}} \int_0^T \frac{1}{\sqrt{t}} e^{-\left(\frac{h^2}{4Dt}\right)} dt = n_0 \sqrt{\frac{D}{\pi}} I(T);$$

$$I(T) = \int_0^T \frac{1}{\sqrt{t}} e^{-\left(\frac{\alpha^2}{t}\right)} dt.$$

Только часть из них $\aleph_\omega(T)$ будет заполнять объем микротрещин. Остальные при диффузии проходят мимо микротрещин.

Для вычисления количества молекул воды, заполняющих микротрещины, учтем, что в соответствии с определением (1) поврежденность ω равна суммарному объему микротрещин, расположенных в единице объема материала покрытия. Значит, время T можно рассматривать как время заполнения объема микротрещин, находящихся в цилиндрическом столбике материала с единичной площадью сечения и высотой h , равной толщине покрытия. Поврежденность единичной площади будем считать равной $\omega^{2/3}$ так, что справедливо соотношение

$$\aleph_\omega(T) = \omega^{2/3} \aleph(T). \quad (7)$$

Предполагая, что молекулы воды полностью заполняют микротрещины, их число $\aleph_\omega(T)$ можно определить как по формуле (7), так и, подставив в него выражения, определяющие правую и левую части, с учетом соотношения

$$\aleph_\omega(T) = n_0 h \omega.$$

После преобразований получаем уравнение, позволяющее оценивать время насыщения T :

$$h \omega^{1/3} \sqrt{\frac{\pi}{D}} = \int_0^T \frac{1}{\sqrt{t}} e^{-\left(\frac{\alpha^2}{t}\right)} dt = 2 \int_0^T e^{-\left(\frac{h}{2\sqrt{Dt}}\right)^2} d(\sqrt{t}).$$

Решение этого уравнения необходимо проводить численно.

Отметим, что время насыщения T , вычисленное с помощью этого уравнения, надо рассматривать как оценочное ввиду того, что оно построено без учета влияния на коэффициент диффузии микротрещин, заполненных водой. Не учтено также напряженное состояние покрытия, создавшееся при его нанесении на абразивное зерно и возникновении адгезии с ним. Это состояние может вызвать большее значение поврежденности покрытия.

Пример расчета времени насыщения. Оценим время насыщения жидкостью абразива с ПКП для ГАР под водой при нарушении однородности покрытия. Частица абразива в полимерной оболочке находится в воде.

По зависимости (6) определяем поврежденность полимерной оболочки

$$\omega_{\min} \approx 10^{-4} = 0,01 \, \%.$$

С учетом кинематического коэффициента диффузии молекул воды в полиэтилене $D_{\text{п}} = 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ время насыщения полимерной оболочки на абразиве из полиэтилена при $x = h = 10^{-3} \text{ м}$ составило примерно одни сутки. Полученный результат качественно соответствует наблюдаемому в естественных условиях эксплуатации абразива с ПКП для ГАР под водой.

Выводы

1. Несмотря на эффективность инновационного абразивного материала с ПКП для подводного ГАР, его можно применять только в период времени, когда он сохраняет эксплуатационную пригодность, которая возможна при сохранении прочностных характеристик покрытия. Эти характеристики ухудшаются по мере его насыщения водой. Увеличить период эксплуатационной пригодности можно подбором материала покрытия. При заданной адгезионной прочности его соединения с защищаемым абразивным зерном покрытие должно обладать минимальными коэффициентом

диффузии в нем воды и естественной поврежденностью сплошности, связанной с его физической природой. Предложенная математическая модель позволяет сделать это теоретически, минуя длительные и дорогостоящие эксперименты.

2. Насыщение трещин водой еще не означает разрушения покрытия. Известно [16], что мо-

лекулы воды, попавшие в микротрещины, могут начать образовывать льдоподобную структуру, включающую в себя вновь поступающие молекулы. При этом в трещине возникает расклинивающее давление, под влиянием которого она теряет устойчивость формы и начинает расти. Процесс происходит до разрушения ПКП на абразиве.

Литература

- [1] Илюхина А.А., Колпаков В.И., Вельтищев В.В. Обоснование конструктивных параметров составного струеформирующего сопла для мобильных установок подводной гидроабразивной резки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 4, с. 30–39, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-4-30-39>
- [2] Shang G., Liu S., Jia J. et al. Experiment on underwater rock breaking by abrasive slurry jet and pick. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, vol. 52, no. 9, pp. 3064–3075, doi: <https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2021.09.008>
- [3] Mugla D.R., Galinovskiy A.L., Kobernik N.V. Selection of rational technological modes and parameters of underwater waterjet cutting. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering*. Springer, 2019, pp. 267–276, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_29
- [4] Кожус О.Г., Барсуков Г.В., Прасолов Е.А. и др. Создание абразива с полимерной оболочкой, обеспечивающего повышение эффективности гидроабразивного резания. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2021, № 6, с. 38–44, doi: <https://doi.org/10.33979/2073-7408-2021-350-6-38-44>
- [5] Zhang R., Hoffmann T., Tsotsas E. Novel technique for coating of fine particles using fluidized bed and aerosol atomizer. *Processes*, 2020, vol. 8, no. 12, art. 1525, doi: <https://doi.org/10.3390/pr8121525>
- [6] Барсуков Г.В., Галиновский А.Л., Кожус О.Г. и др. Теоретические исследования адгезии полимерного компаунд-протектора на поверхности абразивного зерна для гидроабразивного резания в водной среде. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 11, с. 49–58. EDN: RZNIFT
- [7] ГОСТ 20282–86. Полистирол общего назначения. Технические условия. Москва, Изд-во стандартов, 1986. 35 с.
- [8] Wang C., Liu D., Ma J. et al. Characterization of coating shells in a Wurster fluidized bed under different drying conditions and solution viscosities. *Powder Technol.*, 2022, vol. 411, art. 117914, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117914>
- [9] Каплан И.Г. *Межмолекулярные взаимодействия*. Москва, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2023. 397 с.
- [10] Volegov P.S., Gribov D.S., Trusov P.V. Damage and fracture: classical continuum theories. *Phys. Mesomech.*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 157–173, doi: <https://doi.org/10.1134/S1029959917020060>
- [11] Raiser Yu.P., Gribov D.S., Trusov P.V. Physical principles of the theory of brittle fracture cracks. *Sov. Phys. Usp.*, 1970, vol. 13, no. 1, pp. 129–139, doi: <https://doi.org/10.1070/PU1970v013n01ABEH004201>
- [12] Баренблатт Г.И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении. *Прикладная механика и техническая физика*, 1961, т. 2, № 4, с. 3–56.
- [13] Шоркин В.С., Вильчевская Е.Н., Ромашин С.Н. и др. Метод определения повреждений в упругом материале. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2022, № 6, с. 3–13.
- [14] Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Ромашин С.Н. и др. Оценка поврежденности напряженного упругого материала. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2025, № 3, с. 12–21.

- [15] Барсуков Г.В., Шоркин В.С., Власов В.В. и др. Исследование начальной поврежденности абразива из медного шлака для повышения производительности гидроабразивного резания. *Транспортное машиностроение*, 2025, № 12, с. 39–47, doi: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2025-12-39-47>
- [16] Захаров С.Д., Мосягина И.В. Кластерная структура воды: обзор. *Препринт ФИАН*, 2011. 24 с.

References

- [1] Ilyukhina A.A., Kolpakov V.I., Veltishchev V.V. Engineered estimate of the design parameters of a built-up jet-forming nozzle for mobile underwater waterjet cutting systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 4, pp. 30–39, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-4-30-39> (in Russ.).
- [2] Shang G., Liu S., Jia J. et al. Experiment on underwater rock breaking by abrasive slurry jet and pick. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, vol. 52, no. 9, pp. 3064–3075, doi: <https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2021.09.008>
- [3] Mugla D.R., Galinovskiy A.L., Kobernik N.V. Selection of rational technological modes and parameters of underwater waterjet cutting. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering*. Springer, 2019, pp. 267–276, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_29
- [4] Kozhus O.G., Barsukov G.V., Prasolov E.A. et al. Creation of abrasive with a polymershell, providing increasing efficiency abrasive waterjet cutting. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2021, no. 6, pp. 38–44, doi: <https://doi.org/10.33979/2073-7408-2021-350-6-38-44> (in Russ.).
- [5] Zhang R., Hoffmann T., Tsotsas E. Novel technique for coating of fine particles using fluidized bed and aerosol atomizer. *Processes*, 2020, vol. 8, no. 12, art. 1525, doi: <https://doi.org/10.3390/pr8121525>
- [6] Barsukov G.V., Galinovskiy A.L., Kozhus O.G. et al. Theoretical studies of adhesion of polymer compound protector on the surface of abrasive grain for waterjet cutting in an aqueous environment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2025, no. 11, pp. 49–58. EDN: RZNIPT (in Russ.).
- [7] GOST 20282–86. *Polistirol obshchego naznacheniya. Tekhnicheskie usloviya* [State standard 20282–86. General-purpose polystyrene. Specifications]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1986. 35 p. (In Russ.).
- [8] Wang C., Liu D., Ma J. et al. Characterization of coating shells in a Wurster fluidized bed under different drying conditions and solution viscosities. *Powder Technol.*, 2022, vol. 411, art. 117914, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117914>
- [9] Kaplan I.G. *Intermolecular interactions*. Wiley, 2006. 384 p. (Russ. ed.: *Mezhmolekulyarnye vzaimodeystviya*. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2023. 397 p.)
- [10] Volegov P.S., Gribov D.S., Trusov P.V. Damage and fracture: classical continuum theories. *Phys. Mesomech.*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 157–173, doi: <https://doi.org/10.1134/S1029959917020060>
- [11] Raiser Yu.P., Gribov D.S., Trusov P.V. Physical principles of the theory of brittle fracture cracks. *Sov. Phys. Usp.*, 1970, vol. 13, no. 1, pp. 129–139, doi: <https://doi.org/10.1070/PU1970v013n01ABEH004201>
- [12] Barenblatt G.I. Mathematical theory of equilibrium cracks formed during brittle fracture. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 1961, vol. 2, no. 4, pp. 3–56. (In Russ.).
- [13] Shorkin V.S., Vilchevskaya E.N., Romashin S.N. et al. Method for determining damage in elastic material. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2022, no. 6, pp. 3–13. (In Russ.).
- [14] Shorkin V.S., Frolenkova L.Yu., Romashin S.N. et al. Damage assessment of stressed elastic material. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2025, no. 3, pp. 12–21. (In Russ.).

- [15] Barsukov G.V., Shorkin V.S., Vlasov V.V. et al. Study of the initial damage of a copper slag abrasive to increase the productivity of hydroabrasive cutting. *Transportnoe mashinostroenie* [Transport Engineering], 2025, no. 12, pp. 39–47, doi: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2025-12-39-47> (in Russ.).
- [16] Zakharov S.D., Mosyagina I.V. Klasternaya struktura vody: obzor [Cluster structure of water: an overview]. *Preprint FIAN*, 2011. 24 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 13.02.2026

Информация об авторах

БАРСУКОВ Геннадий Валерьевич — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Передовые производственные технологии». ОГУ им. И.С. Тургенева (302026, Орел, Российская Федерация, ул. Комсомольская, д. 95, e-mail: awj@list.ru).

ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: galcomputer@mail.ru).

ШОРКИН Владимир Сергеевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая физика и математика». ОГУ им. И.С. Тургенева (302026, Орел, Российская Федерация, ул. Комсомольская, д. 95, e-mail: v.s.shorkin@yandex.ru).

КОЖУС Ольга Геннадьевна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Передовые производственные технологии». ОГУ им. И.С. Тургенева (302026, Орел, Российская Федерация, ул. Комсомольская, д. 95, e-mail: okozhus@mail.ru).

РОМАШИН Сергей Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая физика и математика». ОГУ им. И.С. Тургенева (302026, Орел, Российская Федерация, ул. Комсомольская, д. 95, e-mail: sromashin@yandex.ru).

Information about the authors

BARSUKOV Gennady Valerievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Leading Research Fellow of the Research Laboratory Advanced Manufacturing Technologies. Orel State University named after I.S. Turgenev (302026, Oryol, Russian Federation, Komsomolskaya St., Bldg. 95, e-mail: awj@list.ru).

GALINOVSKY Andrei Leonidovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Technology of Rocket and Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: galcomputer@mail.ru).

SHORKIN Vladimir Sergeevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technical Physics and Mathematics. Orel State University named after I.S. Turgenev (302026, Orel, Russian Federation, Komsomolskaya St., Bldg. 95, e-mail: v.s.shorkin@yandex.ru).

KOZHUS Olga Gennadyevna — Candidate Science (Eng.), Senior Researcher, Research Laboratory of Advanced Manufacturing Technologies. Orel State University named after I.S. Turgenev (302026, Orel, Russian Federation, Komsomolskaya St., Bldg. 95, e-mail: okozhus@mail.ru).

ROMASHIN Sergey Nikolaevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Technical Physics and Mathematics. Orel State University named after I.S. Turgenev (302026, Orel, Russian Federation, Komsomolskaya St., Bldg. 95, e-mail: sromashin@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Барсуков Г.В., Галиновский А.Л., Шоркин В.С., Кожус О.Г., Ромашин С.Н. Оценка времени насыщения жидкостью абразива с полимерным компаунд-протектором для гидроабразивного резания под водой при нарушении однородности покрытия. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 6, с. 12–20.

Please cite this article in English as:

Barsukov G.V., Galinovsky A.L., Shorkin V.S., Kozhus O.G., Romashin S.N. Evaluation of the saturation time of a liquid abrasive with a polymer protective compound for underwater waterjet cutting in the event of a coating barrier failure. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 6, pp. 12–20.