

УДК 621.921

Теоретические исследования адгезии полимерного компаунд-протектора на поверхности абразивного зерна для гидроабразивного резания в водной среде*

Г.В. Барсуков¹, А.Л. Галиновский², О.Г. Кожус¹,
В.В. Власов¹, Е.А. Прасолов¹

¹ ОГУ им. И.С. Тургенева

² МГТУ им. Н.Э. Баумана

Theoretical studies of adhesion of polymer compound protector on the surface of abrasive grain for waterjet cutting in an aqueous environment

G.V. Barsukov¹, A.L. Galinovsky², O.G. Kozhus¹,
V.V. Vlasov¹, E.A. Prasolov¹

¹ Oryol State University named after I.S. Turgenev

² Bauman Moscow State Technical University

Технологию гидроабразивного резания применяют для выполнения подводно-технических работ под водой в рамках решения специальных задач. Однако износ струеформирующего сопла снижает эффективность резания и требует замены в тяжелых условиях. К настоящему времени проведено много исследований износа сопла гидроабразивной установки, и разработаны методы продления срока его службы. Предложено использовать при гидроабразивной резке абразивные зерна, покрытые полимерной защитной пленкой (компаунд-протектором), что способствует значительному увеличению срока службы деталей устройств установки для гидроабразивной резки. Однако такие защитные пленки имеют существенный недостаток: находясь в водной среде продолжительное время, защитная оболочка абразивного зерна набухает из-за диффундирующей в нее воды. Проведено исследование адгезии полимерного компаунд-протектора на поверхности абразивного зерна для гидроабразивного резания в водной среде с привлечением теории о нелокальных межчастичных взаимодействиях в сплошной среде. Это позволило оценить возможность разрушения покрытия в процессе ввода в поток жидкости и реализовать в полной мере потенциал по использованию мобильных гидроабразивных установок в подводных условиях.

EDN: RZNIFT, <https://elibrary/rznift>

Ключевые слова: гидроабразивное резание, износ сопла, фокусирующая трубка, компаунд-протектор, абразивное зерно, полимерное покрытие

Waterjet cutting technology is used to perform underwater technical work under water to solve special problems. However, wear of the jet-forming nozzle reduces the cutting efficiency and requires replacement in severe conditions. To date, many studies have been con-

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

ducted on the wear of the waterjet nozzle and methods for extending its service life have been proposed. The authors of the article propose using abrasive grains coated with a polymer protective film (compound protector) in waterjet cutting, which will contribute to a significant increase in the service life of the parts of the waterjet cutting unit. However, there is a significant drawback to using such protective films — being in an aquatic environment for a long time, the protective shell of the abrasive grain swells due to water diffusing into it. Therefore, this article is devoted to the study of the adhesion of a polymer compound protector on the surface of an abrasive grain for waterjet cutting in an aqueous medium using the theory of non-local interparticle interactions in a continuous medium, which made it possible to assess the possibility of coating destruction during the introduction into the liquid flow and to fully realize the potential for using mobile waterjet installations in underwater conditions.

EDN: RZNIFT, <https://elibrary/rznift>

Keywords: waterjet cutting, wear of nozzle, focusing tube, compound protector, abrasive grain, polymer coating

Гидроабразивное резание (ГАР) относится к новым нетрадиционным технологиям обработки. Достоинствами ГАР являются низкая температура в зоне резания, минимальное образование пыли, небольшая сила резания и возможность резания деталей большой толщины почти из любого материала. Важность и эффективность технологии ГАР доказана многими учеными для использования в различных отраслях промышленности: аэрокосмической, автомобильной, судостроительной, биомедицине, и энергетике и др.

Эту технологию можно применять для выполнения большей части подводно-технических работ при решении специальных задач, в частности для демонтажа затонувшей техники с целью последующего подъема их частей, обслуживания опасных объектов и обезвреживания боеприпасов.

На сегодняшний день известны работы, 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 спасательных работ и технического обслуживания объектов под водой [1].

Однако развитие технологии ГАР под водой требует глубокой научной адаптации вследствие специфики использования в затопленном состоянии, а ее практическое применение ограничено техническими трудностями подачи воды и абразива, а также износом сопла в процессе резания [2]. При ГАР под водой абразивы предварительно смешиваются с жидкостью, находящейся во взвешенном состоянии, обра-

зую пульпу. Поток абразивно-жидкостной смеси, проходящий через сопло, приводит к его быстрому износу, что снижает эффективность резки и требует замены в тяжелых условиях.

Существуют различные параметры, способные влиять на скорость износа сопла, такие как длина, угол входа и диаметр сопла, диаметр отверстия, расход и тип абразива, а также рабочее давление. Скорость износа сопла можно минимизировать, контролируя эти параметры. Механизм износа сопла аналогичен другим традиционным процессам обработки, использующим режущий инструмент. Высокое давление и твердые абразивные частицы могут привести к значительной эрозии канала сопла.

Для снижения скорости износа и увеличения срока службы разработано сопло, выполненное из материала на основе карбида вольфрама [3]. Сделан выбор оптимальной длины и диаметра сопла, угла входа гидроабразивного потока, расхода абразива и давления воды, снижающих износ сопла. Покрытие сопла из карбида вольфрама титановым сплавом позволило увеличить твердость поверхности канала и защитить ее от повреждений [4].

В работе [5] предложено устройство слежения за износом сопла с помощью датчика износа. Результаты исследования показали, что сенсорная система способна определять направление распространения износа, а также предоставлять необходимую информацию о позиционировании, чтобы компенсировать увеличение внутреннего диаметра сопла.

Для предотвращения износа сопла разработан метод использования пористого смазываемого сопла [6]. Сопло изготовлено из пористого материала и окружено резервуаром, содержа-

щим высокоскоростную смазку. По результатам исследования сделан вывод, что пористое смазываемое сопло может значительно снизить его износ. Показано, что наличие масла помогает уменьшить столкновение абразивных частиц со стенкой сопла, тем самым снижая износ.

К настоящему времени проведено много исследований износа сопла гидроабразивной установки, и предложены методы продления срока его службы. Во многих работах авторы изучали влияние геометрических параметров канала сопла на его повреждение. Обзор литературы показал, что в основном исследуются комбинации таких параметров процесса, как угол схождения фокусирующей трубки, положение входного отверстия для частиц и угол входа абразивных частиц [2, 3, 7].

Следует отметить, что многие исследователи используют различные методы моделирования износа сопла, такие как CFD-анализ, дисперсионный (ANOVA — ANalysis Of VAriance) и регрессионный анализ, чтобы определить оптимальные геометрические параметры канала сопла для снижения его износа [3, 8–11].

Меньшее количество работ посвящено многокритериальной оптимизации давления жидкости, когда заданные параметры резания (качество поверхности, глубина резания) могут быть обеспечены при условии минимального воздействия на поверхность фокусирующей трубки сопла [12].

Другая часть исследований направлена на установление влияния абразивных частиц на износ сопла. Определено время потери массы фокусирующей трубки сопла при попадании абразивных частиц разного типоразмера в ее полость, сделана оценка срока ее службы [10, 13].

В работах [14–16] экспериментально доказано, что использование при ГАР абразивных зерен, покрытых полимерной защитной пленкой (компаунд-протектор), способствует существенному увеличению срока службы деталей устройств резки, которые контактируют в рабочем процессе с гидроабразивной струей.

Однако есть существенный недостаток применения таких защитных пленок — определенные ограничения на условия длительного хранения рабочей смеси, содержащей абразивные зерна с покрытиями из них. Готовая абразивная смесь не может находиться долгое время в воде, что в некоторых случаях оказывается необходимым. Находясь в водной среде продолжи-

тельное время, защитная оболочка абразивного зерна набухает из-за диффундирующей в нее воды. Кроме того, влага просачивается до поверхности контакта оболочки и зерна, где заполняет дефекты их адгезионного контакта. Вследствие набухания во внутренних микротрещинах и порах создается избыточное давление, приводящее к их росту и уменьшению прочности оболочки. Из-за заполнения водой адгезионных дефектов по тем же причинам происходит отслаивание оболочки от зерна. Все это приводит к разрушению защитной оболочки при внешних механических воздействиях, существенно меньше запланированных для хранения в сухих условиях.

Цель работы — исследование адгезии полимерного компаунд-протектора на поверхности абразивного зерна для ГАР в водной среде, что позволит оценить возможность разрушения покрытия в процессе ввода в поток жидкости и реализовать в полной мере потенциал по использованию мобильных гидроабразивных установок в подводных условиях.

Основная часть. В качестве общей модели будем использовать модель, описанную в статье [17]. Она построена на основе изложенных в работах [18, 19] результатах о нелокальных межчастичных взаимодействиях в сплошной среде и заключается в следующем.

Считаем, что всякое тело B (частица и твердый полимер) является сплошным, т. е. представляет собой множество тел-точек b , в любой момент времени t гомеоморфное некоторому регулярному геометрическому множеству точек $\Lambda_t \subset \mathcal{R}^3$ — актуальной или текущей конфигурацией тела B .

Положение $b \in B$ в отсчетной и текущей конфигурациях характеризуется векторами \mathbf{r} и \mathbf{R} . Если $b_i \in B$ и $b_j \in B$ — два произвольных тела-точки с номерами i и j , то положение второй относительно первой в этих конфигурациях характеризуется векторами

$$\mathbf{l}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i \text{ и } \mathbf{L}_{ij} = \mathbf{R}_j - \mathbf{R}_i = \mathbf{l}_{ij} + \Delta \mathbf{u}_{ij}.$$

Здесь \mathbf{u} — смещение b при переходе из положения \mathbf{r} в положение \mathbf{R} , $\mathbf{u} = \mathbf{R} - \mathbf{r}$; $\Delta \mathbf{u}_{ij}$ — смещение b_j относительно b_i , $\Delta \mathbf{u}_{ij} = \mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i$.

Тела-точки b расположены в центрах инерции бесконечно малых частиц $dB \subset B$. Кинематические характеристики тел-точек b — их положения и скорости перемещения, считаем кинематическими характеристиками $dB \subset B$.

В любой момент времени бесконечно малые частицы $dB \equiv dB_1$ тела B взаимодействуют как между собой, так и между частицами другого тела, поскольку потенциальные силы позволяют воздействовать друг на друга на расстоянии. Предполагаем, что реализуются только парные и тройные взаимодействия. Потенциальная энергия взаимодействующих частиц пропорциональна произведению их объемов:

$$dW_t^{(2)} = \Phi^{(2)}(L_{12}(t)) dV_{t1} dV_{t2};$$

$$dW_t^{(3)} = \Phi^{(3)}(L_{12}(t), L_{13}(t)) dV_{t1} dV_{t2} dV_{t3}.$$

В силу однородности и изотропии материала коэффициенты пропорциональности $\Phi^{(2)} \equiv \Phi^{(2)}(L_{12})$ и $\Phi^{(3)}(L_{12}, L_{13})$ являются известными функциями только межчастичных расстояний $L_{ij} = |\mathbf{L}_{ij}| = |\mathbf{R}_j - \mathbf{R}_i|$.

Потенциальная энергия $dW_t(\mathbf{R}) = w_t(\mathbf{R}) dV_t$ взаимодействия частицы $dB \equiv dB_1$ с другими частицами тела B и сила $d\mathbf{F}_t(\mathbf{R}) = \mathbf{f}_t(\mathbf{R}) dV_t$, действующая на нее со стороны окружения, определяются следующими соотношениями:

$$dW_t = w(\mathbf{R}) dV_t = \left\{ \int_{\Lambda_t} \Phi^{(2)}(L_{12}) dV_{t2} + \int_{\Lambda_t} dV_{t2} \int_{\Lambda_t} \Phi^{(3)}(L_{12}, L_{13}) dV_{t3} \right\} dV_t;$$

$$d\mathbf{F}_t(\mathbf{R}) = \mathbf{f}_t(\mathbf{R}) dV_t = -\nabla_{\mathbf{R}} w_t(\mathbf{R}) dV_t; \quad \nabla_{\mathbf{R}} \equiv \frac{d}{d\mathbf{R}}.$$

Допускаем, что для частиц $dB_{(1)i}$ и $dB_{(2)j}$ из разных тел $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$ энергия $dW_{(\alpha)} = w_{(\alpha)t} dV_{(\alpha)t}$ ($\alpha = 1, 2$) частицы $dB_{(\alpha)} \equiv dB_{(\alpha)1}$ равна сумме энергий $w_{(\alpha\alpha)t} dV_{(\alpha)t}$ ее взаимодействий внутри $B_{(\alpha)}$ и энергий $w_{(\alpha\beta)t} dV_{(\alpha)t}$ ($\alpha, \beta = 1, 2; \alpha \neq \beta$) тех ее взаимодействий, в которых участвуют частицы тела $B_{(\beta)}$:

$$w_{(\alpha)t} = w_{(\alpha\alpha)t} + w_{(\alpha\beta)t}.$$

Произвольная частица $dB_{(\alpha)} \equiv dB_{(\alpha)1}$ тела $B_{(\alpha)}$ оказывается под действием силы

$$d\mathbf{F}_{(\alpha)t} = \mathbf{f}_{(\alpha)t} dV_{(\alpha)t} = -\nabla_{\mathbf{R}} w_{(\alpha)t}$$

с объемной плотностью

$$dV_t \mathbf{f}_{(\alpha)t} = \mathbf{f}_{(\alpha\alpha)t} + \mathbf{f}_{(\alpha\beta)t} + \boldsymbol{\varphi}_{(\alpha)t}$$

(по α не суммировать).

Здесь $\mathbf{f}_{(\alpha\alpha)t} = -\nabla_{\mathbf{R}} w_{(\alpha\alpha)t}$ — поле сил, оказывающих воздействие на элементарный участок тела $dB_{(\alpha)} \equiv dB_{(\alpha)1}$ $B_{(\alpha)}$ со стороны соседних элементарных участков этого тела $B_{(\alpha)}$;

$\mathbf{f}_{(\alpha\beta)t} = -\nabla_{\mathbf{R}} w_{(\alpha\beta)t}$ — объемная плотность сил, действующих на $dB_{(\alpha)}$ при участии частиц тела $B_{(\beta)}$: при парном взаимодействии — только частиц тела $B_{(\beta)}$, а когда на участок тела воздействуют три элементарных участка, последнее слагаемое является полем сил со стороны рядом лежащих двух элементарных участков $B_{(\alpha)}$ и $B_{(\beta)}$.

С возрастанием рангов градиентов перемещений с определенной последовательностью функцию $\Delta w_{(11)}$ можно представить в виде перемещений, которые будут характеризовать изменение потенциальной энергии тела при изменении состояния тела. Поэтому получаем выражение для описания тензоров напряжения в теле $B_{(1)}$ путем дифференцирования функции $\Delta w_{(11)}$ по градиентам $\nabla^m \mathbf{u}$:

$$\mathbf{P}^{(n)} = \frac{\partial \Delta w_{(11)}}{\partial (\nabla^m \mathbf{u})} = \mathbf{P}^{0(n)} + \sum_{m=1}^{\infty} (\nabla^m \mathbf{u}) \overbrace{\dots}^{m \text{ раз}} \mathbf{C}^{(mn)},$$

где $\mathbf{P}^{0(n)}$ — тензоры напряжений в первичном положении тела; $\mathbf{C}^{(mn)}$ — тензоры напряжений, отражающие физико-механические свойства материала тела.

При учете только парных и тройных взаимодействий определяющие соотношения имеют следующий вид:

$$\mathbf{P}^{0(m)} = \frac{1}{2!} \int_V \frac{1}{m!} (\nabla_{12} \Phi_{(11)}^{(2)}) \mathbf{I}_{12}^m dV_2 +$$

$$+ \frac{1}{3!} \sum_{j=2}^3 \int_V \int_V \frac{1}{m!} (\nabla_{1j} \Phi_{(111)}^{(3)}) \mathbf{I}_{1j}^m dV_2 dV_3;$$

$$\mathbf{C}^{(mn)} = \frac{1}{2!} \int_V \frac{1}{m! n!} \mathbf{I}_{12}^n (\nabla_1^2 \Phi_{(11)}^{(2)}) \mathbf{I}_{12}^m dV_2 +$$

$$+ \frac{1}{3!} \sum_{p,q=2}^3 \int_V \int_V \frac{1}{m! n!} \mathbf{I}_{1p}^n (\nabla_p \nabla_q \Phi_{(111)}^{(3)}) \mathbf{I}_{1q}^m dV_2 dV_3.$$

При сохранении для описания деформированного состояния первых двух градиентов перемещений получаем модель материалов второго порядка.

Для учета влияния температуры на характеристики напряженно-деформированного состояния необходимо учесть изменение свободной энергии на основании первого начала термодинамики. Оно является полным дифференциалом.

Тензоры напряжений связаны с температурой и деформациями тела следующим образом:

$$\mathbf{P}^{(n)} = \mathbf{P}^{0(n)} - \mathbf{B}^{(n)} \Theta + \sum_{m=1}^{\infty} (\nabla^m \mathbf{u}) \overbrace{\dots}^m \mathbf{C}^{(mn)};$$

$$\mathbf{S} = \sum_{m=1}^{\infty} (\nabla^m \mathbf{u}) \cdot \overbrace{\dots}^m \mathbf{B}^{(m)} + c_\epsilon \frac{\Theta}{T_0},$$

где c_ϵ — теплоемкость тела.

Существует связь между температурой и энтропией, которую можно представить как

$$T(dS/dt) = \Lambda \cdot (\nabla^2 T),$$

где $T = T_0[1 + (\Theta/T_0)]$.

Если среда имеет источники теплоты, скорость распространения которой характеризуется параметром ϑ , то можно записать следующее выражение для определения количества выделившейся теплоты:

$$\Lambda \cdot (\nabla^2 \Theta) - c_\epsilon \frac{d\Theta}{dt} - T_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{d(\nabla^m \mathbf{u}) \cdot \overbrace{\dots}^m \mathbf{B}^{(m)}}{dt} = -\vartheta.$$

Процесс адгезии двух тел $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$, вступивших в контакт, описывается путем рассмотрения нескольких стадий. На первой стадии необходимо выделить два контактирующих тела $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$, для чего из двух сред $\Omega_{(1)}$ и $\Omega_{(2)}$, имеющих бесконечную протяженность на любом отрезке времени (обычно $t_0 = 0$), выделяются тела $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$, которые соответствуют свойствам двух контактирующих тел.

На второй стадии происходит контакт и соединение двух тел $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$. Время вступления в контакт $t^* > t_0 = 0$.

На третьей стадии тела $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$ после вступления в адгезионный контакт претерпевают внутренние изменения, изменяется напряженно-деформированное состояние, возникают источники теплоты и изменяется тепловой баланс тел.

Баланс тепловой и механической энергий должен выполняться в выделенных областях контактирующих тел, причем с учетом их взаимного влияния, что должно отражаться в балансовых соотношениях.

На поверхности адгезионного контакта задаются условия сопряжения полей температур и тепловых потоков, полей перемещений и нормальных составляющих их градиентов, нормальных составляющих тензоров напряжений второго и третьего рангов.

Эти условия выявляем путем варьирования функционала свободной энергии полученного при адгезии объединенного тела $B = B_{(1)} \cup B_{(2)}$ и его частей $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$.

Запишем уравнение энергии

$$E_a = W_{s(1,2)} - W_{s(1)}^0 - W_{s(2)}^0,$$

где $W_{s(1,2)}$ — суммарная энергия двух контактирующих участков $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$, по линии соприкосновения $W_{s(1,2)} = W_{s(1)}^a + W_{s(2)}^a$; $W_{s(k)}^0$ — энергия тела вне контакта двух тел.

Рассмотрим упрощенную модель упругой среды и ее применение для описания адгезии. Этот вариант является частным случаем изложенной общей модели твердых тел и их адгезии. Теория учитывает нелокальное взаимодействие частиц упругой среды путем учета внутреннего начального напряженного состояния, являющегося следствием этого взаимодействия, описываемого тензором

$$\mathbf{P}_0^{(2)} = T_0 \cdot \mathbf{E}; \quad T_0 = \pi_0 \delta_{ij} \delta_{kl} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j \mathbf{e}_k \mathbf{e}_l,$$

где \mathbf{E} — единичный вектор, нормальный к эквипотенциальным поверхностям поля межчастичного взаимодействия внутри изучаемого тела (на поверхности тела \mathbf{E} совпадает с внешней единичной нормалью \mathbf{n}); π_0 — дополнительная, материальная постоянная, характеризующая упругие свойства среды; δ_{ij} , δ_{kl} — символы Кронекера; \mathbf{e}_i , \mathbf{e}_j , \mathbf{e}_k , \mathbf{e}_l — базисные векторы.

Объемная плотность потенциальной энергии межчастичных взаимодействий определяется соотношением

$$w = \mu \epsilon_{ij} \epsilon_{ij} + \frac{\lambda}{2} \epsilon_{kk} \epsilon_{ll} + \frac{2\mu + \lambda}{2} b^2 Z_{ijk}^{(2)} Z_{ijk}^{(2)} + \pi_0 \delta_{ij} E_k Z_{ijk}^{(2)}; \\ \epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (Z_{ij}^{(1)} + Z_{ji}^{(1)}),$$

где μ , λ — параметры Ламэ; b — дополнительная материальная постоянная, характеризующая упругие свойства среды.

Для компонентов тензоров напряжений справедливы следующие выражения:

$$P_{ij}^{(1)} = 2\mu \epsilon_{ij} + \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk} = \mu (u_{ij} + u_{ji}) + \lambda \delta_{ij} u_{kk}; \\ P_{ijk}^{(2)} = (2\mu + \lambda) b^2 Z_{ijk} + \pi_0 \delta_{ij} E_k = \\ = (2\mu + \lambda) b^2 u_{ijk} + \pi_0 \delta_{ij} E_k.$$

Дополнительные материальные постоянные определяются как

$$\pi_0 = W_s; \quad b = \frac{W_s}{2\mu + \lambda},$$

где W_s — поверхностная энергия, значение которой либо является известной величиной, либо определяется приближенно по эмпириче-

ской формуле $W_s \approx 8E \cdot 10^{-12}$ Дж/м² или через потенциал межчастичного взаимодействия.

Будем рассматривать состояние равновесия двух тел для описания адгезии при допущении, что других источников воздействия из внешней среды нет.

Запишем условие сопряжения двух тел, исходя из условия равновесия тел $B_{(j)}$, имеющих адгезионный контакт на участке S_0 , а вся поверхность контактирующего тела будет $S_{(j)}$:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\mathbf{P}^{1(j)} - \nabla \cdot \mathbf{P}^{2(j)}) &= \mathbf{0}, \quad \mathbf{r} \in B^{(j)}; \\ \mathbf{n}^{(j)} \cdot (\mathbf{P}^{1(j)} - \nabla \cdot \mathbf{P}^{2(j)}) - \nabla_s \cdot (\mathbf{n}^{(j)} \cdot \mathbf{P}^{2(j)}) &= \mathbf{0}, \quad \mathbf{r} \in S^{(j)}; \\ \mathbf{n}^{(j)} \cdot \mathbf{P}^{2(j)} &= \mathbf{0}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{n}^{(1-2)} \cdot (\mathbf{P}^{1(1)} - \nabla \cdot \mathbf{P}^{2(1)}) - \nabla_s \cdot (\mathbf{n}^{(1-2)} \cdot \mathbf{P}^{2(1)}) + \\ + \mathbf{n}^{(2-1)} \cdot (\mathbf{P}^{1(2)} - \nabla \cdot \mathbf{P}^{2(2)}) - \nabla_s \cdot (\mathbf{n}^{(2-1)} \cdot \mathbf{P}^{2(2)}) &= \mathbf{0}; \\ \mathbf{n}^{(1-2)} \cdot \mathbf{P}^{2(1)} + \mathbf{n}^{(2-1)} \cdot \mathbf{P}^{2(2)} &= \mathbf{0}; \\ \mathbf{u}^{(1)} = \mathbf{u}^{(2)}; \quad \nabla_n \mathbf{u}^{(1)} = \nabla_n \mathbf{u}^{(2)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Если же для тех же тел $B_{(j)}$, $j=1,2$, на поверхности S_α адгезия отсутствует, то вместо выражений (1) и (2) имеем следующие условия:

$$\begin{aligned} \mathbf{n}^{(1-2)} \cdot (\mathbf{P}^{1(1)} - \nabla \cdot \mathbf{P}^{2(1)}) - \nabla_s \cdot (\mathbf{n}^{(1-2)} \cdot \mathbf{P}^{2(1)}) = \\ = \mathbf{n}^{(2-1)} \cdot (\mathbf{P}^{1(2)} - \nabla \cdot \mathbf{P}^{2(2)}) - \nabla_s \cdot (\mathbf{n}^{(2-1)} \cdot \mathbf{P}^{2(2)}) = \sigma_{1-\alpha}^{(1-2)}; \\ \mathbf{n}^{(1-2)} \cdot \mathbf{P}^{2(1)} = \mathbf{n}^{(2-1)} \cdot \mathbf{P}^{2(2)} = \mathbf{0}. \end{aligned}$$

Решив задачи расчета полей перемещений в телах $B_{(j)}$ при наличии и отсутствии между ними адгезии, можно рассчитать их поверхностные энергии и энергию адгезии. Эти энергии связаны выражением

$$F_a = \frac{W_s^{(1)} W_s^{(2)} (k^{(1)} + k^{(2)})^2}{W_s^{(1)} k^{(2)2} + W_s^{(2)} k^{(1)2}}, \quad k^{(j)} = \frac{\nu^{(j)}}{1 - \nu^{(j)}}.$$

При изменении температуры системы контактирующих тел энергия адгезии может меняться. Такие изменения в общем случае предлагается учитывать при следующих предположениях:

- в любой момент времени температурное поле в контактирующих слоях однородное;
- в каждом из тел потенциальная энергия взаимодействующих частиц, а значит, и энергия упругих деформаций является функцией, в том числе и температуры.

Эти допущения позволяют определять зависимость энергии адгезии от температуры, учитывать через ее влияние на модуль Юнга и коэффициент Пуассона, значения которого общеизвестны.

Обсуждение результатов. Чтобы адгезионные связи полимерной оболочки и абразивной частицы были достаточными для предотвращения ее разрушения в процессе ввода в сверхзвуковую струю жидкости, необходимо учитывать первоначальную влажность частицы. Ее влияние обеспечивается диффузией влаги сквозь оболочку в направлении поверхности адгезионного контакта. Диффузия может происходить как через несовершенства атомной структуры оболочки (объемная диффузия), так и вдоль берегов сквозных трещин в оболочке (поверхностная диффузия). Второй вид диффузии отличается от первого значительно большей скоростью.

Адгезионный процесс по поверхности двух тел с разными атомными решетками и, как следствие, термомеханическими свойствами из-за некогерентности этих решеток приводит к появлению участков с потерей адгезии — несплошностей. Кроме того, известно, что в реальных материалах всегда присутствуют микротрещины. Именно в зоны несплошности адгезии, а также в микротрещины диффундирует влага, образуя тонкие жидкие слои.

Такие тонкие слои жидкости имеют толщину около ста нанометров, которой будет достаточно для возникновения давления, приводящего к расклиниванию наносимого полимерного слоя. На границе раздела двух фаз формируются определенные приповерхностные силы, которые оказывают воздействие на близлежащие участки тела. Расстояние, на которое способны воздействовать эти силы, зависит от свойств материала контактирующих тел, например, на уровне молекулярных и электрических взаимодействий.

Это влияет на механические свойства материала оболочки и ее энергии адгезии с зерном.

Согласно теории трещин Гриффитса, для предела прочности получено известное выражение

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{E W_s}{4c}},$$

где E — модуль Юнга; c — половина длины трещины.

Анализируя на основании этого выражения влияние влаги, можно заключить, что ее наличие приводит к увеличению длины трещин или (в предположении ее постоянства) уменьшению эффективного модуля Юнга, а в целом — к снижению предела прочности материала оболочки. Наблюдаемая пропорциональность по-

верхностной энергии материала и его модуля Юнга свидетельствует о том, что насыщение материала влагой должно уменьшить его поверхностную энергию и, как следствие, энергию адгезии с другим материалом. Кроме того, влага, проникая в несплошности адгезионного контакта, за счет расклинивающего давления будет способствовать уменьшению величины сплошности и возникновению отслоений оболочки от зерна.

Выводы

1. На основе анализа нелокальных межчастичных взаимодействий в сплошной среде

разработана теория для прогнозирования наличия или отсутствия адгезии между полимерным компаунд-протектором и абразивным зерном, что позволило оценить возможность разрушения покрытия в процессе ввода в поток жидкости и реализовать в полной мере потенциал по использованию мобильных гидроабразивных установок в подводных условиях.

2. Получены зависимости для расчета адгезионной связи полимерной оболочки с поверхностью абразива с учетом характеристик упругих свойств покрытия (модуля Юнга и коэффициента Пуассона), что позволяет учитывать влияние температуры и влажности внешней среды на прочность соединения.

Литература

- [1] Maslin E. Subsea waterjet cutting goes ultra-deep and ultra-high pressure. *Offshore Engineer*, 2013, vol. 38, pp. 82–84.
- [2] 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>
- [3] Syazwani H., Mebrahitom G., Azmir A. A review on nozzle wear in abrasive water jet machining application. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 114, art. 012020, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012020>
- [4] Pan H., Chen X., Chen L. et al. Surface topography analysis of BK7 with different roughness nozzles using an abrasive. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 17, art. 4494, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17184494>
- [5] Kovacevic R. A new sensing system to monitor abrasive waterjet nozzle wear. *J. Mater. Process. Technol.*, 1991, vol. 28, no. 1-2, pp. 117–125, doi: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(91\)90211-V](https://doi.org/10.1016/0924-0136(91)90211-V)
- [6] Anand U., Katz J. Prevention of nozzle wear in abrasive water suspension jets (AWSJ) using porous lubricated nozzles. *J. Tribol.*, 2003, vol. 125, no. 1, pp. 168–180, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1491977>
- [7] Qiang Z., Wu M., Miao X. et al. CFD research on particle movement and nozzle wear in the abrasive water jet cutting head. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, vol. 95, no. 7-8, pp. 4091–4100, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1504-6>
- [8] Verma S., Mishra S.K., Moulick S.K. CFD analysis of nozzle in abrasive water suspension jet machining. *Int. J. Adv. Engg. Res. Studies*, 2015, no. 2, pp. 236–241.
- [9] Mostofa M.G., Kil K.Y., Hwan A.J. Computational fluid analysis of abrasive waterjet cutting head. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2010, vol. 24, no. 1, pp. 249–252, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-009-1142-5>
- [10] Zou X., Fu L., Wu L. et al. Research on multiphase flow and nozzle wear in a high-pressure abrasive water jet cutting head. *Machines*, 2023, vol. 11, no. 6, art. 614, doi: <https://doi.org/10.3390/machines11060614>
- [11] Chen X., Deng S., Guan J. et al. Experiment and simulation research on abrasive water jet nozzle wear behavior and anti-wear structural improvement. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2017, vol. 39, no. 6, pp. 2023–2033, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-017-0707-y>
- [12] Golovin K., Pushkarev A., Kovaleva A. Determination of the wear limit value, the optimal operating time, and the consumption of jet-forming elements made of different materials when implementing water jet technologies. *Transp. Res. Proc.*, 2021, vol. 57, pp. 210–219, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.044>

- [13] Perec A., Pude F., Grigoryev A. et al. A study of wear on focusing tubes exposed to corundum-based abrasives in the waterjet cutting process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, vol. 104, no. 5, pp. 2415–2427, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03971-0>
- [14] Barsukov G.V., Kozhus O.G., Shorkin V.S. et al. 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. *Mater. Sci. Forum*, 2021, vol. 1031, pp. 160–165, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.160>
- [15] Barsukov G.V., Kozhus O.G., Danilchenko S.G. et al. Analysis of the properties of the fluidized bed during the formation of the abrasive-polymer compound for waterjet cutting. *Key Eng. Mater.*, 2022, vol. 910, pp. 144–149, doi: <https://doi.org/10.4028/p-gedbz>
- [16] Barsukov G.V., Kozhus O.G., Frolenkova L.Yu. et al. Development of abrasive grain coating technology protective polymer casing for water-abrasive cutting. *Mater. Res. Proc.*, 2022, vol. 21, pp. 169–175, doi: <https://doi.org/10.21741/9781644901755-30>
- [17] Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С. Метод вычисления поверхностной энергии и энергии адгезии упругих тел. *Вестник ПНИПУ. Механика*, 2013, № 1, с. 235–259, doi: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2013.1.235-259>
- [18] Гуткин М.Ю., Овидько И.А. Дефектные структуры на внутренних границах раздела в нанокристаллических и поликристаллических пленках. *Механика и физика материалов*, 2009, т. 8, № 2, с. 108–148.
- [19] Ovid'ko I.A., Sheinerman A.G. Dislocation dipoles in nanoscale films with compositional inhomogeneities. *Philos. Mag. A*, 2002, vol. 82, no. 16, pp. 3119–3127, doi: <https://doi.org/10.1080/01418610208239636>

References

- [1] Maslin E. Subsea waterjet cutting goes ultra-deep and ultra-high pressure. *Offshore Engineer*, 2013, vol. 38, pp. 82–84.
- [2] 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. Mashinostroenie* [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.).
- [3] Syazwani H., Mebrahitom G., Azmir A. A review on nozzle wear in abrasive water jet machining application. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 114, art. 012020, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012020>
- [4] Pan H., Chen X., Chen L. et al. Surface topography analysis of BK7 with different roughness nozzles using an abrasive. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 17, art. 4494, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17184494>
- [5] Kovacevic R. A new sensing system to monitor abrasive waterjet nozzle wear. *J. Mater. Process. Technol.*, 1991, vol. 28, no. 1-2, pp. 117–125, doi: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(91\)90211-V](https://doi.org/10.1016/0924-0136(91)90211-V)
- [6] Anand U., Katz J. Prevention of nozzle wear in abrasive water suspension jets (AWSJ) using porous lubricated nozzles. *J. Tribol.*, 2003, vol. 125, no. 1, pp. 168–180, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1491977>
- [7] Qiang Z., Wu M., Miao X. et al. CFD research on particle movement and nozzle wear in the abrasive water jet cutting head. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, vol. 95, no. 7-8, pp. 4091–4100, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1504-6>
- [8] Verma S., Mishra S.K., Moulick S.K. CFD analysis of nozzle in abrasive water suspension jet machining. *Int. J. Adv. Engg. Res. Studies*, 2015, no. 2, pp. 236–241.
- [9] Mostofa M.G., Kil K.Y., Hwan A.J. Computational fluid analysis of abrasive waterjet cutting head. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2010, vol. 24, no. 1, pp. 249–252, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-009-1142-5>
- [10] Zou X., Fu L., Wu L. et al. Research on multiphase flow and nozzle wear in a high-pressure abrasive water jet cutting head. *Machines*, 2023, vol. 11, no. 6, art. 614, doi: <https://doi.org/10.3390/machines11060614>

- [11] Chen X., Deng S., Guan J. et al. Experiment and simulation research on abrasive water jet nozzle wear behavior and anti-wear structural improvement. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2017, vol. 39, no. 6, pp. 2023–2033, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-017-0707-y>
- [12] Golovin K., Pushkarev A., Kovaleva A. Determination of the wear limit value, the optimal operating time, and the consumption of jet-forming elements made of different materials when implementing water jet technologies. *Transp. Res. Proc.*, 2021, vol. 57, pp. 210–219, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.044>
- [13] Perec A., Pude F., Grigoryev A. et al. A study of wear on focusing tubes exposed to corundum-based abrasives in the waterjet cutting process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, vol. 104, no. 5, pp. 2415–2427, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03971-0>
- [14] Barsukov G.V., Kozhus O.G., Shorkin V.S. et al. 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. *Mater. Sci. Forum*, 2021, vol. 1031, pp. 160–165, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.160>
- [15] Barsukov G.V., Kozhus O.G., Danilchenko S.G. et al. Analysis of the properties of the fluidized bed during the formation of the abrasive-polymer compound for waterjet cutting. *Key Eng. Mater.*, 2022, vol. 910, pp. 144–149, doi: <https://doi.org/10.4028/p-gedbzi>
- [16] Barsukov G.V., Kozhus O.G., Frolenkova L.Yu. et al. Development of abrasive grain coating technology protective polymer casing for water-abrasive cutting. *Mater. Res. Proc.*, 2022, vol. 21, pp. 169–175, doi: <https://doi.org/10.21741/9781644901755-30>
- [17] Frolenkova L.Yu., Shorkin V.S. Method of calculating the surface and adhesion energies of elastic bodies. *Vestnik PNIPU. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin], 2013, no. 1, pp. 235–259, doi: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2013.1.235-259> (in Russ.).
- [18] Gutkin M.Yu., Ovidko I.A. Defect structures on inner interfaces in nanocrystalline and polycrystalline films. *Mekhanika i fizika materialov* [Materials Physics and Mechanics], 2009, vol. 8, no. 2, pp. 108–148. (In Russ.).
- [19] Ovid'ko I.A., Sheinerman A.G. Dislocation dipoles in nanoscale films with compositional inhomogeneities. *Philos. Mag. A*, 2002, vol. 82, no. 16, pp. 3119–3127, doi: <https://doi.org/10.1080/01418610208239636>

Статья поступила в редакцию 17.09.2025

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).

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).

Information about the authors

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

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

ВЛАСОВ Виктор Викторович — научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Передовые производственные технологии». ОГУ им. И.С. Тургенева (302026, Орел, Российская Федерация, ул. Комсомольская, д. 95, e-mail: vlasv90@mail.ru)

VLASOV Viktor Viktorovich — Researcher, Research Laboratory Advanced Manufacturing Technologies. Oryol State University named after I.S. Turgenev (302026, Oryol, Russian Federation, Komsomolskaya St., Bldg. 95, e-mail: vlasv90@mail.ru).

ПРАСОЛОВ Егор Александрович — стажер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Передовые производственные технологии». ОГУ им. И.С. Тургенева (302026, Орел, Российская Федерация, ул. Комсомольская, д. 95, e-mail: prasolovegor@mail.ru).

PRASOLOV Egor Aleksandrovich — Researcher Assistant, Research Laboratory Advanced Manufacturing Technologies. Oryol State University named after I.S. Turgenev (302026, Oryol, Russian Federation, Komsomolskaya St., Bldg. 95, e-mail: prasolovegor@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Барсуков Г.В., Галиновский А.Л., Кожус О.Г., Власов В.В., Прасолов Е.А. 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.

Please cite this article in English as:

Barsukov G.V., Galinovsky A.L., Kozhus O.G., Vlasov V.V., Prasolov E.A. Theoretical studies of adhesion of polymer compound protector on the surface of abrasive grain for waterjet cutting in an aqueous environment. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 11, pp. 49–58.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

**«Точение. Строгание.
Долбление. Протягивание»**

Автор Д.В. Виноградов

Описаны виды обработки резанием: точение, строгание, долбление и протягивание. Рассмотрены разновидности способов обработки и их особенности, преимущества и недостатки. Приведены краткие сведения о станках, технологических и инструментальных приспособлениях, а также используемых режущих инструментах. Даны формулы для расчета основного технологического времени обработки. Представлена информация для проектирования операций обработки резанием — определения формообразующих движений, выполнения схемы обработки, выбора металлорежущего оборудования, приспособлений и режущих инструментов.

Для студентов направлений подготовки специалистов 15.05.01/02 «Проектирование технологических машин и комплексов — Проектирование инструментальных комплексов в машиностроении», а также для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 15.04.02/04 «Технологические машины и оборудование — Процессы и технологии механической и физико-технической обработки».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>