

ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ АБРАЗИВА ИЗ МЕДНОГО ШЛАКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ

Геннадий Валерьевич Барсуков^{1✉}, Владимир Сергеевич Шоркин², Виктор Викторович Власов³, Антон Владимирович Петрухин⁴, Егор Дмитриевич Ноздрин⁵

^{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 v.s.shorkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9147-2315>

³ vlasv90@mail.ru

⁴ antosha.petrukhin@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-4798-8224>

⁵ e.nozdrin@outlook.com

Аннотация

Представлены результаты решения задачи прогнозирования возникновения микротрещин и оценки начальной поврежденности частицы медного шлака, которая может развиваться под действием внешней нагрузки в процессе гидроабразивного резания или селективного дезинтегрирования. Предложено описание напряженно-деформированного состояния трещины в абразиве из медного шлака на основании учета нелокальных взаимодействий частиц континуума. Рассматривается плоская трещина в состоянии равновесия. Берега трещины плавно смыкаются в ее углах, имея общую касательную плоскость. В классической модели в этом случае возникают бесконечные напряжения. В работе показано, что берега трещины могут рассматриваться как материальные поверхности, обладающие своими материальными

характеристиками, и как упругие балки конечной толщины. В качестве примера для оценки степени раскрытия трещины в абразивной частице в естественных условиях использована модель поверхностного слоя в виде балки. Показано, что такое раскрытие имеет малую, но конечную величину. В работе показано, что из-за наличия внутренних начальных напряжений в частице медного шлака, порожденных нелокальными взаимодействиями частиц упругого континуума, в ней возможно появление микротрещин, а значит существование начальной поврежденности, влияющей на производительность гидроабразивного резания.

Ключевые слова: моделирование, абразив, медный шлак, гидроабразивное резание, селективное разрушение, дезинтегратор, трещина.

Финансирование: исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 25-19-00811.

Ссылка для цитирования:

Барсуков Г.В. Исследование начальной поврежденности абразива из медного шлака для повышения производительности гидроабразивного резания / Г.В. Барсуков, В.С. Шоркин, В.В. Власов, А.В. Петрухин, Е.Д. Ноздрин // *Транспортное машиностроение*. – 2025. – № 12. – С. 39-47. doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-39-47.

Original article
Open Access Article

STUDY OF THE INITIAL DAMAGE OF A COPPER SLAG ABRASIVE TO INCREASE THE PRODUCTIVITY OF HYDROABRASIVE CUTTING

Gennady Valeryevich Barsukov^{1✉}, Vladimir Sergeevich Shorkin², Viktor Viktorovich Vlasov³, Anton Vladimirovich Petrukhin⁴, Egor Dmitrievich Nozdrin⁵

^{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 v.s.shorkin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9147-2315>

³ vlasv90@mail.ru

⁴ antosha.petrukhin@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-4798-8224>

⁵ e.nozdrin@outlook.com

Abstract

The results of solving the problem of predicting the occurrence of microcracks and assessing the initial damage of a copper slag particle, which can develop under the influence of an external load during hydroabrasive cutting or selective disintegration are presented. A description of the stress-strain state of a crack in a copper slag abrasive is proposed based on the consideration of non-local interactions of continuum particles. A plain crack in a state of equilibrium is considered. The crack edges smoothly close in its corners, having a common tangent plane. In the classical model, infinite stresses arise in this case. The paper shows that the crack edges can be considered as material surfaces with their own material characteristics and as elastic beams

of finite thickness. As an example, a model of the surface layer in the form of a beam was used to assess the degree of crack opening in an abrasive particle in natural conditions. It is shown that such an opening has a small but finite value. The paper shows that due to the presence of internal initial stresses in a copper slag particle generated by non-local interactions of elastic continuum particles, microcracks may appear in it, which means the existence of initial damage affecting the performance of hydroabrasive cutting.

Keywords. modeling, abrasive, copper slag, hydroabrasive cutting, selective destruction, disintegrator, crack.

Funding: the paper is funded by the Russian Science Foundation project No. 25-19-00811.

Reference for citing:

Barsukov GV, Shorkin VS, Vlasov VV, Petrukhin AV, Nozdrin ED. Study of the initial damage of a copper slag abrasive to increase the productivity of hydroabrasive cutting. *Transport Engineering*. 2025;12:39-47. doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-39-47.

Введение

В современной промышленности одним из важных аспектов производства является обеспечение высокого качества поверхности деталей после их обработки. В последние годы гидроабразивное резание (ГАР) привлекает большой интерес, поскольку это универсальный инструмент, который используется во многих производственных процессах для резания различных материалов. ГАР является альтернативным методом обработки труднообрабатываемых материалов и сплавов, таких как: лазерное, плазменное и электроэрозионное резание. В качестве режущего инструмента технология ГАР использует высокоскоростную струю воды (до 1000 м/с), смешанную с абразивными частицами диаметром 0,15...0,40 мм, истекающую из сопла диаметром около 1 мм.

В настоящее время ГАР является высокоэффективной и экологически чистой технологией, широко применяющейся в машиностроении, автомобилестроении, аэрокосмическом производстве, микроэлектронике, пищевой промышленности, медицине, добыче угля, нефтегазовом машиностроении, морском судостроении и др.

Стоимость гидроабразивной резки в большей степени определяется затратами на абразив (включая стоимость его утилизации). Она может составлять около 70 % от общей стоимости резки в зависимости от

минутного расхода, количества режущих головок, рабочего давления и т.д. [1].

Традиционным абразивом для гидроабразивного резания является гранатовый песок. В России отсутствует его производство в промышленных масштабах. В 2023 году мировое производство граната, включая шесть основных минералов: гроссуляр, пироп, альмандин, спессартит, андрадит и уваровит, достигло примерно 0,97 млн тонн. Основными производителями являются Австралия (40,2 %), Китай (31,9 %) и Южная Африка (18,5 %) [2].

Снижение общих затрат на процесс ГАР может быть достигнуто за счет замены граната недорогими абразивами, например, медным шлаком, что не только снижает эксплуатационные расходы ГАР, но и способствует ресурсосбережению и уменьшению вредного воздействия на окружающую среду, которое связано с утилизацией отходов цветной металлургии [3].

Отходы резки гранита и лом шлифовальных кругов также рассматриваются как перспективные источники абразивного сырья для ГАР, при этом отходы резки гранита традиционно хранятся на полигонах из-за отсутствия экономически выгодной переработки [4]. Использование отходов шлифовальных кругов в качестве абразива для ГАР также позволяет избежать

дорогостоящей утилизации и уменьшить проблемы с захоронением отходов [5].

Другой альтернативой гранату является стальная дробь, которая имеет более высокую плотность и массу. Кроме того, благодаря своей магнитной природе, она легко поддается сбору и пригодна для вторичной переработки [5]. Оксид алюминия, карбид кремния, кварцевый песок также возможно использовать для гидроабразивного резания.

Для эффективного гидроабразивного резания требуется абразивный материал с соотношением твердости абразива к обрабатываемой детали от 1,0 до 1,1, при этом превышение этого значения не приводит к значительному повышению эффективности удаления материала [6].

Использование твердых абразивов подходит для быстрого удаления материала, в то время как использование мягких, хрупких абразивов может подойти для финишной обработки. Более мелкие частицы позволяют создавать более гладкие поверхности. Однако скорость резания материала снижается при использовании более мелких частиц [4].

Регес А. и др. [7] провели исследования по обработке титана различными абразивами: гранатом, оливином и измельченным стеклом. Согласно результатам эксперимента, гранат обеспечивал наилучшую скорость и глубину резания. К тому же применение корундовых абразивов существенно уменьшает срок службы фокусирующих трубок. Это имеет большое значение и ограничивает применение отходов шлифовальных кругов, оксида алюминия и карбида кремния для ГАР.

Известны исследования, в которых медный шлак, кварцевый песок и гранит рассматривались как альтернатива гранату для гидроабразивного резания. Однако оказалось, что режущая способность медного шлака очень плохая даже при медленной подаче, не превышающей 20 мм/мин. Увеличение дозировки абразива не дало какое-либо существенное преимущество, а это означает, что его мощность эрозии явно недостаточна [8]. Значительное снижение скорости резки также наблюдается при использовании кварцево-

го и гранитного песка. Абразивные материалы этих типов показали образование глубоких бороздок на поверхности реза.

Низкая скорость резания частиц медного шлака объясняется его преимущественно аморфным (стекловидным) состоянием с зернами фаялита и ферросилита, что характерно для оксидно-силикатных систем, подвергнутых быстрому охлаждению от высоких температур. Такая структура согласуется с условиями получения медного шлака путем охлаждения горячей массы водой или сжатым воздухом.

В работах [9, 10] показано и экспериментально доказано, что термическая обработка медного шлака для гидроабразивного резания способствует существенному увеличению скорости обработки, сравнимому с абразивными свойствами гранатового песка. Термическая обработка при выбранных условиях способствует росту кристаллитов, преимущественно представленных соединениями Al_2SiO_5 – 40...55 % и $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$ – 28...35 %. Также в составе присутствуют Fe_2O_3 – 9...12 % и $ZnFe_2O_4$ – 8...10 %.

Использование шлаковых отходов в качестве вторичного сырья представляет собой важную задачу, учитывая значительные запасы этих материалов, образовавшиеся в России в результате производства цветных металлов. Применение шлаков в процессе гидроабразивной резки позволит не только смягчить экологические последствия их складирования, но и уменьшить зависимость отечественных производств от импортных поставок гранатового абразива.

Однако, прежде чем приступить к термической обработке частиц медного шлака, важно извлечь некристаллическую твердую силикатную фазу, находящуюся в промежутках между кристаллами фаялита и ферросилита. Это достигается посредством целенаправленного разрушения и высвобождения минеральных компонентов шлака, характеризующихся упорядоченной кристаллической решеткой и значительной прочностью.

Следовательно, селективное разрушение частиц шлака, включающее в себя разрушение структуры материала в про-

цессе дробления или измельчения, например, в процессе дезинтегрирования, позволяет осуществить контролируемое разделение его составных фаз на отдельные структуры. Создание модели, имитирующей избирательное разрушение частиц медного шлака, требует теоретического описания каждой отдельной трещины. Это относится как к трещинам внутри структуры шлакового зерна, обладающей одно-

родными свойствами, так и к трещинам, возникающим на границе срастания кристаллических фаз.

Исходя из вышесказанного, основное внимание в данной статье направлено на решение задачи прогнозирования возникновения микротрещин и оценку начальной поврежденности частицы медного шлака, которая может развиваться под действием внешней нагрузки.

Метод решения задачи о поврежденности частицы медного шлака

Для построения метода решения задачи о поврежденности частицы медного шлака сначала делается упрощение рассматриваемой ситуации за счет предположения о том, что поверхностный слой материала, прилегающий к берегам трещины ΔA^α и ΔA^β , можно рассматривать как тонкий слой с постоянными по его нормальному сечению свойствами.

Для произвольного тела B ограниченного плоской поверхностью A (берега трещины ΔA^α и ΔA^β) область A , занятая им, представлена в виде:

$$\Lambda = \Lambda_V + \Lambda_A \quad (1)$$

Здесь трехмерная Λ_A – область, занимаемая слоем B_A материала тела B , прилегающим к поверхности A . Слой B_A с переменными материальными характеристиками заменен слоем эффективной толщины материала с постоянными, но отличными от объемных значений свойствами (рис. 1). Эффективная толщина слоя h_{eff} приравнена к эффективной толщине слоя с переменной плотностью потенциальной энергии. Она определяется выражением:

$$h_{eff} = \frac{1}{\Delta w_A} \int_0^\infty \Delta w dh = \frac{2W_s}{w_V} \quad (2)$$

Учтено, что ожидаемое значение величины h_{eff} намного меньше размеров тела B и радиуса кривизны поверхности A , h – текущее значение, отсчитываемое вдоль нормали к поверхности A до точки определения величины $\Delta w = w_V - w_A = 0.5 w_V$.

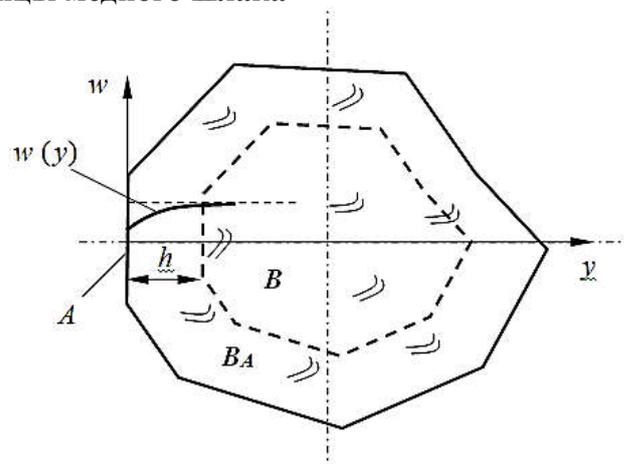


Рис. 1. Схема выделения поверхностного слоя на абразивном зерне с постоянными материальными характеристиками

Fig. 1. Diagram of surface layer separation on an abrasive grain with constant material characteristics

Учитывая, что характер зависимости $\Delta w(h)$ определяется механическими свойствами материала, определяемыми зависимостями $P_0^{(n)}(h)$ и $C^{(m,n)}(h)$, можно считать, что h_{eff} является материальной характеристикой поверхностного слоя. Эта величина выражена через две другие физические характеристики материала поверхностного слоя – объемную плотность внутренней потенциальной энергии бесконечно протяженного тела w_V и его поверхностную энергию W_s .

Напряженное и деформированное состояния материала в объемной части B_V^α тела B^α предполагаются однородными, так как их возмущения, вызванные появлением свободной границы, здесь гаснут, а возмущения, связанные с ее кривизной, малы по сравнению с возмущениями в по-

верхностном слое B_A^α , не замененном слоем с осредненными характеристиками. Поэтому действие объемной части B_V^α тела B^α на слой B_A^α предлагается характеризовать действием распределенной вдоль срединной поверхности осредненного слоя B_A^α нагрузки p . Более того, предлагается учитывать при этом только нормальную к плоскости A нагрузку. Со стороны слоя B_A^α на слой B_A^α действует не-

локальная сила притяжения $f_A^{\beta\alpha}(y)$ (рис. 2).

Форма балки, которая моделирует поверхностный слой толщины $\delta = h_{eff}$, характеризуется зависимостью смещения $u_2^\alpha \equiv v = v(x)$ срединной поверхности слоя от $y = (1/2)\delta$ до текущего значения. Она неизвестна и подлежит определению. Определение делается с помощью основного дифференциального уравнения балки:

$$q(x, y) = p - f_A^{\beta\alpha}(x, y). \quad (3)$$

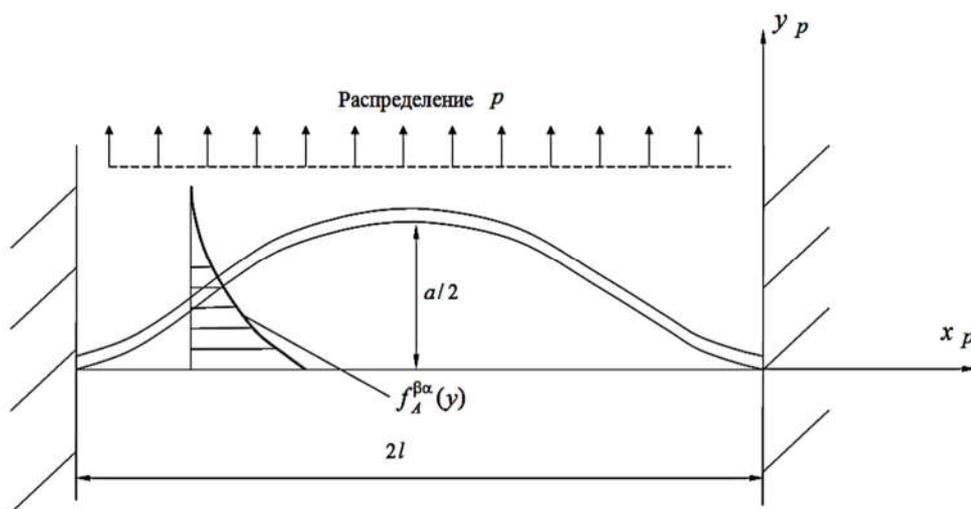


Рис. 2. Расчетная схема для поверхностного слоя в форме балки
Fig. 2. Design diagram for the surface layer in the form of a beam

При этом уравнение, связывающее изгибающий момент $M(x)$ с распределенной нагрузкой $q(x)$ записывается в виде:

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = q(x). \quad (4)$$

Зависимость $v = v(x) \geq 0$ – это прогиб балки k^α в сторону тела B^α считается равной перемещению точек участка ΔA^α плоскости контакта $A^{\beta\alpha} \equiv A$ из отсчетного состояния сплошного тела B в его текущее состояние с трещиной параллельно нормали \vec{n}^α .

Основой расчета нелокальных сил $q_{(\alpha\alpha)}(x)dx$ и $q_{(\beta\alpha)}(x)dx$, действующих на балку со стороны B_V^α и B_V^β является модель расчета адгезионного взаимодействия твердых тел $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$, представленная в

работе [11]. Силы $q_{(\alpha\alpha)}(x)dx$ и $q_{(\beta\alpha)}(x)dx = f_A^{\beta\alpha}(y)dx$ являются дальнедействующими. Предполагается, что каждая из них действует на элемент балки – ее частицы $d_x k^\alpha$ объемом $d_x V^{k\alpha} = \delta \cdot s \cdot dx$ ($s = 1$ – ширина балки).

Эти силы действуют со стороны мысленных полубесконечных стержней – цилиндров dC^α и dC^β материала тел B^α и B^β . Их объединение образует каждое из этих тел. Стержни перпендикулярны плоскости трещины и имеют площадь сечения $dA^{k\alpha} = s \cdot dx$ ($s = 1$ м). Произвольный стержень – цилиндр dC^α «опирается» на поверхность ΔA^α , а стержень – цилиндр dC^α – на поверхность ΔA^β . Расстояние

между основаниями стержней dC^α и dC^β равно 2ν .

В соответствии с этими представлениями, сила притяжения частицы $d_x k^\alpha$ к полубесконечному цилиндру dC^β из тела B^β определяется формулой:

$$q_{(\beta\alpha)} d A^{k^\alpha} \equiv f_{(\beta)} s dx = \beta (2e^{-\xi} - e^{-2\xi}) \left[\left(\frac{\Phi_0^{(2)}}{\beta^3} \right) + \left(\frac{\Phi_0^{(3)}}{\beta^6} \right) (2e^{-\xi} - \frac{1}{2}e^{-2\xi}) \right] s dx. \quad (5)$$

На ту же частицу со стороны полубесконечного цилиндра dC^α из тела B^α действует сила притяжения:

$$q_{(\alpha\alpha)} d A^{k^\alpha} \equiv f_{(\alpha)} s dx = \beta \left[\left(\frac{\Phi_0^{(2)}}{\beta^3} \right) + \frac{3}{4} \left(\frac{\Phi_0^{(3)}}{\beta^6} \right) \right] s dx, \quad s = 1 m \quad (6)$$

Здесь введено обозначение:

$$\xi = 2\beta\nu, \quad x = l\eta. \quad (7)$$

После этого линейная плотность q силы, действующей на балку k^α , должна вычисляться по следующей формуле:

$$q = \beta \left\{ \begin{aligned} & [1 - (2e^{-\xi} - e^{-2\xi})] \left(\frac{\Phi_0^{(2)}}{\beta^3} \right) + \\ & + \left[\frac{3}{2} - (2e^{-\xi} - \frac{1}{2}e^{-2\xi}) (2e^{-\xi} - e^{-2\xi}) \right] \left(\frac{\Phi_0^{(3)}}{\beta^6} \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Учитывая, что модуль Юнга и момент инерции сечения балки: $E = const$, $I = const$, можно получить уравнение для определения зависимости $\xi = \xi(\eta)$ с помощью которой определяется форма трещины:

$$\frac{d^4 \xi}{d\eta^4} = \frac{2\beta l^4}{EI} q s = \sigma, \quad (9)$$

$$\sigma = \alpha \left\{ \begin{aligned} & [1 - (2e^{-\xi} - e^{-2\xi})] \left(\frac{\Phi_0^{(2)}}{\beta^3} \right) + \\ & + \left[\frac{3}{2} - (2e^{-\xi} - \frac{1}{2}e^{-2\xi}) (2e^{-\xi} - e^{-2\xi}) \right] \left(\frac{\Phi_0^{(3)}}{\beta^6} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{l^4 \beta}{EI}, \quad \sigma = \frac{2\beta l^4}{EI} q s, \quad s = 1. \quad (11)$$

В силу описанной симметрии краевые условия задаются при $\eta = \pm 1$. Они имеют вид:

$$\xi|_{\eta=\pm 1} = 0, \quad \left. \frac{d\xi}{d\eta} \right|_{\eta=\pm 1} = 0. \quad (12)$$

Приближенное решение определяется методом Ритца. В соответствии с ним:

$$J = \int_{-1}^1 \left[\left(\frac{d^2 \xi}{d\eta^2} \right)^2 - \sigma(\xi) \xi \right] d\eta. \quad (13)$$

Неизвестная функция $\xi = \xi(\eta)$ заменяется своим приближением. Оно пред-

ставляет собой линейную комбинацию N базисных функций $u_n(\eta)$ с неизвестными коэффициентами a_n , удовлетворяющих краевым условиям (12):

$$\xi = \xi(\eta) = \sum_{n=1}^N a_n u_n(\eta) \quad (14)$$

В качестве пробных функций, учитывая условия симметрии, выбираются четные функции аргумента η . Коэффициенты a_n определяются на основании условия стационарности функционала (13).

Результаты расчета и заключение

Рассматривается случай, когда нагрузка на поверхностный слой – балку создается только внутренними напряжениями, созданными межатомными взаимодействиями в отсутствие внешних механических воздействий. Поверхностный слой находится в естественных условиях.

$$\beta \times 10^{-10} \text{ 1/m} = 0,65, \lambda \times 10^{-9} \text{ N/m}^2 = 74, \mu \times 10^{-9} \text{ N/m}^2 = 63, E = 160 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2, \quad (15)$$

$$\left(\frac{\Phi_0^{(2)}}{\beta^3} \right) = 2.8 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3, \quad \left(\frac{\Phi_0^{(3)}}{\beta^6} \right) = 0.02 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3.$$

Рассмотрен только простейший случай, когда:

$$N = 1, \quad u_1(\eta) \equiv u(\eta) = a(1 - \eta^2)^2 \quad (16)$$

При проведении расчетов сначала определили поверхностную энергию W_p и эффективную толщину δ пограничного слоя. Они вычислялись в предположении о том, что противоположные берега трещины не влияют на их значения. Это допущение является грубым, но упрощающим решение задачи.

Получено:

$$W_p = 1.28 \text{ J/m}^2, \quad \delta = 13 \cdot 10^{-10} \text{ m} \approx 5l_a$$

$$(l_a = 2.7 \cdot 10^{-10} \text{ m} - \text{межатомное расстояние}).$$

Величина l определена на основании представленной в работе [13] приближенной оценки длины устойчивой трещины:

$$l \approx \frac{W_p E}{q^2}. \quad (17)$$

Получена следующая оценка:

$$l \approx 3 \cdot 10^{-9} \text{ m} \approx 10 l_a.$$

Так как в химическом составе медного шлака значительное содержание оксида кремния, рассмотрим его в качестве основного материала, для которого известны следующие значения параметров [12]:

В результате проведенных расчетов оказалось, что $a = 6.2$. Коэффициент a совпадает с максимальным безразмерным значением текущего расстояния между берегами трещины: $a = \xi_{\max} = 2\beta v_{\max}$. Используя это, получено реальное значение максимального расстояния между противоположными точками берегов: $v_{\max} = a/2\beta = 4.6 \cdot 10^{-10} \text{ m}$.

Таким образом, из-за наличия внутренних начальных напряжений в частице медного шлака, порожденных нелокальными взаимодействиями частиц упругого континуума, в нем возможно появление микротрещин, а значит существование начальной поврежденности, которая может развиваться под действием внешней нагрузки. Эти микротрещины имеют заостренные на краях поверхности контакта берегов при отсутствии стремящихся к бесконечности напряжений в их окрестности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Барсуков Г.В., Степанова Е.Ю., Кожус О.Г. Инновационные технологии резания сверхзвуковой струей жидкости: экономика, рынок, состояние и перспективы развития // Вестник Брянского государственного технического университета: научно-технический журнал. Транспортное машиностроение. 2017. № 1 (54). С. 243-253.
2. U.S. Geological Survey, 2024, Mineral commodity summaries 2024: U.S. Geological Survey. 212 p. <https://doi.org/10.3133/mcs2024>
3. Барсуков Г. В., Кожус О. Г., Винокуров А. Ю. Исследование абразивной способности искусственных и природных абразивов, обеспечивающих производительность гидроабразивного резания // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. №. 2. С. 34-40.
4. Aydin G., Kaya S., Karakurt I. Utilization of solid-cutting waste of granite as an alternative abrasive in abrasive waterjet cutting of marble. J Clean Prod. 2017. Vol. 159. pp. 241–247. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.04.173.

5. Cha Y., Oh T.M., Joo G.W., Cho G.C. Performance and reuse of steel shot in abrasive waterjet cutting of granite. *Rock Mech Rock Eng.* 2021. Vol. 54 (3). pp. 1551–1563.
6. Cha Y., Oh T.M., Joo G., Cho G. Effect of Abrasive Feed Rate on Rock cutting Performance of Abrasive Water Jet. *Rock Mech Rock Eng.* 2021. Vol. 52 (9). pp. 3431–3442. doi:10.1007/S00603-019-01784-X/FIGURES/12.
7. Percec A. Experimental research into alternative abrasive material for the abrasive water-jet cutting of titanium. *The international journal of advanced manufacturing technology.* Springer-Verlag London Ltd. 2018. Vol. 97(1). pp. 1529-1540.
8. Sitek L., Martinec P. Abrasives and possibilities of increase in efficiency of abrasive waterjets. *MM Science Journal.* 2016. pp. 877-881. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016_03_201603
9. Barsukov G.V., Zhuravleva T.A., Kozhus O.G. Study of the effect of heat treatment of copper slag particles on abrasiveness for abrasive waterjet cutting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2023. Vol. 129(9). pp. 4293–4300. URL:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-12587-4>

10. Барсуков Г.В., Тарапанов А.С., Журавлева Т.А., Кожус О.Г., Прасолов Е.А., Петрухин А.В. Разработка технологии и технологических принципов повышения прочности частиц медного шлака для гидроабразивного резания // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* 2023. №6(362). С. 61-68.
11. Romashin, S.N., Shorkin, V.S. Variant of the Relationship between the Mechanical and Adhesive Properties of Solid Materials. *Mech. Solids.* 2020. Vol. 55(8). pp.1392–1405. doi:10.3103/S0025654420080233
12. Shorkin, V.S., Vilchevskaya, E.N., Altenbach, H. Linear theory of micropolar media with internal nonlocal potential interactions. *Zeitschrift fur angewandte Mathematik und Mechanik.* 2023. Vol.103(11). P.e202300099. doi:10.1002/zamm.202300099.
13. Raiser Yu.P. Physical principles of the theory of brittle fracture cracks. *Soviet Physics Uspekhi.* 1970. Vol.13(1). pp. 129-139.

REFERENCES

1. Barsukov GV, Stepanova EYu, Kozhus OG. Innovative cutting technologies with supersonic liquid jet: economy, market, state and development outlooks. *Bulletin of Bryansk State Technical University.* 2017;1(54):243-253.
2. US Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2024: U.S. Geological Survey [Internet]. 2024. Available from: <https://doi.org/10.3133/mcs2024>.
3. Barsukov GV, Kozhus OG, Vinokurov AYU. Study of the abrasive ability of artificial and natural abrasives ensuring the performance of hydroabrasive cutting. *Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology.* 2018;2:34-40.
4. Aydin G, Kaya S, Karakurt I. Utilization of solid-cutting waste of granite as an alternative abrasive in abrasive waterjet cutting of marble. *J Clean Prod.* 2017;159:241–247. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.04.173.
5. Cha Y, Oh TM, Joo GW, Cho GC. Performance and reuse of steel shot in abrasive waterjet cutting of granite. *Rock Mech Rock Eng.* 2021;54(3):1551–1563.
6. Cha Y, Oh TM, Joo G, Cho G. Effect of Abrasive Feed Rate on Rock cutting Performance of Abrasive Water Jet. *Rock Mech Rock Eng.* 2021;52(9):3431–3442. doi:10.1007/S00603-019-01784-X/FIGURES/12.
7. Percec A. Experimental research into alternative abrasive material for the abrasive water-jet cutting of titanium. *The international journal of advanced manufacturing technology.* Springer-Verlag London Ltd. 2018;97(1):1529-1540.
8. Sitek L, Martinec P. Abrasives and possibilities of increase in efficiency of abrasive waterjets. *MM Science Journal [Internet].* 2016:877-881. Available from: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016_03_201603
9. Barsukov GV, Zhuravleva TA, Kozhus OG. Study of the effect of heat treatment of copper slag particles on abrasiveness for abrasive waterjet cutting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology [Internet].* 2023;129(9):4293–4300. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-12587-4>
10. Barsukov GV, Tarapanov AS, Zhuravleva TA, Kozhus OG, Prasolov EA, Petrukhin AV. Development of technology and technological principles for increasing the strength of copper feed particles for hydroabrasive chocking. *Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology.* 2023;6(362):61-68.
11. Romashin SN, Shorkin VS. Variant of the Relationship between the Mechanical and Adhesive Properties of Solid Materials. *Mech. Solids.* 2020;55(8):1392–1405. doi:10.3103/S0025654420080233.
12. Shorkin VS, Vilchevskaya EN, Altenbach H. Linear theory of micropolar media with internal nonlocal potential interactions. *Zeitschrift fur angewandte Mathematik und Mechanik.* 2023;103(11):202300099. doi:10.1002/zamm.202300099.
13. Raiser YuP. Physical principles of the theory of brittle fracture cracks. *Soviet Physics Uspekhi.* 1970;13(1):129-139.

Информация об авторах:

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

Шоркин Владимир Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической физики и математики, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, тел. +79606550077.

Власов Виктор Викторович – кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Новые

абразивные материалы», Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, тел. +79155017149.

Петрухин Антон Владимирович – стажер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы», Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, тел. +79208166698.

Ноздрин Егор Дмитриевич – лаборант научно-исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы», Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, тел. +79538177065.

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.

Shorkin Vladimir Sergeevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Technical Physics and Mathematics, Orel State University named after I.S. Turgenyev; phone: +79606550077.

Vlasov Viktor Viktorovich – Candidate of Technical Sciences, Researcher the Advanced Production Tech-

nologies Research Laboratory, Orel State University named after I.S. Turgenyev; phone: +79155017149.

Petrukhin Anton Vladimirovich – Research Trainee at the Advanced Production Technologies Research Laboratory, Orel State University named after I.S. Turgenyev; phone: +79208166698.

Nozdrin Egor Dmitrievich – Laboratory Assistant at the Advanced Production Technologies Research Laboratory, Orel State University named after I.S. Turgenyev; phone: +79538177065.

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 15.10.2025; одобрена после рецензирования 10.11.2025; принята к публикации 27.11.2025. Рецензент – Нагоркин М.Н., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 15.10.2025; approved after review on 10.11.2025; accepted for publication on 27.11.2025. The reviewer is Nagorkin M.N., Doctor of Technical Sciences, Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.