

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-140-150

УДК 620.191, 629.017

Моделирование износа алюминиевого сплава частицами SiO₂ Евгений Александрович Строкач¹✉, Алексей Алексеевич Пожидаев²

^{1,2} Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация

¹ evgenij.strokatsch@mai.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5376-1231>

² aapozhidaev@mai.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7667-5392>

Аннотация

Введение. Современные методы моделирования процесса эрозии материалов твердыми частицами позволяют на микроуровне оценить влияние условий движения частиц, контакта с поверхностью, их формы и материала. Известные зарубежные работы по изучению пар эродента и алюминиевых, титановых сплавов и сталей не дают правильной оценки влияния трения и вращения частиц на остаточное напряженно-деформированное состояние и глубину износа при относительно высоких скоростях частиц. Мало изученным остается вопрос кратковременного нагрева приповерхностного слоя, что при высоких температурах может влиять на свойства материала. Устранение такой неопределенности повысит предиктивную точность модели абразивного износа.

Метод. В работе представлены результаты двумерного конечно-элементного моделирования эрозионного износа поверхности распространенного алюминиевого сплава Al6061-T6 при взаимодействии с частицами двуокиси кремния (SiO₂). Упругопластическое поведение материала поверхности и условия разрушения задавались моделью Джонсона–Кука. **Основные результаты.** Для оценки взаимовлияния следов множественных ударов частиц и изменения напряженно-деформированного состояния поверхности выполнено моделирование последовательных ударов трех групп жестких частиц диаметром 250 мкм со скоростью 155 м/с под углом 45°. Изучено изменение эквивалентных напряжений в образце после каждого удара. Проведена оценка влияния трения между частицами SiO₂ и поверхностью, а также вращения сферических частиц и его направления.

Обсуждение. Показано, что учет трения влияет на профиль эквивалентных напряжений уже после первого удара и сохраняет влияние в дальнейшем. Зависимость результатов от направления вращения частиц при скорости 1000 об/мин проявляется только после второго удара и усиливается после удара третьей группы частиц. Предполагается, что для алюминиевых сплавов серии 6000 и сферических частиц SiO₂ другого размера полученные зависимости будут качественно сохраняться. Дальнейшие исследования предполагают анализ влияния формы несферических частиц SiO₂ при вращении, важность учета деформируемости частиц при ударе, а также воздействие этих эффектов при большем количестве ударов и различных условиях контакта.

Ключевые слова

эрозия твердыми частицами, абразивный износ, FEA-моделирование эрозии, ANSYS Explicit, остаточные напряжения, модель Джонсона–Кука, Al6061

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № FSFF-2023-0006.

Ссылка для цитирования: Строкач Е.А., Пожидаев А.А. Моделирование износа алюминиевого сплава частицами SiO₂ // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 140–150. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-140-150

Numerical study of SiO₂ particle erosion of an aluminum alloy

Evgeny A. Strokach¹✉, Alexei A. Pozhidaev²

^{1,2} Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation

¹ evgenij.strokatsch@mai.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5376-1231>

² aapozhidaev@mai.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7667-5392>

© Строкач Е.А., Пожидаев А.А., 2025

Abstract

Computational methods used to simulate solid particle erosion have advanced so far being able to estimate partial effect of various processing factors on microlevel, such as particle-surface contact, its particle material, and shape, etc. The published activities taken to study different effects in this aspect for popular aluminium or titanium alloys and steels still have a gap in knowledge addressing some process parameters. The influence of particle rotation and its direction on stress-strain state and wear depth is still understudied. The impact of friction consideration in relatively high-speed contacts should also be studied, as well as the surface layer heating effect which may influence the material strength properties when the temperatures get high. Understanding these effects would increase the predictive ability of the erosion model and its accuracy — which is presented in our 2D simulation study for SiO_2 solid particles and a widespread Al6061-T6 alloy. The elastic-plastic and failure properties of the surface material were presented by the Johnson-Cook model. To estimate the influence of multiple impacts on the stress-strain state, three sequential rigid impacts of 250 μm particles at 45° and 155 m/s were modeled. Main attention was driven to the evolution of equivalent von-Mises stresses in the sample after each impact and its dependence on the friction and rotation of particles. It was shown that the effect of friction can be noticed after the first impact, remaining high throughout the simulation. Whereas the influence of rotation direction at 1000 rpm was noticeable after the second impact and tended to increase after the third impact. It is assumed that for other 6000 series aluminium alloys being eroded by spherical SiO_2 particles with differing diameters the erosive behavior would keep. However, future studies should be addressed to the analyzing of non-spherical particles rotation, consideration of particle deformation, and to studies of these parameters including more impacts and different contact properties in complex.

Keywords

solid particle erosion, abrasive wear, FEA erosion simulation, ANSYS Explicit, residual stresses, Johnson-Cook model, Al6061

Acknowledgements

The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant No. FSFF-2023-0006.

For citation: Strokach E.A., Pozhidaev A.A. Numerical study of SiO_2 particle erosion of an aluminum alloy. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 140–150 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-140-150

Введение

Эрозионный абразивный износ целых узлов и отдельных деталей является актуальной проблемой как для перспективных образцов специальной техники [1–3], так и распространенным явлением в гражданской машиностроительной отрасли. Современные подходы к моделированию абразивного износа, опираясь на обширный эмпирико-аналитический опыт его оценки и базу свойств материалов, связаны с численным моделированием, в основном двумя классами методов. Так, методы вычислительной гидрогазодинамики способны оценить распространение гетерогенного потока с частицами на уровне узла или всей машины, в зависимости от задачи и доступных ресурсов — известно множество отечественных и зарубежных расчетно-экспериментальных работ с применением этого подхода [4, 5]. Для оценки скорости износа поверхности в этой постановке в основном применяются полученные экспериментально или аналитически формулировки. Другие подходы на основе методов конечных элементов (Finite Element Analysis, FEA), или метода сглаженных частиц (Smooth Particle Hydrodynamics, SPH) и его расширений, позволяют на микроуровне рассмотреть процесс эродирования каждой частицей, для чего требуется задание механических свойств поверхности и частиц, а также условий их натекания. Это дает возможность связать микропараметры процесса и свойства материалов с режимными характеристиками работы изделия в дальнейшем, а также получить ценную информацию о процессах в приповерхностном слое детали и влиянии множества параметров частиц, потока, поверхности и т. п., что сложно, дорогостояще и, во многих случаях,

невозможно выявить экспериментально. Как и применение методов вычислительной гидрогазодинамики, FEA- и SPH-моделирование эродирования частицами получило резкое развитие в первую очередь благодаря росту вычислительных мощностей.

В работе [6] выполнено моделирование эродирования системы $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ частицами теплозащитных покрытий в двумерной осесимметричной постановке с учетом трения между частицами разной формы и поверхностью. В [7] применен расширенный метод конечных элементов для моделирования роста трещин в теплозащитном покрытии. В работе [8] изучена в 2D осесимметричной постановке эрозия сплава SS316 части разной формы. Получено, что размер частицы прямо влияет на остаточные напряжения сжатия в осевом и радиальном направлениях. Повышение скорости, и, соответственно, кинетической энергии, также приводит к росту напряжений и глубины их распространения в осевом и радиальном направлениях. Отмечено, что температура частиц оказывает меньшее влияние. В [9] проведено моделирование эродирования Ti6Al4V стальной частицей. Пластичность и условие разрушения материала поверхности задавались моделями Джонсона–Кука. Частицы представлялись абсолютно твердыми телами, а трение задавалось зависимостью Coulomb с коэффициентом 0,2. Заметим, что авторы работы [9] основывались на исследовании [10], где было показано, что размер сферической частицы слабо влияет на скорость эродирования, а для точного моделирования достаточно трех частиц. В [11] проверено воздействие частицы глиноземного песка размером от 42 до 50 мкм на основу из стали SAE213-T12 и разнообразные вольфрам-кобальтовые покрытия. Для покры-

тий и основы задавались упругопластичные свойства, а для частиц — упругие при скоростях 50 и 100 м/с. Для моделирования трения выбрана зависимость Coulomb. В работе [12] детально рассмотрен процесс дробления частицы при ударе и его влияние на эрозионный износ. Энергия, затрачиваемая на разрушение частицы, может составлять около 20–30 % от начальной кинетической энергии частиц [13]. В работе, применяя FEA- и SPH-методы для разных частей поверхности, изучено дробление хрупкой частицы, свойства которой задавались моделью Джонсона–Холмквиста, а для материалов образца — моделью Джонсона–Кука. Показано, что угол падения является важным фактором разрушения эродента, а абсолютно жесткие и твердые деформируемые частицы одинаково увеличивали внутреннюю энергию образца. Интересное исследование проводилось для бескислородной меди — жесткие угловатые частицы, наследуя характерные формы карбида кремния SiC, оксида алюминия Al₂O₃, кварца подавались на представленную SPH-частицами поверхность с упругопластическим поведением по модели Джонсона–Кука и уравнением состояния Ми–Грюнейсена. По форме кратера и углу отскока результаты расчетов хорошо совпали с экспериментом. Получено, что механизм износа в основном зависит от положения центра масс при контакте с поверхностью, угловатости и угла падения. В работе [14] исследован износ сплава Ti6Al4V при трех значениях температур (300 К, 423 К, 623 К). Отметим, что максимальный износ был получен для средней и меньшей температуры. Еще один пример использования подхода SPH представлен в [15], где медная поверхность с упругопластическими свойствами по модели Джонсона–Кука эродировалась угловатыми частицами при скоростях до 90 м/с. Авторы показали, что учет деформируемости частиц может давать изменение скорости износа на 30 %. Ранее [5] были рассмотрены исследования в конечноэлементной (Finite Element Analysis, FEA) постановке, связанные с моделированием эрозии и исследованием свойств материала [16], эрозионной стойкости Ti–Ni покрытий и Ti6Al4V [17], высокоскоростной деформации образца [18]. Известны и другие работы по моделированию эродирования твердыми частицами в 3D- и 2D-постановках, с помощью различного программного обеспечения (Abaqus, ANSYS/LS-DYNA), различных сплавов и покрытий, композитных материалов [19–31]. Как видно, FEA- и SPH-моделирование процесса столкновения твердых частиц и поверхности применяется повсеместно, и посвящено различным вопросам отработки методики. В основном упругопластическое поведение материала описывается уравнениями Джонсона–Кука или Джонсона–Холмквиста в связке с уравнением состояния; часто учитывается трение между поверхностью и эродентом, частицы задаются как деформируемыми, так и абсолютно жесткими. Отдельно отмечался [32] недостаток знаний о влиянии вращения частиц на формирование кратера эрозии и сопутствующий унос массы. Несмотря на большой зарубежный опыт моделирования быстротекущего процесса эродирования, разработка методологии моделирования продолжается, и остаются слабо определенные аспекты, требующие

уточнения и универсализации — такие как влияние условий падения и параметров частиц, свойств материала образца и т. п.

В настоящей работе основное внимание уделено некоторым из аспектов — влиянию учета трения между частицами и поверхностью, влиянию вращения частиц, оценке степени нагрева поверхностного слоя при множественном ударе частиц одного диаметра о поверхность.

Материалы и методы

Для моделирования применялся коммерческий пакет Ansys Explicit Dynamics (решатель — Autodyn), была выбрана двумерная постановка задачи. Упругопластическое поведение материала определялось моделью Джонсона–Кука, связывающей напряжения и деформации с учетом высокой скорости деформаций и температуры процесса:

$$\sigma_y = (A + B(\bar{\epsilon}^p)^n)(1 + \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}),$$

где $(\bar{\epsilon}^p)^n$ — эффективная пластическая деформация; $\dot{\epsilon}^*$ — скорость эффективной пластической деформации; $T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$ — гомологическая температура, T_{room} — температура окружающей среды (или референсная температура), T_{melt} — температура плавления материала; A, B, C, n, m — константы.

Для алюминиевого сплава коэффициенты модели Джонсона–Кука получены согласно [20]. Упругое поведение материала задавалось модулем упругости $E = 6,9 \cdot 10^{10}$ Па и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$. Плотность сплава $\rho = 2800$ кг/м³, теплоемкость составила 893 Дж/(кг·К). Условия разрушения материала также соответствует модели Джонсона–Кука с коэффициентами:

$$\bar{\epsilon}_D^p = (d_1 + d_2 \exp(-d_3 \eta))(1 + d_4 \ln \dot{\epsilon}^*)(1 + d_5 T^*),$$

где d_1 – d_5 — константы; $\eta = \frac{\Sigma_h}{\Sigma_e}$, Σ_h — гидростатическая составляющая напряжений, Σ_e — эквивалентные напряжения по Мизесу. Частица двуокиси кремния (SiO₂) представлялась абсолютно жесткой, с плотностью $\rho = 2640$ кг/м³.

Моделирование движения частиц в лагранжевых координатах, их вращения, деформации и перемещения элементов сетки проводились на базе явной разностной схемы интегрирования по времени на основе схемы, предложенной в работах [33, 34]. Система уравнений [33] представлялась (для планарной симметрии) следующим образом:

— уравнение неразрывности:

$$\rho = \frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V},$$

где ρ_0 и V_0 — начальные плотность и объем;

— уравнение сохранения импульса (для направления x):

$$\rho \ddot{x} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y},$$

где $\sigma_{xx} = -(p + q) + s_{xx}p$ — гидростатический компонент тензора, s_{xx} — девиаторный компонент тензора напряжений, q — псевдо-вязкостный член; $\sigma_{xy} = s_{xy}$, $\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x}$, $\dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{x}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} \right)$; $\dot{s}_{xx} = 2G \left(\dot{\epsilon}_{xx} - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \right)$; $\dot{s}_{xy} = 2G \dot{\epsilon}_{xy}$, изменение объема связывалось со скоростью деформации как $\frac{\dot{V}}{V} = \dot{\epsilon}_{xx} + \dot{\epsilon}_{yy}$; G — модуль сдвига;

— уравнение сохранения энергии описывалось в виде:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy}).$$

Ввиду малого относительного времени контакта частиц с поверхностью контактный теплообмен не учитывался, а повышение температуры элементов связано с повышением внутренней энергии через теплоемкость материала, присваиваемого телам (областям сетки).

Полученные уравнения [33] подразумевают, что на основе заданных граничных и начальных условий при интегрировании по времени происходит движение узлов сетки. При рассчитанных ускорениях узла сетки как $\ddot{x} = \frac{F_x}{m_p}$, где m_p — масса, связанная с узлом; F_x — равнодействующая сил, действующих на узел сетки. В момент времени n схема определения скорости и перемещения узла (для направления x), при Δt^n — инкремент по времени в момент времени (на временном шаге n), имеет вид:

$$\dot{x}^{n+1/2} = \dot{x}^{n+1/2} + \ddot{x} \Delta t^n, x^{n+1} = x^n + \dot{x}^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2},$$

$$\Delta t^{n+1/2} = \frac{(\Delta t^n + \Delta t^{n+1})}{2}.$$

Итерационный алгоритм решения включает, после определения и исходя из начальных условий, перемещений узлов, расчет скоростей деформаций элемен-

тов сетки, расчет и обновление параметров состояния элемента (его плотности), обновление напряжений в элементах сетки. Далее, после приложения нагрузок и других граничных условий, суммируются силы, действующие на узлы сетки, рассчитываются и обновляются ускорения узлов, рассчитываются «новые» скорости узлов и снова определяются перемещения узлов.

В настоящей работе основное внимание уделено оценке напряженно-деформированного состояния и износа поверхности при последовательных ударах частиц. При оценке процесса эрозии моделирования удара одной частицы может оказаться недостаточно для проявления некоторых приповерхностных механизмов при износе, кроме того, в реальных случаях на износ может оказывать влияние образование близко лежащих кратеров после удара частиц, а также их перекрытия. Для учета некоторых сценариев таких процессов износа рассматривалось падение 9 частиц, расположенных в три ряда для моделирования трех последовательных ударов приблизительно в одну область поверхности образца. В реальных условиях частицы не располагаются так близко и, как правило, имеют меньшую концентрацию в потоке газа/жидкости. Однако на конкретную область поверхности за весь период действия эродента может приходиться множество ударов частиц с близко лежащими и перекрывающимися кратерами. Так как течение газовой среды не рассматривалось, для упрощения постановки и сокращения расчетных затрат целесообразно рассмотреть модельное расположение частиц в предложенной конфигурации (рис. 1).

Рассмотрим динамику поведения образца при одном из частных случаев натекания — расчеты с другими степенями перекрытия областей контакта частиц с поверхностью, углами падения частиц и т. п. должны быть проведены в дальнейшем и обобщены. Контактное взаимодействие задавалось только между каждой из частиц и поверхностью. На нижней поверхности представительной области образца определялось условие жесткой заделки. Все расчеты проводились при равных задаваемых горизонтальной и вертикальной компонентах скорости частиц 110 м/с при угле падения 45°.

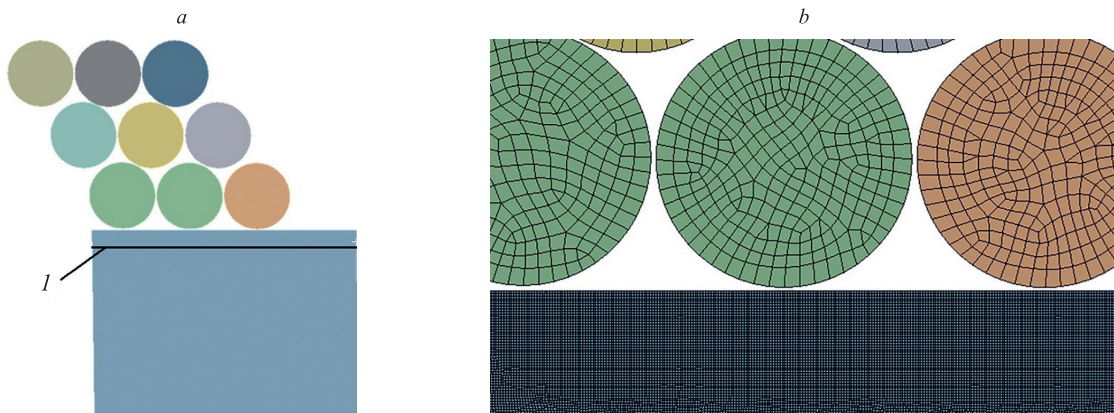


Рис. 1. Двумерная расчетная область.

l — линия снятия напряжений (60 мкм от поверхности) (a); расчетная сетка частиц и поверхности в области контакта (b)

Fig. 1. 2D simulation domain.

l — stress estimation line (60 μm below the surface) (a); particle and sample surface mesh in the contact region (b)

Для упрощения постановки расчета и снижения требуемых вычислительных ресурсов были приняты следующие допущения:

- частицы представлялись абсолютно жесткими — учет упругой деформируемости частиц SiO₂ показал разницу в 2 % по безразмерной скорости эрозии (Erosion Rate, ER) — отношение массы унесенного материала к массе частиц;
- отсутствовало взаимодействие между частицами SiO₂;
- теплообмен между частицами и поверхностью не учитывался из-за малого относительного времени контакта (общее время расчета для моделирования контакта трех рядов частиц с поверхностью — $7 \cdot 10^{-6}$ с);
- относительно малая расчетная область (высота расчетной области образца — 0,75 мм, ширина — 1 мм, диаметр частиц — 0,25 мм) и условие отсутствия на боковых поверхностях перемещений и прохода волн деформаций (предварительное исследование с более широкой областью образца (по 3 мм с каждой стороны — в сумме 7 мм) показало разницу по ER не более 6 %). В то же время пластические деформации существенно убывают к расстоянию 170 мкм от исходной поверхности (23 % общей высоты расчетной области образца);
- частицы расположены близко — отсутствует время для демпфирования колебаний напряженно-деформированного состояния поверхности (рассмотренное расположение соответствует высокой концентрации частиц в пространстве, однако, оценка концентрации и времени между ударами частиц в реальных случаях должны быть целью отдельного исследования). Кроме того, данное допущение вынужденно вводится повсеместно при постановке подобных задач с FEA- и SPH-методами, как показали работы [6–29].

Несмотря на введенные допущения, двумерная расчетная планарная модель позволяла оценить текущее и остаточное напряженное состояние поверхности, и принята достаточной для оценки влияния вращения частиц и учета трения между частицами и поверхностью. Условие контакта дробы и образца включало трение с коэффициентом трения покоя 0,36 и динамическим коэффициентом трения 0,31. В области контакта частиц и поверхности задавалось улучшенное сеточное разрешение, размер ячейки в котором принимался параметром для оценки сеточной сходимости.

Известны расчетные и экспериментальные работы по исследованию эродирования поверхностей, в том числе, алюминиевых сплавов с применением FEA-или SPH-моделирования. Например, в [35] применен пакет ANSYS Explicit Dynamics для оценки износа теплозащитных покрытий 25 мкм частицами с плотностью 2000 кг/м³ на небольшой (относительно размеров частиц) двумерной расчетной области. В [35] также изучено распределение напряжений в материале образца в зависимости от времени эродирования. В работе [36] уделено внимание моделированию влияния вращения угловатых жестких частиц в двумерной SPH-постановке. Отметим, что множественные удары

частиц при наименее «угловатой» конфигурации приводили к картине износа поверхности, подобной на предварительно полученные профили в данной работе. Уже отмеченное исследование [24], направленное на оценку, в том числе, глубины износа сплава 6061 шариками стали в двумерной постановке для множественных ударов с разными межкратерными расстояниями, показало хорошую сходимость модели с экспериментом. В работе [37] на примере многочисленных ударов частицами песка со средним диаметром 800 мкм по стальной поверхности в FEA-моделировании оценивался налог на добавленную стоимость (НДС) материала образцов, а отдельное внимание авторы отвели изучению времени контакта эродента с поверхностью. В работах [7, 38, 39] также показана применимость FEA-методов и расчетов на основе представительного объема для моделирования на микроуровне эродирования различных материалов поверхности. В [40] изучено разрушение и вторичный удар осколков частиц по поверхности на основе двумерного SPH-моделирования и сравнения с экспериментом, что показало физичность модели, а также позволило оценить напрямую тонкие явления, происходящие при ударе. Неполный список таких публикаций говорит, с одной стороны, о применимости методов FEA и SPH для моделирования эродирования, большой практике их использования, а с другой стороны, о возможности с помощью этих методов изучать крайне мелкомасштабные явления и получать недоступную в эксперименте информацию в любой точке расчетной области. Все это позволяет считать такие модельные задачи, при обоснованном введении допущений и проведении исследования независимости от сеточного разрешения, отдельным численным экспериментом. С его помощью могут быть изучены тенденции и зависимости, труднодоступные для чистого определения в эксперименте, которые могут быть далее приложены к разработке более общей и полноценной методологии моделирования.

Результаты и обсуждение

В качестве критерия сеточной сходимости выбраны максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу во всей области образца. Исследование проводилось для абсолютной скорости частиц 155 м/с. Для упрощения постановки расчета критерием разрушения (и удаления) ячейки материала выбрано значение коэффициента геометрической деформации 1,5. В дальнейших расчетах условие разрушения задавалось в соответствии со свойствами материала по модели Джонсона–Кука. Зависимость от характерного размера ячейки в области контакта представлена на рис. 2.

Видно, что снижение размера ячейки ведет к проявлению асимптотического характера зависимости. Для надежной близости используемой сетки к оптимальной выбран размер ячейки $2,5 \cdot 10^{-6}$ м, разрешение которой применено в дальнейших расчетах. Влияние учета трения между частицами и поверхностью оценивалось по максимальной глубине износа и остаточным эквивалентным напряжениям по Мизесу (рис. 3) вдоль линии снятия напряжений на глубине 60 мкм (рис. 1)

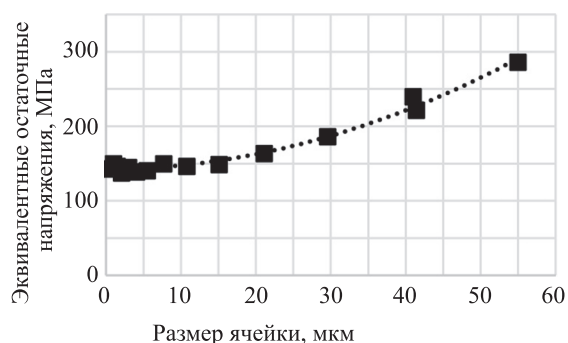


Рис. 2. Зависимость эквивалентных остаточных напряжений от размера ячейки

Fig. 2. Maximal equivalent residual stresses and mesh size

от исходной поверхности образца. Вращение частиц отсутствовало.

Картина глубины износа (рис. 3, d) показывает, что после начального износа первым рядом частиц (в точке около 1,9 мкс) сохраняется близкая глубина, в то время как учет трения существенно влияет на глубину износа

после удара третьего ряда частиц. Кроме того, по распределениям эквивалентных напряжений по Мизесу видно влияние учета трения после каждого удара.

На рис. 4 представлено влияние учета и направления вращения частиц на эквивалентные напряжения и глубину износа. Видно, что с увеличением количества ударов частиц растет влияние их вращения. Глубина износа для частиц с вращением «по часовой» немного выше, чем «против часовой» стрелки. В этой группе расчетов, как описано в разделе «Материалы и методы», контакт моделировался с коэффициентом трения покоя 0,36 и динамическим коэффициентом трения 0,31, а абсолютная скорость частиц также составила 155 м/с.

На рис. 5 заметна тенденция износа профиля. После первого удара частиц разница в профиле износа невелика, однако при увеличении количества столкновений с поверхностью становится заметным и отличие в картине износа. Также видно, что, за исключением некоторых локальных областей непосредственно в точках контакта, рост температуры за счет пластического нагрева составляет более 100 °С. Нагрев в приповерхностном слое образца при воздействии эродирующих

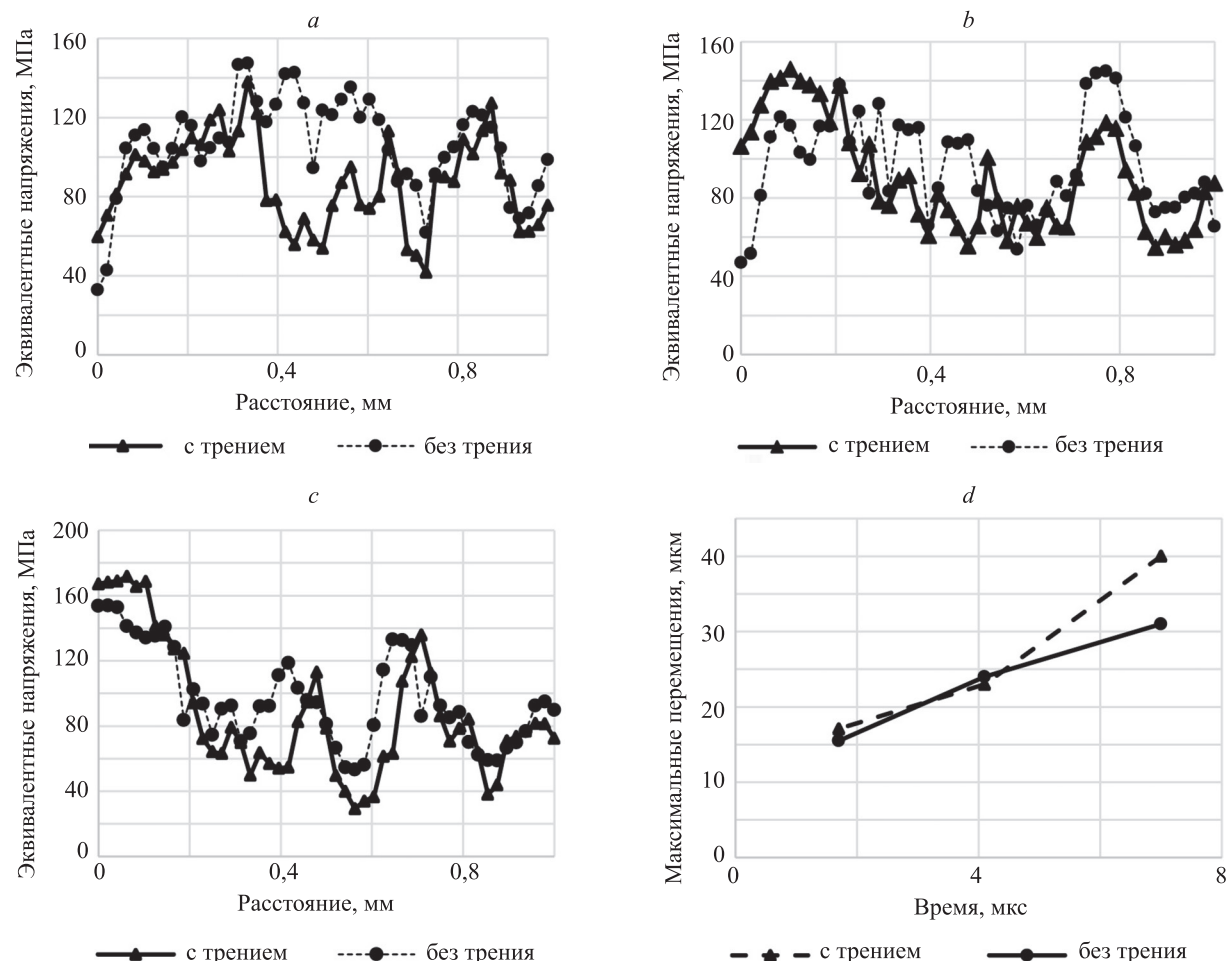


Рис. 3. Зависимости эквивалентных напряжений и максимальных перемещений от учета трения после ударов всех групп частиц (a); после ударов второй (b) и первой (c) групп частиц; перемещения в зависимости от времени (каждая точка — после удара группы частиц) (d)

Fig. 3. Equivalent stresses and maximal displacements dependences vs. friction. Impacted by all particles (a); impacted by two rows of particles (b); impacted by one row of particles (c); displacements vs. time (each point represents a sequential impact of particle row) (d)

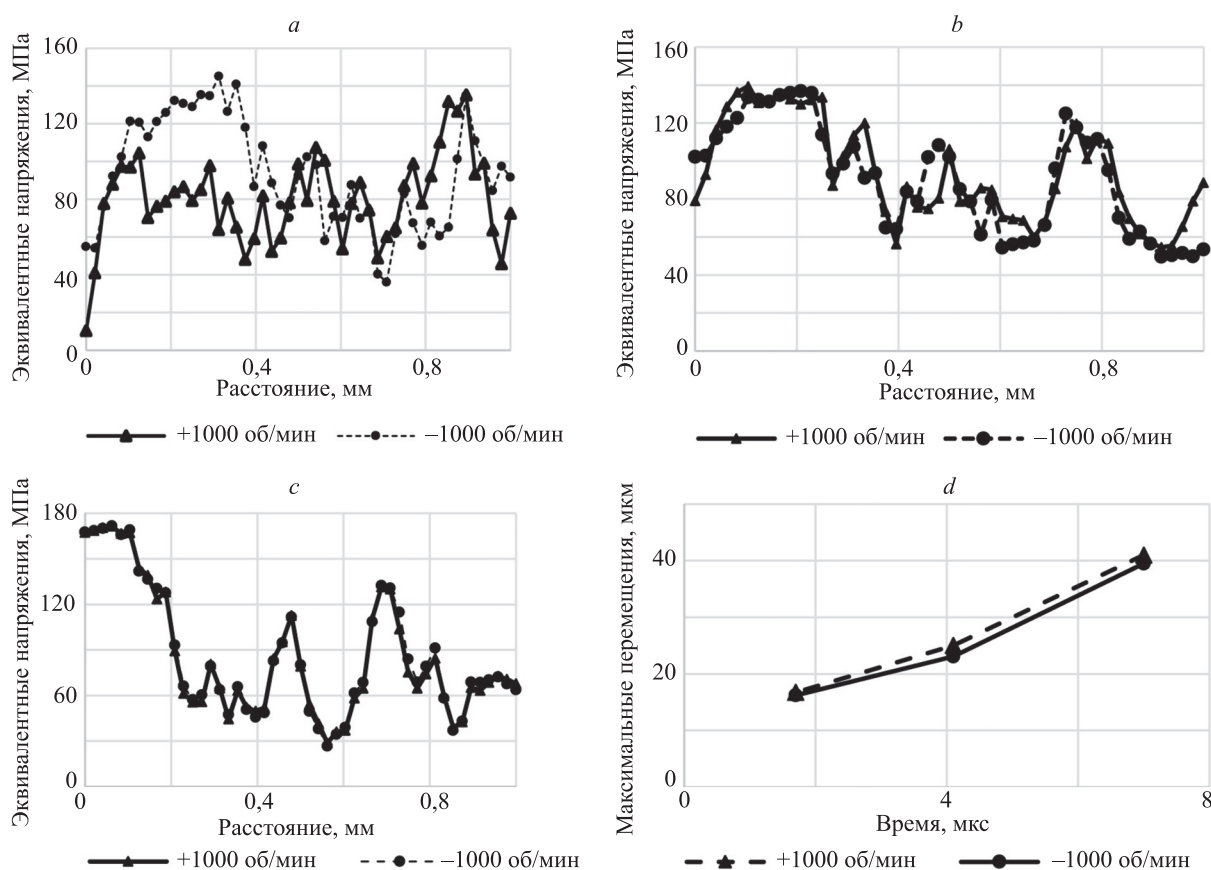


Рис. 4. Зависимости эквивалентных напряжений и максимальных перемещений от направления вращения: после ударов всех групп частиц (a); после ударов второй (b) и первой (c) групп частиц; перемещения в зависимости от времени (каждая точка — после удара группы частиц) (d).

«+» — против часовой и «-» — по часовой стрелки

Fig. 4. Equivalent stresses and maximal displacements dependences vs. the direction of rotation: “+” — anti-clockwise, “-” — clockwise. Impacted by all particles (a); impacted by two rows of particles (b); impacted by one row of particles (c); displacements vs time (each point represents a sequential impact of particle row) (d)

частиц также является важным эффектом [41]. Оценка глубины нагрева показала, что на 60 мкм от поверхности температура может достигать 35–40 °C и почти не

повышаться на глубине 90 мкм (при начальной температуре 22 °C). Отметим также, что возникающие после второго удара предпосылки к отрыву сминаемого мате-

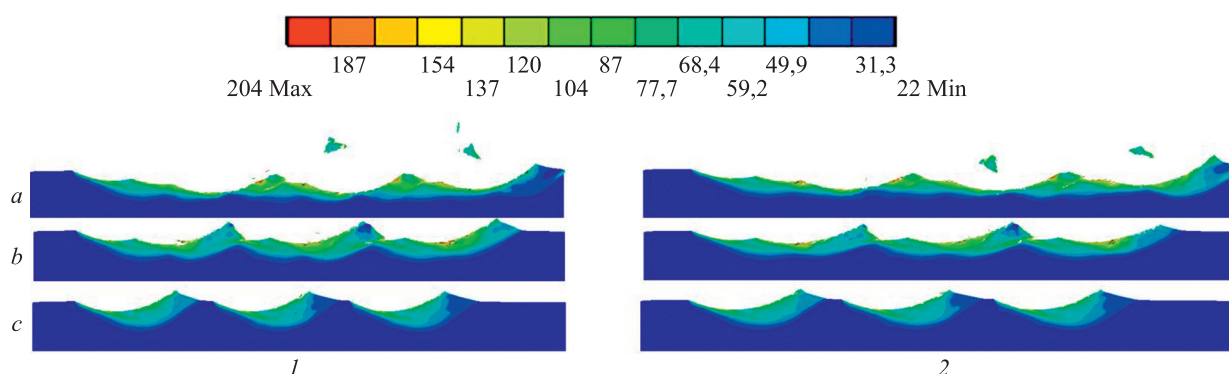


Рис. 5. Картина износа в приповерхностном слое, заливка по температуре (°C).

1 — вращение частиц против часовой и 2 — по часовой стрелке: после ударов всех частиц (a); после ударов второй (b) и первой (c) групп частиц

Fig. 5. Temperature (°C) of the eroded surface.

1 — anti-clockwise particle rotation, 2 — clockwise particle rotation; impacted by all particles (a); impacted by 2 rows of particles (b); impacted by 1 row of particles (c)

риала реализуются в срыве «гребешков» после ударов третьей группы частиц.

Можно предположить, что полученные результаты будут справедливы и для других сплавов серии 6000 (данное предположение требует уточнения), а также сферических частиц SiO_2 других диаметров. Дальнейшие работы могут быть связаны как с уточнением выводов для близких материалов, так и с изучением этих аспектов для других распределений частиц, их форм, скоростей, учета их деформируемости.

Несмотря на обширную базу расчетных и экспериментальных работ по эродированию поверхностей металлов и сплавов, прямое сравнение результатов для выбранной комбинации эродент-поверхность затруднено из-за:

- относительно высокой скорости частиц;
- изучения эродирования двуокисью кремния (SiO_2), в то время как большинство работ связаны с эродированием частицами Al_2O_3 для соответствия стандарту American Society for Testing Materials;
- отсутствия данных о коэффициентах трения частиц и поверхности, нагреве поверхности, о вращении частиц, а также из-за сложности измерения этих параметров на большинстве установок;
- отсутствия, как правило, данных о остаточных напряжениях после эрозионных испытаний и т. п.

Кроме того, в текущей работе рассмотрен начальный этап эродирования, при котором ER может варьироваться в течение последовательных ударов частиц (что косвенно подтверждается изменением максимальной глубины износа по времени (рис. 3 и 4)), и стационарное значение ER может отличаться. Тем не менее, можно привести некоторые работы по эродированию алюминиевых сплавов твердыми частицами в газовом потоке к сравнению уже на рассмотренном этапе.

В работе [42] на большом наборе параметров (всего 27 точек) исследовано влияние скорости частиц песка, их размеров и угла падения на безразмерную скорость эродирования алюминиевого сплава. Для наиболее близких к настоящей работе размеров (300–355 мкм) при скорости частиц 50 м/с (максимальная скорость из [42]) ER составила для углов 30° , 60° , 90° от $1,15 \cdot 10^{-3}$ до $1,475 \cdot 10^{-3}$. Известно, что скорость эрозии экспоненциально ($ER = f(V^n)$) зависит от скорости частиц, причем для металлов показатель экспоненты n составляет от 2,3 до 2,5 [43–45]. Так как в данной работе скорость частиц составила 155 м/с, для сравнения можно экстраполировать полученную экспериментально ER для скорости частиц 50 м/с с учетом значения $n = (2,3–2,5)$. Такой экстраполяционный метод дает ER до $19,9 \cdot 10^{-3}$ – $24,9 \cdot 10^{-3}$. Расчеты, приведенные в текущем исследовании, дают ER в диапазоне около $40 \cdot 10^{-3}$ – $43 \cdot 10^{-3}$. Важно отметить, что в данной работе можно оценить только условную скорость эродирования из-за двумерной постановки, а в рассмотренной экспериментальной работе могут иметь влияние дополнительные факторы — форма частиц, дисперсия распределения размеров и т. п. Тем не менее, можно считать совпадение результатов удовлетворительным.

В другой работе [46] изучалось эродирование сплава AA6061 частицами Al_2O_3 средним размером 300–450 мкм со скоростью около 24 м/с. Экстраполируя тем

же методом полученную экспериментально для скорости 24 м/с ER в $1,755 \cdot 10^{-4}$, получим для 155 м/с ER в диапазоне от $12,8 \cdot 10^{-3}$ до $18,6 \cdot 10^{-3}$ в зависимости от значения показателя степени n . Такие значения можно считать близкими к полученным моделированием в текущей работе — однако, разница существенно зависит как от ограничений точности постановки моделирования, так и от явных и неявных условий испытаний. Например, от свойств частиц. Так, при испытаниях хрупкими частицами Al_2O_3 важно учитывать их разрушение, чему уделялось внимание в зарубежных работах при моделировании, рассмотренных выше, и в недавних отечественных экспериментальных работах [47].

В работах [48–50] представлены исследования эрозии алюминиевых и титановых сплавов, где также показаны зависимости шероховатости поверхности алюминиевого сплава от скорости удара частиц корунда Al_2O_3 со средним диаметром 109 мкм. Шероховатость определена средним арифметическим отклонением профиля Ra . Для сплава АМг6 и скорости частиц 155 м/с [49] экстраполяция дает (максимальная изученная скорость — 140 м/с) $Ra \approx 5$ мкм. В свою очередь, эродирование частицами Al_2O_3 крупнозернистого образца АК1 [48] обеспечивает $Ra \approx 10$ мкм при скорости частиц 155 м/с, при этом толщина разрушенного (деградировавшего) слоя — около 28 мкм. Текущая работа показывает максимальную глубину износа после трех ударов частиц примерно 40 мкм. Также видно, что выступы почти отсутствуют из-за уноса гребней между кратерами, и профиль определяется впадинами относительно исходного профиля. Существенная разница может быть связана с отличием материала частиц, их формы и размера. В еще одной экспериментальной работе по эродированию алюминиевого сплава частицами Al_2O_3 [51] показано значительное влияние размера частиц на шероховатость по показателям Ra и Rz , которые растут с увеличением среднего диаметра. Кроме того, можно отметить качественное сходство картин износа поверхности в текущей работе с некоторыми результатами моделирования износа множественными частицами [24, 36, 40].

Заключение

Проведенное моделирование удара группы высокоскоростных частиц SiO_2 под углом 45° о поверхность алюминиевого сплава позволило определить, что степень влияния учета трения между частицами и поверхностью высока, заметна по итоговой глубине износа и профилям остаточных эквивалентных напряжений в материале. Показано, что влияние учета вращения частиц и его направления проявляется при ударе третьей группы частиц для рассмотренных условий. Выполнена оценка нагрева в приповерхностном слое образца, который после ударов трех групп частиц составил более 100°C , а глубина нагрева — до 90 мкм. Дальнейшие работы могут быть направлены на уточнение выводов для других пар эродент-поверхность, а также на определение степени влияния вращения частиц при большем количестве ударов, влияния учета поглощения энергии деформации частицами (упругопластического поведения частиц), формы частиц.

Литература

References

- Боркова А.Н. Эрозионная стойкость авиационных материалов при соударении с твердыми (пылевыми) частицами: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Всероссийский НИИ авиационных материалов. М., 2006. 26 с.
- Клейс И.Р. Некоторые исследования по абразивной эрозии: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / МИНХиГП им. И.М. Губкина. М., 1970. 250 с.
- Крамченков Е.М. Исследование эрозионного изнашивания материалов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / ГАНГ им. И.М. Губкина. М., 1995. 26 с.
- Строкач Е.А., Кожевников Г.Д., Пожидаев А.А., Добровольский С.В. Моделирование эрозионного износа титанового сплава высокоскоростным потоком частиц // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2023. Т. 25. № 4. С. 268–283. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2023-25.4-268-283>
- Строкач Е.А., Кожевников Г.Д., Пожидаев А.А. Численное моделирование процесса эродирования твердыми частицами в газовом потоке (обзор) // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2021. № 67. С. 56–69. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2021.67.06>
- Liu Y., Cao Z., Yuan J., Sun X., Su H., Wang L. Effect of morphology, impact velocity and angle of the CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS) particle on the erosion behavior of Thermal Barrier Coatings (TBCs): a finite element simulation study // Coatings. 2022. V. 12. N 5. P. 576. <https://doi.org/10.3390/coatings12050576>
- Ma Z.S., Fu L.H., Yang L., Zhou Y.C., Lu C. Finite Element Simulations on Erosion and Crack Propagation in Thermal Barrier Coatings // High Temperature Materials and Processes. 2015. V. 34. N 4. P. 387–393. <https://doi.org/10.1515/htmp-2014-0068>
- Oviedo F., Valarezo A. Residual stress in high-velocity impact coatings: parametric finite element analysis approach // Journal of Thermal Spray Technology. 2020. V. 29. N 6. P. 1268–1288. <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01026-5>
- Liu Z.G., Wan S., Nguyen V.B., Zhang Y.W. Finite element analysis of erosive wear for offshore structure // Proc. of the 13th International Conference on Fracture. 2013. P. 461–468.
- ElTobgy M.S., Ng E., Elbestawi M.A. Finite element modeling of erosive wear // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005. V. 45. N 11. P. 1337–1346. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.01.007>
- Singh P.K., Hota A.R., Mishra S.B. Finite element modelling of erosion parameters in boiler components // Asian Journal of Engineering and Applied Technology. 2018. V. 7. N S2. P. 12–16. <https://doi.org/10.51983/ajeat-2018.7.2.964>
- Du M., Li Z., Feng L., Dong X., Che J., Zhang Y. Numerical simulation of particle fracture and surface erosion due to single particle impact // AIP Advances. 2021. V. 11. N 3. P. 035218. <https://doi.org/10.1063/5.0042928>
- Evans A.G., Gulden M.E., Rosenblatt M. Impact damage in brittle materials in the elastic-plastic response regime // Proc. of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering sciences. 1978. V. 361. N 1706. P. 343–365. <https://doi.org/10.1098/rspa.1978.0106>
- Mohammadi B., Khoddami A. Representative volume element-based simulation of multiple solid particles erosion of a compressor blade considering temperature effect // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2020. V. 234. N 8. P. 1173–1184. <https://doi.org/10.1177/1350650119884825>
- Taherkhani B., Anaraki A.P., Kadkhodapour J., Farahani N., Tu H. Erosion due to solid particle impact on the turbine blade: experiment and simulation // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2019. V. 19. N 6. P. 1739–1744. <https://doi.org/10.1007/s11668-019-00775-y>
- Wu B., Wu F., Li J. Finite Element Modeling of Correlating Mechanical Properties with Erosion Wear Rate // Proc. of the 3rd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2018). 2018. P. 273–276. <https://doi.org/10.2991/eame-18.2018.57>
- Khoddami A.S., Salimi-Majd D., Mohammadi B. Finite element and experimental investigation of multiple solid particle erosion on Ti-6Al-4V titanium alloy coated by multilayer wear-resistant coating // Surface and Coatings Technology. 2019. V. 372. P. 173–189. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.042>
- Petrov Y.V., Bragov A.M., Kazarinov N.A., Evstifeev A.D. Experimental and numerical analysis of the highspeed deformation and erosion
- Borkova A.N. *Erosion resistance of the aircraft materials upon collision with solid (dust) particles*. Abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow, 2006, 26 p. (in Russian)
- Kleis I.R. *Some research on abrasive erosion*. Dissertation for the degree of doctor of technical sciences. Moscow, 1970, 250 p. (in Russian)
- Kramchenkov E.M. *Investigation of the erosive wear of materials*. Abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow, 1995, 26 p. (in Russian)
- Strokach E., Kozhevnikov G., Pozhidaev A., Dobrovolsky S. Numerical study of titanium alloy high-velocity solid particle erosion. *Obrabotka metallov-Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 268–283. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2023-25.4-268-283>
- Strokach E., Kozhevnikov G., Pozhidaev A. Numerical simulation of solid particle erosion in a gaseous flow (review). *Vestnik PNPU. Ajerokosmicheskaja tehnika*, 2021, no. 67, pp. 56–69. (in Russian). <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2021.67.06>
- Liu Y., Cao Z., Yuan J., Sun X., Su H., Wang L. Effect of morphology, impact velocity and angle of the CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS) particle on the erosion behavior of Thermal Barrier Coatings (TBCs): a finite element simulation study. *Coatings*, 2022, vol. 12, no. 5, pp. 576. <https://doi.org/10.3390/coatings12050576>
- Ma Z.S., Fu L.H., Yang L., Zhou Y.C., Lu C. Finite Element Simulations on Erosion and Crack Propagation in Thermal Barrier Coatings. *High Temperature Materials and Processes*, 2015, vol. 34, no. 4, pp. 387–393. <https://doi.org/10.1515/htmp-2014-0068>
- Oviedo F., Valarezo A. Residual stress in high-velocity impact coatings: parametric finite element analysis approach. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, vol. 29, no. 6, pp. 1268–1288. <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01026-5>
- Liu Z.G., Wan S., Nguyen V.B., Zhang Y.W. Finite element analysis of erosive wear for offshore structure. *Proc. of the 13th International Conference on Fracture*, 2013, pp. 461–468.
- ElTobgy M.S., Ng E., Elbestawi M.A. Finite element modeling of erosive wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 45, no. 11, pp. 1337–1346. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.01.007>
- Singh P.K., Hota A.R., Mishra S.B. Finite element modelling of erosion parameters in boiler components. *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*, 2018, vol. 7, no. S2, pp. 12–16. <https://doi.org/10.51983/ajeat-2018.7.2.964>
- Du M., Li Z., Feng L., Dong X., Che J., Zhang Y. Numerical simulation of particle fracture and surface erosion due to single particle impact. *AIP Advances*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 035218. <https://doi.org/10.1063/5.0042928>
- Evans A.G., Gulden M.E., Rosenblatt M. Impact damage in brittle materials in the elastic-plastic response regime. *Proc. of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering sciences*, 1978, vol. 361, no. 1706, pp. 343–365. <https://doi.org/10.1098/rspa.1978.0106>
- Mohammadi B., Khoddami A. Representative volume element-based simulation of multiple solid particles erosion of a compressor blade considering temperature effect. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2020, vol. 234, no. 8, pp. 1173–1184. <https://doi.org/10.1177/1350650119884825>
- Taherkhani B., Anaraki A.P., Kadkhodapour J., Farahani N., Tu H. Erosion due to solid particle impact on the turbine blade: experiment and simulation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 1739–1744. <https://doi.org/10.1007/s11668-019-00775-y>
- Wu B., Wu F., Li J. Finite Element Modeling of Correlating Mechanical Properties with Erosion Wear Rate. *Proc. of the 3rd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2018)*, 2018, pp. 273–276. <https://doi.org/10.2991/eame-18.2018.57>
- Khoddami A.S., Salimi-Majd D., Mohammadi B. Finite element and experimental investigation of multiple solid particle erosion on Ti-6Al-4V titanium alloy coated by multilayer wear-resistant coating. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 372, pp. 173–189. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.042>
- Petrov Y.V., Bragov A.M., Kazarinov N.A., Evstifeev A.D. Experimental and numerical analysis of the highspeed deformation and erosion

- damage of the titanium alloy VT-6 // *Physics of the Solid State*. 2017. V. 59. N 1. P. 93–97. <https://doi.org/10.1134/S1063783417010267>
19. Balu P., Kong F., Hamid S., Kovacevic R. Finite element modeling of solid particle erosion in AISI 4140 steel and nickel–tungsten carbide composite material produced by the laser-based powder deposition process // *Tribology International*. 2013. V. 62. P. 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.01.021>
20. Liu Z.G., Wan S., Nguyen V.B., Zhang Y.W. A numerical study on the effect of particle shape on the erosion of ductile materials // *Wear*. 2014. V. 313. N 1–2. P. 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.03.005>
21. Zhang H., Dong X. Finite element analysis of multiple solid particles erosion in cermet coating // *Surface and Coatings Technology*. 2015. V. 262. P. 184–190. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.040>
22. Mei Y., Dong X. Angular particle impact on ductile materials using the Lagrangian gradient smoothing method // *Tribology Transactions*. 2021. V. 64. N 6. P. 1149–1165. <https://doi.org/10.1080/10402004.2021.1944709>
23. Zheng C., Liu Y., Chen C., Qin J., Ji R., Cai B. Numerical study of impact erosion of multiple solid particle // *Applied Surface Science*. 2017. V. 423. P. 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.132>
24. Zang X., Cao X., Xie Z., Zhang J., Darihaki F., Liu Y. Surface deformation under overlapping impacts of solid particles // *Friction*. 2023. V. 11. N 2. P. 280–301. <https://doi.org/10.1007/s40544-021-0600-2>
25. Chen J., He G., Han Y., Yuan Z., Li Z., Zhang Z., Han X., Yan S. Structural toughness and interfacial effects of multilayer TiN erosion-resistant coatings based on high strain rate repeated impact loads // *Ceramics International*. 2021. V. 47. N 19. P. 27660–27667. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.190>
26. Di J., Wang S., Zhang L., Cai L., Xie Y. Study on the erosion characteristics of boride coatings by finite element analysis // *Surface and Coatings Technology*. 2018. V. 333. P. 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.10.042>
27. Yu Q.M., He Q., Ning F.L. Influence of interface morphology on erosion failure of thermal barrier coatings // *Ceramics International*. 2018. V. 44. N 17. P. 21349–21357. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.188>
28. Zhang H., Li Z., He W., Liao B., He G., Cao X., Li Y. Damage evolution and mechanism of TiN/Ti multilayer coatings in sand erosion condition // *Surface and Coatings Technology*. 2018. V. 353. P. 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.062>
29. Fang Z., Chen J., He W., Yang Z., Yuan Z., Geng M., He G. Study on the damage mechanism of TiN/Ti coatings based on multi-directional impact // *Coatings*. 2019. V. 9. N 11. P. 765. <https://doi.org/10.3390/coatings9110765>
30. Lesnevskiy L.N., Lyakhovetskiy M.A., Kozhevnikov G.D. Ushakov A.M. Research of the AK4-1 alloy microarc oxidation modes effect on the composite ceramic coatings erosion resistance // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1281. N 1. P. 012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1281/1/012048>
31. Гурин В.Г. Исследование процессов разрушения при высокоскоростной эрозии материалов: дипломная работа СПб., 2017 [Электронный ресурс]. https://dspace.spbu.ru/bitstream/11701/10536/1/tekst_diploma.pdf (дата обращения: 05.01.2023).
32. Tarodiya R., Levy A. Surface erosion due to particle-surface interactions – A review // *Powder Technology*. 2021. V. 387. P. 527–559. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.055>
33. ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide. Release 2020 R2, July 2020.
34. Wilkins M.L. *Calculation of Elastic-plastic Flow*. Lawrence Livermore Laboratory, University of California, 1969. 99 p.
35. Li Q., Jing L., Sun Q., Ji L., Chen S. The finite element modeling of the impacting process of hard particles on pump components // *Open Physics*. 2022. V. 20. N 1. P. 596–608. <https://doi.org/10.1515/phys-2022-0048>
36. Dong X., Li Z., Zhang Q., Zeng W., Liu GR. Analysis of surface-erosion mechanism due to impacts of freely rotating angular particles using smoothed particle hydrodynamics erosion model // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2017. V. 231. N 12. P. 1537–1551. <https://doi.org/10.1177/1350650117700>
37. Zheng C., Liu Y., Chen C., Qin J., Zhang S. Finite element analysis on the dynamic erosion process using multiple-particle impact model // *Powder Technology*. 2017. V. 315. P. 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.04.016>
38. Hadavi V., Moreno C.E., Papini M. Numerical and experimental analysis of particle fracture during solid particle erosion, part I: damage of the titanium alloy VT-6. *Physics of the Solid State*, 2017, vol. 59, no. 1, pp. 93–97. <https://doi.org/10.1134/S1063783417010267>
19. Balu P., Kong F., Hamid S., Kovacevic R. Finite element modeling of solid particle erosion in AISI 4140 steel and nickel–tungsten carbide composite material produced by the laser-based powder deposition process. *Tribology International*, 2013, vol. 62, pp. 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.01.021>
20. Liu Z.G., Wan S., Nguyen V.B., Zhang Y.W. A numerical study on the effect of particle shape on the erosion of ductile materials. *Wear*, 2014, vol. 313, no. 1–2, pp. 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.03.005>
21. Zhang H., Dong X. Finite element analysis of multiple solid particles erosion in cermet coating. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 262, pp. 184–190. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.040>
22. Mei Y., Dong X. Angular particle impact on ductile materials using the Lagrangian gradient smoothing method. *Tribology Transactions*, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 1149–1165. <https://doi.org/10.1080/10402004.2021.1944709>
23. Zheng C., Liu Y., Chen C., Qin J., Ji R., Cai B. Numerical study of impact erosion of multiple solid particle. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 423, pp. 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.132>
24. Zang X., Cao X., Xie Z., Zhang J., Darihaki F., Liu Y. Surface deformation under overlapping impacts of solid particles. *Friction*. 2023, vol. 11, no. 2, pp. 280–301. <https://doi.org/10.1007/s40544-021-0600-2>
25. Chen J., He G., Han Y., Yuan Z., Li Z., Zhang Z., Han X., Yan S. Structural toughness and interfacial effects of multilayer TiN erosion-resistant coatings based on high strain rate repeated impact loads. *Ceramics International*, 2021, vol. 47, no. 19, pp. 27660–27667. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.190>
26. Di J., Wang S., Zhang L., Cai L., Xie Y. Study on the erosion characteristics of boride coatings by finite element analysis. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 333, pp. 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.10.042>
27. Yu Q.M., He Q., Ning F.L. Influence of interface morphology on erosion failure of thermal barrier coatings. *Ceramics International*, 2018, vol. 44, no. 17, pp. 21349–21357. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.188>
28. Zhang H., Li Z., He W., Liao B., He G., Cao X., Li Y. Damage evolution and mechanism of TiN/Ti multilayer coatings in sand erosion condition. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 353, pp. 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.062>
29. Fang Z., Chen J., He W., Yang Z., Yuan Z., Geng M., He G. Study on the damage mechanism of TiN/Ti coatings based on multi-directional impact. *Coatings*, 2019, vol. 9, no. 11, pp. 765. <https://doi.org/10.3390/coatings9110765>
30. Lesnevskiy L.N., Lyakhovetskiy M.A., Kozhevnikov G.D. Ushakov A.M. Research of the AK4-1 alloy microarc oxidation modes effect on the composite ceramic coatings erosion resistance. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1281, no. 1, pp. 012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1281/1/012048>
31. Gurin V. *Investigation of fracture processes at high-rate erosion of materials*. Graduation Thesis. St. Petersburg, 2017. Available: https://dspace.spbu.ru/bitstream/11701/10536/1/tekst_diploma.pdf (accessed: 05.01.2023). (in Russian)
32. Tarodiya R., Levy A. Surface erosion due to particle-surface interactions — A review. *Powder Technology*, 2021, vol. 387, pp. 527–559. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.055>
33. *ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide*, Release 2020 R2, July 2020.
34. Wilkins M.L. *Calculation of Elastic-plastic Flow*. Lawrence Livermore Laboratory, University of California, 1969, 99 p.
35. Li Q., Jing L., Sun Q., Ji L., Chen S. The finite element modeling of the impacting process of hard particles on pump components. *Open Physics*, 2022, vol. 20, no. 1, pp. 596–608. <https://doi.org/10.1515/phys-2022-0048>
36. Dong X., Li Z., Zhang Q., Zeng W., Liu GR. Analysis of surface-erosion mechanism due to impacts of freely rotating angular particles using smoothed particle hydrodynamics erosion model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2017, vol. 231, no. 12, pp. 1537–1551. <https://doi.org/10.1177/1350650117700>
37. Zheng C., Liu Y., Chen C., Qin J., Zhang S. Finite element analysis on the dynamic erosion process using multiple-particle impact model. *Powder Technology*, 2017, vol. 315, pp. 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.04.016>

- Modeling and experimental verification // *Wear*. 2016. V. 356–357. P. 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.008>
39. Abubakar A.A., Arif A.F.M., Akhtar S.S., Mostaghimi J. Splats formation, interaction and residual stress evolution in thermal spray coating using a hybrid computational model // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2019. V. 28. N 3. P. 359–377. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00828-6>
40. Dong X., Li Z., Feng L., Sun Z., Fan C. Modeling, simulation, and analysis of the impact(s) of single angular-type particles on ductile surfaces using smoothed particle hydrodynamics // *Powder Technology*. 2017. V. 318. P. 363–382. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.06.011>
41. Урбанович Л.И., Крамченков Е.М., Чуносков Ю.Н. Разогрев твердого тела в зоне удара эродирующей твердой частицы // *Трение и износ*. 1994. Т. 15. № 6. С. 965–972.
42. Chowdhury M.A., Debnath U.K., Nuruzzaman D.M., Islam M.M. Experimental analysis of aluminum alloy under solid particle erosion process // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2016. V. 230. N 12. P. 1516–1541. <https://doi.org/10.1177/1350650116639466>
43. Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles Oberflächenerosion durch feste teilchen // *Wear*. 1960. V. 3. N 2. P. 87–103. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(60\)90055-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(60)90055-7)
44. Oka Y.I., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage // *Wear*. 2005. V. 259. N 1–6. P. 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.040>
45. ANSYS Fluent Theory Guide. Canonsburg, PA: ANSYS Inc, 2022. 1080 p.
46. Laguna-Camacho J., Martínez-García H., Escamilla-Rodríguez F., Alarcón-Rosas C., Calderón-Ramón C., Ríos-Velasco L., Pelcastre-Lozano M., Casados-Sánchez Á., González-Gómez M. Erosion Behavior of AISI 6061-T6 // *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*. 2015. V. 5. P. 136–146. <https://doi.org/10.4236/jsemt.2015.53015>
47. Тхабисимов А.Б. Повышение абразивной стойкости лопаточного аппарата первых ступеней цилиндров высокого и среднего давления мощных паровых турбин: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Национальный исследовательский университет МЭИ. М., 2016. 179 с.
48. Петров Ю.В., Атрошенко С.А., Казаринов Н.А., Евстифеев А.Д., Соловьев В.Ю. Динамическое разрушение поверхности сплава алюминия в условиях высокоскоростной эрозии // *Физика твердого тела*. 2017. Т. 59. № 4. С. 648–652. <https://doi.org/10.21883/FTT.2017.04.44264.173>
49. Евстифеев А.Д., Смирнов И.В. Особенности эрозионного разрушения металлических материалов при воздействии потока твердых частиц // *Физическая мезомеханика*. 2021. Т. 24. № 2. С. 5–12. <https://doi.org/10.24412/1683-805X-2021-2-5-12>
50. Евстифеев А.Д., Смирнов И.В., Петров Ю.В. Влияние динамической прочности материала на его эрозионную стойкость // *Физика твердого тела*. 2020. Т. 62. № 10. С. 1569–1572. <https://doi.org/10.21883/FTT.2020.10.49897.088>
51. Sezer H., Fidan S. Solid Particle Erosion Effects On Surface Plastic Deformation Of Aluminum Alloy // *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*. 2018. V. 5. N 1. P. 243–250. <https://doi.org/10.31202/ecjse.364685>
38. Hadavi V., Moreno C.E., Papini M. Numerical and experimental analysis of particle fracture during solid particle erosion, part I: Modeling and experimental verification. *Wear*, 2016, vol. 356–357, pp. 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.008>
39. Abubakar A.A., Arif A.F.M., Akhtar S.S., Mostaghimi J. Splats formation, interaction and residual stress evolution in thermal spray coating using a hybrid computational model. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 359–377. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00828-6>
40. Dong X., Li Z., Feng L., Sun Z., Fan C. Modeling, simulation, and analysis of the impact(s) of single angular-type particles on ductile surfaces using smoothed particle hydrodynamics. *Powder Technology*, 2017, vol. 318, pp. 363–382. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.06.011>
41. Urbanovich L.I., Kramchenkov E.M., Chunosov Iu.N. Solid body heating in the impact zone of an eroding solid particle. *Trenie i Iznos*, 1994, vol. 15, no. 6, pp. 965–972. (in Russian)
42. Chowdhury M.A., Debnath U.K., Nuruzzaman D.M., Islam M.M. Experimental analysis of aluminum alloy under solid particle erosion process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2016, vol. 230, no. 12, pp. 1516–1541. <https://doi.org/10.1177/1350650116639466>
43. Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles Oberflächenerosion durch feste teilchen. *Wear*, 1960, vol. 3, no. 2, pp. 87–103. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(60\)90055-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(60)90055-7)
44. Oka Y.I., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage. *Wear*, 2005, vol. 259, no. 1–6, pp. 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.040>
45. ANSYS Fluent Theory Guide. Canonsburg, PA: ANSYS Inc, 2022. 1080 p.
46. Laguna-Camacho J., Martínez-García H., Escamilla-Rodríguez F., Alarcón-Rosas C., Calderón-Ramón C., Ríos-Velasco L., Pelcastre-Lozano M., Casados-Sánchez Á., González-Gómez M. Erosion Behavior of AISI 6061-T6. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 2015, vol. 5, pp. 136–146. <https://doi.org/10.4236/jsemt.2015.53015>
47. Tkhabisimov A.B. *Improving the the blade apparatus abrasive resistance at the first stages of high and medium pressure cylinders of the powerful steam turbines*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow, 2016, 179 p. (in Russian)
48. Petrov Y.V., Atroshenko S.A., Kazarinov N.A., Evstifeev A.D., Solov'ev V.Y. Dynamic fracture of the surface of an aluminum alloy under conditions of high-speed erosion. *Physics of the Solid State*, 2017, vol. 59, no. 4, pp. 661–666. <https://doi.org/10.1134/S1063783417040175>
49. Evstifeev A.D., Smirnov I.V. Features of Solid Particle Erosion of Metals. *Physical Mesomechanics*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 12–17. <https://doi.org/10.1134/S1029959922010027>
50. Evstifeev A.D., Smirnov I.V., Petrov Y.V. Effect of Dynamic Strength of a Material on Its Erosion Resistance. *Physics of the Solid State*, 2020, vol. 62, no. 10, pp. 1737–1740. <https://doi.org/10.1134/S1063783420100066>
51. Sezer H., Fidan S. Solid Particle Erosion Effects On Surface Plastic Deformation Of Aluminum Alloy. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 243–250. <https://doi.org/10.31202/ecjse.364685>

Авторы

Строкач Евгений Александрович — кандидат технических наук, ведущий инженер, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-5376-1231>, evgenij.strokatsch@mai.ru

Пожидаяев Алексей Алексеевич — ассистент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-7667-5392>, aapozhidaev@mai.ru

Authors

Evgeny A. Strokach — PhD, Leading Engineer, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-5376-1231>, evgenij.strokatsch@mai.ru

Alexei A. Pozhidaev — Assistant, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7667-5392>, aapozhidaev@mai.ru

Статья поступила в редакцию 22.07.2024
Одобрена после рецензирования 04.11.2024
Принята к печати 24.01.2025

Received 22.07.2024
Approved after reviewing 04.11.2024
Accepted 24.01.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»