

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 12. С. 565–571  
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 12, pp. 565–571

Научная статья  
УДК 620.191, 629.017

## Моделирование нагрева и остаточных напряжений в титановом сплаве при обработке стальной дробью

А.А. Пожидаев<sup>1</sup>, Е.А. Строкач<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

✉evgenij.strokatsch@mai.ru

**Аннотация.** Современные методы численного моделирования широко применяются для изучения особенностей различных технологических процессов, в том числе пластического деформирования поверхности, однако часто пренебрегают учетом некоторых физических явлений, например нагревом, или предварительными настройками модели. С целью определения влияния нагрева в области контакта на распределение остаточных напряжений при обработке образца из титанового сплава Ti6Al4V дробью из стали AISI 52100 было проведено моделирование методом конечных элементов в явной постановке. Свойства материалов задавались упругопластическими моделями Джонсона – Кука и уравнениями состояния Грюнейсена, а нормально падающая на поверхность закрепленного образца сферическая дробь диаметром 0,3 мм имела скорость от 10 до 40 м/с. Предварительно были проведены исследования сеточной сходимости и независимости результатов от количества частиц, показавшие, что достаточно 12 дробин, размер элемента в области контакта должен быть не более 0,005 мм (1,7% диаметра дроби), а глубина деформированного слоя была одинакова для всех расчетов и составляла около 0,17 мм. Нагрев в приповерхностном слое достигал 15 °С и незначительно влиял на распределение остаточных напряжений, имевших максимум в приближении 770 МПа на глубине 0,024 мм.

**Ключевые слова:** моделирование остаточных напряжений, дробеударное упрочнение, модель Джонсона – Кука, сеточная сходимость, нагрев при пластической деформации

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, тема № FSFF-2023-0006 «Процессы взаимодействия многофазных потоков частиц и излучения высокой энергии с поверхностью применительно к двигателям летательных аппаратов нового поколения».

**Для цитирования.** Пожидаев А.А., Строкач Е.А. Моделирование нагрева и остаточных напряжений в титановом сплаве при обработке стальной дробью // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 12. С. 565–571. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=178349>

Original article

## Simulation of heating and residual stresses in a steel shot peened titanium alloy

A.A.Pozhidaev<sup>1</sup>, E.A. Strokach<sup>1</sup>✉<sup>1</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

✉evgenij.strokatsch@mai.ru

**Abstract.** Features and details of modern technological processes, including surface plastic deformation, are widely studied numerically, though often some physical effects, for example plastic work heating, or preliminary mesh studies are not included. In this paper, explicit finite element analysis method is used to simulate a shot peening process of Ti6Al4V using AISI 52100 shots aiming to determine the effect of heating on residual stresses. Elastoplastic Johnson – Cook models are used both with the Gruneisen equation of state. A single shot with a diameter of 0,3 mm normally impacts a fixed titanium alloy sample at 10 m/s – 40 m/s. Preliminary mesh convergence and particle number convergence studies have shown that 12 shots are needed and the mesh size in the contact area should be at least 0,005 mm (1,7% of particle diameter), and the peened layer depth is similar for all cases being about 0,17 mm. The temperature rise in the contact area is 15 °C, which insignificantly affects the residual stresses, that have a maximum of 770 MPa at depth of 0,024 mm.

**Keywords:** simulation of residual stresses, shot peening, Johnson – Cook model, mesh independence study, plastic deformation heating

**Funding.** The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FSFF-2023-0006).

**For citation.** Pozhidaev A.A., Strokach E.A. Simulation of heating and residual stresses in a steel shot peened titanium alloy. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 12, pp. 565–571. URL: <https://tpt.mai.ru/publications.php?ID=178349>

### Введение

Современное программное обеспечение в области моделирования быстропротекающих процессов позволяет детально изучать процессы взаимодействия твердых тел на микроуровне. Одним из таких процессов является поверхностное пластическое деформирование (ППД) – дробеударная обработка, применяемое для упрочнения поверхностного слоя материала. Этот технологический процесс подобен дробеударному формообразованию, используемому для придания кривизны длинномерным деталям, и эксплуатационному воздействию на поверхность изделия – абразивной эрозии. Схожесть этих процессов связана с искомыми характеристиками, определяемыми при расчетах и испытаниях – остаточными напряжениями по глубине материала, величиной упрочненного слоя, итоговой формой поверхности и детали. Результаты, полученные в ходе моделирования дробеударного упрочнения, могут быть полезны и при моделировании процессов формообразова-

ния дробью и эродирования твердыми частицами. Известны отечественные и зарубежные работы по моделированию дробеударной / дробеструйной обработки, абразивной эрозии [1–9]. Конечно-элементное моделирование остаточных напряжений широко применяется при изучении аспектов различных технологических процессов [10–12].

При моделировании упругопластического поведения сталей, титановых и алюминиевых сплавов наиболее распространена модель в форме Джонсона – Кука, учитывающая влияние скорости деформации, что особенно актуально для быстропротекающих процессов, и изменение температуры в области контакта. Часто влияние нагрева на формирование распределения напряжений не учитывают, хотя многочисленные удары дроби и повторяющееся пластическое деформирование может существенно менять тепловое состояние в поверхностном слое и создавать локальные градиенты температур, а значит, термических напряжений. В то же время при малых скоростях и массе частиц влияние нагрева может быть мало и позволит ис-

ключить температурную зависимость из модели материала для экономии вычислительных ресурсов. Характерными для дробеударной обработки являются скорости от 10–30 до 90–100 м/с.

Данная работа посвящена изучению влияния нагрева в области контакта на формирование остаточных напряжений для пары титановый сплав Ti6Al4V – дробь AISI 52100 при относительно низких скоростях дробинки порядка 10–40 м/с.

При подготовке расчетной модели для проведения основного исследования критически важным оказывается предварительное изучение независимости результатов расчета, то есть интегральных значений искомых параметров или их распределения, от сеточного разрешения, следовательно, требуется проведение исследования сеточной сходимости. Для задач с последовательными многочисленными ударными воздействиями также требуется изучение независимости от количества ударов. Зачастую этими исследованиями пренебрегают или проводят номинально, хотя тщательно подобранная сетка и набор частиц являются основой достоверных результатов. В данной работе такие исследования предваряли выполнение основной цели – моделирование нагрева в области контакта и формирование остаточных напряжений в поверхностном слое.

### Материалы и методы

Моделирование проводилось в коммерческом пакете Ansys/LS-DYNA. Для задания упругопластического поведения материала применялась модель Джонсона – Кука, связывающая напряжения и деформации с учетом высокой скорости деформаций и температуры процесса (1):

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

где  $\bar{\epsilon}^p$  – эффективная пластическая деформация,  $\dot{\epsilon}^*$  – скорость эффективной пластической деформации [1/с],  $T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$  – гомологическая температура, где  $T_{room}$  – температура окружающей среды (или референсная температура),  $T_{melt}$  – температура плавления материала, A, B, C, n, m – константы конкретной модели Джонсона – Кука.

Полноценная модель материала требует также задания уравнения состояния (equation of state – EOS). Для Ti6Al4V коэффициенты модели Джонсона – Кука задавались согласно [13], а EOS – по модели Грюнейсена согласно [14], теплофизические свойства соответствовали материалу в работе [15].

Частицы дроби, в отличие от многих исследований, представлялись деформируемыми, где коэффициенты модели Джонсона – Кука соответствовали [16], модели Грюнейсена выбраны согласно [17], а теплофизические свойства в соответствии со свойствами материала в работе [18]. Расчетная модель – представительный объем образца и явное воспроизведение дробинки, попадающей на поверхность (рис. 1). Поскольку исследовались процессы в слое близ поверхности, такое приближение допустимо, а для фиксации расчетной области на нижней поверхности представительного объема задавалось условие жесткой заделки. Все расчеты по исследованию сеточной сходимости и независимости от количества ударов проводились при нормальном ударе дробинки о поверхность и их скорости 30 м/с. Для упрощения постановки расчета и снижения требуемых вычислительных ресурсов взаимодействие между дробинками отсутствовало, а сама расчетная 3D-модель представляла из себя четверть полноценной модели, где на поверхностях разреза задавались условия симметрии. На внешних поверхностях задавалось условие свободного прохода волн деформации. Высота расчетной области образца – 3,5D, два других размера – 2,5D, где D – диаметр дроби, равный 0,3 мм. Условие контакта дроби и образца включало трение с коэффициентом трения покоя 0,36 и динамическим коэффициентом трения 0,31 [19]. В процессе исследования параметром сеточного разрешения являлся размер элемента в области контакта. Для задач, связанных с динамическим воздействием частицами (например, дробью), требуется исследование «сходимости» по количеству частиц, так как контакт с поверхностью, как правило, моделируется в явной, а значит, нестационарной постановке. Это ведет к изменению картины остаточных напряжений при каждом ударе частицы до достижения насыщения по рассматриваемым параметрам. Далее показано, что 12 ударов дроби позволяют давать независимое от их количества решение.

### Результаты и обсуждение

Влияние размера элемента сетки в области падения частиц на эпюру остаточных напряжений по глубине материала показано на рис. 2. Характерная картина наблюдалась для всех сеток: сжимающие напряжения имели пик на глубине около 0,024 мм при дальнейшем переходе к растягивающим напряжениям на глубине приблизительно 0,08 мм. Глубина подверженного остаточным напряжениям слоя составляла во всех случаях

около 0,17 мм. При размере элемента 0,005 мм и 0,0025 мм качественно эпюры напряжений совпадали, количественно по максимальному значению остаточных сжимающих напряжений различались на 0,7%, составляя 768 и 774 Мпа соответственно, глубина залегания максимальных напряжений 0,02368 и 0,02356 мм соответственно. В связи с этим можно считать, что при размере элемента 0,005 мм достигалось условие сеточной сходимости по остаточным напряжениям.

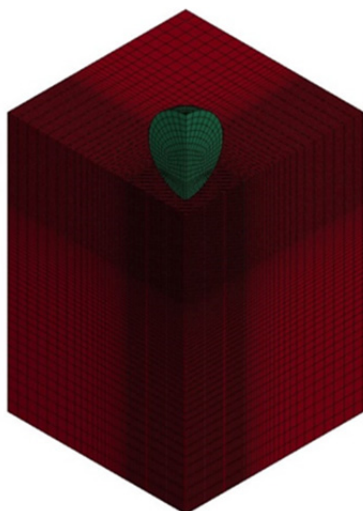


Рис. 1. Вид расчетной модели

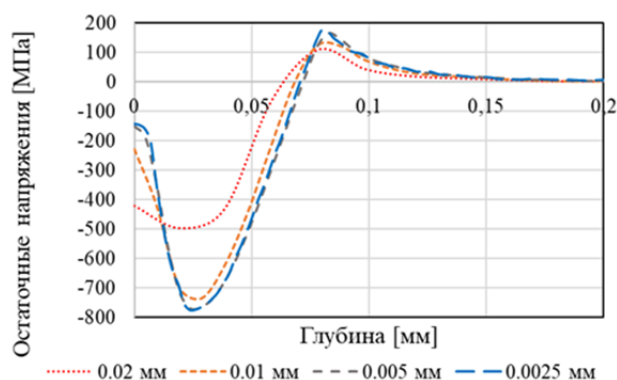


Рис. 2. Остаточные напряжения по глубине образца в зависимости от разрешения сетки

На рис. 3 показано влияние количества ударов дробинки на остаточные напряжения. Видно, что при 12 ударах достигалось насыщение поверхностного слоя по всей толщине.

Для определения влияния нагрева в области контакта на остаточные напряжения сравнивались результаты двух типов расчетов: механического (без учета перехода энергии в тепловую и изменения внутренней энергии тел) и термомеханического

(с учетом увеличения внутренней энергии из-за нагрева).

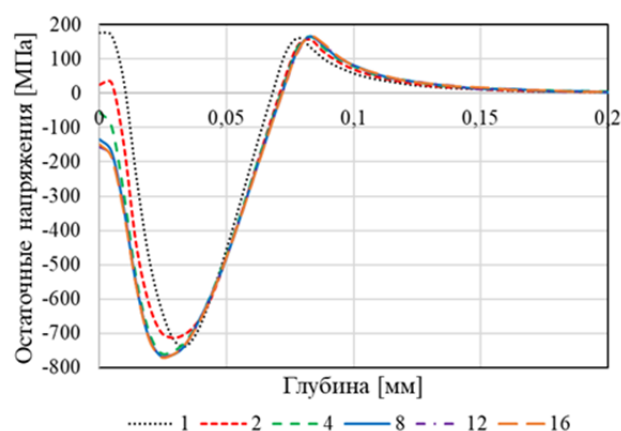


Рис. 3. Остаточные напряжения по глубине образца в зависимости от количества частиц

На рис. 4 представлено распределение остаточных напряжений с учетом нагрева и без него для скоростей 30 и 40 м/с (так как очевидно, что максимальная разница может быть достигнута для наиболее высоких из рассмотренных скоростей). Максимальные значения напряжений сжатия отличались на 0,5%, а профили остаточных напряжений совпадали. Видно, что гораздо большее влияние на распределение по толщине имела скорость дробы. На рис. 5 представлена картина нагрева титанового сплава после 12 ударов дробы для разных скоростей. Максимальный нагрев был получен для скоростей 30 и 40 м/с и составил 15 °С. По-видимому, отсутствие влияния нагрева на остаточные напряжения связано с малой энергией дробинки при рассматриваемых скоростях.

Дальнейшие работы должны быть направлены на изучение влияния учета нагрева при других характерных для процесса дробеударного упрочнения скоростях и углах падения частиц, а также других пар материалов и размеров дробы. Полученные выводы о необходимом количестве частиц, размере элемента сетки в области контакта, картине распределения остаточных напряжений и степени их изменения при увеличении скорости будут полезны при моделировании дробеударного формообразования, а также при моделировании абразивного износа для других материалов и при более высоких скоростях. Кроме того, эти результаты могут быть использованы при моделировании многочисленных одновременных ударов дробы, что требуется для приближения математической модели к реальным условиям процесса.

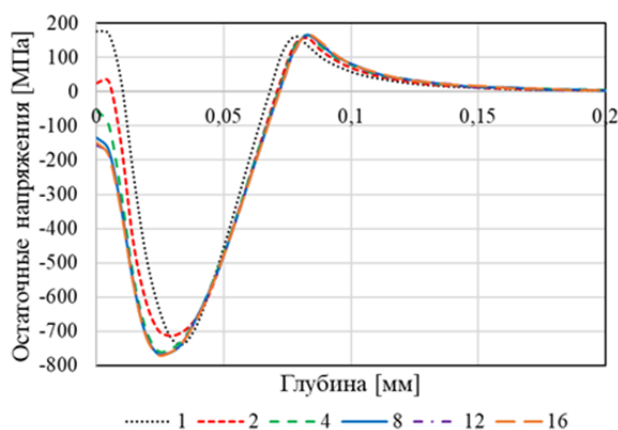


Рис. 4. Влияние учета нагрева, (с) – с учетом нагрева в области контакта

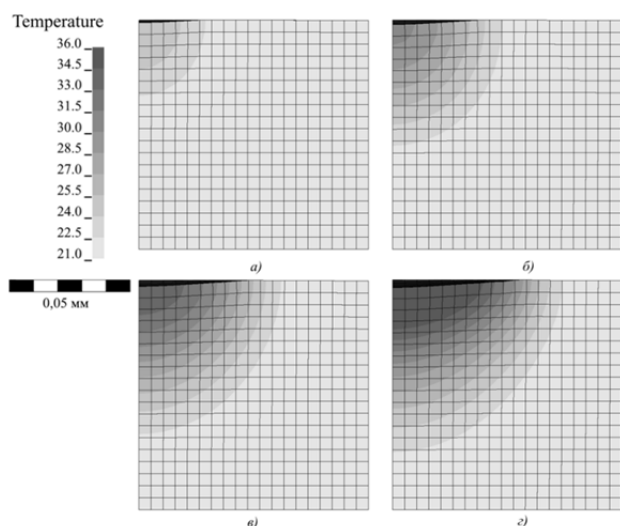


Рис. 5. Распределение температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) по образцу после 12 соударений, а – 10 м/с, б – 20 м/с, в – 30 м/с, г – 40 м/с

### Заключение

Для всех рассмотренных сеточных разрешений наблюдалось качественно подобное распределение остаточных напряжений, а также равная глубина деформированного слоя – 0,17 мм. Максимальные остаточные сжимающие напряжения при этом достигали приблизительно 770 МПа.

Для рассмотренных условий сеточная сходимость достигалась при размере элемента в области контакта 0,005 мм, что составляло 1,7% от диаметра дроби, а независимость результатов от количества частиц достигалась при 12 ударах дроби.

Подготовленная с учетом анализа сеточной сходимости и сходимости по количеству частиц математическая модель позволила определить для рассмотренных скоростей максимальный нагрев в области контакта, который составил 15  $^{\circ}\text{C}$ . Влия-

ние учета нагрева образца на итоговое распределение остаточных напряжений незначительно. Таким образом, при моделировании дробеударной обработки при подобных условиях нагрев может не учитываться.

Полученные выводы об остаточных напряжениях при ударе дробью, их распределении, влиянии учета нагрева, необходимом сеточном разрешении и количестве ударов дробинок будут полезны при моделировании подобных задач дробеударного / дробеструйного упрочнения и формообразования, что ускорит построение новых полноценных математических моделей этих технологических процессов и позволит их оптимизировать в конкретных условиях производства.

### Список источников

1. **Tarodiya R., Levy A.** Surface erosion due to particle-surface interactions: A review // *Powder Technology*. 2021. Vol. 387. P. 527–559. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.04.055
2. **Fardan A., Berndt Christopher C., Ahmed R.** Numerical modelling of particle impact and residual stresses in cold sprayed coatings: A review. *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 409. Article number 126835. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126835
3. **Кисёлев И.А., Жуков Н.А., Васильев Б.Е., Селиванов А.Н.** Учет остаточных напряжений при расчетах прочности элементов замковых соединений. Часть 1. Моделирование дробеструйной обработки // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2018. № 11. С. 49–59. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-11-49-59
4. **Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А., Нгуен Минь Хоанг.** Моделирование формирования основных показателей качества поверхностного слоя деталей при дробеударном упрочнении // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2022. № 3(75). С. 50–58. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).50-58.
5. **Пашков А.Е., Пашков А.А., Самойленко О.В.** Исследование начальных напряжений процесса обработки дробью // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2022. Т. 20. № 4. С. 120–128. DOI:10.18503/1995-2732-2022-20-4-120-128
6. **Faucheux P.** Simulating Shot Peen Forming with Eigenstrains. Ph.D. thesis. Polytechnique Montréal. PolyPublie, 2019. URL: <https://publications.polymtl.ca/4189/> (дата обращения: 25.11.2023)
7. **Wu J., Chen K., Zhang P., Zhu J., Liu G., Wei P., Liu H.** Effects of peening velocity and coverage on peen forming // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2023. DOI: 10.1177/09544089231207086.

8. **Люшня Д.А.** Исследование процесса дробеструйной обработки с применением DEM-FEM подхода // *Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2022 (ICMSSTE 2022): материалы Международной научно-практической конференции (Ялта, 16–19 мая 2022 г.)*. Симферополь: Издательский дом КФУ, 2022. С. 531–537.
9. **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. No. 11 (3). Article number 035218. DOI: 10.1063/5.0042928
10. **Бабайцев А.В., Рабинский Л.Н., Мин Я.Н.** Методика оценки остаточных напряжений в образцах из сплава AlSi10Mg, полученных по технологии SLM // *Труды МАИ*. 2021. № 119. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159788>. DOI: 34759/trd-2021-119-10
11. **Сазанов В.П., Кирпичёв В.А., Письмаров А.В.** Распределение остаточных напряжений во впадинах резьбы после опережающего поверхностного пластического деформирования // *Труды МАИ*. 2023. № 131. DOI: 10.34759/trd-2023-131-07
12. **Ковалев А.А., Краско А.С., Сидоров П.А.** Моделирование ударного взаимодействия напыляемых частиц с поверхностью детали при формировании плазменных покрытий // *Вестник МАИ*. 2021. Т. 28. № 4. С. 257–266. DOI: 10.34759/vst-2021-4-257-266
13. **Khan A., Suh Y.S., Kazmi R.** Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys // *International Journal of plasticity*. 2004. Vol. 20. Iss. 12. P. 2233–2248. DOI: 10.1016/j.ijplas.2003.06.005
14. **Steinberg D.J.** Equation of state and strength properties of selected materials, Lawrence Livermore national laboratory report. UCRL-MA-106439, Livermore, CA, 1996. URL: [https://books.google.ru/books/about/Equation\\_of\\_State\\_and\\_Strength\\_Propertie.html?id=UyEXHAAACAAM&redir\\_esc=y](https://books.google.ru/books/about/Equation_of_State_and_Strength_Propertie.html?id=UyEXHAAACAAM&redir_esc=y) (дата обращения: 25.11.2023).
15. **ASM Aerospace Specification Metals Inc.** URL: <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mtp641> (дата обращения: 25.11.2023).
16. **Kuznetsov V., Smolin I., Skorobogatov A., Akhmetov A.** Finite Element Simulation and Experimental Investigation of Nanostructuring Burnishing AISI 52100 Steel Using an Inclined Flat Cylindrical Tool // *Applied Sciences and Technology*. 2023. No. 13. Article number 5324. DOI: 10.3390/app13095324
17. **Chen W., Shi Y., Ma J., Xu C., Lu S., Xu X.** Stochastic Material Point Method for Analysis in Non-Linear Dynamics of Metals // *Metals*. 2019. No. 9. Article number 107. DOI: 10.3390/met9010107
18. **Matweb.** Material property data. URL: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d0b0a51bff894778a97f5b72e7317d85&ckck=1> (дата обращения: 25.11.2023).
19. **Totten G.E.** ASM handbook. Volume 18: Friction, lubrication, and wear technology. ASM international, Cleveland. 1992. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/>ASM-Handbook%2C-Volume-18%3A-Friction%2C-Lubrication%2C-and-Totten/ca1cb69c1df9f26ce0c068e521ecb57f07cd3dc7/ (дата обращения: 25.11.2023).

## References

1. **Tarodiya R., Levy A.** Surface erosion due to particle-surface interactions: A review. *Powder Technology*, 2021, vol. 387, pp. 527–559. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.04.055
2. **Fardan A., Berndt Christopher C., Ahmed R.** Numerical modelling of particle impact and residual stresses in cold sprayed coatings: A review. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 409, article number 126835. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126835
3. **Kiselev I.A., Zhukov N.A., Vasilyev B.E., Selivanov A.N.** Modeling of Residual Stresses when Calculating Strength of Lock Joint Elements. Part 1. Modeling of the Shot Peening Process. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2018, no. 11, pp. 49–59. (In Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2018-11-49-59.
4. **Kol'tsov V.P., Le Chi Vinh, Starodubtseva D.A., Nguyen Minh Hoang.** Modeling of the formation of the main quality indicators of the surface layer of parts during shot-impact hardening. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2022, no. 3(75), pp. 50–58. (In Russ.). DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).50-58.
5. **Pashkov A.E., Pashkov A.A., Samoilenko O.V.** Development of Initial Stresses During Shot Peening. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 120–128. (In Russ.). URL: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-120-128>
6. **Faucheux P.** Simulating Shot Peen Forming with Eigenstrains. Ph.D. thesis. Polytechnique Montréal. PolyPublie, 2019. URL: <https://publications.polymtl.ca/4189/> (access date: 25.11.2023)
7. **Wu J., Chen K., Zhang P., Zhu J., Liu G., Wei P., Liu H.** Effects of peening velocity and coverage on peen forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2023. DOI: 10.1177/09544089231207086.
8. **Lyushnya D.A.** Issledovanie protsessa drobestruinoi obrabotki s primeneniem DEM-FEM podkhoda [Investigation of the blasting process using a DEM-FEM approach]. *Materials science, shape-generating technologies and equipment 2022 (ICMSSTE 2022)* (Yalta, May 16–19, 2022). Simferopol': Izdatel'skii dom Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo, 2022, pp. 531–537. (In Russ.).
9. **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, no. 11 (3), article number 035218. DOI: 10.1063/5.0042928.
10. **Babaitsev A.V., Rabinskii L.N., Min Y.N.** Method for evaluating residual stresses in AlSi10Mg alloy speci-

- mens obtained by SLM technology. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. (In Russ.). URL: DOI: 10.34759/trd-2021-119-10.
11. **Sazanov V.P., Kirpichev V.A., Pismarov A.V.** Distribution of residual stresses in bottom of thread after advance surface plastic deformation. *Trudy MAI*, 2023, no. 131. (In Russ.). DOI: 10.34759/trd-2023-131-07.
  12. **Kovalev A.A., Krasko A.S., Sidorov P.A.** Shock interaction simulation of sprayed particles with the part surface while plasma coatings forming. *Vestnik MAI*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 257–266. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2021-4-257-266.
  13. **Khan A., Suh Y.S., Kazmi R.** Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys. *International Journal of plasticity*, 2004, vol. 20, iss. 12, pp. 2233–2248. DOI: 10.1016/j.ijplas.2003.06.005.
  14. **Steinberg D.J.** Equation of state and strength properties of selected materials, Lawrence Livermore national laboratory report. UCRL-MA-106439, Livermore, CA, 1996. URL: [https://books.google.ru/books/about/Equation\\_of\\_State\\_and\\_Strength\\_Propertie.htm?id=UyEX\\_HAAACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.ru/books/about/Equation_of_State_and_Strength_Propertie.htm?id=UyEX_HAAACAAJ&redir_esc=y) (access date: 25.11.2023).
  15. ASM Aerospace Specification Metals Inc. URL: <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mtp641> (date of appeal: 25.11.2023).
  16. **Kuznetsov V., Smolin I., Skorobogatov A., Akhmetov A.** Finite Element Simulation and Experimental Investigation of Nanostructuring Burnishing AISI 52100 Steel Using an Inclined Flat Cylindrical Tool. *Applied Sciences and Technology*, 2023, no. 13, article number 5324. DOI: 10.3390/app13095324
  17. **Chen W., Shi Y., Ma J., Xu C., Lu S., Xu X.** Stochastic Material Point Method for Analysis in Non-Linear Dynamics of Metals. *Metals*, 2019, no. 9, article number 9010107. DOI: 10.3390/met9010107.
  18. Matweb. Material property data. URL: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d0b0a51bff894778a97f5b72e7317d85&ckck=1> (access date: 25.11.2023).
  19. **Totten G.E.** ASM handbook, Volume 18: Friction, lubrication, and wear technology. ASM international, Cleveland, 1992. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/ASM-Handbook%2C-Volume-18%3A-Friction%2C-Lubrication%2C-and-Totten/ca1cb69c1df9f26ce0c068e521ecb57f07cd3dc7/> (access date: 25.11.2023).

Статья поступила в редакцию 17.11.2023; одобрена после рецензирования 06.12.2023; принята к публикации 25.12.2023.

The article was submitted on 17.11.2023; approved after reviewing on 06.12.2023; accepted for publication on 25.12.2023.