



УДК 621.785

DOI 10.17073/0368-0797-2024-2-155-160



Оригинальная статья
Original article

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕССОВОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ЛАЗЕРОМ

Н. А. Чиченев¹, С. М. Горбатюк¹, К. Н. Соломонов²,
С. А. Снитко³, О. Н. Чиченева¹

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

² Филиал Ростовского государственного университета путей сообщения в г. Воронеж (Россия, 394026, Воронеж, ул. Урицкого, 75а)

³ Донецкий национальный технический университет (Россия, Донецкая народная республика, 283001, Донецк, ул. Артема, 58)

✉ chich38@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена повышению износостойкости кузнечно-прессового инструмента, в частности пуансонов для пробивки отверстий и вырубных штампов. Низкая стойкость инструмента приводит к повышению стоимости готовых изделий, увеличению трудовых и материальных затрат на замену изношенного инструмента и его наладку, снижению производительности прессового оборудования и повышению количества бракованной продукции. Представлена методика теоретического исследования для решения задачи по расчету температурного поля штампового инструмента при лазерной обработке. Составлено дифференциальное уравнение для численного решения поставленной задачи. Предложены режимы лазерной термообработки пуансона для пробивки отверстий и штампового инструмента из стали повышенной твердости. Натурные испытания, проведенные в промышленных условиях, показали, что рекомендованные режимы лазерной термообработки позволили повысить стойкость пуансона, предназначенного для пробивки отверстий, в 2–3 раза, а стойкость вырубных штампов в 2,2–2,8 раз.

Ключевые слова: кузнечно-прессовое производство, поле температур, пуансон, штамп, лазер

Для цитирования: Чиченев Н.А., Горбатюк С.М., Соломонов К.Н., Снитко С.А., Чиченева О.Н. Исследование изменения температуры прессового инструмента при обработке лазером. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(2):155–160. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-155-160>

INVESTIGATION OF CHANGES IN TEMPERATURE OF PRESSING TOOL DURING LASER PROCESSING

N. A. Chichenev¹, S. M. Gorbatyuk¹, K. N. Solomonov²,
S. A. Snitko³, O. N. Chicheneva¹

¹ National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

² Voronezh Branch of the Rostov State Transport University (75a Uritskogo Str., Voronezh 394026, Russian Federation)

³ Donetsk National Technical University (58 Artema Str., Donetsk, Donetsk People’s Republic 283001, Russian Federation)

✉ chich38@mail.ru

Abstract. The article is devoted to improving the wear resistance of forging tools, in particular punches for punching holes and cutting stamp dies. Low tool life leads to an increase in the cost of finished products, an increase in labor and material costs for replacing worn tools and adjusting them, a decrease in the productivity of pressing equipment and an increase in the number of defective products. A method is presented for theoretical research of solving the problem of calculating the temperature field of a stamp die tool during laser processing. A differential equation was compiled for a numerical solution of the problem. The authors proposed the modes of laser heat treatment of a punch for punching holes and a stamp die tool made of high-hardness steel. Field tests conducted in industrial conditions showed that the proposed laser heat treatment modes made it possible to increase resistance of the punch intended for punching holes by 2–3 times and the resistance of the stamp dies by 2.2–2.8 times.

Keywords: press forging, temperature field, punch, stamp die, laser

For citation: Chichenev N.A., Gorbatyuk S.M., Solomonov K.N., Snitko S.A., Chicheneva O.N. Investigation of changes in temperature of pressing tool during laser processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2024;67(2):155–160. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-155-160>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее широко распространенных способов холодной обработки металлов давлением (ОМД) является холодная штамповка [1 – 3], которая позволяет производить высокоточные детали широкого сортамента. В качестве инструмента для осуществления этого процесса используют штампы холодного деформирования [4 – 6]. В последние годы весьма актуальной является задача по разработке новых отечественных технологий [7; 8], направленных на повышение качества выпускаемой продукции и снижение ее себестоимости. Эта задача может быть эффективно решена путем совершенствования оборудования и инструмента, в том числе ОМД [9; 10].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одной из главных причин нарушения работоспособности штампового инструмента является износ его рабочих поверхностей. Для повышения стойкости технологического инструмента ОМД применяют термическую, термохимическую и термомеханическую обработку [11 – 13]. Эти способы существенно повышают твердость рабочих поверхностей инструмента и увеличивают прочность основного металла, из которого изготавливается инструмент. Эффективным методом повышения качества технологического инструмента ОМД является обработка его рабочих поверхностей с помощью лазерного излучения. Лазерная обработка характеризуется малым временем воздействия на обрабатываемые поверхности и полностью исключает их деформацию. При воздействии лазера нагреву подвергается только тонкий поверхностный слой обрабатываемой детали [14 – 16]. Как показали многочисленные исследования, тепловые процессы, протекающие при нагреве лазером, схожи с результатами теплового воздействия на металлы других способов их нагрева. Это позволяет, с учетом специфики лазерной термообработки, применять классические уравнения теории теплопроводности для решения теоретических задач лазерной обработки.

В данной работе приведено решение задачи по расчету температурного поля штампового инструмента при упрочнении его рабочей поверхности лазерным излучением.

МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ

Как известно, результат закалки инструментальных сталей [17; 18] существенно зависит от распределения температурного поля, образующегося при данном процессе [19; 20]. Для упрочнения поверхностных слоев необходимо нагреть рабочую поверхность штампа

выше температуры аустенитного превращения T_a , после чего быстро охладить до температуры ниже перлитного превращения T_p . Если для термообработки применять лазерный луч высокой плотности, то поверхностные слои инструмента будут нагреваться до температуры, зависящей от продолжительности лазерного излучения и его мощности. После лазерного нагрева поверхность штампа быстро остывает. Это происходит из-за передачи тепла от нагретой поверхности штампа остальным удаленным участкам инструмента. Причем температура нагрева участков зависит от их удаленности от поверхности штампа. Глубину закаленного слоя можно оценить, изучив характеристики образовавшегося температурного поля [21; 22].

Приведем математическое описание температурного поля для цилиндрического пуансона вырубki (рис. 1).

Изменение температуры T во времени t можно рассчитать путем численного решения двухмерного дифференциального уравнения, которое в цилиндрической системе координат имеет вид [23 – 25]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right).$$

Здесь $T(r, z, t)$ – температура в произвольный момент времени t в любой точке пуансона, характеризуемой цилиндрическими координатами r и z ; a – коэффициент температуропроводности материала пуансона; q – плотность мощности внешнего источника тепла (лазерного излучения) [26 – 28].

Зададим начальные и граничные условия:

– в начальный момент деформации заготовки температура пуансона принимается одинаковой во всем объеме, т. е.

$$T_0 = T(z, r, 0) = \text{const};$$

– на свободных поверхностях пуансона происходит теплообмен конвективного и лучистого типов с окружающей средой

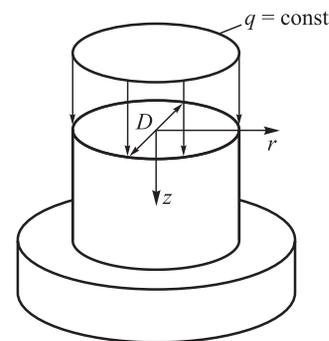


Рис. 1. Схема к расчету температурного поля цилиндрического пуансона диаметром D

Fig. 1. Calculation scheme for temperature field of a cylindrical punch of diameter D

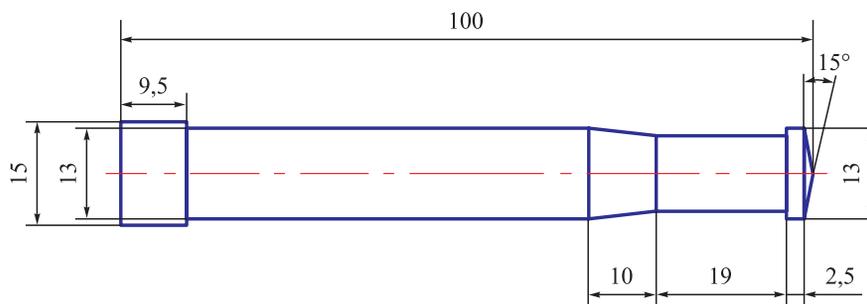


Рис. 2. Пуансон для пробивки отверстий

Fig. 2. Hole punch

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha(T_{\text{пов}} - T_{\text{ср}}) + \varepsilon\sigma \left[(T_{\text{пов}} - 273)^4 - (T_{\text{ср}} - 273)^4 \right];$$

– на торцевой (облучаемой) поверхности пуансона происходит теплообмен лучистого типа

$$\frac{\partial T}{\partial t} = q + \varepsilon\sigma \left[(T_{\text{пов}} - 273)^4 - (T_{\text{ср}} - 273)^4 \right],$$

где α – коэффициент конвективной теплопередачи; $T_{\text{пов}}$ и $T_{\text{ср}}$ – температуры поверхности пуансона и окружающей среды соответственно; ε – степень черноты поверхности пуансона; σ – коэффициент излучения абсолютно твердого тела.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

По приведенной выше методике были проведены теоретические и экспериментальные исследования для пуансона (рис. 2), изготовленного из хромистой инструментальной стали повышенной твердости X12M¹ [29; 30] диаметром рабочей поверхности $D = 13$ мм.

На основе анализа результатов предварительного эксперимента с образцами из стали X12M, которые хорошо согласуются с известными из научно-технической литературы данными [31; 32], в дальнейших исследованиях использовали следующие значения теплофизических параметров:

- коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,028$ Вт/(мм·°C);
- коэффициент температуропроводности $a = 7,78$ мм²/с;
- температура закалки $T_{\text{зак}} = 1000$ °C;
- температура плавления $T_{\text{пл}} = 1280$ °C.

На рис. 3 приведены результаты расчета температурного поля в осевом и радиальном направлениях при $\lambda = \text{const}$ (сплошные линии) и $\lambda = f(T)$ (штриховые) при мощности лазерного излучения $P = 0,97$ кВт, скорости перемещения лазерного луча $v = 12$ мм/с и диаметре лазерного пятна $d_{\text{л}} = 4$ мм. Анализ полученных гра-

фиков показывает, что разница между температурой пуансона, полученной при постоянном и переменном значении λ , незначительная. Поэтому при проведении инженерных расчетов можно принимать среднее значение коэффициента теплопроводности.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных результатов исследования послужил основанием для проведения натурного эксперимента. Из стали X12M были изготовлены две опытные партии пуансонов и матриц, предназначенных для выполнения различных операций штамповки. Первая партия проходила традиционную объемную термическую обработку. Вторая – дополнительную упрочняющую обработку с помощью CO₂-лазера. На основе полученных данных были рекомендованы следующие параметры лазерного излучения для эффективного упрочнения рабочей поверхности штампового инструмента: при диаметре лазерного пятна $d_{\text{л}} = 4$ мм мощность лазерного излучения $P = 0,95 - 0,99$ кВт, скорость перемещения лазерного луча $v = 11 - 13$ мм/с.

Опытно-промышленные испытания показали, что после лазерной термообработки стойкость штампового

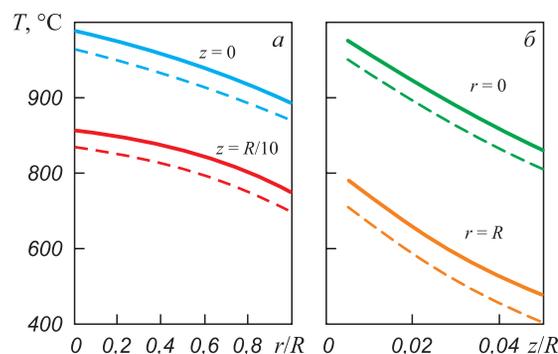


Рис. 3. Графики изменения температуры пуансона в осевом (а) и радиальном (б) направлениях при $\lambda = \text{const}$ (сплошные линии) и $\lambda = f(T)$ (штриховые линии)

Fig. 3. Graphs of the punch temperature change in axial (a) and radial (б) directions at $\lambda = \text{const}$ (solid lines) and $\lambda = f(T)$ (dashed lines)

¹ Характеристика материала X12M / Марочник стали и сплавов. URL: <http://www.splav-kharkov.com> (дата обращения 23.08.2023).

инструмента существенно возрастает. Так, у пуансонов для пробивки отверстий после традиционной термической обработки ресурс работы составляет 10 – 12 ч, а после дополнительной упрочняющей лазерной обработки стойкость повысилась до 20 – 36 ч, т. е. возросла в 2 – 3 раза. Опытные-промышленные испытания опытной партии вырубных штампов в количестве 20 шт. показали, что применение дополнительной упрочняющей обработки с помощью CO₂-лазера позволяет повысить их эксплуатационную стойкость в 2,2 – 2,8 раз. Технично-экономическая эффективность от применения лазерного упрочнения определяется не только экономией дорогостоящей инструментальной стали, но и снижением трудовых затрат за счет того, что удалось совместить периодичность замены штампового инструмента с графиком профилактических и ремонтных работ.

Выводы

Предложена методика теоретического исследования температурного поля цилиндрического пуансона, образующегося при лазерной обработке. Методика основана на базе численного решения двумерного дифференциального уравнения в цилиндрической системе координат. В результате теоретического исследования предложены режимы лазерной термообработки штампового инструмента различного назначения, изготовленного из инструментальной стали X12M. Исследования, проведенные в промышленных условиях, показали, что лазерная термообработка, выполненная по предложенным режимам, позволила повысить эксплуатационную стойкость пуансонов для вырубки отверстий в 2 – 3 раза, а вырубных штампов в 2,2 – 2,8 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Рогов В.А., Позняк Г.Г. Технология машиностроения. Штамповочное и литейное производство: Учебник. Москва: Издательство Юрайт; 2022:319.
2. Константинов И.Л., Сидельников С.Б. Кузнечно-штамповочное производство: Учебник. Москва: НИЦ ИНФРА-М; 2021:464.
3. Семенов Е.И. Ковка и горячая штамповка: Учебник. Москва: МГИУ; 2011:414.
4. Бочаров Ю.А. Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник. Москва: Академия; 2008:479.
5. Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н. Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник / Под ред. Л.И. Живова. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2006:560.
6. Ефремов Д.Б., Степанов В.М., Чиченева О.Н. Модернизация механизма быстрого отжима валков прокатной клетки ДУО стана 2800 АО «Уральская Сталь». *Сталь*. 2020;(8):44–47.
Efremov D.B., Stepanov V.M., Chicheneva O.N. Upgrading of the roll emergency lifting mechanism of the mill 2800 rolling stand of the JSC “Ural Steel”. *Stal’*. 2020;(8):44–47. (In Russ.).
7. Nefedov A.V., Svichkar V.V., Chicheneva O.N. Re-engineering of equipment to feed the melting furnace with aluminum charge. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021: 1198–1204. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_139
8. Нефедов А.В., Китанов А.А., Чиченев Н.А. Реинжиниринг роликовой закалочной машины листопрокатного цеха АО «Уральская Сталь». *Черные металлы*. 2022;(3):22–26.
Nefedov A.V., Kitanov A.A., Chichenev N.A. Reengineering of the roller hardening machine of the sheet-rolling shop of JSC Ural Steel. *Chernye metally*. 2022;(3):22–26. (In Russ.).
9. Нефедов А.В., Танчук А.В., Чиченев Н.А. Модернизация привода опрокидывателя рудных вагонеток Донского ГОК АО «ТНК Казхром». *Горный журнал*. 2022;(8): 52–56. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.08.07>
Nefedov A.V., Tanchuk A.V., Chichenev N.A. Modernization of the tipper drive for ore trolleys at the Donskoy Mining and Processing Plant of TNK Kazchrome JSC. *Gornyi zhurnal*. 2022;(8):52–56. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/gzh.2022.08.07>
10. Самусев С.В., Фадеев В.А., Сидорова Т.Ю. Разработка эффективных калибровок формовки листовой заготовки для производства прямошовных электросварных труб малого и среднего диаметров. *Металлург*. 2020;(7):55–59.
Samusev S.V., Fadeev V.A., Sidorova T.Yu. Development of effective calibrations for forming blank for production of longitudinal welded pipes of small and medium diameters. *Metallurgist*. 2020;64(7–8):658–664.
<https://doi.org/10.1007/s11015-020-01042-4>
11. Горбатюк С.М., Морозова И.Г., Наумова М.Г. Разработка рабочей модели процесса реиндустриализации производства термической обработки штамповых сталей. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2017;60(5):410–415. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-5-410-415>
Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Development of the working model of production reindustrialization of die steel heat treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017;60(5):410–415. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-5-410-415>
12. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: справочник. В 3-х т. Т. 3. Термическая и термомеханическая обработка стали и чугуна / Под ред. Рахштадта А.Г., Капуткиной Л.М., Прокошкина С.Д., Супова А.В. Москва: Интермет Инжиниринг; 2007:919.
13. Стенико А., Тами В. Совершенствование процесса прямой закалки на заводе компании Nucor Tuscaloosa. *Черные металлы*. 2018;(12):41–43.
Steniko A., Tami V. Improvement of direct hardening process at the Nucor Tuscaloosa plant. *Chernye metally*. 2018;(12):41–43. (In Russ.).
14. Chichenev N.A., Gorbatyuk S.M., Naumova M.G., Morozova I.G. Using the similarity theory to describe laser hardening processes. *CIS Iron and Steel Review*. 2020;19:44–47
15. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учебное пособие. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2006:663.
16. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В.Я. Панченко. Москва: ФИЗМАТЛИТ; 2009:664.

17. Milenin A., Petrov P., Petrov M., Krutina E. Numerical model of fracture in magnesium alloys during forming processes. *Steel Research International*. 2012;(SPL. ISSUE):847–850.
18. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Крутина Е.В. Методика расчета деформационных и энергосиловых параметров при совмещенной ротационной вытяжке и поперечной прокатке дисков колес. *Производство проката*. 2019;(10):9–14.
Maksimov E.A., Shatalov R.L., Krutina E.V. Procedures for calculation of deformation and energy-power parameters for combined rotary drawing and cross rolling of wheel disks. *Proizvodstvo prokata*. 2019;(10):9–14. (In Russ.).
19. Kiani-Rashid A.R., Rounaghi S.A. The new methods of graphite nodules detection in ductile cast iron. *Materials and Manufacturing Processing*. 2011;26(2):242–248.
<https://doi.org/10.1080/10426914.2010.520788>
20. Di Cocco V., Iacoviello F., Cavallini M. Damaging micro-mechanisms characterization of a ferritic ductile cast iron. *Engineering Fracture Mechanics*. 2010;77(11):2016–2023.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.03.037>
21. Chaus A.S., Sojka J., Pokrovskii A.I. Effect of hot plastic deformation on microstructural changes in cast iron with globular graphite. *The Physics of Metals and Metallography*. 2013; 114(1):84–95. <https://doi.org/10.1134/S0031918X13010031>
22. Zhao X., Jing T.F., Gao Y.W., Qiao G.Y., Zhou J.F., Wang W. Morphology of graphite in hot compressed nodular iron. *Journal of Materials Science*. 2004;39(19):6093–6096.
<https://doi.org/10.1023/B:JMSS.0000041709.60100.56>
23. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. Москва: Наука; 1964:487.
Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Conduction of Heat in Solids*. London: Oxford University Press; 1947.
24. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики: учебник. Москва: МГУ им. М.В. Ломоносова; 2004:800.
25. Thambunayagam R. K. M. *The Diffusion Handbook: Applied Solutions for Engineers*. McGraw-Hill Professional; 2011:2048.
26. Ткаченко Л.А., Репина А.В. Теория теплообмена: Учебное пособие. Казань: Изд-во Казанского университета; 2017:151.
27. Ushakov I.V. Method of mechanical testing of laser treated metallic glass by indenters with different geometry. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2007;6597:659714. <https://doi.org/10.1117/12.726773>
28. Shinkaryov A.S., Ozherelkov D.Yu., Pelevin I.A., Eremin S.A., Anikin V.N., Burmistrov M.A., Chernyshikhin S.V., Gromov A.A., Nalivaiko A.Yu. Laser fusion of aluminum powder coated with diamond particles via selective laser melting: powder preparation and synthesis description. *Coatings*. 2021;11(10):1219.
<https://doi.org/10.3390/coatings11101219>
29. Ganzulenko O.Y., Petkova A.P. Simulation and approbation of the marking laser process on metal materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1753(1):012016.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012016>
30. Пичуев А.В., Петров В.Л. Обоснование схемы замещения шахтной подземной электрической сети для анализа режимов утечки тока через изоляцию. *Горные науки и технологии*. 2023;8(1):78–86.
<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-72>
Pichuev A.V., Petrov V.L. Equivalent circuit for mine power distribution systems for the analysis of insulation leakage current. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):78–86. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-72>
31. Zhang Y.Q., Jiang S.Y., Zhao Y.N., Shan D.B. Isothermal precision forging of complex-shape rotating disk of aluminum alloy based on processing map and digitized technology. *Materials Science and Engineering: A*. 2013;580:294–304.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.05.059>
32. Zheng J.H., Lin J.G., Lee J., Pan R., Li C., Davies C.M. A novel constitutive model for multi-step stress relaxation ageing of a pre-strained 7xxx series alloy. *International Journal of Plasticity*. 2018;106:31–47.
<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2018.02.008>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Николай Алексеевич Чиченев, д.т.н., профессор кафедры инжиниринга технологического оборудования, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ORCID: 0000-0002-9019-4675

E-mail: chich38@mail.ru

Сергей Михайлович Горбатюк, д.т.н., профессор кафедры «Инжиниринг технологического оборудования», Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ORCID: 0000-0002-4368-5965

E-mail: sgor02@mail.ru

Константин Николаевич Соломонов, д.т.н., профессор кафедры социально-гуманитарных, естественно-научных и общепрофессиональных дисциплин, Филиал Ростовского государственного университета путей сообщения в г. Воронеж

E-mail: konssol@list.ru

Сергей Александрович Снитко, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением», Донецкий национальный технический университет

ORCID: 0000-0002-1099-5801

E-mail: snitko_sa@mail.ru

Nikolai A. Chichenev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0002-9019-4675

E-mail: chich38@mail.ru

Sergei M. Gorbatyuk, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0002-4368-5965

E-mail: sgor02@mail.ru

Konstantin N. Solomonov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Social, Humanitarian, Natural Sciences and General Professional Discipline, Voronezh Branch of the Rostov State Transport University

E-mail: konssol@list.ru

Sergei A. Snitko, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair “Metal Forming”, Donetsk National Technical University

ORCID: 0000-0002-1099-5801

E-mail: snitko_sa@mail.ru

Ольга Николаевна Чиченева, к.т.н., доцент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
E-mail: chich38@mail.ru

Ol'ga N. Chicheneva, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., National University of Science and Technology "MISIS"
E-mail: chich38@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Н. А. Чиченев – разработка методики расчета температурного поля цилиндрического тела.

С. М. Горбатюк – анализ и обобщение полученных результатов моделирования.

К. Н. Соломонов – формирование концепции статьи, определение цели и задачи исследования, подготовка текста.

С. А. Снитко – техническое обоснование задач исследования, обоснование параметров процесса.

О. Н. Чиченева – графическое оформление полученных результатов.

N. A. Chichenev – development of method for calculating the temperature field of a cylindrical body.

S. M. Gorbatyuk – analysis and generalization of the obtained modeling results.

K. N. Solomonov – formation of the article concept, setting the research goals and objectives, writing the text.

S. A. Snitko – technical justification of research tasks, justification of process parameters.

O. N. Chicheneva – graphic design of the obtained results.

Поступила в редакцию 17.09.2023
 После доработки 07.01.2024
 Принята к публикации 23.03.2024

Received 17.09.2023
 Revised 07.01.2024
 Accepted 23.03.2024