

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Левченко Е.А. Моделирование энергоемкости пластической деформации работы режущих поверхностей отрезного круга при абразивной разрезке труб // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 15–20. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.02

Please cite this article in English as:

Levchenko E.A. Modeling the energy intensity of plastic deformation of the cutting surfaces of the cutting wheel during abrasive cutting of pipes. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 1, pp. 15-20. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.02

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 24, № 1, 2022
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.02

УДК 621.914.02

Е.А. Левченко

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ
ДЕФОРМАЦИИ РАБОТЫ РЕЖУЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТРЕЗНОГО КРУГА
ПРИ АБРАЗИВНОЙ РАЗРЕЗКЕ ТРУБ**

Рассмотрены особенности моделирования энергоемкости пластической деформации работы боковых режущих поверхностей отрезного круга при абразивной разрезке труб.

Абразивная разрезка материалов, с точки зрения физических процессов, происходящих в поверхностных слоях разрезаемых заготовок, является одним из самых высокотемпературных и высокопластичных процессов механической обработки. Возникающий при разрезке деформационный процесс отличается напряженным состоянием поверхностного слоя разрезаемой заготовки и может характеризоваться наличием как сжимающих, так и растягивающих напряжений, максимальное значение которых не всегда имеет место на поверхности, а смещается вглубь образованного поверхностного слоя сечения детали и приводит к его изменению.

Установлено, что причинами возникновения напряженного состояния сечения паза является неоднородность пластической деформации и локальный нагрев металла поверхностного слоя, а при наличии превращений – разность объемов возникающих структур. В зависимости от условий резки напряженное состояние поверхностного слоя будет определяться либо доминирующим влиянием одного из указанных факторов, либо совместным их действием.

Наблюдаемое неоднородное распределение напряженного состояния поверхностного слоя металла объясняется действием двух факторов – механического (пластической деформации), наводящего только сжимающие напряжения, и теплового (нагрева поверхностного слоя), являющегося причиной образования только растягивающих напряжений.

Приведены результаты исследования закономерностей процесса, которые определяют энергоемкость пластической деформации при абразивной разрезке. Энергоемкость процесса в свою очередь оказывает значительное влияние на ход процесса, в частности на качество и точность изделий.

Представлены аналитические зависимости энергоемкости процесса резки, позволяющие впоследствии разработать математические модели определения составляющих силы резания при абразивной разрезке.

Ключевые слова: абразивная разрезка, поверхностный слой, пластическая деформация, энергоемкость, нагрев, срезаемый слой, механическое воздействие, ширина срезаемого слоя, локальная зона сдвига, отрезной круг, моделирование.

E.A. Levchenko

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

MODELING THE ENERGY INTENSITY OF PLASTIC DEFORMATION OF THE CUTTING SURFACES OF THE CUTTING WHEEL DURING ABRASIVE CUTTING OF PIPES

The features of modeling the energy consumption of plastic deformation of the side cutting surfaces of the cutting wheel during abrasive cutting of pipes are considered.

Abrasive cutting of materials, from the point of view of physical processes occurring in the surface layers of the cut workpieces, is one of the most high-temperature and highly plastic machining processes. The deformation process arising during cutting is characterized by the stressed state of the surface layer of the cut workpiece and can be characterized by the presence of both compressive and tensile stresses, the maximum value of which does not always take place on the surface, but shifts into the depth of the formed surface layer of the section of the part and leads to its change.

It has been established that the causes of the stress state of the groove section are the inhomogeneity of plastic deformation and local heating of the metal of the surface layer, and in the presence of transformations, the difference in the volumes of the emerging structures. Depending on the cutting conditions, the stress state of the surface layer will be determined either by the dominant influence of one of these factors, or by their joint action.

The observed non-uniform distribution of the stress state of the surface layer of the metal is explained by the action of two factors - mechanical (plastic deformation), which induces only compressive stresses, and thermal (heating of the surface layer), which is the cause of the formation of only tensile stresses.

The results of the study of the regularities of the process, which determine the energy intensity of plastic deformation during abrasive cutting, are presented. The energy intensity of the process, in turn, has a significant impact on the course of the process, in particular, on the quality and accuracy of products.

Analytical dependences of the energy consumption of the cutting process are presented, which subsequently make it possible to develop mathematical models for determining the components of the cutting force during abrasive cutting.

Keywords: abrasive cutting, surface layer, plastic deformation, energy consumption, heating, cut layer, mechanical impact, width of cut layer, local shear zone, cutoff wheel, modeling.

Абразивная резка материалов является одним из самых сложных видов глубокой пластической деформации металла, осуществляемой при одновременном воздействии огромных гидростатических давлений и высоких температур в широком диапазоне изменения скоростей деформации.

Условия упругопластической деформации поверхностного слоя при резке металла весьма сложны: давление, скорость деформации металла и температура по глубине поверхностного слоя затухают, имея максимум на поверхности [1–5].

Поверхностный слой поверхности деталей после резки становится пластически деформированным. Степень деформации по глубине поверхностного слоя переменная и изменяется от максимального значения на поверхности до нуля на определенной глубине [6–8]. Температурные и упругопластические деформации заготовки обуславливают искажение с паза, которую она приняла бы после остывания. Действительная форма сечения паза получается с учетом упругих пластических деформаций заготовки (рис. 1).

Из исследования [1] известно, что при абразивной резке деталей из конструкционных сталей усредненная усадка стружки по высоте характеризуется коэффициентом утолщения, равным $K_B = 1,4$, по длине коэффициентом укорочения, равным $K_\alpha = 1,3$, и по ширине – коэффициентом уширения, равным $K_\alpha = 0,93$, что соответствует логарифмической деформации [9]:

$$\varepsilon_1 = 0,08; \quad \varepsilon_2 = -0,42; \quad \varepsilon_3 = 0,34, \quad (1)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – логарифмические деформации срезаемого слоя (стружки) по осям x, y, z .

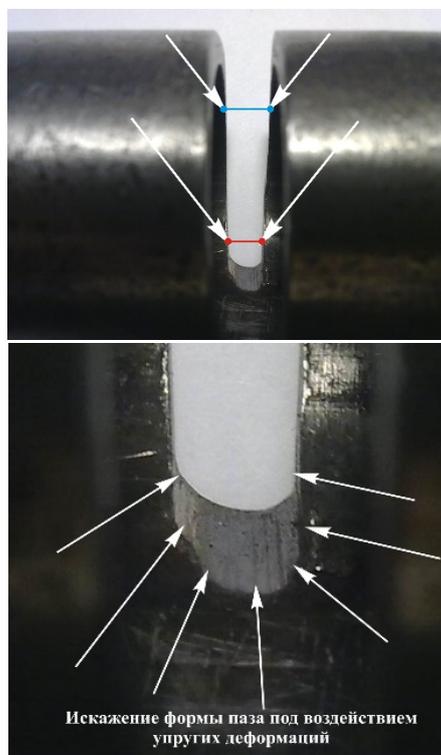


Рис. 1. Деформирование сечения реза трубы под воздействием упругих пластических деформаций

Деформация стружки связана примерно пропорциональной зависимостью [2], а отражением этой зависимости может служить отношение поперечной деформации к продольной, т. е. величиной коэффициента Пуассона. Для рассматриваемых условий деформирования коэффициент Пуассона может быть определен из соотношения [10–12]:

$$\mu = \frac{\delta_1}{\delta_2}, \quad (2)$$

где δ_1 – относительная поперечная деформация срезанного слоя; δ_2 – относительная продольная деформация срезанного слоя.

При единичной длине, ширине и толщине срезанного слоя поперечная деформация равна изменению ширины срезанного слоя (стружки), а выражение для ее определения имеет вид:

$$\delta_1 = \frac{b_y}{b}, \quad (3)$$

где b_y – уменьшение ширины срезанного слоя (стружки); b – ширина срезанного слоя.

Из определения уменьшения ширины срезанного слоя имеем:

$$b_y = b_1 - b, \quad (4)$$

где b_1 – ширина срезанного слоя.

В соответствии с принятыми значениями после подстановки получаем:

$$b_1 = 0,23.$$

Выражение относительной продольной деформации имеет вид:

$$\delta_2 = \frac{a_y}{a}, \quad (5)$$

где a_y – увеличение толщины срезанного слоя; a – толщина срезанного слоя.

Соответственно

$$a_y = a_1 - a, \quad (6)$$

где a_1 – толщина срезанного слоя.

Учитывая значение коэффициента изменения толщины, имеем $\delta_2 = 0,4$. Подставив значения относительных деформаций в (2), получаем $\mu = 0,57$. Полученное значение коэффициента Пуассона выше теоретически возможного $\mu = 0,5$, получаемого при «классических» условиях пластического деформирования [13–15]. Учитывая ско-

рость деформации и температуру, можно считать, что увеличение коэффициента Пуассона связано с условиями пластической деформации, отличающимися от «классических». Принимая напряжение, действующее в поперечном направлении, за единичное σ_s , в соответствии с величиной коэффициента Пуассона имеем:

$$\sigma_y = 1,8\sigma_s, \quad \sigma_z = \sigma_s, \quad (7)$$

где σ_y и σ_z – главные напряжения по осям y и z ; σ_s – предел текучести обрабатываемого при данных условиях материала.

Так как деформация наблюдается и в направлении оси x , то согласно теории малых упругопластических деформаций имеем:

$$\sigma_x = \sigma_s, \quad (8)$$

где σ_x – главное напряжение по оси x .

Учитывая относительную монотонность процесса деформации срезанного слоя, можно в первом приближении считать напряженное состояние в локальной зоне сдвига, отвечающее простому нагружению [2], и использовать известную зависимость для вычисления потенциальной энергии изменения формы при пластическом деформировании срезанного слоя [2]:

$$u = 0,33 \cdot G \cdot V \left[(\epsilon_y - \epsilon_x)^2 + (\epsilon_x - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_y)^2 \right], \quad (9)$$

где G – модуль сдвига разрезаемого материала; V – деформируемый объем.

Деформируемый объем выразим через параметры режимов резания:

$$V = b \cdot a \cdot Z_p, \quad (10)$$

где Z_p – длина пути, пройденного режущим инструментом по разрезанной поверхности.

Согласно теории малых упругопластических деформаций зависимость модуля сдвига от напряжений и деформаций имеет вид [2]:

$$G = \frac{\sigma_i}{3\epsilon_i}, \quad (11)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; ϵ_i – интенсивность деформаций.

Подставив значения главных напряжений в уравнение интенсивности напряжений [2; 21], имеем:

$$\sigma_i = 0,71 \times \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2} = 3\sigma_s \quad (12)$$

После подстановки и решения уравнения интенсивности деформаций [2] получаем:

$$\varepsilon_i = 0,47 \sqrt{(\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_x)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2} = 0,44. \quad (13)$$

Подстановка и решение уравнения (12) дает:

$$G = 2,2\sigma_s. \quad (14)$$

После подстановки и решения уравнения (9) имеем:

$$u = 0,71 \cdot b \cdot a \cdot \sigma_s \cdot Z_p. \quad (15)$$

Потенциальную энергию пластического деформирования срезаемого слоя выразим через работу внешних сил по теореме Клайперона:

$$A = 2u. \quad (16)$$

Выражение работы пластического деформирования срезаемого слоя через внешнюю силу имеет вид [16–20]:

$$A = P \cdot Z_p. \quad (17)$$

Подстановка и решение уравнений (15), (16) и (17) дает:

$$P = 1,42 \cdot \sigma_s \cdot a \cdot b. \quad (18)$$

Полученная зависимость не учитывает работу трения и изменение предела текучести обрабатываемого материала и служит для приближенной оценки энергоемкости пластической деформации срезаемого слоя [23–25].

Выражая энергоемкость через напряжения сдвига и учитывая, что

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{2}, \quad (19)$$

где τ_s – напряжения сдвига, получаем:

$$P = 2,84 \cdot \tau_s \cdot a \cdot b. \quad (20)$$

Выражение (20) идентично выражению силы сдвига, полученной по другой методике Л.Н. Филимоновым [9], для описания процесса пластической деформации стружки при угле сдвига, равном $\beta = 20^\circ$.

Полученное выражение энергоемкости пластической деформации стружки находится в удов-

летворительной корреляции с зависимостями, выявленными другими исследователями и может быть рекомендовано для определения динамических характеристик процесса абразивной резки.

Список литературы

1. Levchenko E., Pokintelitsa N. Investigation of Thermal Processes in Abrasive Pipe Samplin // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 01078.
2. Богомолов Н.И. Исследование деформации металла при абразивных процессах под действием единичного зерна // Труды ВНИИАШ. – 1968. – № 7. – С. 74–87.
3. Бокучава Г.В. О влиянии скорости шлифования на стойкость абразивного инструмента // Абразивы и алмазы. – 1964. – № 1. – С. 47–53.
4. Богомолов Н.И. Основные процессы при взаимодействии абразива и металла: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения». – Киев, 1967, – 46 с.
5. Вульф А.М., Мурдасов А.В. Геометрические параметры режущих элементов абразивных зерен шлифовального круга // Абразивы: науч. техн. реф. сб. – 1968. – Вып. 1.
6. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
7. Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. Износ алмазов и алмазных кругов. – М.: Машиностроение, 1967. – 112 с.
8. Калинин Е.П. Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.03.01 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки». – Рыбинск, 2006. – 414 с.
9. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с.
10. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
11. Левченко Е.А. Экспериментальные исследования радиального износа отрезного круга при абразивной резке труб // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – 2013. – Вип. 139. – С. 148–153.
12. Левченко Е.А., Новоселов Ю.К. Экспериментальные исследования энергосиловых параметров процесса абразивной резки труб // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – 2013. – Вип. 140. – С. 52–57.
13. Левченко Е.А. Теплофизическая модель процесса абразивной резки труб отрезными кругами // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Вып. 40: Технические науки. – 2013. – С. 70–75.
14. Левченко Е.А., Покинтелитца Н.И., Новоселов Ю.К. Расчет боковой режущей поверхности отрезного круга с учетом износа абразивных зерен // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – 2014. – Вип. 151. – С. 74 – 80.

15. Левченко Е.А. Пути повышения эффективности процесса абразивной резки труб с учетом износа вершин зерен отрезного круга // *Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет.* – 2014. – Вип. 152. – С. 145–151.
16. Левченко Е.А., Покинтелица Н.И. Теплофизическая модель процесса абразивной резки труб отрезными кругами // *Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастопольский государственный университет.* – 2016. – Вып. № 3. – С. 46–51.
17. Братан С.М., Левченко Е.А. Определение вероятности изнашивания вершины зерна отрезного круга в процессе резки труб // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського.* – 2009. – Вип. 6 (59), част. 1. – С. 40–43.
18. Левченко Е.А. Теоретическое исследование особенностей работы боковых поверхностей отрезного круга при абразивной резке труб // *Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет.* – 2010. – Вип. 107. – С. 114–117.
19. Левченко Е.А., Новоселов Ю.К. Анализ закономерностей удаления металла боковыми сторонами круга при абразивной резке труб // *Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет.* – 2011. – Вип. 118. – С. 57–61.
20. Левченко Е.А. Методика расчета параметров боковых поверхностей отрезных кругов при абразивной резке // *Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастопольский государственный университет.* – 2017. – Вып. № 6. – С. 39–45.
21. Левченко Е.А., Покинтелица Н.И., Харченко А.О. Теория и практика абразивной резки труб: монография – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 142 с.
22. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
23. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. – М.: Машиностроение, 1980. – 136 с.
24. Папшева Н.Д., Александров М.К., Акушская О.М. Тепловые явления при поверхностном пластическом деформировании // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2010. – Т. 12, № 4 (3). – С. 682–685.
25. Давыдов С.В., Гуляев Ю.В., Симочкин В.В. Влияние теплофизических свойств углеродистых сталей на эвтектоидное превращение аустенита // *Вестник Брянского государственного технического университета.* – 2008. – № 1 (17). – С. 4–9.
3. Bokuchava G.V. O vliianii skorosti shlifovaniia na stoikost' abrazivnogo instrumenta [On the effect of grinding speed on the durability of abrasive tools]. *Abrazivy i almazy*, 1964, no. 1, pp.47–53.
4. Bogomolov N.I. Osnovnye protsessy pri vzaimodeistvii abraziva i metalla [Basic processes in the interaction of abrasive and metal]. Doctor's degree dissertaishion. Kiev, 1967, 46 p.
5. Vul'f A.M., Murdasov A.B. Geometricheskie parametry rezhushchikh elementov abrazivnykh zeren shlifoval'nogo kruga [Geometric parameters of the cutting elements of abrasive grains of a grinding wheel]. *Nauchnyi tekhnicheskii referativnyi sbornik «Abrazivy»*, 1968, iss. 1.
6. Korchak S.N. Proizvoditel'nost' protsessa shlifovaniia stal'nykh detalei [Productivity of the grinding process of steel parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 280 p.
7. Loladze T.N., Bokuchava G.V. Iznos almazov i almaznykh krugov [Wear and tear on diamonds and diamond wheels]. Moscow: Mashinostroenie, 1967, 112 p.
8. Kalinin E.P. Teoriia i praktika upravleniia proizvoditel'nost'iu abrazivnoi obrabotki s uchetom zatupleniia instrumenta [Theory and practice of abrasive blasting performance management with regard to tool blunting]. Doctor's degree dissertation. Rybinsk, 2006, 414 p.
9. Filimonov L.N. Vysokoskorostnoe shlifovanie [High speed grinding]. Leningrad: Mashinostroenie, 1979, 248 p.
10. Novoselov Iu.K. Dinamika formoobrazovaniia poverkhnosti pri abrazivnoi obrabotke [Dynamics of Surface Shaping in Abrasive Machining]. *Izdatel'stvo SevNTU*, 2012, 304p.
11. Levchenko E.A. Eksperimental'nye issledovaniia radial'nogo iznosa otreznogo kruga pri abrazivnoi razrezke trub [Experimental studies of cutting wheel radial wear during abrasive pipe cutting]. *Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb.ornik nauk. pr. Sevastopol's'kii natsional'nii tekhnichnii universitet*, 2013, iss. 139, pp. 148–153.
12. Levchenko E.A., Novoselov Iu.K. Eksperimental'nye issledovaniia energosilovykh parametrov protsessa abrazivnoi razrezki trub [Experimental studies of energy-power parameters of abrasive pipe cutting process]. *Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol's'kii natsional'nii tekhnichnii universitet*, 2013, iss. 140, pp. 52–57.
13. Levchenko E.A. Teplofizicheskaia model' protsessa abrazivnoi razrezki trub otreznymi krugami [Thermophysical model of the abrasive pipe cutting process with cutting wheels]. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Iss. 40: Tekhnicheskie nauki*, 2013, pp. 70–75.
14. Levchenko E.A., Pokintelitsa N.I., Novoselov Iu.K. Raschet bokovoi rezhushchei poverkhnosti otreznogo kruga s uchetom iznosa abrazivnykh zeren [Calculation of the side cutting surface of a cutting wheel with regard to abrasive grit wear]. *Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zbornik nauk. pr. Sevastopol's'kii natsional'nii tekhnichnii universitet*, 2014, iss. 151, pp. 74–80.
15. Levchenko E.A. Puti povysheniia effektivnosti protsessa abrazivnoi razrezki trub s uchetom iznosa vershin zeren otreznogo kruga [Ways to improve the efficiency of the abrasive pipe cutting process, taking into account the wear of the grain tips of the cutting wheel]. *Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr.*

References

1. Levchenko E., Pokintelitsa N. Investigation of Thermal Processes in Abrasive Pipe Samplin. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, p. 01078.
2. Bogomolov N.I. Issledovanie deformatsii metalla pri abrazivnykh protsessakh pod deistviem edinichnogo zerna [Study of metal deformation during abrasive processes under the action of a single grain]. *Trudy VNIILSh*, 1968, no. 7, pp. 74–87.

Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet, 2014, iss. 152, pp. 145–151.

16. Levchenko E.A., Pokintelitsa N.I. Teplofizicheskaia model' protsessa abrazivnoi razrezki trub otreznymi krugami [Thermophysical model of the abrasive pipe cutting process with cutting wheels]. *Vestnik sovremennykh tekhnologii: sb. nauch. tr. Sevastopol'skii gosudarstvennyi universitet*, 2016, iss. no 3, pp. 46–51.

17. Bratan S.M., Levchenko E.A. Opredelenie veroiatnosti iznashivaniia vershiny zerna otreznogo kruga v protsesse razrezki trub [Determination of the wear probability of the tip of the cutting wheel grain during pipe cutting]. *Visnik Kremenchuts'kogo derzhavnogo politekhnichnogo universitetu imeni Mikhaïla Ostrograds'kogo*, 2009, iss. 6 (59), part. 1, pp. 40–43.

18. Levchenko E.A. Teoreticheskoe issledovanie osobennosti raboty bokovykh poverkhnosti otreznogo kruga pri abrazivnoi razrezke trub [Theoretical study of the performance of the side surfaces of the cutting wheel during abrasive pipe cutting]. *Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet*, 2010, iss. 107, pp. 114–117.

19. Levchenko E.A., Novoselov Iu.K. Analiz zakonomernosti udaleniia metalla bokovymi storonami kruga pri abrazivnoi razrezke trub [Analysis of metal removal patterns by the sides of the wheel during abrasive pipe cutting]. *Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet*, 2011, iss. 118, pp. 57–61.

20. Levchenko E.A. Metodika rascheta parametrov bokovykh poverkhnosti otreznykh krugov pri abrazivnoi razrezke [Calculation method for the parameters of the side surfaces of cutting wheels during abrasive cutting]. *Vestnik sovremennykh tekhnologii: sb. nauch. trudy Sevastopol'skii gosudarstvennyi universitet*, 2017, iss. no. 6, pp. 39–45.

21. Levchenko E.A., Pokintelitsa N.I., Kharchenko A.O. Teoriia i praktika abrazivnoi razrezki trub: monografiia [Theory and practice of abrasive pipe cutting]. Moscow: *Vuzovskii uchebnik: INFRA-M*, 2018, 142 p.

22. Sipailov V.A. Teplovyie protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti [Thermal processes in

grinding and surface quality management]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 167 p.

23. Balakin V.A. Trenie i iznos pri vysokikh skorostiakh skol'zheniia [Friction and wear at high sliding speeds]. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 136 p.

24. Papsheva N.D., Aleksandrov M.K., Akushskaia O.M. Teplovyie iavleniia pri poverkhnostnom plasticheskom deformirovanii [Thermal phenomena in surface plastic deformation]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2010, vol. 12, no. 4 (3), pp. 682–685.

25. Davydov S.V., Guliaev Iu.V., Simochkin V.V. Vliianie teplofizicheskikh svoistv uglerodistykh stali na evtetoidnoe prevrashchenie austenita [Influence of thermophysical properties of carbon steels on eutectoidal transformation of austenite]. *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 1 (17), pp. 4–9.

Поступила: 09.12.2021

Одобрена: 21.02.2022

Принята к публикации: 22.02.2022

Сведения об авторах

Левченко Елена Александровна (Севастополь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Севастопольского государственного университета (Россия, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: ealev1978@mail.ru).

About the author

Elena Al. Levchenko (Sevastopol, Russian Federation) – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technology of Mechanical Engineering Sevastopol State University (33 University str., Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: ealev1978@mail.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад. 100 %.