

Покинтелица Н.И., Левченко Е.А. Влияние тепловых явлений на энергосиловые параметры процесса термофрикционного упрочнения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 43–48. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.06

Pokintelitsa N.I., Levchenko E.A. Heat phenomena and their influence on energy and force parameters of the thermofrictional hardening. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 43–48. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.06

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 21, № 1, 2019**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.06

УДК 621.914.02

**Н.И. Покинтелица, Е.А. Левченко**

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

**ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ  
ПРОЦЕССА ТЕРМОФРИКЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ**

Рассмотрены особенности тепловых явлений и их влияние на энергосиловые параметры в зоне термофрикционного упрочнения.

Показано, что качество поверхностного слоя деталей оказывает значительное влияние на надежность и долговечность изделий и определяется совокупностью характеристик шероховатости, волнистости, физико-механических свойств, микротвердости, микроструктуры металла и остаточных напряжений. Предложен способ ТФУ, обеспечивающий повышение показателей качества обработанных поверхностей при минимальных затратах. Приведены сведения о влиянии окружной скорости вращающегося диска, подачи, материалов, смазки и площади контакта на величину температуры резания в зоне трения, что позволяет определить количественную связь между теплопроводностью металла, градиентом температуры и тепловым потоком в инструменте и заготовке.

Установлено, что теплота в зоне обработки распределяется неравномерно и изменяется в зависимости от теплопроводности материала инструмента и заготовки. Представлены зависимости определения среднеинтегральных скоростей нагрева и охлаждения слоя металла, оказывающих большое влияние на структуру и свойства упрочненного трением слоя. Определено, что мощность и плотность теплового потока при упрочнении – функции множества факторов, которые зависят от режимов обработки.

Приведены результаты исследования закономерностей процесса ТФУ, которые определяют энергосиловые затраты. Температура резания оказывает значительное влияние на ход процесса, в частности на качество и точность изделий.

Представлены энергосиловые зависимости процесса обработки, позволяющие разработать математические модели определения составляющих силы резания при ТФУ. Отмечено, что повышение температуры резания вызывает увеличение составляющих силы резания, приводящее к необходимости стабилизации температуры в контактной зоне с целью контроля и прогнозирования процесса ТФУ.

**Ключевые слова:** термофрикционное упрочнение, поверхностный слой, тепловые явления, тепло, температура резания, тепло-выделение, силы резания, упрочняющий диск, пластическое деформирование, окружная сила, радиальная сила.

**N.I. Pokintelitsa, E.A. Levchenko**

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

**HEAT PHENOMENA AND THEIR INFLUENCE ON ENERGY  
AND FORCE PARAMETERS OF THE THERMOFRICTIONAL HARDENING**

The heat phenomena features and their effect on energy-force parameters in the thermofrictional hardening area are considered.

It is shown that the surface part layer quality has a significant effect on the reliability and product durability and is determined by a combination of roughness, waviness, physical and mechanical properties, microhardness, metal microstructure and temper. The thermofrictional hardening method is proposed, which provides an the quality indicator improving of treated surfaces at minimum costs. Impact information of rotating disk peripheral velocity, feed, materials, lubrication and contact area on the cutting temperature value in the friction area is provided, it makes possible to determine the quantitative communication between the metal heat conductivity, the temperature gradient and the heat flux in the tool and workpiece.

It is established that the heat in the processing area is distributed unevenly and varies depending on the heat conductivity of the tool material and the workpiece. The definition dependence metal layer the average integral heating and cooling rate are presented exerting high influence on structure and properties hardening the friction layer. It is determined that the power and density of the heat flux at hardening - functions of many factors that depend on the processing modes.

The thermofrictional hardening process regularity research results are given which determine the energy-force costs. The cutting temperature has a significant influence on the process progress, in particular on the quality and accuracy of the products.

Energy-force dependences of the machining process are presented, allowing to develop mathematical models for determining the components of the cutting force under thermofrictional hardening. It is noted that cutting temperature rise induce cutting force components increase leading to the temperature stabilization need in contact area for the purpose of monitoring and forecasting the process of thermofrictional hardening

**Keywords:** heat hardening, surface layer, heat phenomena, heat, cutting temperature, heat release, cutting forces, hardening disk, plastic deformation, peripheral force, radial force.

Прогресс в области машиностроения и в смежных отраслях, таких как детали машин и материаловедение, не стоит на месте. Но изделия все также выходят из строя и перед учеными по-прежнему стоит задача получить высокое качество с минимальными затратами.

Качество поверхностного слоя деталей оказывает значительное влияние на надежность и долговечность изделий и определяется совокупностью характеристик шероховатости, волнистости, физико-механических свойств, микротвердости, микроструктуры металла и остаточных напряжений. Одним из способов повышения качества является упрочнение поверхностного слоя. Так, на износостойкость обработанной поверхности детали большое влияние оказывают степень и глубина распространения упрочнения, а также величина остаточных напряжений в поверхностном слое. Известно большое количество методов упрочнения. Все они разделены на три группы: поверхностная закалка, химико-термическая обработка и поверхностное пластическое деформирование.

К последней группе относится термофрикционное упрочнение (ТФУ), которое позволяет повысить качество поверхностного слоя без использования дорогостоящего оборудования и инструментов. ТФУ представляет собой комбинированный метод, сочетающий тепловое и механическое воздействие на обрабатываемый металл, осуществляемое путем непосредственного контакта заготовки и вращающегося с большой окружной скоростью диска трения. Под действием температуры и приложенного давления поверхности трения деформируются и материал в контактной зоне подвергается термообработке.

Слои, упрочненные трением, характеризуются высокой твердостью, микротвердостью, пластичностью. Износостойкость, усталостная и коррозионная стойкость их значительно выше, чем у слоев, закаленных токами высокой частоты [1].

Метод ТФУ недостаточно изучен, что ограничивает его применение в промышленности. Температура резания является важнейшей характеристикой ТФУ. Она оказывает существенное влияние не только на износ и стойкость диска трения, но и на качество и точность изделий.

При исследовании закономерностей процесса ТФУ и решении практических задач, связанных с выбором технологического режима, следует учитывать закономерности, присущие процессам трения при высоких скоростях скольжения.

В зависимости от условий обработки температура в контактной зоне может колебаться в пределах 900–1200 °С, что выше температуры рекристаллизации большинства обрабатываемых мате-

риалов и характерно для горячей деформации, способствующей росту пластичности и уменьшению сопротивления деформации в зоне резания. Установлено, что на величину температуры в зоне трения влияют окружная скорость вращающегося диска, подача, материалы, смазка и площадь контакта.

Количественная связь между теплопроводностью металла, градиентом температуры и тепловым потоком в твердых телах определяется законом Фурье

$$dQ = -\lambda dF (\partial\Theta / \partial n)_{n=0},$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $dF$  – величина элементарной площадки;  $\partial\Theta / \partial n$  – температурный градиент.

Знак «минус» указывает на то, что теплота направлена в сторону, противоположную возрастанию температуры.

Быстровращающийся диск представляет собой полосовой источник теплоты шириной  $2h$ , равной длине контакта диска с поверхностью образца, который перемещается в положительном направлении горизонтальной оси  $Z$ .

Для плоских образцов

$$2h = \frac{\pi D}{360} \arccos(1 - t / R),$$

где  $D$  – диаметр диска, мм;  $t$  – припуск на обработку, мм;  $R$  – радиус диска, мм (рис. 1).

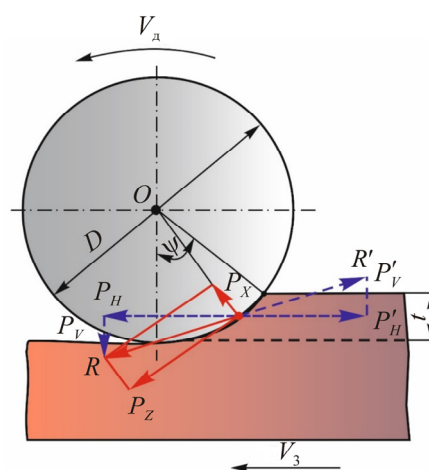


Рис. 1. Схема сил резания при термофрикционном упрочнении

Для полосового источника теплоты, представленного в виде бесконечно длинной полосы шириной  $2h$ , расположенной в горизонтальной плоскости  $YOZ$  вдоль оси  $Y$ , движущегося в положительном направлении оси  $Z$ , выведено уравнение, описывающее температурное поле [2]:

$$\Theta = \frac{2qa}{\pi\lambda V_3} \int_{z-H}^{z+H} \exp(-\xi) k_0 \left( \sqrt{x^2 + \xi^2} \right) d\xi, \quad (1)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $V_3$  – скорость подачи, м/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Безразмерные критерии

$$x = V_{3x} / 2a, \quad z = V_{3z} / 2a, \quad H = V_{3h} / 2a,$$

$$\xi = V_3 (Z - Z') / 2a, \quad d\xi = V_3 dz / 2a.$$

Функция Бесселя второго рода нулевого порядка

$$k_0(m) = \int_0^\infty \frac{dz}{z \left( \exp \left[ - \left( m^2 z^2 + 1 / (4z^2) \right) \right] \right)}.$$

Определив значения интеграла, входящего в выражение (1), вычисленные для определенных значений безразмерной координаты  $X$  при условии, что нижние пределы вычисленных интегралов приняты равными нулю, и зная температуру на поверхности контакта, можно определить плотность теплового потока  $q$ , идущего в заготовку, подставив для этого в выражение (1) значение температуры  $\Theta$ :

$$q = \frac{\Theta \pi \lambda V_3}{2a \Theta^*},$$

где  $\Theta^*$  – безразмерная температура [2]. Здесь  $\Theta^* = k[I(z+H) - I(z-H)]$ .

После обработки экспериментальных данных установлено, что максимальная температура в зоне трения составляет 1360 °С и изменяется по глубине упрочненного слоя. Теплота распределяется неравномерно и изменяется в зависимости от теплопроводности материала диска и заготовки.

В исследованиях, проведенных ранее [1, 3], отмечалось, что 4–8 % затраченной механической энергии, преобразованной в тепловую, в зоне контакта переходит в заготовку и участвует в создании особого структурно-напряженного состояния поверхностного слоя; около 20–40 % теплоты теряется с отделившейся стружкой, а остальная теплота переходит в диск и рассеивается в окружающую среду [4–8].

Скорости нагрева и охлаждения оказывают большое влияние на структуру и свойства упрочненного трением слоя. Среднеинтегральные скорости нагрева и охлаждения слоя металла могут быть определены по формуле

$$\Delta\Theta / \Delta Z = 1 / \Delta z \left\{ \int_{Z_1-H}^{Z_1+H} \exp(-\xi) k_0 \left( \sqrt{x^2 + \xi^2} \right) d\xi - \right.$$

$\left. - \int_{Z_2-H}^{Z_2+H} \exp(-\xi) k_0 \left( \sqrt{x^2 + \xi^2} \right) d\xi \right\}$ , где  $Z_1$  и  $Z_2$  – координаты точек, имеющих разную температуру  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$ ;  $\Delta\Theta$ ,  $\Delta Z$  – соответственно температурный интервал и интервал изменений координат точек, между которыми измеряется разность значений температуры,  $\Delta\Theta = \Theta_1 - \Theta_2$ ,  $\Delta Z = Z_1 - Z_2$ .

Используя данные по измерению температуры на поверхности заготовки и окружного усилия, или мощности, можно определить тепловой поток, выделившийся в зоне контакта и идущий в заготовку.

Мощность и плотность теплового потока при упрочнении являются функциями множества факторов, которые зависят от режимов обработки (скорости подачи, площади контакта, материала диска и образца). Разделив значение мощности, затраченной на упрочнение, на значение площади контакта диска с заготовкой, получим полный тепловой поток:

$$q = N / S,$$

где  $N$  – мощность, Вт;  $S$  – площадь контакта диска и заготовки, м<sup>2</sup>.

$$N = V_3 B E \gamma \left[ c (\Theta - \Theta_0) + a_0 \right] \frac{\lambda_M + \lambda_D}{\lambda_M} \cos \psi,$$

где  $V_3$  – скорость подачи, мм/с;  $B$  – ширина обработки, мм;  $E$  – хорда, стягивающая дугу контакта, мм;  $\gamma$  – удельный вес, кг/мм<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\Theta$  – температура плавления, К;  $\Theta_0$  – начальная температура, К;  $a_0$  – скрытая теплота плавления, Дж/кг;  $\lambda_M$ ,  $\lambda_D$  – коэффициенты теплопроводности обрабатываемого материала и материала диска, Вт/(м·К);  $\psi$  – угол соприкосновения металла с диском, град.

Площадь контакта принята равной геометрической площади при условии, что диск является абсолютно жестким, а заготовка – эластичной:

$$S = b \pi D \psi / 360,$$

где  $b$  – ширина диска, м;  $D$  – диаметр диска, м.

Если учесть, что в заготовку идет часть всей теплоты, образующейся в зоне контакта, то тепловой поток, идущий в заготовку, может быть определен

$$q_3 = N \eta / S,$$

где  $\eta$  – коэффициент, показывающий долю теплоты, идущей в заготовку.

ТФУ сочетает тепловое и механическое воздействие на обрабатываемый металл. В зоне кон-

такта под действием сил трения интенсивно выделяется теплота, что приводит к повышению температуры поверхности трения [9–12].

Температура трения оказывает влияние на величину усилий, затраченных на упрочнение, наряду с величиной подачи, глубины врезания, материала диска и заготовки и других параметров процесса.

Схема сил, действующих на диск, представлена на рис. 1. Суммарную равнодействующую силу сопротивления срезаемого слоя можно разложить на следующие силы: касательную  $P_Z$  (сила трения) и радиальную  $P_X$  или горизонтальную  $P_H$  и вертикальную  $P_V$  [4].

Отношение значений касательной и радиальной сил определяет значение коэффициента трения  $\mu = P_Z / P_X$ . Величина коэффициента трения определяется условиями, в которых работает диск.

Сила трения  $P_Z$  определяет крутящий момент на диске и величину мощности, затрачиваемой на процесс резания. Радиальная сила  $P_X$  оказывает давление на подшипники шпинделя и его изгиб. По горизонтальной силе  $P_H$  (силе подачи) производится расчет механизма подачи станка, силы закрепления заготовки и деталей приспособления [13–16].

Сила  $P_V$  прижимает диск к заготовке. Сила реакции  $P_V'$ , действующая на заготовку, направлена вверх. В этом случае она является силой отрыва заготовки от стола.

Окружное усилие, Н (см. рис. 1),

$$P_Z = N_p / V_d,$$

где  $V_d$  – окружная скорость вращения диска, м/с.

Радиальная сила, Н,

$$P_X = P_Z / \mu.$$

Усилие подачи, Н,

$$P_H = P_Z (\cos^2(\psi / \mu) - \sin^2(\psi / 2)),$$

где  $\mu$  – коэффициент трения.

На базе выполненных исследований были разработаны математические модели по определению составляющих силы резания при ТФУ:

$$P_Z = 270V_d^{-0,224} \cdot Q^{0,315} \cdot t^{0,233};$$

$$P_X = 4920V_d^{-0,2505} \cdot Q^{0,392} \cdot t^{0,331}.$$

Результаты исследований усилий резания при упрочнении заготовок из стали 45 представлены на рис. 2, 3.

Представленный способ ТФУ обеспечивает повышение показателей качества обработанных поверхностей при минимальных затратах. Приве-

денные сведения о влиянии окружной скорости вращающегося диска, подачи, материалов, смазки и площади контакта на величину температуры резания в зоне трения позволяют определить количественную связь между теплопроводностью металла, градиентом температуры и тепловым потоком в инструменте и заготовке.

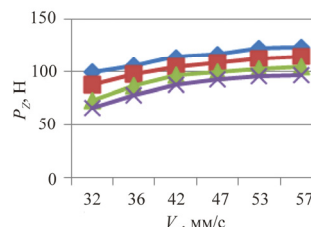


Рис. 2. Влияние скорости диска на окружное усилие резания  $P_Z$ . Диск – сталь 50:  $\blacklozenge$  – заготовка – сталь 45,  $S = 130 \text{ мм}^2$ ;  $\blacksquare$  – заготовка 40X13,  $S = 130 \text{ мм}^2$ ;  $\blacktriangle$  – заготовка – сталь 45,  $S = 40 \text{ мм}^2$ ;  $\blackcross$  – заготовка 40X13,  $S = 40 \text{ мм}^2$

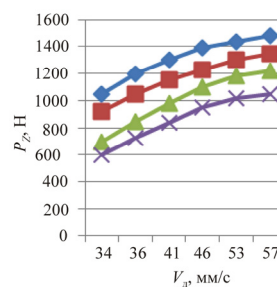


Рис. 3. Влияние скорости диска на нормальное усилие резания  $P_X$ . Диск – сталь 50:  $\blacklozenge$  – заготовка – сталь 45,  $S = 130 \text{ мм}^2$ ;  $\blacksquare$  – заготовка 40X13,  $S = 130 \text{ мм}^2$ ;  $\blacktriangle$  – заготовка – сталь 45,  $S = 40 \text{ мм}^2$ ;  $\blackcross$  – заготовка 40X13,  $S = 40 \text{ мм}^2$

Установлено, что теплота в зоне обработки распределяется неравномерно и изменяется в зависимости от теплопроводности материала инструмента и заготовки. Представленные зависимости определения среднеинтегральных скоростей нагрева и охлаждения слоя металла позволяют установить степень их влияния на структуру и свойства упрочненного трением слоя. При этом показано, что мощность и плотность теплового потока при упрочнении являются функциями множества факторов, зависящих от режимов обработки [17, 18].

Приведенные математические модели определения энергосиловых параметров ТФУ указывают на то, что повышение температуры резания вызывает увеличение составляющих силы резания, приводящее к необходимости стабилизации температуры в контактной зоне с целью контроля и прогнозирования процесса обработки.

## Список литературы

1. Логунов И.И. Повышение качества цилиндрических и плоских стальных изделий высокоскоростным трением: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Новокузнецк, 1985. – 189 с.
2. Суслов А.Г. Обеспечение качества поверхностного слоя. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
3. Pokintelitsa N., Levchenko E. Projecting parameters of a microprofile for a surface obtained as a result of the thermofrictional treatment // *Procedia Engineering 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)*. – 2016. – Vol. 150. – P. 1013–1019.
4. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
5. Бабей Ю.И., Гурей В.М., Драчинская А.Г. Влияние фазовоупрочняющей обработки на структуру, фазовый состав и износостойкость стали и чугуна // *Металлофизика*. – 1980. – № 6. – С. 110–117.
6. Зарубицкий Е.У., Покинтелица Н.И., Костина Т.П. Исследование силовых зависимостей при термофрикционной обработке ступенчатых плоскостей // *Физические процессы при резании металлов*. – Волгоград, 1988. – С. 43–46.
7. Гурей Т.А., Кирилов В.И., Штаюра С.Т. Экспериментальные исследования влияния режимов фрикционной обработки на составляющие силы трения в зоне контакта инструмент–деталь // *Вестник Национального университета «Львовская политехника»: Оптимизация производственных процессов и технический контроль в машиностроении и приборостроении*. – Львов: Изд-во Нац. ун-та «Львовская политехника», 2009. – № 642. – С. 8–13.
8. Покинтелица Н.И. Применение высокоскоростного трения в резании металла. – Киев: ВИПОЛ, 1993. – 156 с.
9. Pokintelitsa N., Levchenko E. Application of thermo-frictional and mechanical treatment complex method for production of parts with specific properties // *Procedia Engineering 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2017) 2017*. – Vol. 206. – P. 1326–1332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.639>
10. Нечаев К.Н. Анализ технологических возможностей термофрикционного упрочнения деталей // *Металлообработка*. – 2011. – № 5. – С. 34–37.
11. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. – М.: Машиностроение, 1980. – 136 с.
12. Бабей Ю.И., Бутаков Б.И., Сысоев В.Г. Поверхностное упрочнение металлов. – Киев: Наукова думка, 1995. – 253 с.
13. Крыськов А.Д. Технология фрикционного формообразования: монография / РВЛ КНТУ. – Кировоград, 2008. – 303 с.
14. Зарубицкий Е.У. Термофрикционная обработка плоских поверхностей деталей // Пути повышения эффективности использования режущего инструмента: сб. науч. тр. – М., 1987. – С. 71–74.
15. Плахотник В.А., Покинтелица Н.И. Тепловые условия деформирования при термофрикционной обра-

ботке деталей // *Вестник СевНТУ. Машиностроение и транспорт: сб. науч. тр.* – 2010. – Вып. 107. – С. 80–84.

16. Кравченко Б.А. Силы, остаточные напряжения и трение при резании металлов. – Куйбышев: Куйб. кн. изд-во, 1962. – 179 с.

17. Папшева Н.Д., Александров М.К., Акушская О.М. Тепловые явления при поверхностном пластическом деформировании // *Изв. Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2010. – Т. 12, № 4(3). – С. 682–685.

18. 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.

## References

1. Logunov I.I. Povyshenie kachestva tsilindricheskikh i ploskikh stal'nykh izdelii vysokoskorostnym treniem [Improving the quality of cylindrical and flat steel products with high-speed friction]. Ph. D. thesis. Novokuznetsk, 1985, 189 p.
2. Suslov A.G. Obespechenie kachestva poverkhnostnogo sloia [Ensuring the quality of the surface layer]. Moscow: Mashinostroenie, 2000, 320 p.
3. Pokintelitsa N., Levchenko E. Projecting parameters of a microprofile for a surface obtained as a result of the thermofrictional treatment. *Procedia Engineering 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)*, 2016, vol. 150, pp. 1013–1019.
4. Sipailov V.A. Teplovye protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti [Thermal grinding processes and surface quality management]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 167 p.
5. Babei Iu.I., Gurei V.M., Drachinskaia A.G. Vliianiia fazovouprochniiaushchei obrabotki na strukturu, fazovyi sostav i iznosostoiost' stali i chuguna [Influence of phase hardening on steel and cast iron structure, phase composition and wear resistance]. *Metallofizika*, 1980, no. 6, pp. 110–117.
6. Zarubitskii E.U., Pokintelitsa N.I., Kostina T.P. Issledovanie silovykh zavisimostei pri termo-friksionnoi obrabotke stupenchatykh ploskosti [Investigation of force dependences at thermofriction treatment of step planes] *Fizicheskie protsessy pri rezanii metallov*. Volgograd, 1988, pp. 43–46.
7. Gurei T.A., Kirilov V.I., Shtaiura S.T. Eksperimental'nye issledovaniia vliianiia rezhimov friksionnoi obrabotki na sostavliaiushchie sily treniia v zone kontakta instrument–detal' [Experimental studies of the influence of friction treatment modes on friction components in the tool-detail contact zone]. *Vestnik Natsional'nogo universiteta «L'vovskaia politekhnikha»: Optimizatsiia proizvodstvennykh protsessov i tekhnicheskii kontrol' v mashinostroenii i priborostroenii*. L'vov: Izdatel'stvo Natsional'nogo universiteta «L'vovskaia politekhnikha», 2009, no. 642, pp. 8–13.
8. Pokintelitsa N.I. Primenenie vysokoskorostnogo treniia v rezanii metalla [Application of high-speed friction in metal cutting]. Kiev: VIPOL, 1993, 156 p.

9. Pokintelitsa N., Levchenko E. Application of thermo-frictional and mechanical treatment complex method for production of parts with specific properties. *Procedia Engineering 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2017) 2017*, vol. 206, pp. 1326–1332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.639>

10. Nechaev K.N. Analiz tekhnologicheskikh vozmozhnostei termofriktsionnogo uprochneniia detalei [Анализ технологических возможностей термофрикционного упрочнения деталей]. *Metaloobrabotka*, 2011, no. 5, pp. 34–37.

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

12. Babei Iu.I., Butakov B.I., Sysoev V.G. Poverkhnostnoe uprochnenie metallov [Surface hardening of metals]. Kiev: Naukova dumka, 1995, 253 p.

13. Kryskov A.D. Tekhnologiya friktsionnogo formobrazovaniia: monografiia [Friction forming technology: monograph]. RVL KNTU. Kirovograd, 2008, 303 p.

14. Zarubitskii E.U. Termofriktsionnaia obrabotka ploskikh poverkhnostei detalei [Thermal friction treatment of flat surfaces of parts]. *Puti povysheniia effektivnosti ispol'zovaniia rezhushchego instrumenta: sbornik nauchnih trudov*. Moscow, 1987, pp. 71–74.

15. Plakhotnik V.A., Pokintelitsa N.I. Teplovyie usloviia deformirovaniia pri termofriktsionnoi obrabotke detalei [Thermal conditions of deformation during thermofriction treatment of parts]. *Vestnik Sevastopol'skogo Natsional'nogo Tekhnicheskogo Universiteta. Mashinostroeniie i transport: sbornik nauchnih trudov*, 2010, iss. 107, pp. 80–84.

16. Kravchenko B.A. Sily, ostatochnye napriazheniia i trenie pri rezanii metallov [Forces, residual stresses and friction in metal cutting]. Kuibyshev: Kuibyshevskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1962, 179 p.

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

18. Davydov S.V., Guliaev Iu.V., Simochkin V.V. Vliianie teplofizicheskikh svoystv uglerodistykh staley na evtektoidnoe prevrashchenie austenita [Influence of thermo-physical properties of carbon steels on eutectoid transformation of austenite]. *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 1(17), pp. 4–9.

Получено 21.12.18

Опубликовано 21.03.19

#### Сведения об авторах

**Покинтелица Николай Иванович** (Севастополь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой пищевых технологий и оборудования Севастопольского государственного университета; e-mail: ni3178@rambler.ru.

**Левченко Елена Александровна** (Севастополь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Севастопольского государственного университета; e-mail: ealev1978@mail.ru.

#### About the authors

**Nikolai I. Pokintelitsa** (Sevastopol, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Food Technologies and Equipment, Sevastopol State University, e-mail: ni3178@rambler.ru.

**Elena A. Levchenko** (Sevastopol, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Mechanical Engineering, Sevastopol State University, e-mail: ealev1978@mail.ru.