

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.1.01

УДК 621.914.02

О.С. Кравченко, Н.И. ПокинтелицаСевастопольский государственный университет,
Севастополь, Россия**ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ
В ЗОНЕ ТЕРМОФРИКЦИОННОГО РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛА**

Рассмотрены особенности деформационных и тепловых явлений в зоне термофрикционного резания металла. Приведены результаты исследования характерных показателей контактного взаимодействия инструмента и заготовки. Вследствие чередования процессов сухого, граничного и жидкостного трения предложено создать и поддерживать устойчивую прослойку жидкой фазы металла в контактной зоне, которая позволит производить обработку при рабочей температуре поверхностей инструмента, не нагревая глубинные слои обрабатываемого материала. В результате замены внешнего трения при непосредственном контакте тел внутренним трением разделяющего их слоя жидкости уменьшается сопротивление трения и скорость изнашивания поверхности режущего диска.

Изучение контактного взаимодействия инструмента и заготовки выявило необходимость анализа процессов тепловыделения, распределения теплоты в области контакта, контактных температур и температурных полей, механических и адгезионных свойств нагретых поверхностных слоев, а также процессов, связанных с оплавлением поверхностей трения. Это позволит стабилизировать граничный слой и минимизировать износ инструмента.

Приведены результаты теоретического анализа рабочих процессов термофрикционной обработки заготовок дисковым инструментом. Построена физическая модель процесса, которая учитывает закономерности течения расплавленного металла. Установлено, что при врезании дискового инструмента в заготовку толщина слоя расплавленного металла растет в зависимости от времени врезания и достигает максимума, который приблизительно равен толщине срезаемого слоя. При этом слой расплавленного металла распределяется на три части: первая образует обработанную поверхность заготовки, вторая формирует внутреннюю поверхность стружки, а третья распространяется по поверхности инструмента и удаляется из зоны резания.

Ключевые слова: термофрикционная обработка, фрикционный контакт, локальный расплавленный слой, граничный слой, смешанное трение, свойства контакта, силы трения, тепловыделение, волнистость, плавление металла.

O.S. Kravchenko, N.I. Pokintelitsa

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

**DEFORMATION AND THERMAL PHENOMENA
IN THE CUTTING METAL THERMOFRICTIONAL ZONE**

The peculiarities of the deformation and thermal phenomena are considered in the cutting metal thermofrictional zone. The research results of contact interaction between tool and workpiece are cited. Due to dry, boundary and complete lubrication friction processes alternation, the liquid metal phase stable layer has been proposed to create in the contact zone, which allow execute machining at a tool sur-

face operating temperature without heating of the work material deep layers. As a result of the replacement of sliding friction by direct contact of bodies separating the internal friction of the fluid layer decreases the frictional resistance and wear rate of the cutting disk.

The study of the contact interaction of tool and workpiece has been manifested the need for analysis of the heat-evolution processes, the heat distribution in the contact zone, contact temperatures and temperature fields, mechanical and adhesive properties of the heated surface layers, as well the processes associated with the friction surfaces melting. This boundary layer will stabilize and minimize tool wear.

The theoretical working processes analysis results of thermofrictional disk tool workpiece machining are given. The physical process model which takes into account the regularity of the molten metal flow are constructed. It has been established that when inserting the disc tool into the workpiece the layer thickness of the molten metal increases as a function of time and reaches a maximum, which is approximately equal to the thickness of the cutting layer. With the layer of molten metal is divided into three parts: the first one generates the machining workpiece surface, the second one forms the inner chip surface, and the third one is distributed over the surface of the tool and it is removed from the cutting zone

Keywords: thermofrictional machining, frictional contact, local molten layer, boundary layer, mixed friction, contact properties, frictional force, heat-evolution, undulation, melting metal.

Современное машиностроение характеризуется широким разнообразием механических, термических, термомеханических, химико-термических и многих других методов обработки. Одним из прогрессивных направлений является термофрикционная обработка (ТФО), которая представляет из себя разновидность обработки металлов резанием с нагревом, создаваемым силами трения в зоне контакта быстровращающегося инструмента с заготовкой, которая движется относительно него [1].

Эффективность этого метода заключается в высокой стойкости инструмента и его низкой стоимости, уменьшении сопротивляемости материала заготовки и сил резания при повышенных режимах обработки.

В последних исследованиях и публикациях рассмотрены различные методы ТФО деталей дисковым инструментом [2]. Подтверждено высокое качество обработанной поверхности и ее особые свойства. В ряде работ сформулированы рекомендации по повышению качества обработки и совершенствованию оборудования. В основном авторы используют экспериментальные методы исследований. Представлены также отдельные конструкции инструментов для ТФО [3, 4].

Тем не менее на данный момент ТФО является недостаточно изученной и прогнозирование процесса остается затруднительным. Это связано с большим количеством факторов, влияющих на формообразование [5]. В связи с этим задача создания необходимых условий обработки, обеспечивающих выполнение современных требований к качеству изделий, является актуальной. Цель данной работы – изучение особенностей

рабочих процессов, характеризующих тепловые и деформационные явления в зоне термофрикционного резания (ТФР).

Фрикционный контакт является неоднородным процессом: одновременно можно наблюдать процессы сухого, граничного и жидкостного трения, а также их чередование. Сухое трение возникает между заготовкой и инструментом при отсутствии расплавленного слоя и имеет протяженность 1–2 мм.

При граничном трении инструмент и заготовка разделены расплавленным слоем толщиной 0,1–0,2 мкм. Жидкостное трение возникает, когда заготовка и инструмент полностью разделены расплавленным слоем, который играет предохранительную роль для рабочих поверхностей инструмента.

Для обеспечения максимальной производительности и минимальной интенсивности износа инструмента необходимо создать устойчивую прослойку жидкой фазы металла в контактной зоне, которая позволит производить обработку при рабочей температуре поверхностей инструмента, не нагревая глубинные слои обрабатываемого материала.

Возможность создания локального расплавленного слоя затруднительна вследствие шероховатости и волнистости рабочих поверхностей инструмента и заготовки.

Структурная схема процесса трения при ТФР, отображающая причинно-следственные связи, приведена на рис. 1. Она состоит из ряда стадий, которые характеризуются подсистемами от 4-го порядка.

При основных подсистемах 1 и 2 адсорбированные на поверхности трения молекулы расплавленных частиц обрабатываемого материала и пленок окислов образуют граничный слой, и умеренное адгезионное изнашивание происходит по вершинам единичных микронеровностей. Когда режим трения характеризуется подсистемой 3-го порядка, на поверхностях трения образуются самоорганизующиеся пленки из полимеров трения, включающих в себя образовавшиеся окислы, продукты износа и оплавленные частицы обрабатываемого металла. В этих условиях при значительном термическом влиянии на поверхностях трения в результате трибохимической реакции образуются модифицированные слои, несколько снижающие трение, а процесс износа инструмента приобретает коррозионно-механический характер.

Когда скорость удаления модифицированных слоев начинает превалировать над скоростью их образования, наблюдается переход от кор-

розионно-механического изнашивания к интенсивному адгезионному изнашиванию с последующим удалением металла снимаемого припуска на обработку (подсистема 4-го порядка) [6–10].

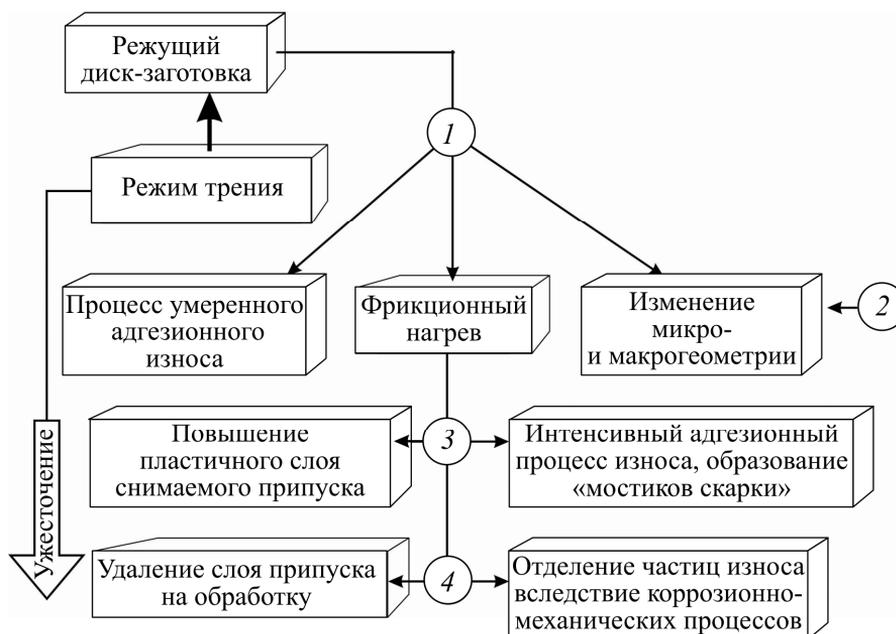


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия определяющих параметров процесса трения при ТФР: 1 – начальное условие работы; 2 – режимы работы при невысоких температурах (процесс врезания); 3 – условия выхода на рабочий режим; 4 – условия трения, приводящие к процессу резания обрабатываемых металлов

В момент врезания диска в заготовку образуется участок сухого трения. В результате трибосопряжения можно выделить зоны трения чистых ювенильных поверхностей, слоев окислов и адсорбированных веществ.

В условиях умеренного адгезионного изнашивания, которое происходит по вершинам единичных микронеровностей, адсорбированные молекулы расплавленных частиц обрабатываемого материала и пленок окислов образуют граничный слой. При этом можно наблюдать процесс схватывания 2-го рода и характерные для этого явления: высокие значения удельных давлений, скорости и контактной температуры, вырывы, налипание и размазывание металла контактирующей пары.

В дальнейшем образуются самоорганизующиеся пленки из полимеров трения, которые состоят из образовавшихся окислов, продуктов износа и оплавленных частиц обрабатываемого металла. При увеличении температуры зоны контакта вследствие трибохимической реакции на поверхности трения образуются модифицированные слои, а процесс износа приобретает коррозионно-механический характер.

Если модифицированные слои удаляются быстрее, чем образуются, наблюдается переход от коррозионно-механического изнашивания к адгезионному изнашиванию с последующим удалением металла снимаемого припуска на обработку. При ТФО наблюдаются смешанные виды трения, а это оказывает влияние на динамические процессы.

Если граничный слой стабилизировать и сохранить на всей фактической поверхности трения, это позволит снизить силы трения и минимизировать интенсивность износа инструмента [11, 12].

При взаимодействии дискового инструмента с обрабатываемой поверхностью происходят сложные рабочие процессы. Трение периферийной части инструмента по поверхности заготовки приводит к значительному тепловыделению [13–15]. В начальный момент взаимодействия инструмента с поверхностью заготовки имеет место сила сухого трения. Сила сухого трения зависит от нормальной нагрузки (радиальной силы). При врезании инструмента радиальная сила увеличивается вследствие движения подачи. При этом наблюдается упругая деформация системы шпиндель – инструмент (рис. 2).

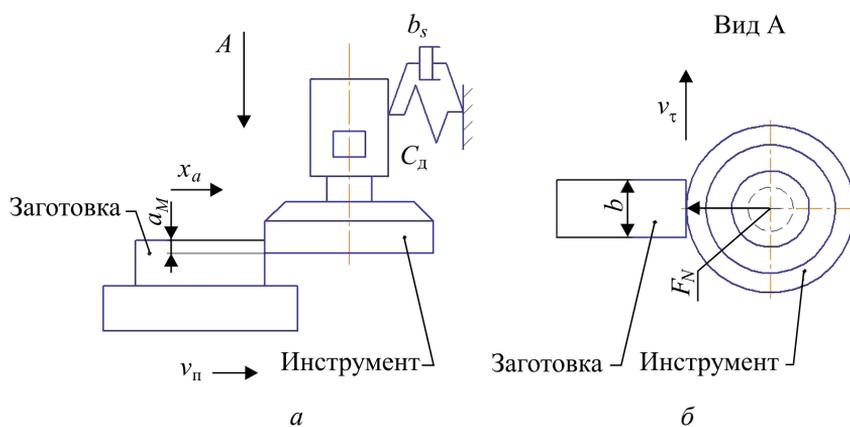


Рис. 2. Схема взаимодействия инструмента и заготовки при врезании: а – вид сбоку; б – вид сверху

Упругие деформации соответствуют движению подачи стола станка, поэтому можно считать, что в начальный момент времени перемещение заготовки относительно инструмента составит

$$x_d = \int_0^t v_n dt, \quad (1)$$

где v_n – скорость подачи; t – текущий момент времени, измеренный от времени касания заготовки с инструментом ($t = 0$).

Нормальная сила резания в начальный момент времени будет определяться упругостью системы «шпиндель – инструмент – заготовка» и составит (с учетом формулы (1))

$$F_N = C_d (x_d - x_S) = C_d \left[\int_0^t v_n dt - x_S \right], \quad (2)$$

где x_S – перемещение шпинделя в результате упругих деформаций.

При действии нормальной силы F_N возникает касательная сила резания F_τ , которая обусловлена сухим трением инструмента по заготовке.

Учитывая выражение (2), получим

$$F_\tau = k_C F_N = k_C C_d \left[\int_0^t v_n dt - x_S \right],$$

где k_C – коэффициент сухого трения инструмента и заготовки.

Коэффициент трения «сталь по стали» составляет 0,2–0,4, поэтому возникают интенсивные силы трения, что приводит к высвобождению значительной механической энергии, которая переходит в тепло.

Мощность, необходимая для компенсации сил трения, определенная через тангенциальную силу резания,

$$N = F_\tau \cdot v_\tau,$$

где v_τ – окружная скорость движения периферийной части инструмента.

Работа сил трения определена путем интегрирования:

$$A = \int_0^t N dt = \int_0^t F_\tau v_\tau dt = \int_0^t v_\tau k_C C_d \left[\int_0^t v_n dt - x_S \right] dt. \quad (3)$$

Выполним интегрирование в формуле (3). Вычислим интеграл в квадратных скобках:

$$\int_0^t v_n dt \approx v_n t. \quad (4)$$

При интегрировании в формуле (4) принято, что подача заготовки постоянна.

Второе слагаемое в квадратных скобках формулы (3) зависит от деформаций шпинделя станка. Как правило, данные деформации малы, поэтому предложено в начальный момент времени считать движение шпинделя равноускоренным с ускорением $a_s = \text{const}$. При этом перемещение шпинделя

$$x_s = -\int_0^t a_s t dt = -a_s \frac{t^2}{2}. \quad (5)$$

Подставив значения величин (4) и (5) в формулу (3), получим

$$A = \int_0^t v_r k_c C_d \left[v_n t - a_s \frac{t^2}{2} \right] dt. \quad (6)$$

Проведя интегрирование в формуле (6), получим зависимость от времени работы сил резания при врезании инструмента в виде

$$A = v_r k_c C_d \left(v_n \frac{t^2}{2} - a_s \frac{t^3}{6} \right). \quad (7)$$

Отсюда следует, что работа сил резания при врезании инструмента соответствует параболической зависимости.

Наличие интенсивных сил сопротивления и соответствующей работы сил резания приводит к высвобождению значительной энергии, которая превращается в тепло. При этом работа сил резания A , определенная по формуле (7), идет на нагрев части заготовки, которая непосредственно контактирует с инструментом. Часть тепла рассеивается в окружающее пространство.

В начальный момент теплоотдача от зоны резания незначительна, а энергия в виде тепла расходуется на нагрев объема материала до температуры плавления и дальнейшего фазового превращения металла из твердой фазы в жидкую.

Количество тепла, которое выделяется при врезании инструмента в заготовку, определяется зависимостью

$$Q = E_M \cdot A = E_M v_t k_c C_d \left(v_n \frac{t^2}{2} - a_s \frac{t^3}{6} \right), \quad (8)$$

где E_M – механический эквивалент теплоты.

Определим характерный объем материала заготовки. Он зависит от ширины заготовки b , толщины срезаемого слоя a и перемещения x_d .

Примем, что характерный объем

$$W_C = k_w a \cdot b v_n t,$$

где k_w – некоторый коэффициент, $k_w \approx 1$.

Определим количество тепла, которое идет на нагрев характерного объема до температуры плавления:

$$Q_H = C_W (\Theta_n - \Theta_o) \cdot W_C = C_W (\Theta_n - \Theta_o) k_w a b v_n t, \quad (9)$$

где C_W – теплоемкость материала заготовки; Θ_o – температура окружающей среды; Θ_n – температура плавления металла.

Принимая, что часть металла из характерного объема переходит в жидкое состояние, определим объем жидкого металла в виде некоторой части характерного объема:

$$W_P = k_p W_C, \quad (10)$$

где k_p – коэффициент, определяющий процентное отношение жидкой фазы к характерному объему.

Количество тепла, которое идет на плавление металла, зависит от объема жидкого металла (10) и составляет

$$Q_P = C_n W_P = C_n k_p k_w a b v_n t, \quad (11)$$

где C_n – удельная теплота плавления металла.

В начальный момент времени ($t \approx 0$) теплоотдача мала, поэтому всё тепло, которое выделяется при врезании, идет на нагрев характерного объема Q_H , плавление металла Q_P и нагрев инструмента Q_1 . В результате имеем уравнение теплового баланса

$$Q_H + Q_P + Q_1 = Q. \quad (12)$$

Окружная скорость вращения инструмента v_τ достаточно велика, поэтому можно считать, что теплоотвод через инструмент является постоянным и составляет от 5 до 20 % от общего количества выделенного тепла. Соответственно, упрощенное уравнение теплового баланса (12) примет вид

$$Q_H + Q_P = K_1 Q, \quad (13)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий теплоотдачу через инструмент, $K_1 \approx 0,8 \dots 0,95$.

Подставим значения составляющих из формул (8), (9) и (11) в уравнение теплового баланса (13) и получим

$$(C_W (\Theta_n - \Theta_o) + C_n k_P) k_W b v_n a t = k_1 E_M v_\tau k_C C_d \left(v_n \frac{t^2}{2} - a_s \frac{t^3}{6} \right). \quad (14)$$

Сократив уравнение теплового баланса (14) на значение времени t , получим изменение во времени толщины слоя расплавленного металла.

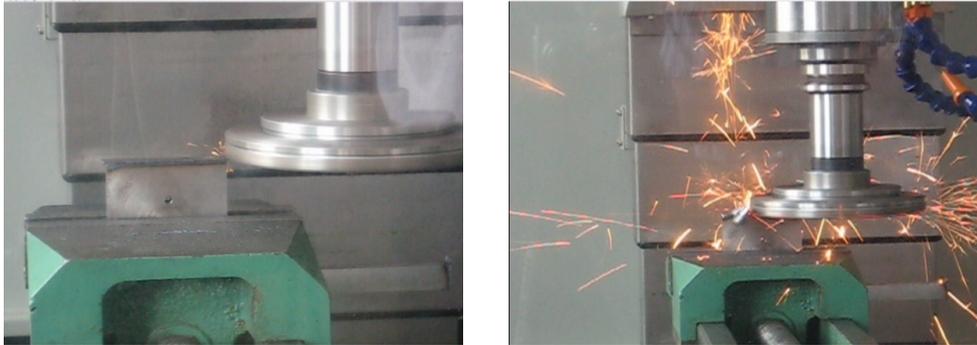
$$a = \frac{k_1 E_M v_\tau k_C C_d}{(C_W (\Theta_n - \Theta_o) + C_n k_P) k_W \cdot b} \left(v_n \frac{t}{2} - a_s \frac{t^2}{6} \right).$$

Слой расплавленного металла не может быть больше глубины врезания инструмента в заготовку a_M , поэтому в некоторый момент времени t_M достигается равенство $a_0 = a_M$. Значение времени t_M определится из решения квадратного уравнения

$$a_s \frac{t_M^2}{6} - v_n \frac{t_M}{2} + \frac{a_M (C_W (\Theta_n - \Theta_o) + C_n k_P) k_W \cdot b}{k_1 E_M v_\tau k_C C_d} = 0. \quad (15)$$

Квадратное уравнение (15) включает значительное число параметров и эмпирических коэффициентов, поэтому оно разрешено приближенными методами. При этом значение времени врезания t_M составляет 0,2–0,4 с.

Для опытного подтверждения результатов теоретических исследований проведена серия экспериментов с обработкой контрольных образцов. Исследовался процесс врезания инструмента, установившийся процесс обработки и выход инструмента (рис. 3).



а

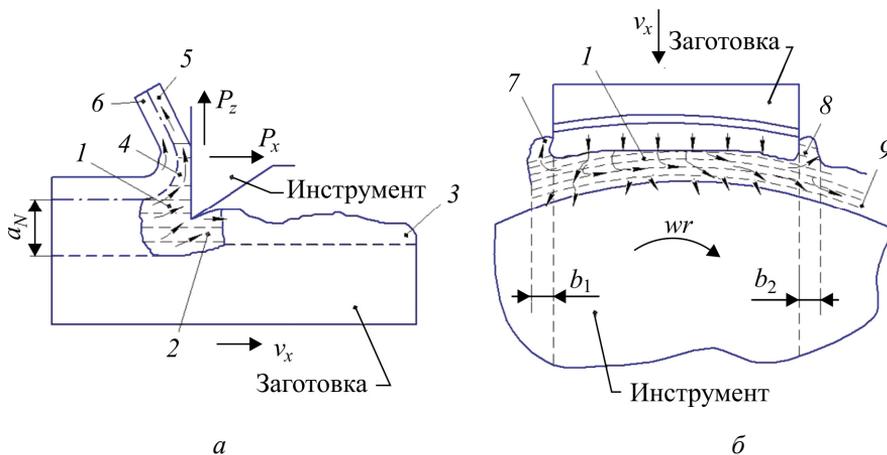
б

Рис. 3. Процесс обработки при врезании инструмента в заготовку (а) и при установившемся резании (б)

В ходе экспериментальных исследований определялось время полного формирования процесса врезания. В разных опытах значение времени формирования процесса составило 0,3–0,5 с. Это в целом соответствует теоретически определенному значению $t_M = 0,2 \dots 0,4$ с.

В результате теоретических и экспериментальных исследований обоснована физическая модель рабочего процесса ТФО.

В области, прилегающей к закругленной кромке инструмента, образуется слой расплавленного металла l (рис. 4, а).



а

б

Рис. 4. Схема формирования стружки и обработанной поверхности вследствие течения расплавленного металла:
 а – схема процесса в радиальном сечении инструмента;
 б – течение металла в торцовой плоскости инструмента

Слой расплавленного металла распространяется по поверхности в виде потока 2 и формирует обработанную поверхность 3. С другой стороны слой расплавленного металла образует поток 4, распространяющейся по периферийной поверхности инструмента.

Охлаждаясь, данный поток образует внутренний слой стружки 5. Стружка имеет внешний слой 6, состоящий из металла, температура которого меньше температуры плавления, и, соответственно, данная часть стружки состоит из пластически деформированного металла.

Оплавление материала заготовки происходит в слое толщиной a_N , который формирует обработанную поверхность 3 и поверхность стружки 5.

Часть металла из слоя 1 выносится за пределы заготовки, образуя наплывы 7 и 8 на обработанной поверхности (рис. 4, б). Установлено, что размеры наплывов b_1 и b_2 составляют 1–3 мм.

Размеры наплывов взаимосвязаны с волнистостью обработанной поверхности. Увеличение волнистости приводит к увеличению размеров наплывов. Часть расплавленного металла выносится из зоны обработки потоком расплава 9, прилегающего к поверхности инструмента.

Установлено, что при врезании дискового инструмента в заготовку толщина слоя расплавленного металла растет в зависимости от времени врезания и достигает максимума, который приблизительно равен толщине срезаемого слоя. При этом слой расплавленного металла распределяется на три части: первая образует внешнюю поверхность обработанной детали, вторая формирует внутреннюю поверхность стружки, а третья распространяется по поверхности инструмента и удаляется из зоны резания.

Список литературы

1. Насад Т.Г., Игнатьев А.А. Высокоскоростная обработка труднообрабатываемых материалов с дополнительными потоками энергии в зоне резания: монография / Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2002. – 112 с.
2. Гик Л.А. Ротационное резание металлов: монография. – Калининград: Кн. изд-во, 1990. – 254 с.
3. Зарубицкий Е.У. Термофрикционная обработка плоских поверхностей деталей // Пути повышения эффективности использования режущего инструмента: сб. науч. тр. – М., 1987. – С. 71–74.
4. Крыськов А.Д. Технология фрикционного формообразования: монография / Кировоград. нац. техн. ун-т. – Кировоград, 2008. – 303 с.

5. Струтинский В.Б., Покинтелица Н.И. Механизм формирования волнистой поверхности при термофрикционной обработке деталей // Вестник СевНТУ. Машиноприборостроение и транспорт: сб. науч. тр. – Севастополь, 2014. – Вып. 160. – С. 161–169.

6. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Д.И. Механико-химические процессы при граничном трении. – М.: Наука, 1972. – 170 с.

7. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник / А.В. Чичинадзе [и др.]; под ред. А.В. Чичинадзе. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.

8. Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М. Основы трибологии и триботехники: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2008. – 206 с.

9. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.

10. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.

11. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. – М.: Машиностроение, 1980. – 136 с.

12. Хоменко А.В., Ляшенко Я.А. Периодический прерывистый режим граничного трения // Журнал технической физики. – Сумы, 2010. – Вып. 1. – С. 27–33.

13. Зарубицкий Е.У. Разработка и исследование процесса эффективности термофрикционной обработки материалов: монография. – Киев: ВИПОЛ, 1993. – 76 с.

14. Покинтелица Н.И., Плахотник В.А. Пластическое деформирование и температура в зоне резания при термофрикционной обработке материалов // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: сб. науч. тр. – Луганск: Изд-во Восточноукр. нац. ун-та им. В. Даля, 2003. – Ч. 1. – С. 196–201.

15. Плахотник В.А., Покинтелица Н.И. Тепловые условия деформирования при термофрикционной обработке деталей // Вестник СевНТУ. Машиностроение и транспорт: сб. науч. тр. – Севастополь, 2010. – Вып. 107. – С. 80–84.

References

1. Nasad T.G., Ignat'ev A.A. Vysokoskorostnaia obrabotka trudnoobrabatyvaemykh materialov s dopolnitel'nymi potokami energii v zone rezaniia [Highspeed processing of intractable materials with additional energy

flows in the cutting zone]. Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2002. 112 p.

2. Gik L.A. Rotatsionnoe rezanie metallov [Rotary metal cutting]. Kalinigrad: Knizhnoe izdatel'stvo, 1990. 254 p.

3. Zarubitskii E.U. Termofriksionnaia obrabotka ploskikh poverkhnostei detalei [Thermofriction treatment of flat details surfaces]. *Sbornik nauchnykh trudov "Puti povysheniia effektivnosti ispol'zovaniia rezhushchego instrumenta"*, 1987, pp. 71-74.

4. Krysov A.D. Tekhnologiya friksionnogo formoobrazovaniia [The technology of frictional forming]. Kirovogradskii natsional'nyi tekhnicheskii universitet, 2008. 303 p.

5. Strutinskii V.B., Pokintelitsa N.I. Mekhanizm formirovaniia volnistoi poverkhnosti pri termofriksionnoi obrabotke detalei [The formation mechanism of undulating surface by the thermofriction parts treatment]. *Vestnik Sevastopol'skogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Mashinoprioborostroyeniye i transport*, 2014, no. 150, pp. 161-169.

6. Kostetskii B.I., Natanson M.E., Bershadskii L.I. Mekhaniko-khimiicheskie protsessy pri granichnom trenii [Mechano-chemical processes in the boundary friction]. Moscow: Nauka, 1972. 170 p.

7. Chichinadze A.V. Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka) [Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication)]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2001. 664 p.

8. Penkin N.S., Penkin A.N., Serbin V.M. Osnovy tribologii i tribotekhniki [Fundamentals of tribology and tribotechnology]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2008. 206 p.

9. Garkunov D.N. Tribotekhnika [Tribotechnology]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1989. 328 p.

10. Talantov N.V. Fizicheskie osnovy protsessa rezaniia, iznashivaniia i razrusheniia instrumenta [Physical basis of the cutting process, wear and destruction of the instrument]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1992. 240 p.

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

12. Khomenko A.V., Liashenko Ia.A. Periodicheskie preryvistyie rezhim granichnogo treniia [Periodic intermittent wipe of boundary friction]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2010, no. 1. pp. 27-33.

13. Zarubitskii E.U. Razrabotka i issledovanie protsessa effektivnosti termofriksionnoi obrabotki materialov: monografiia [Development and re-

search of the effectiveness thermofrictional materials processing process: monograph]. Kiev: VIPOL, 1993. 76 p.

14. Pokintelitsa N.I., Plakhotnik V.A. Plasticheskoe deformirovanie i temperatura v zone rezaniia pri termofriktsionnoi obrabotke materialov [Plastic deformation and the temperature in the cutting zone when thermofrictional materials processing]. *Resursosberegaiushchie tekhnologii proizvodstva i obrabotki davleniem materialov v mashinostroenii*, 2003, part 1, pp. 196-201.

15. Plakhotnik V.A., Pokintelitsa N.I. Teplovye usloviia deformirovaniia pri termofriktsionnoi obrabotke detalei [The thermal deformation conditions at thermofrictional processing details]. *Vestnik Sevastopol'skogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Mashinoprioborostroenie i transport*, 2009, no. 107, pp. 80-84.

Получено 08.12.2015

Об авторах

Покинтелица Николай Иванович (Севастополь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Пищевые технологии и оборудование» Севастопольского государственного университета; e-mail: ni3178@rambler.ru.

Кравченко Ольга Сергеевна (Севастополь, Россия) – аспирантка Политехнического института Севастопольского государственного университета; e-mail: olka.bolka20@gmail.com.

About the authors

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

Olga S. Kravchenko (Sevastopol, Russian Federation) – Postgraduate Student, Polytechnic Institute, Sevastopol State University; e-mail: olka.bolka20@gmail.com.