

НОВИКОВ Ф. В., ДИТИНЕНКО С. А.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ЭФФЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Теоретически с единых позиций рассмотрены закономерности формирования силовой напряженности процессов резания и шлифования и сформулированы условия ее уменьшения с целью повышения качества и производительности обработки. Значительное внимание уделено закономерностям формирования упругих перемещений, возникающих в технологической системе, которые, как правило, определяют погрешность обработки и точность изготовления деталей машин. Предложены новые теоретические решения, направленные на уменьшение возникающих упругих перемещений, а также на их управление в процессе обработки абразивными и лезвийными инструментами для повышения производительности обработки с учетом ограничения по точности обрабатываемых поверхностей. Показана эффективность обработки свободным абразивом или инструментом со связанным мелкозернистым абразивом, изготовленным гальваническим методом. Рассмотрены особенности и эффективность применения процесса шлифования алмазными кругами на металлических связках с использованием их электроэрозионной правки, основанной на введении в зону резания дополнительной электрической энергии в форме электрических разрядов. Этот процесс позволяет стабилизировать производительность во времени, добиться ее увеличения по сравнению с обычным шлифованием, уменьшить силу резания и упругие перемещения в технологической системе.

Ключевые слова: шлифование, абразивные и лезвийные инструменты, качество и производительность обработки, упругое перемещение, условное напряжение резания

НОВИКОВ Ф. В., ДИТИНЕНКО С. О.

ТЕОРЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ВИБОРУ ЕФЕКТИВНИХ СПОСОБІВ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ВИСОКОТОЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

Теоретично з єдиних позицій розглянуто закономірності формування силової напруженості процесів різання і шліфування й сформульовано умови її зменшення з метою підвищення якості та продуктивності обробки. Значну увагу приділено закономірностям формування пружних переміщень, що виникають в технологічній системі, які, як правило, визначають похибку обробки і точність виготовлення деталей машин. Запропоновано нові теоретичні рішення, спрямовані на зменшення пружних переміщень, що виникають, а також на їх управління в процесі обробки абразивними і лезовими інструментами для підвищення продуктивності обробки з урахуванням обмеження за точністю оброблюваних поверхонь. Показано ефективність обробки вільним абразивом або інструментом зі зв'язаним дрібнозернистим абразивом, виготовленим гальванічним методом. Розглянуто особливості та ефективність застосування процесу шліфування алмазними кругами на металевих зв'язках з використанням їх електроерозійної правки, заснованої на введенні в зону різання додаткової електричної енергії у формі електричних розрядів. Цей процес дозволяє стабілізувати продуктивність в часі, домогтися її збільшення в порівнянні зі звичайним шліфуванням, зменшити силу різання і пружні переміщення в технологічній системі.

Ключові слова: шліфування, абразивні й лезові інструменти, якість та продуктивність обробки, пружне переміщення, умовне напруження різання

NOVIKOV F. V., DITINENKO S. A.

THEORETICAL APPROACH TO THE SELECTION OF EFFECTIVE METHODS FOR FINISHING HIGH-PRECISION PARTS

Theoretically, from a unified point of view, the regularities of the formation of power tension in cutting and grinding processes were examined and the conditions for its reduction were formulated in order to improve the quality and productivity of processing. Considerable attention is paid to the laws governing the formation of elastic displacements that occur in a technological system, which, as a rule, determine the processing error and the accuracy of manufacturing machine parts. New theoretical solutions are proposed that are aimed at reducing the occurring elastic displacements, as well as at controlling them during processing with abrasive and blade tools to increase processing productivity, taking into account limitations on the accuracy of the machined surfaces. The effectiveness of processing with a free abrasive or a tool with bonded fine-grained abrasive made by the galvanic method is shown. Peculiarities and efficiency of the application of the process of grinding with diamond wheels on metal bonds with the use of their EDM based on the introduction of additional electric energy in the form of electric discharges into the cutting zone are considered. This process allows to stabilize productivity over time, to achieve its increase in comparison with conventional grinding, to reduce cutting force and elastic displacements in the technological system.

Keywords: grinding, abrasive and blade tools, quality and productivity of processing, elastic movement, conditional cutting stress

Введение. Высокие требования к точности и качеству изготовления изделий современной техники предопределяют необходимость применения новых более эффективных способов обработки, разработки оптимальных технологических процессов и т.д. Решение этих задач неразрывно связано с проблемой оптимизации условий обработки, созданием глубоких математических моделей основных методов резания лезвийными и абразивными инструментами, а также методов обработки металлов пластическим

деформированием. В настоящее время накоплен большой опыт решения оптимизационных задач в технологии машиностроения. Однако решения разнородны, отсутствует единый подход к математическому описанию технологических процессов, отсутствуют единые уравнения (зависимости), описывающие целевые функции (себестоимость, производительность, параметры точности и качества обработки) и технические ограничения. Это сужает возможности оптимального

проектирования. Поэтому важно с единых позиций провести оптимизацию параметров лезвийной и абразивной обработки и получить оптимальные решения, разработать методики расчета оптимальных режимов резания и других условий обработки, а также предложить рекомендации по выявлению и реализации новых резервов механической обработки.

Анализ последних исследований и публикаций. При изготовлении ответственных деталей машин наиболее существенной проблемой, по-прежнему, является проблема обеспечения высокой точности обрабатываемых поверхностей [1]. Это обусловлено, прежде всего, наличием упругой системы станка – источника возникновения упругих перемещений и колебаний, вызывающих погрешности обработки [2]. Исключить упругую систему станка из технологического процесса обработки практически невозможно. Поэтому основным путем повышения точности обработки следует рассматривать управление упругими перемещениями и колебаниями при обработке [3]. Исходя из этого, поставлена задача определения параметров силовой напряженности процессов механической обработки и на их основе обоснования условий уменьшения силы резания и упругих перемещений, возникающих в технологической системе.

Цель работы – обоснование условий повышения качества, точности и производительности механической обработки.

Изложение основного материала. Общеизвестно, что упругое перемещение y , возникающее в технологической системе в радиальном направлении, равно отношению радиальной составляющей силы резания P_y и приведенной жесткости системы c , т.е. $y = P_y / c$. Неограниченно уменьшая P_y , можно реализовать условие $y \rightarrow 0$. Однако это требует существенного уменьшения производительности обработки Q , что не всегда эффективно. В общем виде [4]: $P_y = \sigma \cdot S / K_{рез}$, где σ – условное напряжение резания, Н/м²; $K_{рез} = P_z / P_y$ – коэффициент резания; P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; S – площадь поперечного сечения среза, м². При шлифовании $S = Q / V_{кр}$ – площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, где $V_{кр}$ – скорость круга, м/с.

Исходя из этой зависимости, уменьшить силу P_y без уменьшения параметра S можно уменьшением отношения $\sigma / K_{рез}$, связанного с известным отношением a_z / R обратно пропорциональной зависимостью, где a_z – толщина среза, м; R – радиус округления лезвия режущего инструмента (или вершины режущего зерна). Следовательно, чем больше a_z и меньше R , тем меньше $\sigma / K_{рез}$. Поскольку параметр a_z линейно связан с S ,

уменьшить P_y (без уменьшения S) можно уменьшением R . Это достигается применением лезвийных и абразивных инструментов из синтетических сверхтвердых материалов, обладающих чрезвычайно высокой твердостью и износостойкостью.

Для получения инженерных зависимостей, описывающих параметры силовой напряженности процесса микрорезания единичным зерном, использована упрощенная расчетная схема (рис. 1), в которой контактное давление P равномерно распределено вдоль дуги контакта зерна с обрабатываемым материалом. Проецируя давление P на условную плоскость сдвига, расположенную под углом β , получено выражение для расчета силы, вызывающей сдвиг элемента материала в направлении условной плоскости сдвига:

$$F = \int_{\varphi_0}^{90^\circ} P \cdot \epsilon \cdot R \cdot \cos(\varphi + \beta) \cdot d\varphi = P \cdot \epsilon \cdot R \cdot [\sin(90^\circ + \beta) - \sin(\varphi_0 + \beta)], \quad (1)$$

где $(90^\circ - \varphi_0)$ – угол контакта зерна с обрабатываемым материалом; ϵ – ширина контакта зерна с обрабатываемым материалом, м.

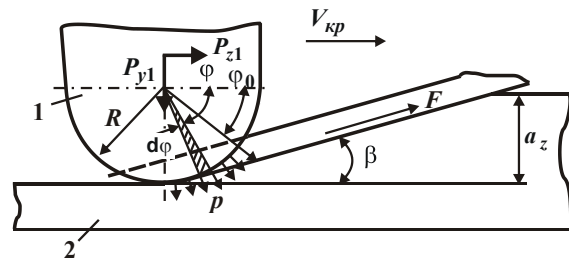


Рис. 1 – Расчетная схема параметров процесса микрорезания: 1 – зерно; 2 – обрабатываемый материал

Касательное напряжение в условной плоскости сдвига материала:

$$\tau = \frac{F \cdot \sin \beta}{a_z \cdot \epsilon} = \frac{P \cdot R \cdot \sin \beta}{a_z} \cdot [\sin(90^\circ + \beta) - \sin(\varphi_0 + \beta)]. \quad (2)$$

Положение условной плоскости сдвига материала определяет такой угол β , при котором касательное напряжение τ максимально. Подчиняя функцию τ необходимому условию экстремума $d\tau_\beta = 0$, определено экстремальное значение угла $\beta = 22,5^\circ - \varphi_0 / 4$. Анализ зависимости показывает, что условный угол β при угле $\varphi_0 = 0$ может изменяться в пределах $0 \dots 22,5^\circ$, что соответствуют экспериментальным данным [4]. Угол φ_0 зависит от условий стружкообразования и определяется из условия достижения в условной плоскости сдвига материала предельной силы $F = \tau_{сдв} \cdot \epsilon \cdot a_z / \sin \beta$. С учетом зависимости (1) и $\sin \beta \approx \beta$; $\cos \beta \approx 1$ (в силу малости угла β), а величину P равной твердости обрабатываемого материала HV (по Виккерсу), получено:

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{\tau_{сдв}}{4 \cdot HV} \cdot \frac{a_z}{R}}; \quad (3)$$

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2} - 4\beta = \frac{\pi}{2} - \sqrt[3]{\frac{16 \cdot \tau_{сдв}}{HV} \cdot \frac{a_z}{R}}. \quad (4)$$

Тангенциальная P_{z1} и радиальная P_{y1} составляющие силы резания, коэффициент резания $K_{рез}$, условное напряжение резания σ и удельная интенсивность съема материала λ описываются аналитическими зависимостями:

$$P_{z1} = \int_{\varphi_0}^{90^0} HV \cdot \epsilon \cdot R \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi = \epsilon \cdot R \cdot \sqrt[3]{32 \cdot \tau_{сдв}^2 \cdot HV \cdot \alpha^2}; \quad (5)$$

$$P_{y1} = \int_{\varphi_0}^{90^0} HV \cdot \epsilon \cdot R \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi = \epsilon \cdot R \cdot \sqrt[3]{16 \cdot \tau_{сдв} \cdot HV^2 \cdot \alpha}; \quad (6)$$

$$K_{рез} = \frac{P_{z1}}{P_{y1}} = 2 \cdot \beta = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{HV} \cdot \frac{a_z}{R}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{HV} \cdot \alpha}; \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{P_{z1}}{\epsilon \cdot a_z} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot \tau_{сдв}^2 \cdot HV \cdot R}{a_z}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot \tau_{сдв}^2 \cdot HV}{\alpha}}; \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{V_{кр} \cdot K_{рез}}{\sigma} = V_{кр} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{\tau_{сдв}} \cdot \left(\frac{\alpha}{4 \cdot HV}\right)^2}, \quad (9)$$

где $\alpha = a_z / R$ – коэффициент, определяющий условия перехода от упруго-пластического деформирования металла к резанию (по экспериментальным данным ряда исследований $\alpha > 0,04$).

Анализ приведенных зависимостей показал.

1) Составляющие силы резания P_{z1} и P_{y1} увеличиваются с увеличением a_z , R , предела прочности на сдвиг $\tau_{сдв}$ и твердости HV обрабатываемого материала. При этом P_{z1} в большей степени определяется параметрами $\tau_{сдв}$ и a_z , а P_{y1} – параметрами HV и R , что обусловлено особенностями механизмов их формирования: силы P_{z1} – деформацией сдвига материала, а силы P_{y1} – деформацией смятия материала при вдавливании зерна.

2) Условиями уменьшения составляющих силы резания P_{z1} и P_{y1} являются: R и уменьшение коэффициента $\alpha = a_z / R$ до минимально возможного значения, при котором процесс резания переходит в процесс упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала без образования стружки ($\alpha < 0,04$).

3) Коэффициент резания $K_{рез}$ однозначно определяется условным углом сдвига материала β : чем больше β , тем больше $K_{рез}$ и выше эффективность процесса микрорезания.

4) Условный угол сдвига материала β и коэффициент резания $K_{рез}$ зависят от коэффициента

$\alpha = a_z / R$: с его увеличением параметры β и $K_{рез}$ увеличиваются, что согласуется с экспериментальными данными [5].

5) Коэффициент резания $K_{рез}$ зависит от отношения $\tau_{сдв} / HV$: чем оно больше, тем больше $K_{рез}$ и выше эффективность процесса микрорезания. Этим объясняется различная обрабатываемость материалов при шлифовании.

6) Условное напряжение резания σ , аналогично коэффициенту резания $K_{рез}$, определяется коэффициентом $\alpha = a_z / R$: с его увеличением σ уменьшается, что согласуется с многочисленными экспериментальными данными [3, 4]. Условное напряжение резания σ в большей степени зависит от $\tau_{сдв}$, чем от HV , что обусловлено взаимосвязью σ с тангенциальной составляющей силы резания P_{z1} .

7) Уменьшение коэффициента $\alpha = a_z / R$ приводит к уменьшению P_{z1} , P_{y1} и увеличению σ . Поэтому при высокопроизводительной обработке, благодаря увеличению коэффициента $\alpha = a_z / R$ происходит уменьшение σ , что способствует повышению эффективности обработки. При финишной обработке (доводке, полировании, суперфинишировании и т.п.), наоборот, необходимо уменьшать коэффициент $\alpha = a_z / R$ с целью уменьшения P_{z1} , P_{y1} и повышения качества обработки. Величину $y = P_y / c$ с учетом зависимости (6) можно представить в виде:

$$y = \frac{\epsilon \cdot R}{c} \cdot \sqrt[3]{16 \cdot \tau_{сдв} \cdot HV^2 \cdot \alpha}. \quad (10)$$

Из зависимости (10) вытекают основные условия уменьшения величины y , состоящие в уменьшении параметров ϵ , R , a_z и увеличении c . Наибольшее влияние на величину y оказывают параметры ϵ и c . Однако, уменьшение параметров ϵ и a_z связано с уменьшением производительности обработки. Поэтому эффективно увеличивать c и уменьшать R .

Радиус округления вершины режущего зерна R связан линейной зависимостью с зернистостью абразивного или алмазного порошка, используемого при алмазно-абразивной обработке. Поэтому важнейшим условием повышения точности обработки необходимо рассматривать снижение зернистости, что подтверждается экспериментальными данными. Если все возможности уменьшения величины упругого перемещения y за счет уменьшения параметров c и R исчерпаны, то необходимо уменьшить параметр ϵ , затем a_z , т.к. ϵ в значительно большей степени влияет на величину y , чем a_z .

При продольном точении (рис. 2) ширина среза $\epsilon = t / \cos \varphi$, где t – глубина резания, м; φ – угол реза в плане; D , d – диаметры заготовки и обработанной детали, м; S – продольная подача,

м/об.; V – скорость резания, м/с; $a = a_z$ – толщина среза, м; P – сила резания, Н; P_y , P_x – радиальная и осевая составляющие силы резания, Н.

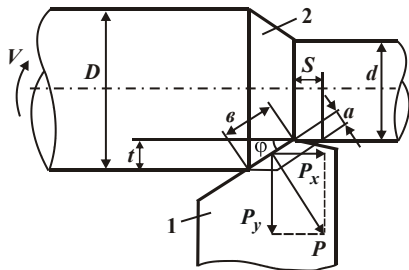


Рис. 2 – Расчетная схема продольного точения: 1 – резец; 2 – деталь

Уменьшение e предполагает уменьшение t . При этом отношение a_z/R должно быть больше предельного значения, при котором резание неосуществимо, а возможно лишь упруго-пластическое деформирование обрабатываемого материала. Тогда зависимость (10) примет вид:

$$y = \frac{t \cdot R}{c \cdot \cos \varphi} \cdot \sqrt[3]{16 \cdot \tau_{сдв} \cdot HV^2 \cdot \alpha} \quad (11)$$

При заданном значении коэффициента $\alpha = a_z/R$ уменьшить величину y можно уменьшением параметров t , R и увеличением c . При обеспечении наименьшего значения $t \cdot R / c \cdot \cos \varphi$ зависимость (11) определяет минимально возможное значение величины y , достигаемое в процесс резания. Следовательно, повысить точность обработки при обеспечении высокой производительности можно за счет уменьшения ширины среза e и увеличения толщины среза a_z . Очевидно, наименьшие значения параметров R и a_z можно достичь при обработке свободным абразивом или инструментом со

связанным мелкозернистым абразивом, изготовленным гальваническим методом. Эти инструменты (шлифовальные круги) обеспечивают однослойное (одновысотное) расположение режущих зерен, чего не обеспечивают традиционные абразивные и алмазные круги. Кроме того, изготовить обычные круги мелкой зернистости весьма сложно, что ограничивает возможности уменьшения параметра R в зависимости (10).

Более высокие значения R при шлифовании требуют увеличения параметра a_z для обеспечения условия микрорезания $\alpha = a_z/R = const$. Отсюда вытекает, что процесс шлифования существенно ограничен с точки зрения достижения высокой точности обработки.

Важным резервом повышения эффективности шлифования является применение алмазных кругов на металлических связках, работающих в режиме электроэрозионного шлифования, основанного на введении в зону резания дополнительной электрической энергии в форме электрических разрядов. Для оценки технологических возможностей этого перспективного метода обработки были проведены комплексные экспериментальные исследования алмазного электроэрозионного шлифования изделий из твердых сплавов на операциях круглого наружного, плоского и внутреннего шлифования (рис. 3). Наибольший эффект был достигнут при внутреннем шлифовании, которое характеризуется относительно низкой жесткостью технологической системы и быстрой потерей режущей способности алмазного круга на металлической связке, имеющей небольшую режущую поверхность. Например, при обычном шлифовании алмазным кругом на металлической связке М2-01 в течение 8 минут производительность обработки уменьшилась в 5 раз.

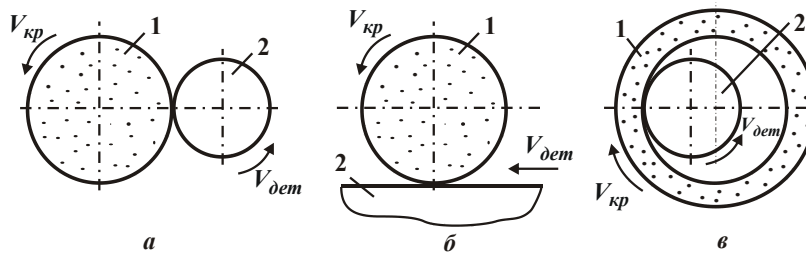


Рис. 3 – Схемы круглого наружного (а), плоского (б) и внутреннего (в) шлифования: 1 – круг; 2 – деталь

Введение в зону резания дополнительной электрической энергии постоянного тока позволило, во-первых, стабилизировать производительность во времени, во-вторых, добиться ее увеличения по сравнению с обычным шлифованием (без тока) и приблизить фактическое и номинальное значение. Этим удалось существенно уменьшить силу резания и упругие перемещения в технологической системе. Исходя из зависимости $P_y = \sigma \cdot S / K_{рез}$, уменьшение P_y произошло за счет уменьшения отношения $\sigma / K_{рез}$, т.е. увеличения отношения a_z/R .

Исходя из зависимости (11), уменьшение величины y произошло за счет повышения остроты режущих зерен круга, т.е. уменьшения R . Увеличение коэффициента $\alpha = a_z/R$ не привело к увеличению величины y , поскольку коэффициент α входит в зависимость (11) с меньшей степенью, чем R .

На основе проведенных экспериментальных исследований установлено, что основной эффект алмазного электроэрозионного шлифования состоит в обеспечении своевременного удаления с рабочей поверхности круга затупившихся зерен и устранении

трения металлической связки круга с обрабатываемым материалом. Это создает условия уменьшения силовой напряженности процесса и повышения производительности и точности обработки. Разработанные технологии алмазного электроэрозионного шлифования твердосплавных инструментов и других изделий, а также технологии алмазно-абразивной обработки используются на Харьковском машиностроительном заводе "ФЭД" и других предприятиях.

Таким образом, исходя из зависимости (11), можно заключить, что добиться уменьшения величины y (т.е. повысить точность обработки) можно уменьшением параметров t , R и увеличением c . Однако уменьшение глубины резания t ведет к снижению производительности обработки. Поэтому эффективно увеличивать c и уменьшать радиус округления режущей кромки инструмента R . Поскольку величина c ограничена, основным путем уменьшения величины упругого перемещения y следует рассматривать уменьшение R , т.е. необходимо обеспечить высокую остроту режущей кромки инструмента. Это достигается применением как лезвийных, так и абразивных инструментов. Большими возможностями располагают алмазно-абразивные инструменты благодаря высокой остроте режущих кромок алмазных зерен. При этом важно обеспечить своевременное удаление с рабочей поверхности алмазного круга затупившихся зерен, имеющих увеличенное значение радиуса R .

Приведенная зависимость (11) открывает новые возможности анализа и выбора оптимальных способов финишной обработки. Например, по изменению радиуса R анализируют с единых позиций все известные методы лезвийной и абразивной обработки с точки зрения обеспечения наибольшей точности и производительности обработки. Чрезвычайно важное значение имеет управление коэффициентом $\alpha = a_z / R$ путем установления рационального отношения между толщиной среза a_z и радиусом округления режущей кромки инструмента R . Полученные теоретические решения положены в основу разработанной методики выбора эффективных способов финишной обработки, используемых при изготовлении высокоточных деталей.

Выводы. В работе теоретически с единых позиций рассмотрены закономерности формирования силовой напряженности процессов резания и

шлифования и сформулированы условия ее уменьшения с целью повышения качества и производительности обработки. Значительное внимание уделено закономерностям формирования упругих перемещений, возникающих в технологической системе, которые, как правило, определяют погрешность обработки и точность изготовления деталей машин. Предложены новые теоретические решения, направленные на уменьшение возникающих упругих перемещений, а также на их управление в процессе обработки для повышения производительности с учетом ограничения по точности обрабатываемых поверхностей. Показана эффективность процесса шлифования алмазными кругами на металлических связках с применением их электроэрозионной правки.

Список литературы:

1. Сизый Ю. А. Динамика и теплофизика шлифования / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. – Харьков: ГП УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. – 448 с.
2. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г. Б. Лурье. – Ленинград: Машиностроение, 1984. – 103 с.
3. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – Москва: Машиностроение, 1975. – 175 с.
4. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки: монография / Ф. В. Новиков. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 400 с.
5. Жовтобрюх В. А., Новиков Ф. В. Проектирование и автоматизированное программирование современных технологий для станков с ЧПУ: монография. – Днепр: ЛИРА, 2019. – 480 с.

References (transliterated)

1. Sizyy YU. A., Stalinskiy D. V. Dinamika i teplofizika shlifovaniya [Dynamics and thermal physics of grinding]. – Khar'kov: GP UkrNTTS "Energostal", 2016. – 448 s.
2. Lur'ye G. B. Progressivnyye metody kruglogo naruzhnogo shlifovaniya [Progressive methods of circular external grinding]. – Leningrad: Mashinostroyeniye, 1984. – 103 s.
3. Yakimov A. V. Optimizatsiya protsessov shlifovaniya [Optimization of the grinding process] / Moskva: Mashinostroyeniye, 1975. 175 s.
4. Novikov F. V. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki: monografiya [Fundamentals of mathematical modeling of technological processes of machining: monograph] / Dnepr : LIRA, 2018. 400 s.
5. Zhovtobryukh V. A., Novikov F. V. Proyektirovaniye i avtomatizirovannoye programmirovaniye sovremennykh tekhnologiy dlya stankov s CHPU: monografiya [Design and automated programming of modern technologies for CNC machines: monograph]. – Dnepr: LIRA, 2019. – 480 s.

Поступила (received) 21.01.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новіков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedir) – доктор технічних наук, професор кафедри «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: novikovfv@i.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6996-3356>

Дитиненко Станіслав Олександрович (Дитиненко Станислав Александрович, Ditinenko Stanislav) – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-0678924575; e-mail: fokusnic1@rambler.ru ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5382-2276>