

ПОЛЯНСКИЙ В. И.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ И ШЛИФОВАНИИ

Аналитически установлено, что высокоскоростное фрезерование располагает значительными технологическими возможностями с точки зрения уменьшения шероховатости поверхности при одновременном увеличении производительности обработки. Установлено также, что при шлифовании уменьшение шероховатости поверхности связано с уменьшением производительности. Наиболее прогрессивным методом шлифования, обеспечивающим одновременно увеличение производительности и уменьшение шероховатости поверхности, является глубинное шлифование с небольшой скоростью детали, которое характеризуется меньшей производительностью по сравнению с высокоскоростным фрезерованием.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, цилиндрическая фреза, шлифование, шлифовальный круг, шероховатость поверхности, производительность обработки, окончательная обработка, технологическая операция.

В. І. ПОЛЯНСЬКИЙ

ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ТА ШЛІФУВАННІ

Аналітично встановлено, що високошвидкісне фрезерування має у своєму розпорядженні значні технологічні можливості з погляду зменшення шорсткості поверхні при одночасному збільшенні продуктивності обробки. Встановлено також, що при шліфуванні зменшення шорсткості поверхні пов'язано зі зменшенням продуктивності. Найбільш прогресивним методом шліфування, що забезпечує одночасно збільшення продуктивності і зменшення шорсткості поверхні, є глибинне шліфування з невеликою швидкістю деталі, яке характеризується меншою продуктивністю порівняно з високошвидкісним фрезеруванням.

Ключові слова: високошвидкісне фрезерування, циліндрична фреза, шліфування, шліфувальний круг, шорсткість поверхні, продуктивність обробки, кінцева обробка, технологічна операція.

V. I. POLYANSKIY

THEORETICAL DETERMINATION OF SURFACE ROUGHNESS DURING HIGH-SPEED MILLING AND GRINDING

The paper presents the results of theoretical studies of the surface roughness during milling and grinding. It is shown that high-speed milling has significant technological capabilities in terms of reducing surface roughness, because cutting data parameters are included in the calculated dependencies obtained to determine surface roughness with higher degrees than during grinding. This applies in particular to the speed of rotation of the cutter. Therefore, with its increase, it becomes possible to significantly reduce the surface roughness while increasing the processing capacity, which opens up broad prospects for the practical use of high-speed milling. It is established that during grinding, a decrease in surface roughness is associated with a decrease in productivity, and this reduces the efficiency of processing. The most progressive method of grinding, providing both an increase in productivity and a reduction in surface roughness, is deep-grinding at a low speed of the part. However, it is characterized by lower productivity in comparison with high-speed milling.

Keywords: high-speed milling, cylindrical mill, grinding, grinding wheel, surface roughness, processing performance, final processing, technological operation.

Введение. Применение современных технологий механической обработки твердосплавными и керамическими инструментами с износостойкими покрытиями открывает широкие перспективы повышения производительности и качества обработки изделий, изготовленных из различных по физико-механическим свойствам материалов. Это позволяет во многих случаях совместить предварительную и окончательную обработку в одну операцию, исключая традиционные методы финишной абразивной обработки, характеризующиеся относительно низкой производительностью. В особой мере это относится к высокоскоростному фрезерованию, осуществляемому на современных высокооборотных металлорежущих станках с ЧПУ типа «обрабатывающий центр». Как показывает практика, наряду с обеспечением высокой производительности, при высокоскоростном фрезеровании снижается количество тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, что приводит к уменьшению температуры резания и повышению качества обработки. Также достигаются высокие показатели шероховатости поверхности, соизмеримые с показателями шероховатости

поверхности при шлифовании. В связи с этим, актуальна задача теоретического определения и сравнения шероховатости поверхности при высокоскоростном фрезеровании и шлифовании.

Анализ последних исследований и публикаций. Процессам фрезерования и шлифования в научно-технической литературе постоянно уделяется большое внимание [1–4] вследствие их широкого практического использования. В последние годы получило применение высокоскоростное фрезерование [5; 6], характеризующееся высокими показателями производительности и качества обработки. Вместе с тем, в научно-технической литературе приведено недостаточно информации об условиях эффективного осуществления этого метода обработки, отсутствуют сравнительные данные методов высокоскоростного фрезерования и шлифования по критериям производительности обработки и шероховатости обработанной поверхности. Поэтому проведение теоретического определения и сравнения шероховатости поверхности при высокоскоростном фрезеровании и шлифовании позволит раскрыть истинные технологические

возможности высокоскоростного фрезерования и разработать практические рекомендации по их эффективному осуществлению.

Цель работы – теоретическое определение условий уменьшения шероховатости поверхности при высокоскоростном фрезеровании и шлифовании и разработка практических рекомендаций.

Изложение основного материала. При фрезеровании цилиндрической фрезой параметр шероховатости поверхности R_z определяется в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рис. 1, на основе полученной в работе [1] аналитической зависимости:

$$R_z = \frac{S_z^2}{4 \cdot D}, \quad (1)$$

где S_z – подача на зуб, м/зуб;

D – диаметр фрезы, м.

Параметр S_z можно выразить через скорость перемещения детали V_{dem} и скорость вращения фрезы $V_{фр}$ с учетом кинематического соотношения

$$S_z = \tau \cdot V_{dem}, \quad \text{где } \tau = \frac{\pi \cdot D}{z \cdot V_{фр}} - \text{ время перемещения}$$

фрезы на расстояние S_z , с; z – количество зубьев фрезы. Тогда

$$R_z = \frac{D}{4} \cdot \left(\frac{\pi \cdot V_{dem}}{z \cdot V_{фр}} \right)^2 = \frac{1}{4 \cdot D} \cdot \left(\frac{V_{dem}}{z \cdot n} \right)^2, \quad (2)$$

где $V_{фр} = \pi \cdot D \cdot n$;

n – частота вращения фрезы, об./с.

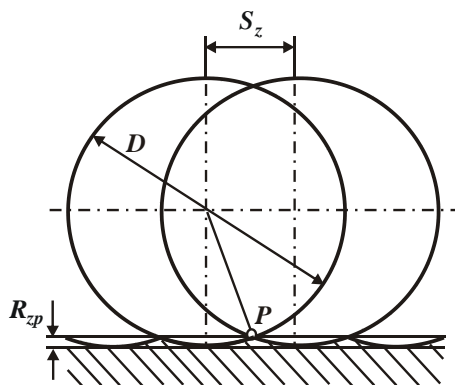


Рис. 1 – Расчетный микропрофиль обработанной поверхности при фрезеровании цилиндрической фрезой [1]

Из зависимости (2) следует, что уменьшить параметр шероховатости поверхности R_z можно уменьшением скорости перемещения детали V_{dem} и увеличением параметров z , n и D , причем, за счет изменения параметров V_{dem} , z , n – в значительно большей степени, чем за счет увеличения диаметра фрезы D . Очевидно, наиболее целесообразным условием уменьшения параметра R_z необходимо

рассматривать увеличение частоты вращения фрезы n , т.е. условие перехода в область высокоскоростного фрезерования, применяя для этого современные высокооборотные металлорежущие станки с ЧПУ типа «обрабатывающий центр». Создание фрез с большим количеством режущих зубьев, что имеет место на практике, также является важным условием уменьшения параметра R_z .

Уменьшение скорости перемещения детали V_{dem} с целью уменьшения параметра шероховатости поверхности R_z , очевидно, неэффективно, поскольку требует снижения производительности обработки. Поэтому за счет существенного увеличения частоты вращения фрезы n можно добиться существенного уменьшения параметра шероховатости поверхности R_z независимо от диаметра фрезы D , который входит в зависимость (2) с меньшей степенью, чем частота вращения фрезы n (табл. 1).

Таблица 1 – Расчетные значения параметра шероховатости поверхности R_z (в мкм) при высокоскоростном фрезеровании ($D=10$ мм; $Z=4$)

$n \cdot 10^3$, об./мин	V_{dem} , м/мин				
	1	4	8	12	16
1	1,56	25	100	224,6	400
10	0,0156	0,25	1,0	2,246	4,0
20	0,004	0,063	0,25	0,56	1,0
30	0,0017	0,028	0,111	0,249	0,44

Производительность обработки $Q = \mathcal{G} / \tau$, исходя из условия перемещения фрезы на расстояние S_z за время $\tau = \frac{\pi \cdot D}{z \cdot V_{фр}}$, определяется

зависимостями:

$$Q = \frac{B \cdot t \cdot S_z \cdot V_{фр} \cdot z}{\pi \cdot D} = B \cdot t \cdot S_z \cdot n \cdot z = B \cdot t \cdot S \cdot n, \quad (3)$$

где $\mathcal{G} = B \cdot t \cdot S_z$ – объем материала, удаляемого одним зубом фрезы, м³;

B – ширина фрезерования, м;

t – глубина резания, м;

$S = S_z \cdot z$ – подача на один оборот фрезы, м/об.

Как видно, увеличить производительность обработки Q можно увеличением параметров B , t , S_z , n и z или параметров B , t , S и n .

Подача на зуб S_z , обеспечивающая заданную шероховатость обработанной поверхности R_z , исходя из зависимости (1), равна:

$$S_z = \sqrt{4 \cdot D \cdot R_z}, \quad (4)$$

т.е. чем больше параметры D и R_z , тем больше S_z .

Выражая в зависимости (3) подачу на зуб S_z зависимостью (4), имеем:

$$Q = \frac{B \cdot t \cdot V_{\text{фр}} \cdot z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot R_z}{D}} = B \cdot t \cdot n \cdot z \cdot \sqrt{4 \cdot D \cdot R_z} \quad (5)$$

Увеличить производительность обработки Q с учетом ограничения по шероховатости обработанной поверхности R_z можно увеличением параметров B , t , $V_{\text{фр}}$, z и уменьшением диаметра фрезы D или с учетом соотношения $V_{\text{фр}} = \pi \cdot D \cdot n$ – увеличением всех входящих в зависимость (5) параметров B , t , $V_{\text{фр}}$, z и D . Поскольку параметры B и t не влияют на R_z , согласно зависимости (1), то добиться наиболее существенного увеличения производительности обработки Q можно, прежде всего, за счет увеличения этих двух параметров.

Одним из ограничений достижения высоких показателей производительности и качества обработки при высокоскоростном фрезеровании является ограничение по предельной (прочностной) толщине среза a , которая определяется зависимостью [7]:

$$a = \frac{2 \cdot \pi}{z} \cdot \frac{V_{\text{дем}}}{V_{\text{фр}}} \cdot \sqrt{t \cdot D} \quad (6)$$

С учетом выражения для определения производительности обработки $Q = B \cdot V_{\text{дем}} \cdot t$ зависимость (6) принимает вид:

$$a = \frac{2 \cdot \pi}{z} \cdot \frac{Q}{B \cdot V_{\text{фр}}} \cdot \sqrt{\frac{D}{t}} \quad (7)$$

Откуда

$$Q = \frac{a \cdot z \cdot B \cdot V_{\text{фр}}}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{t}{D}}; \quad (8)$$

$$V_{\text{дем}} = \frac{a \cdot z \cdot V_{\text{фр}}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{t \cdot D}} \quad (9)$$

Как видно, повысить производительность обработки Q для заданного предельного значения a можно путем увеличения ширины фрезерования B , глубины резания t , скорости вращения фрезы $V_{\text{фр}}$ и количества режущих зубьев z .

Судя по известным экспериментальным данным [5], наиболее эффективным условием повышения производительности обработки при высокоскоростном фрезеровании считается уменьшение глубины резания t (т.е. уменьшение толщины снимаемого слоя материала) и увеличение подачи (т.е. увеличение скорости перемещения детали $V_{\text{дем}}$). С физической точки зрения это связано с уменьшением температуры резания за счет снижения количества тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, и увеличения количества тепла, уходящего в образующиеся стружки. Это, в частности, вытекает из аналитической зависимости для определения глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали [7]:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}}, \quad (10)$$

где λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·град);

c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·град);

ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³;

$\tau = h/V_{\text{дем}}$ – время контакта зуба фрезы с обрабатываемой деталью, с;

h – длина контакта зуба фрезы с обрабатываемой деталью, м.

Как видно, параметр l_2 вполне однозначно определяется временем τ . Чем оно меньше, тем меньше параметр l_2 и, соответственно, интенсивность теплового воздействия на поверхностный слой обрабатываемой детали, температура резания и вероятность образования на обрабатываемой поверхности температурных дефектов (прижогов, микротрещин и др.). Очевидно, увеличение скорости перемещения детали $V_{\text{дем}}$ способствует такому протеканию теплового процесса при высокоскоростном фрезеровании, что и предопределяет основную концепцию его эффективного применения на практике. Исходя из этого, зависимости (6) – (9) следует рассматривать как дополнительные к основной концепции высокоскоростного фрезерования, связанной с уменьшением тепловой напряженности процесса резания.

Расчетную схему, приведенную на рис. 1, можно применить и для расчета шероховатости обработанной поверхности при шлифовании, рассматривая вместо положений цилиндрической фрезы на рис. 1 положения режущих зерен, представленных в форме сферы, а вместо величины подачи на зуб S_z – среднее расстояние между зернами. В этом случае параметр шероховатости поверхности R_z при шлифовании будет определяться зависимостью (1) с учетом $S_z = B/N$, где B – ширина шлифования, м; N – количество режущих зерен шлифовального круга, участвующих в формировании шероховатости поверхности; D_3 – диаметр режущего зерна, м. Тогда

$$R_z = \frac{1}{4 \cdot D_3} \cdot \left(\frac{B}{N}\right)^2 \quad (11)$$

Для определения количества режущих зерен шлифовального круга N , участвующих в формировании шероховатости поверхности, следует воспользоваться зависимостью:

$$N = \frac{R_z}{b} \cdot k \cdot S, \quad (12)$$

где b – максимальная высота выступания вершины режущего зерна над уровнем связки круга, м;

k – поверхностная концентрация режущих зерен круга, шт./мм²;

$S = B \cdot l$ и l – соответственно площадь и длина рабочей поверхности шлифовального круга, участвующая в формировании шероховатости поверхности.

Применительно к алмазному шлифованию параметры k и b определяются зависимостями [4]:

$$k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot D_3^2}; \quad (13)$$

$$b = (1 - \varepsilon) \cdot D_3, \quad (14)$$

где m – объемная концентрация зерен алмазного круга (для 100 %-й концентрации – $m = 100$ и т.д.);

$(1 - \varepsilon)$ – относительная величина, учитывающая степень выступания зерен алмазного круга над уровнем связки.

При плоском шлифовании $l = \tau \cdot V_{кр}$, где τ – время формирования шероховатости поверхности в фиксированном поперечном сечении обрабатываемой детали, с; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с.

С другой стороны, время $\tau = L / V_{дем}$, где $L = \sqrt{D_{кр} \cdot R_z}$ [3] – длина перемещения алмазного круга за время τ , м; $D_{кр}$ – диаметр круга, м; $V_{дем}$ – скорость перемещения детали, м/с. Тогда

$$l = \sqrt{D_{кр} \cdot R_z} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дем}}. \quad (15)$$

После подстановки всех полученных выражений в зависимость (15) имеем:

$$R_z = \frac{1}{4 \cdot D_3} \cdot \left(\frac{200 \cdot \pi \cdot D_3^3 \cdot V_{дем}}{3 \cdot m \cdot R_z \cdot \sqrt{D_{кр} \cdot R_z} \cdot V_{кр}} \right)^2. \quad (16)$$

Разрешая зависимость (16) относительно параметра шероховатости поверхности R_z , получено:

$$R_z = D_3 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot \pi \cdot V_{дем}}{3 \cdot m \cdot V_{кр}}} \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{кр}}}. \quad (17)$$

Как видно, уменьшить параметр шероховатости поверхности R_z при плоском шлифовании можно главным образом за счет уменьшения зернистости круга D_3 , поскольку этот параметр входит в зависимость (17) с наибольшей степенью. Уменьшению параметра R_z также способствует уменьшение $V_{дем}$ и увеличение параметров m , $V_{кр}$ и $D_{кр}$ (табл. 2).

Таблица 2 – Расчетные значения параметра шероховатости поверхности R_z (в мкм) при шлифовании ($m = 100$; $D_3 = 100$ мкм; $D_{кр} = 300$ мм)

$V_{кр}$, м/с	$V_{дем}$, м/мин				
	1	4	8	12	16
20	0,39	0,78	1,1	1,35	1,56
40	0,275	0,55	0,778	0,954	1,1
100	0,174	0,349	0,492	0,6	0,698
150	0,086	0,285	0,4	0,493	0,57

Сравнение расчетных данных, приведенных в табл. 1 и табл. 2, показывает, что с увеличением частоты вращения фрезы n при высокоскоростном фрезеровании параметр R_z существенно уменьшается. Достигнуть таких небольших значений параметра R_z при шлифовании, согласно зависимости (17), можно лишь за счет существенного уменьшения зернистости круга D_3 , что свидетельствует о значительных возможностях высокоскоростного фрезерования.

В отличие от зависимости (2), зависимость (17) содержит параметры со значительно меньшими степенями. Следовательно, при фрезеровании цилиндрической фрезой можно в более широких пределах изменять параметр шероховатости поверхности R_z по сравнению с процессом шлифования. Это связано, прежде всего, с возможностью реализации высокоскоростного фрезерования [7], характеризующегося повышенными значениями скорости вращения фрезы $V_{фр}$ и соответственно частоты вращения фрезы n в зависимости (2). В этом случае параметр R_z может принимать значения, которые имеют место при финишной обработке шлифованием. Учитывая, что высокоскоростное фрезерование является высокопроизводительным методом обработки, можно предварительную и окончательную обработку совместить в одну технологическую операцию, обеспечивая дополнительное повышение производительности.

Основной эффект уменьшения параметра R_z при шлифовании, исходя из зависимости (17), обусловлен уменьшением зернистости круга D_3 , а также увеличением скорости круга $V_{кр}$, поскольку уменьшение скорости перемещения детали $V_{дем}$ приводит к уменьшению производительности обработки.

Для определения производительности обработки при шлифовании с учетом ограничения по шероховатости обработанной поверхности зависимость (17) следует разрешить относительно скорости перемещения детали $V_{дем}$:

$$V_{дем} = \frac{3 \cdot m \cdot V_{кр}}{100 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{R_z}{D_3} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{D_{кр}}{D_3}}. \quad (18)$$

Тогда

$$Q = B \cdot V_{дем} \cdot t = \frac{3 \cdot m \cdot B \cdot t \cdot V_{кр}}{100 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{R_z}{D_3} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{D_{кр}}{D_3}}. \quad (19)$$

Аналогично зависимости (5), полученной применительно к процессу фрезерования цилиндрической фрезой, зависимость (19) также содержит параметры B и t , которые не входят в зависимость (17) для определения параметра шероховатости поверхности R_z . Поэтому добиться наиболее существенного повышения производительности обработки Q с учетом ограничения по шероховатости обработанной поверхности R_z можно также за счет увеличения этих двух параметров. Однако, как известно, увеличение глубины шлифования t приводит к увеличению максимальной толщины среза зерном круга, что требует уменьшения скорости перемещения детали $V_{дет}$, т.е. применения схемы глубинного шлифования. Следовательно, добиться одновременно увеличения производительности обработки Q и уменьшения параметра шероховатости поверхности R_z можно в условиях глубинного шлифования с небольшой скоростью перемещения детали $V_{дет}$. Сделанный вывод подтверждается экспериментальными данными, полученными как при абразивном, так и алмазном шлифовании [3]. Это позволяет рассматривать метод глубинного шлифования в качестве одного из наиболее перспективных методов предварительного и окончательного шлифования, а в ряде случаев, позволяющего эффективно совместить предварительное и окончательное шлифование в одну операцию и существенно повысить производительность при обеспечении высокого качества обработки.

Выводы. В работе приведены результаты теоретических исследований шероховатости поверхности при обработке фрезерованием и шлифованием. Показано, что высокоскоростное фрезерование располагает значительными технологическими возможностями с точки зрения уменьшения шероховатости поверхности, т.к. параметры режима резания входят в полученные расчетные зависимости для определения шероховатости поверхности с более высокими степенями, чем при шлифовании. В особенности это относится к скорости вращения фрезы. Поэтому с ее увеличением появляется возможность существенного уменьшения шероховатости поверхности при одновременном увеличении производительности обработки, что открывает широкие перспективы практического использования высокоскоростного фрезерования. Установлено, что при шлифовании уменьшение шероховатости поверхности связано с

уменьшением производительности, а это снижает эффективность обработки. Наиболее прогрессивным методом шлифования, обеспечивающим одновременно увеличение производительности и уменьшение шероховатости поверхности, является глубинное шлифование с небольшой скоростью детали. Однако оно характеризуется меньшей производительностью по сравнению с высокоскоростным фрезерованием.

Список литературы

1. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2002. – Т. 1. "Механика резания материалов". – 580 с.
4. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / под ред. проф. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.
5. Баталин А. С. Тенденции развития высокоскоростной обработки / А. С. Баталин, В. М. Мануйленко // Физические и компьютерные технологии: труды 15-й Международной научно-технической конференции, 2–3 декабря 2009, г. Харьков. – Х.: ХНПК "ФЭД", 2009. – С. 137–145.
6. Рябенков І. О. Підвищення ефективності фінішної обробки деталей гідроапаратури на основі вибору раціональної структури і параметрів операцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / І. О. Рябенков. – Одеса, 2009. – 21 с.
7. Технологии производства: проблемы и решения : монография / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх, С.А. Дитиненко, А.Г. Крюк, Н. Ф. Савченко, В.Г. Шкурупий, В.И. Полянский, И.А. Рябенков, Д.Ф. Новиков. – Д.: ЛИРА, 2018. – 536 с.

References (transliterated)

1. Bobrov V. F. Osnovy teorii rezaniya metallov / V. F. Bobrov. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. – 343 p.
2. Loladze T. N. Prochnost' i iznosostoykost' rezhushchego instrumenta / T. N. Loladze. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1982. – 320 p.
3. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya / pod obshch. red. F. V. Novikova i A. V. Yakimova. V desyati tomakh. – Odessa: ONPU, 2002. – Vol. 1. "Mekhanika rezaniya materialov". – 580 p.
4. Almazno-abrazivnaya obrabotka materialov: spravochnik / pod red. prof. A. N. Reznikova. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1977. – 390 p.
5. Batalin A. S. Tendentsii razvitiya vysokoskorostnoy obrabotki / A. S. Batalin, V. M. Manuylenko // Fizicheskiye i komp'yuternyye tekhnologii: trudy 15-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 2–3 dekabrya 2009, g. Khar'kov.– KH.: KHNPК "FED", 2009. – P. 137–145.
6. Ryabenkov I. O. Pidvyshchennya efektyvnosti finishnoy obrobky detaley gidroaparatury na osnovi vyboru ratsional'noyi struktury i parametriv operatsiy: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : spets. 05.02.08 "Tekhnolohiya mashynobuduvannya" / I. O. Ryabenkov. – Odesa, 2009. – 21 p.
7. Tekhnologii proizvodstva: problemy i resheniya: monografiya / F.V. Novikov, V.A. Zhovtobryukh, S.A. Ditenenko, A.G. Kryuk, N. F. Savchenko, V.G. Shkurupiy, V.I. Polyanskiy, I.A. Ryabenkov, D.F. Novikov. – D.: LIRA, 2018. – 536 p.

Поступила (received) 03.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Полянский Владимир Иванович (Полянський Володимир Іванович, Polyansky Vladimir Ivanovich) – кандидат технических наук, Генеральный директор, ООО «Империя металлов», г. Харьков; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com