

6. Samsonov, G.V. *Electron Localization in Solids* / G.V. Samsonov, I.F. Pryadko, L.F. Pryadko. – М.: Science. 1976. – pp. 339.

7. Nosenko, V.A. Interaction intensity criterion of worked and grinding materials at grinding / V.A. Nosenko // *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. – 2001. – No. 5. – pp. 85-91.

8. Nosenko, V.A. To problem of contact interaction intensity of d-transition metals with silicon carbide at grinding /

V.A. Nosenko, // *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. – 2002. – No. 5. – pp. 78-84.

9. Nosenko, V.A. Contact interaction impact upon abrasive tool wear at grinding / V.A. Nosenko // *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. – 2005. – No. 1. – pp. 73-77.

10. *Elements Properties: Reference Book* / under the editorship of M.E. Drits. – М.: Metallurgy. – 1985. – pp. 672.

Рецензент д. ф-м.н. В.Г. Кульков

УДК 62-1/-9

DOI: 10.12737/article\_59d496ebddec57.65109772

А.В. Морозов, к.т.н.,

В.Г. Гусев, д.т.н.

(Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87)

E-mail: prof\_gusev@mail.ru; ntk\_2005@rambler.ru

## Моделирование напряженного состояния режущей поверхности дискретного шлифовального круга

*Выполнено компьютерное моделирование в современном САЕ-комплексе Cosmos Works напряженного состояния режущей поверхности и центрального отверстия шлифовального инструмента с высокочастотной дискретизацией режущей поверхности. На основе результатов моделирования разработан прочный инструмент, позволяющий проводить дискретное шлифование на интенсивных режимах резания.*

**Ключевые слова:** шлифовальный круг; высокочастотная дискретизация; компьютерное моделирование; режущая поверхность; напряженное состояние; механическая прочность.

A.V. Morozov, Can. Eng.,

V.G. Gusev, D. Eng.

(Stoletovs State University of Vladimir 87, Gorky Str., Vladimir 600000)

## Stressed state simulation of discrete abrasive disk cutting surface

*Grinding disks with high frequency discretization of a cutting surface allow not only breaking a cutting process and decreasing its thermal intensity, but decreasing a vibration level of a technological system which has a positive effect upon quality of a surface worked. But, for realization of intensive grinding modes these tools should possess a mechanical strength not only in the central hole, but that of a discrete cutting surface. In this connection in modern CAE-complex CosmosWorks a computer simulation of a stressed state of a cutting surface and a central hole of the grinding disk subjected to a high-frequency discretization is carried out. On the basis of the simulation results there is developed a durable tool allowing the fulfillment of discrete grinding in intensive modes.*

**Keywords:** grinding disk; high-frequency discretization; computer simulation; cutting surface; stressed state; mechanical strength.

Применение новых способов шлифования [1, 2] и конструкций шлифовальных инструментов [3, 4] с высокочастотной дискретизацией режущей поверхности позволяет уменьшить уровень вибрации системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка», износ абразивного и алмазного правящего инструмента [5, 6], а также назначать более высокие режимы резания при отсутствии термического повреждения обработанного поверхностного слоя [7, 8].

Шлифовальный круг с высоко частотной

дискретизацией режущей поверхности представляет собой абразивную основу 1, в которой с помощью лазерного луча или абразивно-жидкостной струи высокого давления вырезано большое количество отверстий 2 малого радиуса  $r = 0,25 \dots 2,5$  мм (рис. 1, а, б). Окружной шаг  $T_0$  и радиус  $r$  малых отверстий определяются исходя из степени снижения температуры шлифуемой поверхности заготовки, а осевой шаг  $T_{oc}$  – неравенством  $3r < T_{oc} < 4r$ , что обеспечивает отсутствие сплошного резания в течение каждого оборота

инструмента.

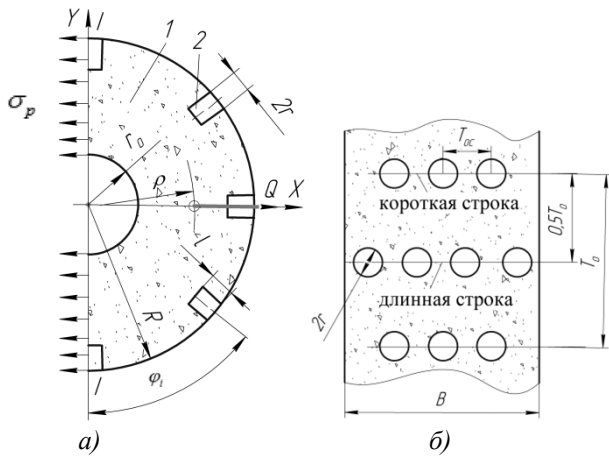


Рис. 1. Дискретный шлифовальный круг под действием центробежной силы  $Q$  с отверстиями, расположенными:

а – радиально; б – строками

Вырезание отверстий на небольшом расстоянии друг от друга приводит к возникновению тонких стенок, снижающих механическую прочность режущей поверхности, к перераспределению масс, изменению площадей несущих сечений в инструменте, значений инерционных центробежных сил, действующих на технологическую систему. В этих условиях изменяются также напряжения в абразивном материале круга, уровень которых характеризует его механическую прочность.

В этой связи актуальным является конечно-элементный анализ напряженного состояния шлифовальных кругов с высокочастотной дискретизацией режущей поверхности в современном САЕ-комплексе Cosmos Works, поскольку на основании результатов анализа возможно прогнозирование механической прочности и разработка новых высокопрочных шлифовальных кругов, выдерживающих рабочую нагрузку в процессе интенсивного шлифования изделий.

Малые отверстия, выполненные в шлифовальном круге, являются концентраторами напряжений, что усложняет проектные расчеты инструмента, поэтому при прочностном анализе высоко частотных дискретных кругов использовали как аналитический метод, так и метод конечных элементов.

По требованиям безопасной работы на шлифовальном оборудовании (ГОСТ 12.3.028-82) абразивные и эльборовые круги на керамической и органической связках с наружным диаметром более 150 мм необходимо подвергать испытаниям на механическую прочность путем вращения на частоте в 1,5 раза превы-

шающей рабочую частоту инструмента. При полуторакратной перегрузке шлифовального круга по частоте вращения на него действуют значительные инерционные центробежные силы, которые могут вызвать его разрыв.

Задачей компьютерного моделирования являлось создание шлифовального инструмента с высоко частотной дискретизацией режущей поверхности, обеспечивающего реализацию интенсивных режимов шлифования без его разрушения. Конечно-элементная модель включала в себя шлифовальный круг и ось симметрии, связанные между собой контактными элементами, средний размер конечного элемента в модели (средняя величина ребра) составляла 1 мм. Для рационального использования ресурсов программного обеспечения САЕ-комплекса Cosmos Works расчетная модель представляла собой четвертую часть шлифовального круга. Влияние отброшенных частей шлифовального инструмента компенсировалось граничными условиями.

Компьютерное моделирование проведено для широко распространенного в промышленности шлифовального круга из белого электрокорунда зернистостью  $F(40-46)$  и твердостью  $L$ , подвергнутого высоко частотной дискретизации. Физико-механические характеристики инструмента, необходимые для моделирования: наружный диаметр режущей поверхности  $D = 250$  мм; диаметр посадочного отверстия  $d = 76$  мм; высота  $B = 20; 32$  мм; плотность абразивного материала  $\gamma = 2500$  кг/м<sup>3</sup>; модуль упругости  $E = 3 \cdot 10^4$  МПа; предел прочности на растяжение 16 МПа; сжатие 35 МПа; изгиб 25 МПа; рабочая частота вращения 2880 мин<sup>-1</sup>; коэффициент теплопроводности  $\lambda = 4$  Вт/м<sup>2</sup>К; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,22$  [4]. Оценка прочности шлифовального круга с высоко частотной дискретизацией режущей поверхности основывалась на гипотезе максимального нормального напряжения Мизеса.

Результаты моделирования показали, что максимальные напряжения Мизеса 6,13 МПа (рис. 2) меньше допускаемых и находятся на поверхности центрального (посадочного) отверстия круга. Минимальные напряжения распределяются вдоль вырезанных радиальных отверстий, что свидетельствует о повышении механической прочности полезного слоя абразивного материала инструмента.

Согласно ГОСТ 52588-2006 коэффициент запаса прочности  $n$  шлифовального круга при работе в закрытой рабочей зоне с механиче-

ской подачей должен быть не менее 1,75. Запас прочности  $n$  определяли для двух опасных сечений дискретного шлифовального круга: центрального отверстия и плоскости перехода от сплошной части круга к дискретной. Моделирование показало, что запас прочности  $n_d$  центрального отверстия дискретного круга примерно на 20 % больше запаса прочности  $n_c$  сплошного ( $n_d = 2,6 > n_c = 2,1$ ), что обусловлено выполнением радиальных отверстий на глубину полезно используемого абразивного слоя, уменьшением массы дискретного инструмента по сравнению со сплошным и инерционной нагрузки на технологическую систему.

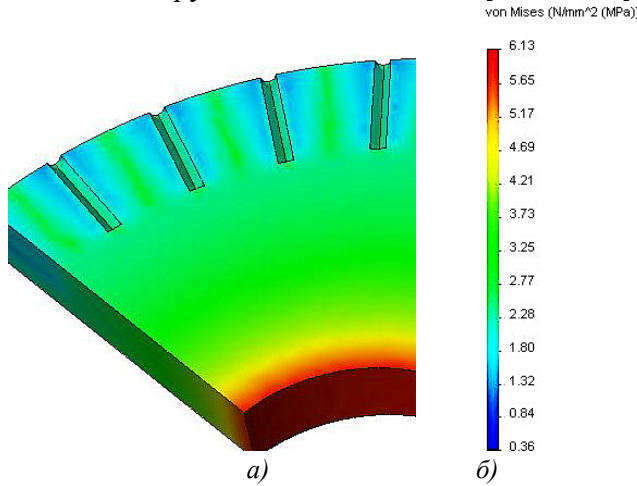


Рис. 2. Распределение напряжений в дискретном шлифовальном круге (а) и поле интенсивности напряжений Мизеса (б)

В диаметральной плоскости дискретного и сплошного кругов значения радиальных и окружных напряжений, вызванных центробежными силами, примерно одинаковы и меньше допускаемых напряжений. Для плоскости перехода от сплошной части круга к дискретной запас прочности  $n = 4,8$ . Приведенные данные свидетельствует о высокой механической прочности, как центрального отверстия, так и полезно используемого абразивного слоя инструмента с высоко частотной дискретизацией режущей поверхности.

На режущей поверхности, подвергнутой высоко частотной дискретизации, максимальные напряжения Мизеса находятся на периферийных площадках стенок между вырезанными соседними отверстиями (рис. 3, а), при этом в процессе дискретного шлифования, согласно полю напряжений, наибольшие их значения достигают 9,39 МПа (рис. 3, б), которые меньше допускаемых. При входе режущих абразивных зерен, расположенных на кромках вырезанных отверстий, возникают напряже-

ния сжатия, а при выходе из материала – напряжения растяжения, которые также меньше допускаемых.

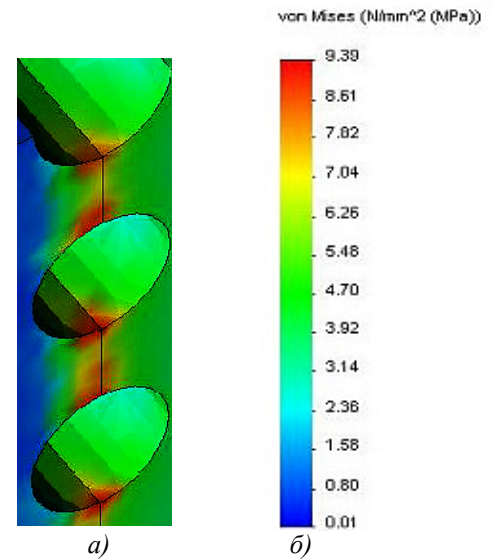


Рис. 3. Напряжение дискретного шлифовального круга в стенках между соседними отверстиями (а), поле напряжений режущей поверхности (б)

Кроме компьютерного моделирования, для оценки прочности дискретного инструмента разработана аналитическая модель прочности, которая основана на уравнениях теории упругости в осесимметричной постановке. Для разработки аналитической модели необходима информация о геометрических размерах дискретного инструмента, числе отверстий в короткой и длинной строках, а также на всей режущей поверхности.

Число отверстий, уместяющихся по окружности шлифовального круга,  $n_o = \pi D / T_o$ , в длинной строке  $n_d = B / T_{oc}$  и короткой строке  $n_k = n_d - 1$ . Суммарное число отверстий, размещенных на всей режущей поверхности круга,  $n_\Sigma = n_o (n_d + n_k)$ . Масса абразивного материала, удаленного из половины круга в результате вырезания отверстий вычисляется по формуле

$$m_0 = \frac{\pi r^2 l \gamma n_o (n_d + n_k)}{2}, \quad (1)$$

где  $r, l$  – радиус и длина вырезанного отверстия соответственно;  $\gamma$  – плотность абразивного материала.

Масса половины дискретного круга с радиальными отверстиями:

$$m = \frac{\pi(D^2 - d^2)B\gamma}{8} - m_0 \quad (2)$$

где  $D, d, B$  – диаметр режущей поверхности, центрального отверстия и высота шлифовального круга соответственно.

Радиус центра тяжести половины круга с радиальными отверстиями (рис. 1, а):

$$\rho = \frac{F_1 \rho_1 - F_2 \rho_2 - \sum_{i=1}^{n_{0/2}} F_3 \rho_3 \cos \varphi_i}{F_1 - F_2 - \sum_{i=1}^{n_{0/2}} F_3}, \quad (3)$$

где  $F_1, F_2$  – площадь полукруга диаметром  $D$  и  $d$  соответственно;  $F_3$  – площадь продольного сечения вырезанного отверстия;  $\rho_1 = \frac{2D}{3\pi}$ ,

$\rho_2 = \frac{2d}{3\pi}$ ,  $\rho_3 = \frac{D-l}{2}$  – радиус центра тяжести полукруга диаметром  $D$  и  $d$  соответственно, а также радиус окружности, на которой располагаются центры вырезанных отверстий;  $\varphi_i$  – угол между осью  $x$  и радиально расположенной осью рассматриваемого вырезанного отверстия.

Неуравновешенная центробежная сила, действующая на половину дискретного круга в процессе вращения на рабочей частоте равна

$$Q = m\omega^2 \rho, \quad (4)$$

где  $\omega \approx 0,105n_p$  – угловая скорость круга;  $n_p$  – рабочая частота вращения круга.

Напряжения растяжения в опасном сечении I – I дискретного круга (рис. 1, а):

$$\sigma_p = \frac{Q}{F_p} = \frac{m\omega^2 \rho}{(D-d)B - 2n_d r l}, \quad (5)$$

где  $F_p$  – площадь опасного сечения, работающего на разрыв;  $l$  – длина вырезанного отверстия.

Число оборотов дискретного инструмента, при котором происходит его разрушение, определяют исходя из предположения, что в момент разрыва во всех точках расчетного сечения окружные напряжения  $\sigma_o$  равны пределу прочности материала круга при растяжении  $[\sigma_p]$ . С учетом этого определена разрушающая угловая скорость дискретного шлифовального инструмента:

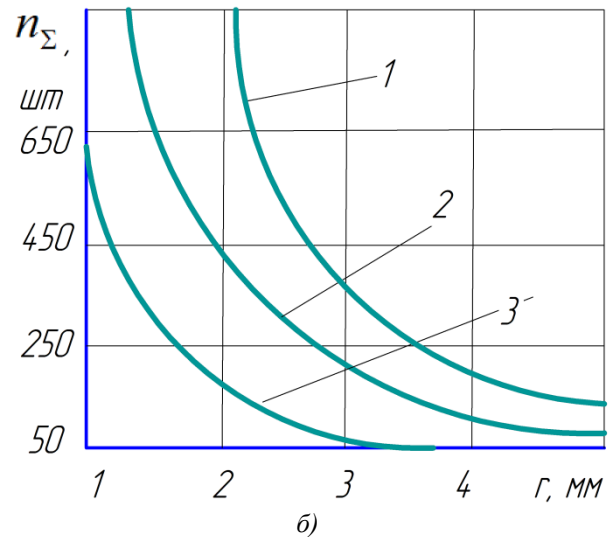
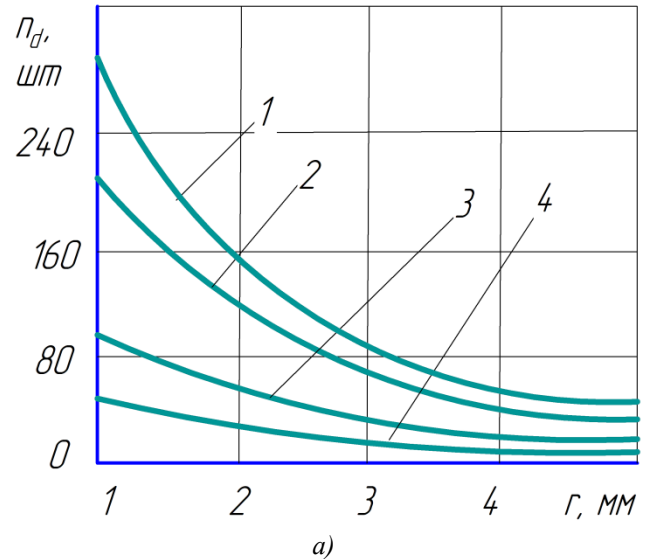
$$\omega_o = \sqrt{\frac{[\sigma_p]((D-d)B - 2n_d r l)}{m \rho}}. \quad (6)$$

Запас прочности дискретного круга по разрушающим оборотам определяли по формуле

$$k = \frac{\omega_o}{\omega}. \quad (7)$$

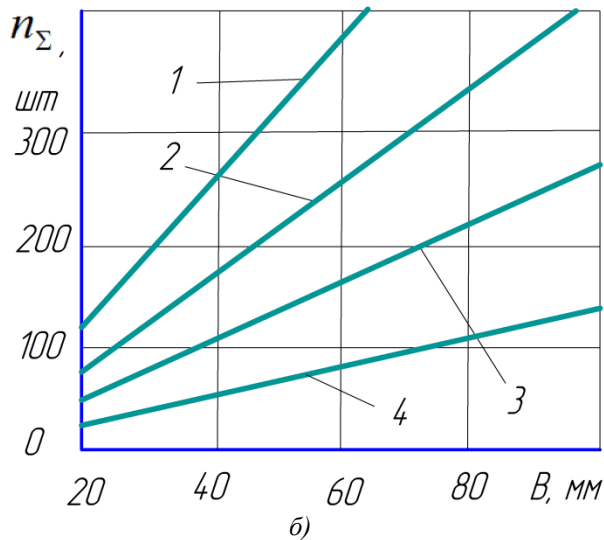
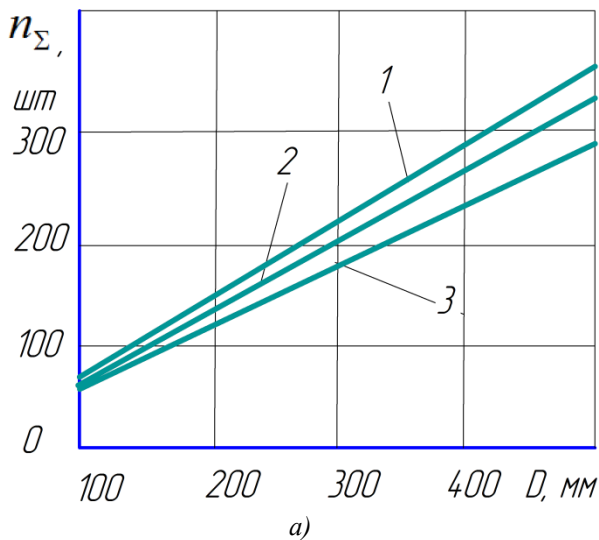
Для упрощения расчетов по формулам (1) – (7) построены графики зависимости количества вырезанных отверстий от радиуса  $r$ , наружного диаметра  $D$  и высоты  $B$  инструмента.

При увеличении радиуса  $r$  число отверстий в короткой  $n_k$ , длинной  $n_d$  строках и на всей режущей поверхности  $n_\Sigma$  уменьшается (рис. 4, а, б), так как с ростом  $r$ , увеличивается площадь поперечного сечения вырезанного отверстия, в то время как площадь режущей поверхности при неизменных габаритных размерах круга остается постоянной. С увеличением диаметра  $D$  и высоты  $B$  дискретного круга суммарное число отверстий  $n_\Sigma$  возрастает по линейной зависимости (рис. 5, а, б).



**Рис. 4. Влияние радиуса  $r$ :**

а) на число отверстий в длинной строке: 1 –  $n_d = 300r^{-1}$ ,  $D = 700$  мм; 2 –  $n_d = 214r^{-1}$ ,  $D = 500$  мм; 3 –  $n_d = 86r^{-1}$ ,  $D = 200$  мм; 4 –  $n_d = 42r^{-1}$ ,  $D = 100$  мм; б) на число отверстий режущей поверхности круга: 1 –  $n_\Sigma = \frac{3303-107r}{r^2}$ ,  $D = 500$  мм; 2 –  $n_\Sigma = \frac{1980-20r}{r^2}$ ,  $D = 300$  мм; 3 –  $n_\Sigma = \frac{660-21r}{r^2}$ ,  $D = 100$  мм



**Рис. 5. Изменение суммарного числа отверстий на режущей поверхности:**

а) в функции её диаметра  $D$ : 1 –  $n_{\Sigma} = 0,71D$ ,  $r = 1$  мм; 2 –  $n_{\Sigma} = 0,66D$ ,  $r = 3$  мм; 3 –  $n_{\Sigma} = 0,61D$ ,  $r = 5$  мм;  
 б) в функции её высоты  $B$ : 1 –  $n_{\Sigma} = 7,3B - 36$ ,  $D = 500$  мм; 2 –  $n_{\Sigma} = 4,5B - 21$ ,  $D = 300$  мм; 3 –  $n_{\Sigma} = 3,0B - 14$ ,  $D = 200$  мм; 4 –  $n_{\Sigma} = 1,5B - 7$ ,  $D = 100$  мм

Окружные и радиальные напряжения сплошного круга, нагруженного центробежной силой, определяются по формулам

$$\sigma_r = \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 (R^2 + r_o^2 + \frac{R^2 r_o^2}{R_i^2} - R_i^2), \quad (8)$$

$$\sigma_o = \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 (R^2 + r_o^2 + \frac{R^2 r_o^2}{R_i^2} - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu} R_i^2), \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность абразивного материала;  $\omega$  – угловая скорость шлифовального круга;  $R$ ,  $r_o$ ,  $R_i$  – радиус режущей поверхности, поса-

дочного отверстия и текущий радиус шлифовального круга соответственно.

Результаты расчета окружных и радиальных напряжений в сплошном круге по (8) и (9) показали хорошую сходимость данных, полученных при моделировании и аналитическом расчете. Так, максимальные значения радиальных напряжений, полученных при использовании сравниваемых методов, составили соответственно 1,45 и 1,47 МПа (расхождение 1,3 %), а максимальные значения окружных напряжений – 6,12 и 6,22 МПа (расхождение 1,6 %). Хорошее совпадение результатов подтверждают корректность конечно-элементной модели, а именно: задания кинематических граничных условий, условий приложения нагрузки, свойств абразивного материала шлифовального круга и геометрических параметров конечных элементов.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования и аналитического расчета показали, что для шлифовального круга с высокочастотной дискретизацией режущей поверхности, выполненной в соответствии с рекомендациями [3], напряжения в центральном отверстии круга и на его режущей поверхности меньше по сравнению со сплошным кругом, что объясняется уменьшением его массы из-за большого количества выполненных радиальных отверстий.

Уменьшение массы приводит к снижению рабочей нагрузки на шпиндель шлифовального станка и дискретный инструмент, что обеспечивает запас прочности центрального отверстия дискретного круга  $n = 2,6$  и плоскости перехода от сплошной части круга к дискретной  $n = 4,8$  при требуемом по стандарту запасу прочности  $n \geq 1,75$ .

Приведенные результаты исследований свидетельствуют о высокой механической прочности разработанных шлифовальных инструментов с высоко частотной дискретизацией режущей поверхности и возможности использования в процессах интенсивного дискретного шлифования без опасения их разрушения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. № 2520169 РФ. Способ дискретизации абразивного инструмента // Гусев В.Г., Морозов А.В., Метелкин О.Ю., заявл. 02.11.2012, опубл. 20.04.2014. Бюл. №9.
2. Пат. № 2589993 РФ. Способ дискретизации режущей поверхности шлифовального инструмента /Морозов А.В, Гусев В.Г., заявл. 05.12.2014, опубл. 14.06.2016 Бюл. № 19.

3. Гусев, В.Г., Морозов, А.В. Технология дискретизации рабочих поверхностей шлифовальных кругов лазером и гидроабразивной струей // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – №9(73). – С. 20–27.

4. Пат. № 2582841 РФ. Шлифовальный инструмент с дискретной режущей поверхностью // Морозов А.В., Гусев В.Г., Швагирев П.С., заявл. 05.12.2014, опубл.27.04.2016. Бюл. №12.

5. Gusev V.G., Morozov A.V., Shvagirev P.S. Evaluating discrete wheels and their influence on grinding dynamics (2009). Russian Engineering Research, 29(8), pp.835 – 837.

6. Морозов, А.В. Износ алмазного инструмента при правке дискретных шлифовальных кругов // Вестник машиностроения. – 2016. – № 3. – С. 59–64.

7. Gusev V.G., Morozov A.V. Distribution of Thermal Fields in Face Grinding by Slotted Abrasive Segments (2016). Russian Engineering Research, Vol. 36, No3, pp. 169–173. ISSN 1068-798X.

8. Гусев В.Г., Морозов А.В. Плоское периферийное шлифование дискретными кругами: монография.– Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2012. – 222 с. ISBN 978-5-905371-38-7.

## REFERENCES

1. Pat. No.2520169 the RF. *Method for Abrasive Tool Discretization* // Gusev V.G., Morozov A.V., Metelkin O.Yu.,

applied 02.11.2012, published 20.04.2014. Bull. No. 9.

2. Pat. No.2589993 the RF. *Method for Discretization of Grinding Tool Cutting Surface* // Morozov A.V., Gusev V.G., applied 05.12.2014, published 14.06.2016. Bull. No. 19.

3. Gusev, V.G., Morozov, A.V. Technology of abrasive disk working surface discretization with laser and hydro-abrasive jet // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No. 9(73). – pp. 20-27.

4. Pat. No.2582841 the RF. *Polishing Tool with Discrete Cutting Surface*// Morozov A.V., Gusev V.G., Shvagirev P.S., applied 05.12.14, published 27.04.2016. Bull. No.12.

5. Gusev V.G., Morozov A.V., Shvagirev P.S. Evaluating discrete wheels and their influence on grinding dynamics (2009). Russian Engineering Research, 29(8), pp.835 – 837.

6. Morozov, A.V. Diamond tool wear at discrete grinding disks dressing // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2016. – No.3. – pp. 59-64.

7. Gusev V.G., Morozov A.V. Distribution of Thermal Fields in Face Grinding by Slotted Abrasive Segments (2016). Russian Engineering Research, Vol. 36, No3, pp. 169–173. ISSN 1068-798X.

8. Gusev V.G., Morozov A.V. Flat Peripheral Grinding with Discrete Disks: monograph. – Yoshkar-Ola: Colloquium, 2012. – pp. 222 ISBN 978-5-905371-38-7.

Рецензент д.т.н. В.И. Денисенко

ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО  
И ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЖУРНАЛА

**«Научно-технические технологии в машиностроении»**  
объявляет подписку на 2018 год

Подписной индекс **79195**  
по объединенному каталогу  
**«Пресса России. Газеты и журналы»**

Журнал выходит с 2011 г.

Почтовый адрес издательства:

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7,

**Редакция издания приглашает авторов публикаций к совместной работе.**