

Key words: turning of hardened steels, surface roughness, round cutting insert, composite on the basis of cBN.

Литература

1. Різальний композит кубічного нітриду бору з низькомодульною добавкою жароміцного нітриду кремнію / І. А. Петруша, О. С. Осіпов, Т. І. Смирнова та ін. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – Вып. 11. – С. 206–212.
2. Динамические явления при чистовом точении закаленных сталей инструментом из композита на основе КНБ / Н. Е. Стахнив, Л. Н. Девин, И. А. Петруша, О. С. Осіпов // Сверхтвердые матер. – 2009. – № 3. – С. 75–83.
3. Стахнив Н. Е., Девин Л. Н. Исследование износа круглы режущих пластин из композита на основе КНБ и его влияния на силы резания при чистовом точении закаленных сталей // Сверхтвердые матер. – 2011. – № 2. С. 77–85.
4. Стахнив Н. Е., Девин Л. Н. Исследование влияния износа инструмента с композитом на основе КНБ на вибрации при чистовом точении закаленных сталей // Сверхтвердые матер. – 2012. – № 3. – С. 62–69.
5. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров и др. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.
6. Хусу А. П., Витенберг Ю. Р., Пальмов В. А. Шероховатость поверхности. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
7. Девин Л. Н. Прогнозирование работоспособности металлорежущего инструмента. – К.: Наук. думка, 1992. – 131 с.

Поступила 06.04.17

УДК 621.941:534.647

Л. Н. Девин; д-р техн. наук, С. В. Рычев¹; А. В. Смерчинский²

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

²Национальный технический университет «Киевский политехнический институт», Украина

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ НА ГРАНЯХ РЕЗЦА ИЗ МОНОКРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА АНАЛИТИЧЕСКИМ 2-D И 3-D МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Проведено сравнение результатов определения вероятности разрушения резцов из монокристаллов алмаза с учетом их анизотропии при использовании аналитического 2-D метода по формулам А.В. Бетанелли, а также 3-D методом конечных элементов. Для сравнения использовали значения силы резания, полученные экспериментально при торцевом точении алюминиевых сплавов с различной глубиной и скоростью резания.

Ключевые слова: метод конечных элементов, алмазный резец, вероятность разрушения, силы резания, алюминиевые сплавы.

Для расчета прочности режущего инструмента необходимо знать распределение напряжений в его режущей части. А. В. Бетанели [1] предложил метод определения напряжений в режущей части инструмента, принимая эпюру распределения контактных нормальных напряжений в форме параболы. Этот метод является развитием работы Ф. Р. Арчибальда, который при решении аналогичной задачи ограничивался треугольной эпюрой контактного напряжения на режущем клине с передним $\gamma = 0^\circ$. Хотя предложенным методом определяют напряжение в контактной зоне, им невозможно определить напряжение за пределами контактной зоны в опасных точках. Таким образом рассчитать прочность режущей части инструмента этим методом не нельзя. Формулы, полученные для плоской постановки задачи А. В. Бетанели, могут быть основой для определения величины вероятности разрушения, но они не учитывают сложного объемного распределения напряжения, которое возникает вдоль режущей кромки на некотором расстоянии от нее. Цель настоящей работы – проверить величины этих напряжений с помощью МКЭ в трехмерной постановке, которые затем будут использовать для расчета вероятности разрушения.



Рис. 1. Блок-схема автоматизированной системы

Для изучения процесса тонкого косоугольного точения монокристаллами алмаза в ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины использовали автоматизированную систему измерения сил резания [2]. Блок-схема аппаратной части системы показана на рис. 1.

Для точения использовали резцовую вставку с монокристаллом синтетического алмаза фирмы «De Beers» весом 0,1 карат (рис. 2), ориентация {111}. Монокристалл алмаза закрепляли в режущей вставке 1 методом пайки. Затачивали кристалл на станке ЗАР3637, доводку осуществляли на чугунном притире, шаржированном алмазным порошком марки АМ 40. Геометрия резца после доводки: $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $\lambda=0^\circ$, радиус при вершине $r = 0,19$ мм, радиус закругления режущей кромки – 0,3 мкм

Автоматизированная система измерения составляющих силы резания состояла из универсального динамометра УДМ–100 конструкции ВНИИИ (Россия) и разработанного нами тензоусилителя «Топаз», а также АЦП ADA 1406 фирмы «HOLIT Data Systems» и персонального компьютера. Управление АЦП, регистрацию и предварительную обработку экспериментальных данных для сигнала АЭ и силы резания выполняли с помощью программы «PowerGraph».

Исследовали процесс резания на высокоточном токарном станке ТПК-125ВМ с бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя главного движения от 100 до 2400 об./мин.

Результаты экспериментов и их анализ

После экспериментов получили результаты о составляющих сил резания (рис. 3) в зависимости от скорости резания при глубине 20 мкм.

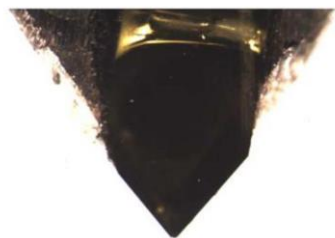


Рис. 2. Общий вид пластины из монокристалла алмаза, $\times 40$

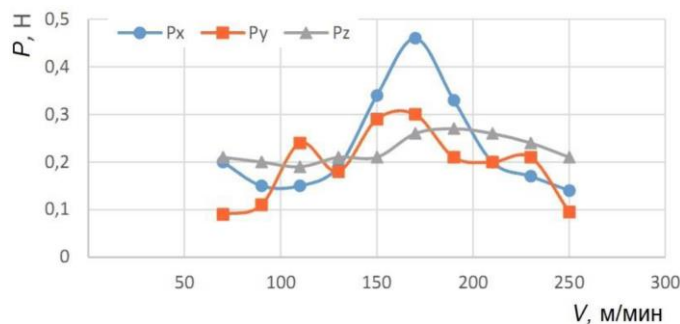


Рис. 3. Зависимости составляющих сил резания от скорости при $t = 20$ мкм

Общие сведения о методе конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет численно решать широкий спектр задач, которые математически формулируются в виде системы дифференциальных уравнений. Этот метод можно использовать для анализа напряженно-деформированного состояния конструкций, термического анализа, решения гидрогазодинамических задач и задач электродинамики [4].

Сплошная среда является некоторой виртуальной субстанцией, которая непрерывным, сплошным образом заполняет часть пространства. В этой связи описание его движения связано с заданием величин, характеризующих движение в каждой точке определенной области пространства. Другими словами, при описании движения сплошных сред приходится иметь дело с полями скалярных и векторных величин, характеризующих это движение [5].

Для расчета полей с помощью МКЭ в рассматриваемой области необходимо определить материалы элементов и задать их свойства. В задачах деформирования прежде всего нужно указать упругие свойства модуль упругости и коэффициент Пуассона. Если предполагается пластическое деформирование, необходимо задать настоящие диаграммы деформирования, которые аппроксимируются билинейными или мультилинейными кривыми. Состояние тела характеризуется конечным количеством независимых параметров, определенных в узлах конечно-элементной сетки. Такие параметры называют степенями свободы. В рассмотренных далее деформационных задачах в качестве степеней свободы применяли перемещения узлов, среди компонентов которых были и угловые перемещения [4].

Определение величины напряжений на передней и задней поверхностях с помощью системы конечно-элементного анализа ANSYS и их сравнение с теоретическими значениями аналитического метода (плоская задача 2-D)

Прочность режущей части инструмента определяли по допустимым напряжениям первого рода [1] аналогично расчету прочности деталей машин и элементов сооружений. Согласно этому методу при действующей нагрузке определяли главное напряжение $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

А. В. Бетанели [1] предложил метод расчета хрупкой прочности режущей части инструмента по равнодействующей сосредоточенной силе резания R , приложенной к вершине режущего клина. При этом распределение напряжений принимается как простое радиальное и выражается формулой:

При глубине резания 20 мкм наблюдали:

1. Резкое повышение сил при $V = 170$ м/мин, особенно силы P_x ;
2. Постепенное снижение сил при $V=170-250$ м/мин.

Показанные на рис. 3 зависимости изменения значения величины силы обусловлены возникновением на малых скоростях заторможенного слоя, что приводит к повышению сил [3].

$$S_R = -\frac{2R}{br} \left\{ \frac{\cos \left[v_0 - \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right] \cos \left[\theta - \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right]}{\beta + \sin \beta} + \frac{\sin \left[v_0 - \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right] \sin \left[\theta - \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right]}{\beta - \sin \beta} \right\}, \quad (1)$$

где R – равнодействующая сила; b – ширина срезаемого слоя; r, θ – полярные координаты; v – угол, определяющий направление силы резания; β – угол заострения; γ – передний угол.

С помощью программы ANSYS в интерактивном режиме можно определять главное напряжение (Maximum Principal Stress). Поле распределения σ_1 при $t = 20$ мкм, и $V = 70$ м/мин показано на рис. 4.

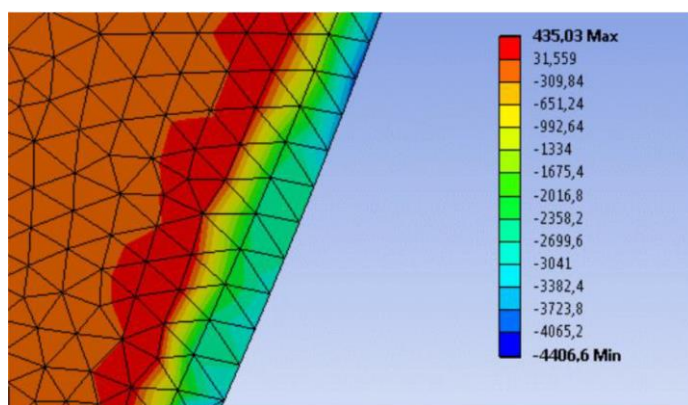


Рис. 4. Схема поля распределения главного напряжения σ_1 на передней поверхности

Как следует из рис. 4, в зоне приложения силы возникают сжимающие напряжения, а на некотором расстоянии от режущей кромки – область растягивающих напряжений. Эта область находится на расстоянии $r = (1,3–1,5)c$, где c – ширина зоны контакта стружки с передней поверхностью, принятая равной толщине материала, который срезается.

Расстояние от режущей кромки в зоне максимальных напряжений принимали равным $2c$. Обычно полная длина контакта $c = (1,8–2,5)c_1$, где c_1 – длина пластического контакта,

которую для $\gamma = 0^\circ$ вычисляли по формуле

$$c_1 = \frac{a \sin \left(\frac{\pi}{4} \right)}{\sin \Phi \sin \left(\frac{\pi}{4} + \Phi \right)}, \quad (2)$$

где $a = S \sin(\varphi)$ – толщина среза; S – подача; Φ – угол плоскости сдвига.

После расчета математической модели в среде ANSYS были получены значения главных напряжений для объемной задачи (3-D) для различных режимов резания и они были сравнены с величиной главных напряжений, полученные с помощью формулы А.В. Бетанели для плоской задачи. Эти сравнительные графики показаны на рис. 5.

При глубине резания $t = 20$ мкм и скорости $V = 150–170$ м/мин наблюдали максимальную величину сжимающих напряжений на передней поверхности при объемной задаче, что обусловлено колебанием сил резания и образованием заторможенного слоя на передней поверхности [3]. Максимальные напряжения на задней поверхности переходят из сжимающих в растягивающие при $V = 120$ м/мин и затем переходят снова в сжимающие при $V = 180$ м/мин. Разница между величинами максимального напряжения объемной и плоской задачи на передней поверхности составляла 18% – 25% на задней 25% до 36%, причем для объемной задачи напряжения всегда превышают напряжения плоской задаче.

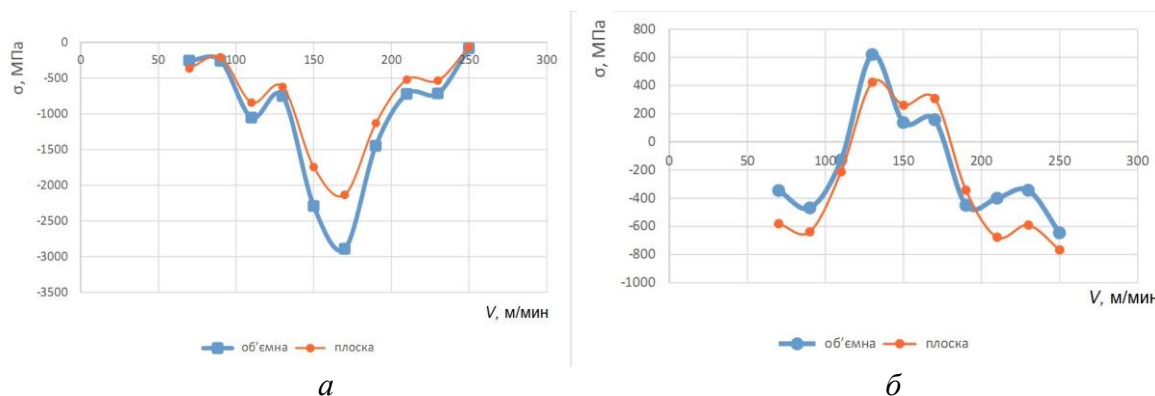


Рис. 5. – Зависимости максимальной величины напряжений на передней (а) и задней (б) поверхности реза в зависимости от скорости резания при $t = 20$ мкм для плоской и объемной задач

Исследование вероятности разрушения резцов из монокристалла алмаза при плоской 2-D и объемной 3-D задачах определения напряжения

Обозначим напряжения, возникающие в опасных точках вершины резца при точении, S_R , прочность монокристалла алмаза при растяжении и сжатии – соответственно S_p и S_c . В процессе обработки за счет неоднородности свойств материала детали и динамики стружкообразования сила резания колеблется. С учетом этого напряжения в опасных точках резца характеризовали средним значением \bar{S}_R и среднеквадратическим отклонением σ_{S_R} , предполагая, что их распределение не противоречит нормальному закону [6].

Прочность монокристалла алмаза также характеризовали средними значениями предела прочности при растяжении и сжатии и их стандартным отклонением $\sigma_{S_p}, \sigma_{S_c}$. Известно,

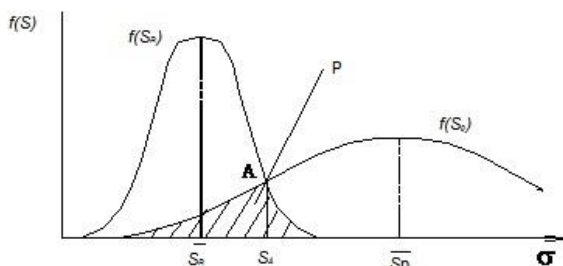


Рис. 6. Дифференциальные функции распределения S_R и S_P

что распределение прочности хрупких материалов лучше всего описывается законом Вейбулла. Однако при оценке параметров распределения по малой выборке (до 30 образцов) трудно отдать предпочтение закону Вейбулла по сравнению с нормальным или логарифмически нормальным распределением [7].

Для упрощения расчетов предположим, что распределение прочности подчиняется нормальному закону (рис. 6) [8].

Как известно [8], вероятность разрушения резца в таком случае будет равняться площади фигуры, образованной пересечением кривых этих функций. Тогда для растягивающих напряжений вероятность будет:

$$P = \int_0^{S_A} f(S_p) dS + \int_{S_A}^{\infty} f(S_R) dS, \quad (3)$$

где S_A – напряжение, соответствующее точке A дифференциальных функций $f(S_p)$ и $f(S_R)$.

Величину S_A находили, решая систему уравнений [8]

$$\begin{cases} f(S_P) = \frac{1}{\sigma_{S_P} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-(S_A - \bar{S}_P)^2 / 2\sigma_{S_P}^2\right]; \\ f(S_R) = \frac{1}{\sigma_{S_R} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-(S_A - \bar{S}_R)^2 / 2\sigma_{S_R}^2\right], \end{cases} \quad (4)$$

откуда

$$(\sigma_{S_R}^2 - \sigma_{S_P}^2)^2 S_A^2 + 2(\sigma_{S_P} S_R - \sigma_{S_R} S_P) S_A + \sigma_{S_R}^2 S_P^2 - \sigma_{S_P}^2 S_R^2 - 2\sigma_{S_P}^2 \sigma_{S_R}^2 \ln(\sigma_{S_R} / \sigma_{S_P}) = 0 \quad (5)$$

Координата точки А – S_A является корнем уравнения (5)

Согласно литературным данным предел прочности при растяжении и сжатии монокристаллов алмаза широкий. Так, $S_c = 200 - 8900$ МПа [9], предел прочности при изгибе $S_{и} = 200 - 500$ МПа. Учитывая, что обычно для хрупких материалов S_p составляет $(1/30 - 1/60)S_c$ и около $1/2S_{и}$, в дальнейших расчетах для передней поверхности приняли $S_p = 200$ МПа; $S_c = 1960$ МПа, а для задней $S_p = 180$ МПа; $S_c = 1660$ МПа.

В течение периода устойчивости резец может разрушиться как со стороны передней грани, так и задней. Для расчета вероятности разрушения напряжение на гранях резцов сравнивали с границами прочности при растяжении и сжатии. В этом случае формула (3) принимает вид

$$P = \begin{cases} \int_0^{S_a} f(S_P) dS + \int_{S_a}^{\infty} f(S_R) dS \\ \int_{-\infty}^{S_a} f(S_R) dS + \int_{S_a}^0 f(S_C) dS \end{cases}$$

Учитывая, что вероятности разрушения со стороны передней и задней граней независимые случайные, вероятность разрушения резца в целом вычисляли по формуле

$$P = P_{п} + P_{з} - P_{п} P_{з}$$

Кривые вероятности разрушения, вычисленные по формулам для плоской и объемной задачи, показаны соответственно на рис. 7.

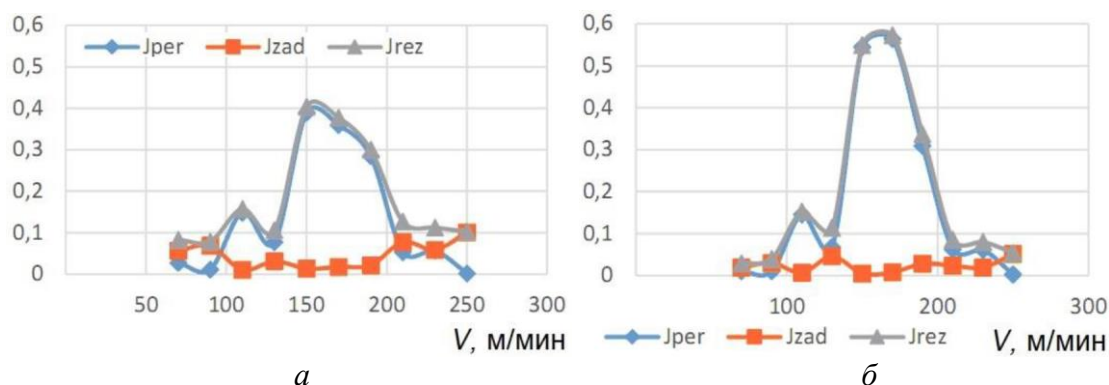


Рис. 7. Кривые изменения вероятности разрушения резца при изменении скорости резания для задачи определения максимальных напряжений при глубине резания $t = 20$ мкм: а – плоской; б – объемной

Как видим при глубине резания $t = 20$ мкм наибольшая вероятность разрушения для решения плоской задачи определения напряжения, а именно 50% наблюдается при $V = 150$ м/мин. Это обусловлено повышением контактного напряжения со стороны передней поверхности и возможного образования заторможенного слоя на этой поверхности. При построении кривой вероятности разрушения с использованием напряжения, полученного при решении объемной задачи в среде ANSYS, получила наибольшую вероятность 60%, т. е. на 10% больше, чем при плоской задаче.

Максимальная вероятность, а именно 13%, наблюдалась при $V = 110$ м/мин. При $V = 110 - 170$ м/мин вероятность снижалась с 13 до 2% и оставалась неизменной при $V = 170 - 250$ м / мин.

При решении объемной задачи в среде ANSYS установили область на режущей кромке режущей пластины, где возникают наибольшие напряжения. Она находится на расстоянии $r = (1,3 - 1,5)c$, где c – ширина зоны контакта стружки с передней поверхностью инструмента.

Разница между значениями напряжений при решении объемной задачи и по формулам А.В.Бетанели составляет 4% – 30%, что существенно влияет на вероятность, которая зависит от величины контактных напряжений возникающих на передней и задней поверхностях.

Разница между значениями вероятности разрушения составляет около 10%. Поэтому в формуле, которую предложил А.В. Бетанели для определения напряжения по равнодействующей силе R , следует использовать уточненное расстояние $r = (1,3 - 1,5)c$ в зоне максимальных напряжений.

Выводы

Установлено, что максимальные напряжения, определенные с помощью МКЭ находятся на расстоянии $r = (1,3 - 1,5)c$ от края режущей кромки (по формуле А.В. Бетанели $r = 2c$). Максимальная вероятность разрушения (13%), зафиксирована при $V = 110$ м/мин. Это обусловлено возникновением растягивающих напряжений на передней поверхности резца. После корректировки формулы А.В. Бетанели разница между расчетами вероятностей, выполненных с учетом напряжений по скорректированной формуле и МКЭ составила от 1% – 16%.

Наведено порівняння результатів визначення ймовірності руйнування різців з монокристалів алмазу з урахуванням їх анізотропії при вирішенні аналітичним 2-D методом за формулами А.В. Бетанеллі, а також 3-D методом скінченних елементів. Для порівняння використовували значення сили різання, що були отримані експериментально при торцевому точінні алюмінієвих сплавів з різною глибиною і швидкістю різання.

Ключові слова: Метод скінченних елементів (МСЕ), алмазний різець, ймовірність руйнування, сила різання, алюмінієві сплави.

COMPARISON OF RESULTS OF THE DETERMINATION OF THE STRESSES ON THE CUTTING EDGES FROM DIAMOND MONOCRYSTALS BY ANALYTIC 2-D AND 3-D BY THE FINITE ELEMENT METHOD

The aim of the study was to compare the results of determining the probability of fracture of incisors from diamond single crystals, taking into account their anisotropy when solving by an analytical 2-D method using the formulas of A.V. Betanelli, and also when solving with the finite element method 3-D. For comparison, the cutting forces were used, which were obtained experimentally at the end turning of aluminum alloys with different depth and cutting speed.

Key words: finite element method, diamond cutter, fracture probability, cutting force, aluminum alloys.

Литература

1. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
2. Девин Л. Н., Стахнив Н. Е, Сулима А. Г. Автоматизированная система для измерения сигнала акустической эмиссии в процессе прецизионного алмазного точения / Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: матер. 11-го Междунар. Науч.-техн. семинара, 21–25 февраля 2011 г., г. Свалява. – К.: Изд-го АТМ Украины 2011. – С. 79–81.
3. Круглов Г. А. Обработка алмазными резцами деталей приборов. – М. Машиностроение. 1968.
4. Бруйка В. Инженерный анализ в Ansys Workbench: учеб. пособие. Самара – 2010. Ч. 1.
5. Криворучко Д. В., Залога В. О., Корбач В. Г. основи 3d-модельювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів: навч. Посіб. – Суми: Вид. СумДУ, 2009.
6. Хаэт Г. Л. Прочность режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1975. – 168 с.
7. Писаренко Г. С., Руденко В. Н., Третьяченко Г. Н. Прочность материалов при высоких температурах – К. : Наук. думка, 1966. – 791 с.
8. Девин Л. Н., Вильгельм М. Прогнозирование вероятности разрушения резцов на основе КНБ // Сверхтвердые матер. – 1992. – № 6. – С. 41–46.
9. Породоразрушающий инструмент для геологоразведочных скважин: справочник / Н. И. Корнилов, В. С. Травкин, Л. К. Берестень и др. – М.: Недра, 1979. – 361 с.

Поступила 06.06.17

УДК621.921-666.1

А. М. Кошкин, Д. В. Соколюк, В. В. Белорусец, В. Г. Полторацкий, канд. техн. наук,
Т. Л. Кротенко¹, А. И. Кодрик, канд. техн. наук; **А. П. Денисенко², Е. В. Калина³**

¹*Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев*

²*Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты г. Киев*

³*Казенное производственное приборостроительное предприятие «Арсенал», г. Киев,
Украина*

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ АЛМАЗНЫМИ И АБРАЗИВНЫМИ ХОНИНГОВАЛЬНЫМИ БРУСКАМИ

На основе анализа зернистости SiC (карбида кремния зеленого), используемого в качестве абразивного наполнителя при изготовлении хонбрусков для плосковершинного хонингования, применение измельченных частиц SiC для изготовления аналогичных брусков позволило обеспечить увеличение маслоёмкости, площади опорной поверхности и получить оптимальный ее микропрофиль.

Ключевые слова: *карбид кремния зеленый, измельчённые частицы, абразивный наполнитель, плосковершинное хонингование, оптимальная структура поверхностного слоя, маслоёмкость, площадь опорной поверхности, оптимальный микропрофиль поверхности.*