

УДК 621.941: 534.647

Девин<sup>1</sup> Л.Н., д.т.н., проф., Рычев<sup>1</sup> С.В., Смерчинский<sup>2</sup> А.В.

1 - Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины », г.Киев, Украина;

2 - НТУУ «Киевский политехнический институт», г.Киев, Украина

## ВЕРОЯТНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ РЕЗЦОВ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА ПРИ ТОНКОМ ТОЧЕНИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Devin<sup>1</sup> L., Rychev<sup>1</sup> S., Smerchynskiy<sup>2</sup> A.

1 - V. Bakul Institute for Superhard Materials, Kyiv, Ukraine (ldevin@ism.kiev.ua);

2 - National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (san4os-s@yandex.ru)

### PROBABILITY OF SINGLE CRYSTALS DIAMOND CUTTERS FRACTURE FOR FINE TURNING ALUMINUM ALLOY

*В работе исследована надежность работы резцов из монокристаллов природного алмаза при косоугольном тонком точении алюминиевых сплавов. Приведены результаты исследования влияния силы резания на вероятность разрушения монокристаллов алмаза при различных скоростях резания и углах наклона режущей кромки. Для расчета вероятности разрушения резца была использована математическая модель, в которой для определения значений максимальных напряжений возникающих на передней и задней гранях использовалась расчетная схема, основанная на замене контактных нагрузок сосредоточенной силой, приложенной к вершине режущего клина.*

*Ключевые слова:* монокристаллы алмаза; вероятность разрушения; косоугольное точение; алюминиевые сплавы.

**Введение.** Алмазные монокристаллы наиболее эффективно применяют в резцах при чистовых операциях при обработке деталей, изготовленных из цветных сплавов [1]. При обработке таких материалов твердосплавные резцы не обеспечивают требуемой точности и шероховатости поверхности. Традиционные операции, на которых используют алмазные резцы – чистовые, т.е. алмазное тонкое или микро- точение. При чистовой обработке силы резания не велики, однако напряжения, возникающие в остро заточенном режущем клине, могут достигать значительных величин. Учитывая высокую хрупкость алмаза и его сравнительно невысокую прочность при растяжении [2], даже небольшие вибрации могут привести к сколу вершины резца. В связи с этим целесообразно оценить вероятность разрушения (сколов) вершины такого резца.

**Целью работы** является количественно оценить надежность (вероятность разрушения) резцов из алмазных монокристаллов при изменении скорости резания и угла наклона режущей кромки резца при косоугольном точении алюминиевых сплавов.

**Изложение основного материала.** Процесс тонкого алмазного точения обычно выполняют на высокоточных токарных станках при подаче  $S = 10 - 60$  мкм/об и глубине резания  $t = 50 - 300$  мкм. Обозначим напряжения, возникающие в опасных точках вершины резца при точении  $S_R$ , а прочность монокристалла алмаза при растяжении и сжатии - соответственно  $S_p$  и  $S_c$ . В ходе обработки за счет неоднородности свойств материала детали и не стационарности процесса стружкообразования величина силы резания колеблется. С учетом этого напряжения в опасных точках резца характеризовали средним значением  $\overline{S_R}$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{S_R}$ , предполагая, что их распределение не противоречит нормальному закону [3].

Прочность монокристалла алмаза также характеризовали средними значениями предела прочности при растяжении и сжатии и их среднеквадратическими отклонениями  $\sigma_{S_p}$  и  $\sigma_{S_c}$ . Известно, что распределение прочности хрупких материалов наиболее хорошо описывается законом Вейбулла. Однако при оценке параметров распределения по малой выборке (до 20-30 образцов) трудно отдать предпочтение закону Вейбулла по сравнению с нормальным или логарифмически нормальным распределением [4].

Как и в работе [5] для упрощения расчетов допустим, что распределение прочности  $S_p$  и  $S_c$  подчиняется нормальному закону (см. рис. 1.)

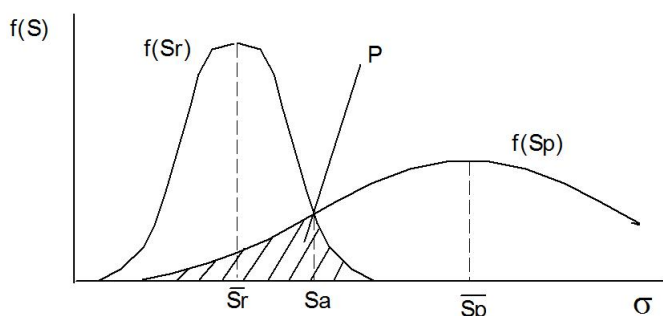


Рис. 1. Дифференциальные функции распределения  $S_R$  и  $S_P$

Из [5] известно, что вероятность разрушения резца  $P$  в данном случае будет равна площади фигуры, образованной пересечением кривых этих функций.

Тогда для растягивающих напряжений

$$P = \int_0^{S_A} f(S_P) dS + \int_{S_A}^{\infty} f(S_R) dS \quad (1)$$

где  $S_A$  - напряжение, соответствующее точке А пересечения дифференциальных функций  $f(S_r)$  и  $f(S_p)$ .

Величину  $S_A$  находили, решая систему

уравнений [5]:

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

Откуда

$$(\sigma_{S_R}^2 - \sigma_{S_P}^2)^2 S_A^2 + 2(\sigma_{S_R} \sigma_{S_P} - \sigma_{S_R}^2 \sigma_{S_P}) S_A + \sigma_{S_R}^2 S_P^2 - \sigma_{S_P}^2 S_R^2 - 2\sigma_{S_P}^2 \sigma_{S_R}^2 \ln(\sigma_{S_R} / \sigma_{S_P}) = 0 \quad (3)$$

Координата точки А  $S_A$  - является корнем уравнения (3).

Для вычисления напряжений на передней и задней гранях резца использовали формулу (4) [6,7].

$$S_R = -\frac{2R}{br} \left\{ \frac{\cos\left[v_0 - \left(\frac{\beta}{2} + \gamma\right)\right] \cos\left[\theta - \left(\frac{\beta}{2} + \gamma\right)\right]}{\beta + \sin\beta} + \frac{\sin\left[v_0 - \left(\frac{\beta}{2} + \gamma\right)\right] \sin\left[\theta - \left(\frac{\beta}{2} + \gamma\right)\right]}{\beta - \sin\beta} \right\} \quad (4)$$

где  $r, \theta$  - полярные координаты.

Расстояние  $r$  от режущей кромки до зоны максимальных напряжений принимали равным  $2c$  [6-8]. Обычно полная длина контакта  $c = (1.8-2.5) c_1$ . Здесь  $c_1$  - длина пластического контакта, которую для  $\gamma = 0$  вычисляли по формуле [8]:

$$c_1 = \frac{a \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)}{\sin\Phi \sin\left(\frac{\pi}{4} + \Phi\right)} \quad (5)$$

где  $a = S \sin(\phi)$  - толщина среза;  $S$  - подача;  $\Phi$  - угол плоскости сдвига,  $\Phi = \arctg\left(\frac{1}{\xi}\right)$ ;  $\xi$  - усадка стружки.

Пределы прочности при растяжении и сжатии монокристаллов алмаза по литературным данным находятся в широких пределах. Так, в [2, 9]  $S_c$  от 200 до 8900 МПа, предел прочности при изгибе  $S_u = 200-500$  МПа. Учитывая, что для хрупких материалов обычно  $S_p$  составляет (1/30-1/60)  $S_c$  и около 1/2  $S_u$ , в дальнейших расчетах приняли  $S_p = 200$  МПа,  $S_c = 1960$  МПа.

Для изучения процесса тонкого косоугольного точения монокристаллами алмаза в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины была использована автоматизированная система [10,11]. На рис. 2 представлена блок-схема аппаратной части системы.

Для проведения экспериментов по косоугольному точению была разработана специальная конструкция резцедержателя, позволяющая поворачивать режущую кромку резца на угол  $\lambda$  (рис.3). Резцовую вставку с монокристаллом алмаза 1 крепили в державке резца 2, которая с помощью прижима 3 фиксировалась на борштанге 4. Датчик акустической эмиссии 5 размещали в нижней части державки резца 2. Поворот державки резца 2 на угол  $\lambda$  осуществляли при помощи прижима и винтов 6.

Для точения использовали резцовую вставку с монокристаллом синтетического алмаза фирмы De Beers весом 0.1 карат, ориентация {111}. Монокристалл алмаза закрепляли в режущей вставке 1 методом пайки.

Заточку кристалла осуществляли на станке ЗАР3637, доводку - на чугунном притире шаржированного алмазным порошком марки АМ 40. Геометрия реза после доводки: радиус при вершине – 1 мм, углы  $\gamma=0^\circ$ ,  $\alpha=1.5^\circ$ .

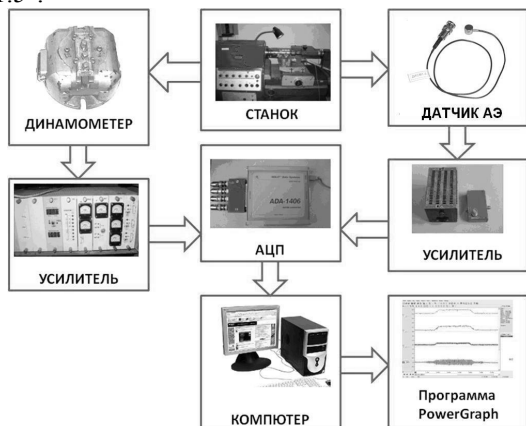


Рис. 2. Блок-схема автоматизированной измерительной системы

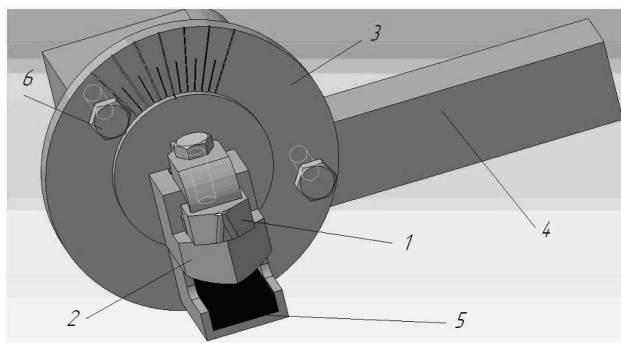


Рис. 3. Державка реза для косоугольного резания

Автоматизированная система исследования процесса резания включала универсальный динамометр УДМ – 100 конструкции ВНИИИ (Россия) и разработанного нами тензоусилителя «Топаз», а также АЦП ADA 1406 фирмы HOLT Data Systems и персонального компьютера. Управление АЦП, регистрацию и предварительную обработку экспериментальных данных для сигнала АЭ и силы резания выполняли программой «PowerGraph» [10].

Исследования при резании проводили на высокоточном токарном станке ТПК-125ВМ с бесступенчатым регулированием скорости вращения шпинделя главного движения от 100 до 2400 об/мин. Эксперименты проводили при торцевом точении, обрабатываемый материал – алюминиевый сплав АМг6.

Учитывая малые величины составляющих силы резания, нами особое внимание было уделено устранению дрейфа нуля. Это был комплекс действий по предварительной обработке исходных данных, который включал в себя смещение начала процесса резания в нулевую точку и устранение дрейфа нуля в программе PowerGraph. Для выполнения этих операций исходный файл разбивался на три блока. Первый блок – 5 с до начала резания, второй – резание, третий – 5 с после выхода реза из заготовки. С помощью функции усреднения (mean) вычисляли средние значения на всех блоках по трем каналам ( $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$ ), затем полученные значения на первом блоке вычитали с помощью функции калибровка (calibrate). Затем устраняли дрейф нуля при помощи функции «no trend». Если после применения данной операции нулевая точка вновь смещалась, выполняли вторую итерацию по вышеописанному алгоритму (команды mean и calibrate). На рис. 4 представлен образец полученной исходной осциллограммы составляющих  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  после предварительной обработки, в том числе после устранения дрейфа нуля и градуировки.

Зависимости величин составляющих силы резания от угла наклона режущей кромки при  $V = 50$  м/мин приведены на рис. 5а, а от скорости резания при  $\lambda = 5^\circ$  – на рис 5б.

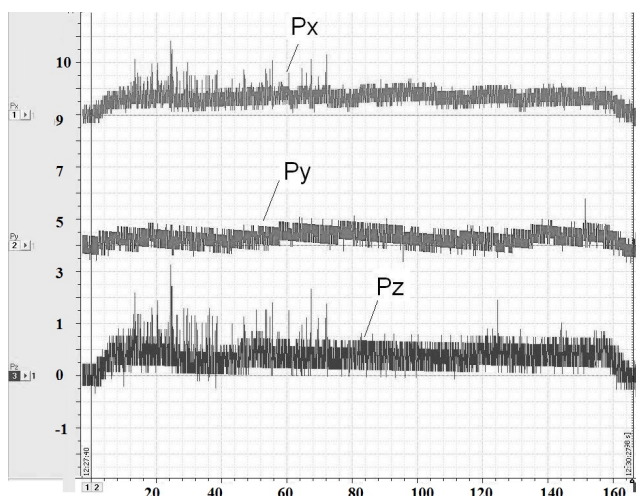


Рис. 4. Пример предварительной обработки экспериментальных данных в «PowerGraph»

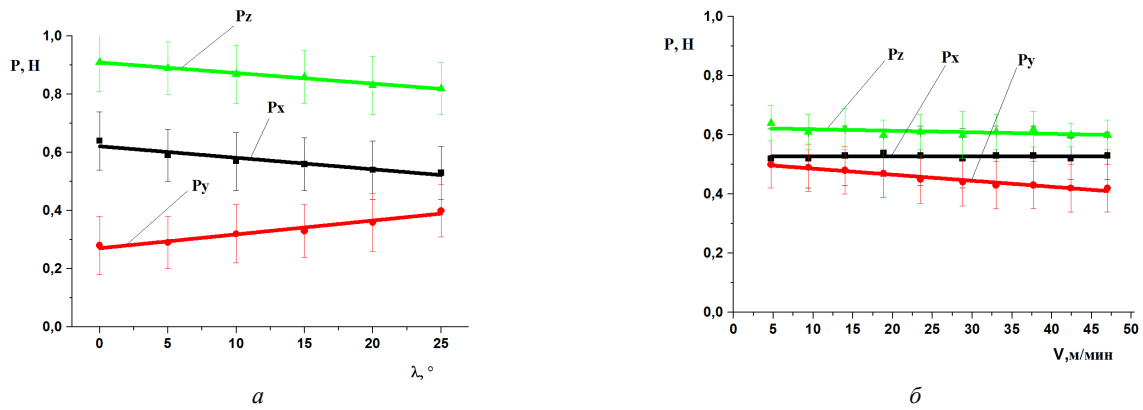


Рис. 5. Влияние угла  $\lambda$  (а) и скорости резания  $V$  (б) на составляющие сил резания

По измеренным величинам сил резания были вычислены напряжения на гранях резца, которые показаны на рис. 6.

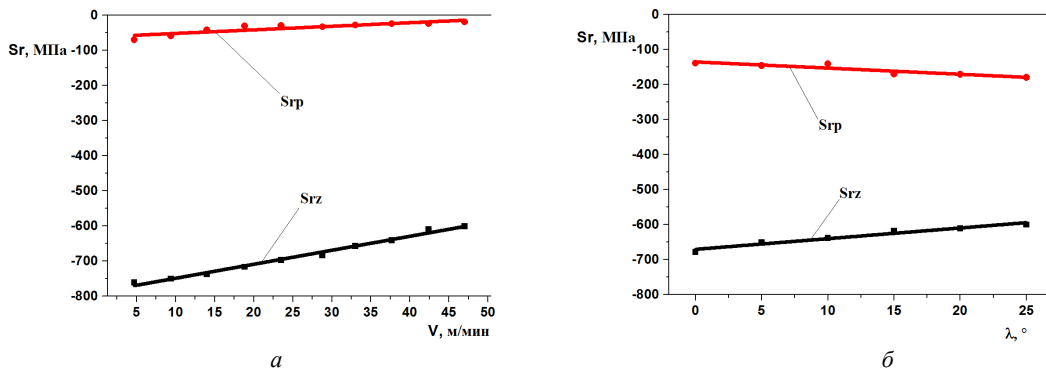


Рис. 6. Изменение напряжений на передней  $S_{rp}$  и задней  $S_{rz}$  гранях резца от скорости резания при  $\lambda = 5^\circ$  (а) и от угла  $\lambda$  при  $V = 50$  м/мин (б)

На протяжении периода стойкости резец может разрушиться как со стороны передней грани, так и со стороны задней. Для расчета вероятности разрушения напряжения на гранях резцов сравнивали с пределами прочности при растяжении и сжатии. В этом случае формула (1) выглядит иначе:

$$P = \begin{cases} \int_{S_a}^{S_a} f(S_P)dS + \int_{S_a}^{\infty} f(S_R)dS \\ 0 \\ \int_{-\infty}^{S_a} f(S_R)dS + \int_{S_a}^0 f(S_C)dS \end{cases} \quad (6)$$

Учитывая, что вероятности разрушения со стороны передней и задней граней являются независимыми случайными величинами, вероятность разрушения резца в целом вычисляли по формуле  $P = P_{II} + P_3 P_{II} P_3$  [12].

На рис. 7 приведены линии вероятности разрушения, вычисленные по формулам (6).

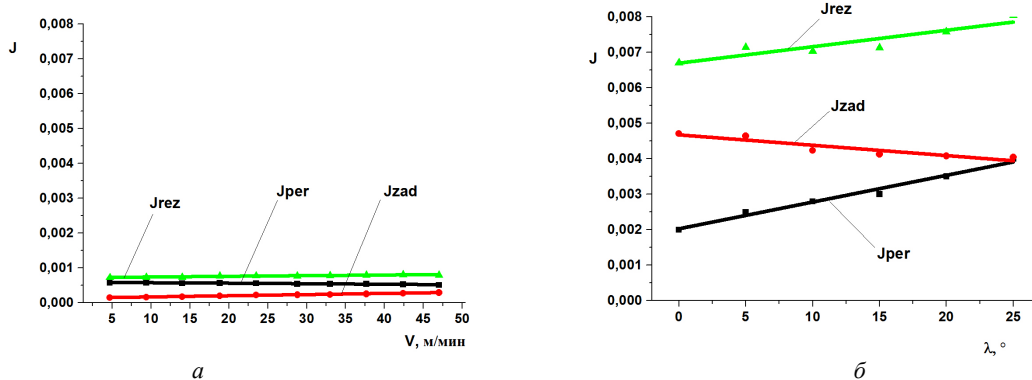


Рис. 7. Изменение вероятности разрушения резцов при изменении скорости резания при  $\lambda = 5^\circ$  (а) и угла  $\lambda$  при скорости 50 м/мин (б)

Как видно из графика (рис. 7) вероятность разрушения резца со стороны задней грани зависит как от скорости резания, так и угла наклона режущей кромки. С увеличением скорости резания вероятность разрушения незначительно увеличивается со стороны задней грани, со стороны передней грани имеет тенденцию к снижению. С увеличением угла наклона режущей кромки  $\lambda$ , вероятность разрушения со стороны передней грани увеличивается в 2 раза, со стороны задней незначительно снижается.

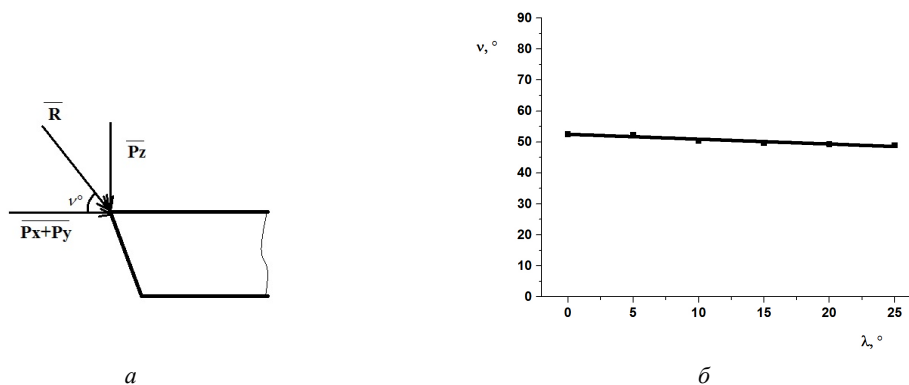


Рис. 8. Составляющие и равнодействующая  $R$  силы резания (а) и изменение угла  $\nu^\circ$ , определяющего напряжения при изменении угла  $\lambda$  (б)

Равнодействующая сила  $R$  наклонена под углом к передней грани резца  $\nu^\circ$ , значение которого рассчитали по формуле(7)[6]:

$$\nu = \arctg \left( \frac{P_z}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}} \right) \quad (7)$$

Изменение угла наклона режущей кромки  $\lambda$  незначительно влияет на изменение угла  $\nu^\circ$  (рис. 8б)

#### Выводы

Применение автоматизированной системы исследования процессов течения позволило исследовать особенности резания при тонком точении алюминиевых сплавов резцами из монокристаллического природного алмаза.

Установлено влияние скорости резания и угла наклона режущей кромки на вероятность разрушения резцов при тонком косоугольном резании. С увеличением скорости резания вероятность разрушения увеличивается в 2 раза со стороны задней грани, со стороны передней грани имеет тенденцию к снижению. С увеличением угла наклона режущей кромки  $\lambda$ , вероятность разрушения со стороны передней грани увеличивается в 2 раза. Выявленные закономерности позволяют более обоснованно выбирать режимы резания и угол наклона резца из природных алмазов при тонком точении.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории 18/1 ИСМ НАНУ к.т.н. Н.Е. Стахниву, к.т.н. А.А. Осадчому и инж. В.Н. Ничипоренко за помощь в проведении экспериментов, а зав. группой С.Н. Иванову и инж. Н.Я. Карлющенко за изготовление резцовых вставок из алмаза.

**Анотація.** У роботі досліджена надійність роботи різців з монокристалів природного алмазу при тонкому косокутному точінні алюмінієвих сплавів. Наведено результати дослідження впливу сили різання та швидкості різання на теоретичну ймовірність руйнування монокристалів алмазу при різних швидкостях різання і кутах нахилу ріжучого леза. Для розрахунку ймовірності руйнування різців була використана математична модель в якій для визначення значень максимальних напружень, що виникають на передній і задній поверхнях використовувалася розрахункова схема, яка основана на заміні контактних навантажень зосередженою силою, що прикладена до вершини ріжучого клину.

**Ключові слова:** монокристали алмазу; ймовірність руйнування; косокутне точіння; алюмінієві сплави.

**Abstract.** The paper investigated the reliability of the cutters with natural diamond single crystals with small oblique turning aluminum alloys. The main aim is to quantify the reliability (probability of failure) single crystals of diamond cutting tools when changing the cutting speed and the angle of the cutting edge of the blade at an oblique turning of aluminum alloys.

Research in cutting was carried out on high-precision lathe TPK-125VM stepless spindle speed main motion from 100 to 2400 rev/min. Experiments were conducted in face turning, the processed material - aluminum alloy AMg6.

We use automated system for studying the process of cutting included universal dynamometer UDM - 100 design) and developed by us tenzoamplifier "Topaz" and the ADC 1406 ADA firm HOLIT Data Systems and PC.

The results of the study effect of cutting force and cutting speed on the theoretical probability of destruction diamond single crystals at different cutting speeds and angles of the cutting blade. To calculate the probabilities of the destruction of the cutter was used a

mathematical model in which to determine the values of maximum stresses occur at the front and rear faces of the calculation scheme based on replacement contact concentrated force loads applied to the top of the cutting wedge.

**Keywords:** single crystal diamond; probability of fracture; oblique turning; aluminum alloys.

#### Библиографический список использованной литературы

1. *Несмелов А.Ф.* Алмазные инструменты в промышленности – М. : Машиностроение, 1964. – 277 с.
2. *Новиков Н.В.* Физические свойства алмаза – К.: Наукова думка, 1987. – 188 с.
3. *Хаев Г. Л.* Прочность режущего инструмента – М. : Машиностроение, 1975. – 168 с.
4. *Писаренко Г.С.,* Прочность материалов при высоких температурах / Писаренко Г.С., Руденко В.Н., Третьяченко Г.Н., – К. : Наукова думка, 1966. – 791 с.
5. *Девин Л.Н.,* Прогнозирование вероятности разрушения резцов на основе КНБ / Девин Л.Н., Вильгельм М. // Сверхтвердые материалы. – Киев, 1992. №6 – С.41 – 46.
6. *Лоладзе Т.Н.* Прочность и износостойкость режущего инструмента – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
7. *Бетанели А.И.* Расчет хрупкой прочности режущей части инструмента // Надежность режущего инструмента. – Киев: Техніка, 1972. – С. 96 –105.
8. *Виноградов А.А.* Контактные нагрузки на режущих поверхностях // Резание и инструмент. – 1990. – №44 – С. 124 – 128.
9. *Породоразрушающий* инструмент для геологоразведочных скважин: Справочник / Корнилов Н.И., Травкин В.С., Берестень Л.К. и др. – М.: Недра, 1979. – 361 с.
10. *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 – Материалы 11-го Международного научно-технического семинара, 21 -25 февраля 2011г., г. Свалява. – Киев: АТМ України 2011. С.79-81.
11. *Девин Л.Н.* Прогнозирование работоспособности металлорежущего инструмента. – Киев: Наукова думка 1992. – 131с.
12. *Гмурман В.Е.* Введение в теорию вероятности и математическую статистику – М. : Высшая школа., 1963. – 238 с.

#### References

1. *Nesmelov A.F.* Almaznye instrumenty v promyshlennosti (Diamond tools in manufactory). Moscow : Mashinostroenie, 1964. 277 p.
2. *Novikov N.V.* Fizicheskie svojstva almaza (Physical properties of diamond) Kyiv: Naukova dumka, 1987. 188 p.
3. *Haev G. L.* Prochnost' rezhushhego instrumenta (Strength of the cutting tool) Moscow : Mashinostroenie, 1975. 168 p.
4. *Pisarenko G.S.,* Prochnost' materialov pri vysokih temperaturah (Strength of materials at high temperatures) Pisarenko G.S., Rudenko V.N., Tret'jachenko G.N., Kyiv: Naukova dumka, 1966. 791 p.
5. *Devin L.N.,* Prognozirovanie verojatnosti razrusheniya rezcov na osnove KNB (Prediction of failure probability cutters CBN) Devin L.N., Vil'gel'm M. Sverhtverdye materialy. Kyiv, 1992. no 6 – pp.41 – 46.
6. *Loladze T.N.* Prochnost' i iznosostojkost' rezhushhego instrumenta (The strength and durability of the cutting tool) Moscow: Mashinostroenie, 1982. 320 p.
7. *Betaneli A.I.* Raschet hrupkoj prochnosti rezhushhej chasti instrumenta (The calculation of the brittle strength of the cutting tool) Nadezhnost' rezhushhego instrumenta. Kyiv: Tehnika, 1972. pp. 96 –105.
8. *Vinogradov A.A.* Kontaktnye nagruzki na rezhushhih poverhnostyah (Contact load on the cutting surfaces), Rezanie i instrument. 1990. no 44 pp. 124 – 128.
9. *Porodorazrushajushij* instrument dlja geologorazvedochnyh skvazhin: Spravochnik (The rock-breaking tool for exploration wells: Guide) Kornilov N.I., Travkin V.S., Beresten' L.K. i dr. Moscow: Nedra, 1979. 361 p.
10. *Devin L.N.,* Stahniv N.E, Sulima A.G., Avtomatizirovannaja sistema dlja izmerenija signala akusticheskoj jemissii v processe precizionnogo almaznogo tochenija (Automated system for measuring signal of acoustic emission during precision diamond turning). Sovremennye problemy proizvodstva i remonta v promyshlennosti i na transporte. Materialy 11-go Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo seminar, 21-25 fevralja 2011g., g.Svaljava. Kyiv: АТМ України 2011. pp.79-81.
11. *Devin L.N.* Prognozirovanie rabotosposobnosti metallorazhushhego instrumenta. (The forecasting performance of cutting tools) Kyiv: Naukova dumka 1992. 131p.
12. *Gmurman V.E.* Vvedenie v teoriju verojatnosti i matematicheskiju statistiku (Introduction to the theory of probability and mathematical statistics). Moscow: Vysshaja shkola, 1963. 238 p.

Подана до редакції 09.02.2015