УДК 621.95.1

ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОТ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И ПРИ ОБРАБОТКЕ СИНТЕГРАНА СВЕРЛЕНИЕМ

Рогов В.А., Кокарев В.И., Велис А.К.

Российский университет дружбы народов, Москва,
e-mail: vladimirrogov@yandex.ru, alejandro_veliz@hotmail.com

В настоящей работе определяются зависимости шероховатости как функция частоты вращения сверла и скорости вертикальной подачи. Была поставлена цель вывода математической модели, которая могла описывать сверление синтеграна и для осуществления такой задачи была принята теория механики разрушения в виде образований трещин в хрупких материалах, таких как гранит и стекло. По мере внедрения сверла в заготовку происходит разрушение синтеграна особым образом. В ходе обработки синтеграна образуется комплексное разрушение в виде зоны пластических деформаций в хрупком материале. В связи с образованием пластических деформаций происходит основное разрушение материала и формирование микротрещин внутри синтеграна. Анализ этих явлений и физических свойств синтеграна позволяли получить математическую модель обработки синтеграна сверлением.

Ключевые слова: обработка материалов сверлением, сверление композитов, сверление синтеграна, сверление стекла, сверление хрупких твердых неметаллических материалов, математическая модель сверления синтеграна

DETERMINISTIC DEFINITION OF A FUNCTION FOR SURFACE ROUGHNESS DEPENDING ON CUTTING MODES FOR DRILLING SYNTHETIC GRANITE

Rogov V.A., Kokarev V.I., Veliz A.C.

People's Friendship University of Russia, Moscow,
e-mail: vladimirrogov@yandex.ru, alejandro_veliz@hotmail.com

In the present work roughness is determined as a function that depends on the speed of drilling and the vertical speed feed. The objective is to obtain a mathematical model that describe drilling of synthetic granite for that purpose was adopted the theory of fracture mechanics in the form of cracks in brittle materials such as granite and glass. As drill advances into the workpiece, synthetic granite fractures in special way. During the processing of synthetic granite a complex fracture is developed inside of the workpiece due to a formation of plastic zones in the brittle material. Because of formation of plastic zones, main deformations occur and formation of microcracks in the synthetic granite. The analysis of these phenomena and physical properties of synthetic granite allowed obtaining a mathematical model to describe the process of drilling synthetic granite.

Keywords: materials processing drilling, drilling composites, synthetic granite drilling, drilling glass, drilling hard-brittle nonmetallic materials, mathematical model of synthetic granite drilling

Обработка композиционных материалов является очень сложным технологическим процессом, поскольку они могут быть армированы разными по составу элементами, ориентированными в разных направлениях. При обработке постоянно меняются углы резания, силы, тепловые параметры и т.д. Каждый новый материал должен быть изучен для выявления общих закономерностей, которые определяют его поведение при разных условиях обработки. Целью настоящей работы является математический анализ появления шероховатости, определение детерминистических связей для прогнозирования её значений при определенных режимах обработки.

По теории хрупкого разрушения (теория трещин Гриффитса) или энергетическому критерию, если не подводить достаточную энергию в вершину трещины, разрушение заготовки прекратится, т.е. трещина расти не будет [14, 13, 6, 7].

В связи с тем, что движение сверла по вертикальной оси за один оборот на порядок меньше, чем диаметр самой маленькой частицы заполнителей и наполнителей синтетического материала, предполагается, что разрушение синтеграна происходит в основном внутри зерен заполнителя, а не по поверхностям раздела заполнитель-связующее (рис. 1). В экспериментальных работах [7, 8] получены оптимальные режимы резания для обработки синтеграна сверлением S_o = 0,016 мм, v = 60 м/мин. Диаметр заполнителей составляют (0,6–20 мм), а наполнителей до 6 мкм. В объеме количество заполнителей составляет до 90% от общего объема бетона, в то время как только 10% составляют наполнители и связующая смола (рис. 1), где показывается что крупная фракция минерала составляет большинство элементов синтеграна.

Обработка происходит следующим образом:

Когда режущая кромка встречает крупное зерно, весь процесс резания происходит как процесс резания минерала, в то время как если встречает мелкие наполнители,

происходит вырывание и разрушение зерен, как показано при рассмотрении обработанных поверхностей под микроскопом (рис. 1).

После анализа результатов экспериментальной обработки синтеграна [4, 8, 2, 10] наиболее подходящей теорией для теоретического определения качества поверхности при обработке синтеграна сверлением проанализированы работы о формировании боковых трещин [16, 15, 18, 19].

В общем случае трещина рассматривается как микротрещина из-за скольжения, образующегося в результате локализованной пластической деформации, происходящей при передвижении дислокаций. Скольжения происходят в зонах смещения этих дислокаций при максимальных касательных напряжениях, то есть скольжения дислокаций генерируют микротрещину под углом 45 градусов по отношению к осям растяжения. Затем, дислокации разрастаются в макротрещины, а их направление перпендикулярно направлению напряжений растяжения [13, 17].

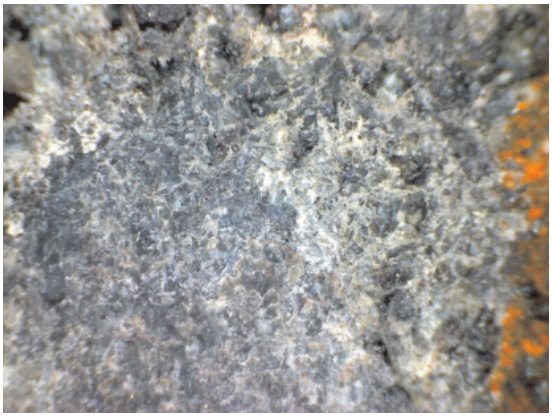

Рис. 1. Изображение обработанной поверхности 50х

При обработке синтеграна сверлением происходит внедрение сверла на глубину S_o, то есть на величину подачи на оборот, что приводит к формированию стружки такой же толщины на всем пути обработки.

Формирование поверхности среза происходит с помощью двух усилий: усилия подачи R и усилия резания P.

Трещина образуется при вдавливании сверла в материал, как показано на рис. 2.

Результирующая сила F этих двух сил создает направление трещины, вокруг которой возникают более мелкие трещины.

Необходимое условие для того, чтобы трещина расширилась – коэффициент интенсивности напряжений должен быть больше критического [12, 17].

Направление распространения трещин перпендикулярно направлению главных напряжений [13, 5]. Кроме того, остаточные пластические деформации после снятия напряжений являются главным источником создания боковых трещин [19, 9, 11].

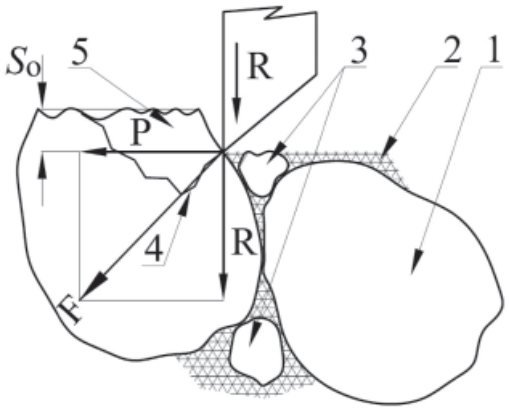

Рис. 2. Схема обработки синтеграна сверлением:
1 – крупная фракция (наполнитель);
2– связующее; 3 – мелкие фракции (заполнитель); 4 – трещина; 5 – скол

На рис. 3 представлена схема твердой фазы синтеграна с образованием боковых и центральных трещин.

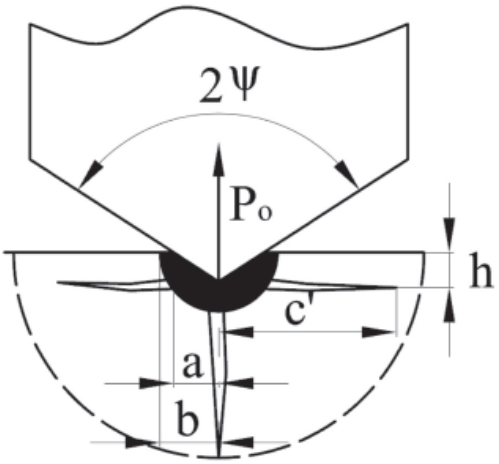

Рис. 3. Схема образования боковых трещин. P_o – сила, созданная остаточными напряжениями пластической зоны, определяет движущую силу трещины; пунктирные линии указывают границу мелких трещин с образованием лунок

На рис. 4 показана схема образования всех видов трещин и сколов, которые наблюдаются при обработке резанием почти всех хрупких материалов, в том числе и синтеграна.

Из уравнения микротвердости (1)

$$H_v = \frac{P^m}{2La} = \frac{P_L^m}{2a}.$$

Рис. 4. Схема образования разрушений у синтеграна при обработке резанием

Значение c' пропорционально длине отпечатки индентора;

$$c' = \lambda_L a = \lambda_L \frac{P^m}{2HL} = \lambda_L \frac{P_L^m}{2H}. \quad (1)$$

Из теории механики разрушения имеем [16]:

$$c' = \frac{k_L P_L^m}{2\Gamma E}; \quad (2)$$

$$k_L = \frac{(1-\nu^2)}{\pi \tan^2 \psi}, \quad (3)$$

где H_v – твердость по Викерсу; P^m – сила давления на материал в точке; P_L^m – сила давления на материал по длине; L – длина образца; λ_L – коэффициент пропорциональности; c' – длина радиальных трещин; k_L – коэффициент пропорциональности; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга материала; Г – энергия разрушения; h – высота упругих деформаций; a – длина отпечатка индентора; G – скорость освобождения упругой энергии при увеличении длины трещины; ψ – половина угла режущего инструмента (индентора).

Процесс разрушения синтеграна можно представить в виде четырех этапов (рис. 5):

1 – упругая деформация (I);

2 – образование трещин и скалывание минерала (II);

3 – снятие напряженного состояния системы сверло-синтегран и прохождение сверла на холостом ходу (III);

4 – повторение процесса сначала с пункта (I).

В общем случае, для расчета сил, действующих на режущие кромки сверла P, R и F для одной режущей кромки получено следующее соотношение:

$$F = \sqrt{P^2 + R^2} =$$

$$= \sqrt{\left[\frac{\mu_2 R_д \cdot r}{2\sin\varphi} + \frac{R_{ск} r S_o (\sin\gamma + \mu_1 \cos\gamma)}{2\sin(\tau+\gamma)\sin\tau}\right]^2 + \left[\frac{R_д \cdot r}{2} - \frac{R_{ск} r S_o (\cos\gamma - \mu_1 \sin\gamma)}{2\sin(\tau+\gamma)\sin\tau}\right]^2}. \quad (4)$$

Для синтеграна формула (9а) принимает следующий вид:

$$F = r\sqrt{\left[1,6964 \cdot \Delta + 57,51 \cdot S_o\right]^2 + \left[6,7 \cdot \Delta + 2,41 \cdot S_o\right]^2}.$$

После сокращения получим:

$$F = D \cdot \sqrt{11,94 \cdot \Delta^2 + 56,85 \cdot \Delta \cdot \frac{S}{n} + 828,30 \cdot \left(\frac{S}{n}\right)^2}, \text{ (кгс)}. \quad (5)$$

Шероховатость R_z после обработки синтеграна зависит от размеров пластической деформации, которая возникает вокруг точки соприкосновения инструмента и синтеграна. Обработка хрупких материалов, в том числе и синтеграна, подчиняется законам хрупкого разрушения. На основе описанных выше рассуждений принимаем, что размер R_z связан с размером b и h (рис. 6) пластических деформаций, возникающих при воздействии силы F, а длина холостого хода сверла связана с размером c длины боковых трещин в синтегране.

На основе проведенного анализа можно утверждать, что шероховатость это функция:

$$R_z = \Phi(\Delta, n, S, c, v, F), \quad (6)$$

где Δ – износ по задней поверхности; n – частота вращения; S – осевая подача; c – длина боковых трещин; v – скорости сверла на радиусе r; F – результирующая сила от R и P.

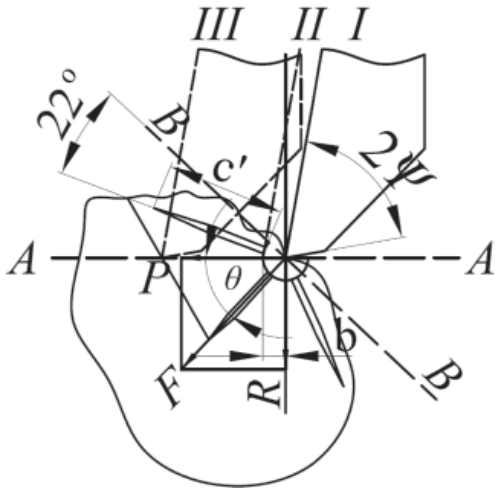

Рис. 5. Схема разрушения синтеграна, показывает положение сверла в разных стадиях обработки:
I – вход в синтегран; II – упругая деформация синтеграна и образование трещины и скол синтеграна; III – холостой ход инструмента

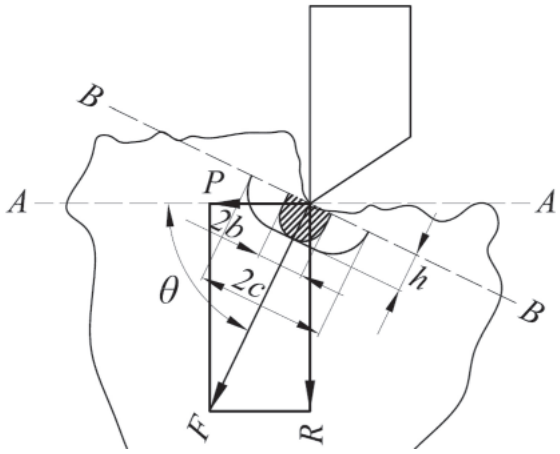

Рис. 6. Схема формирования боковых трещин при обработке синтеграна

Схема образования боковых трещин при обработке синтеграна показана на рис. 7.

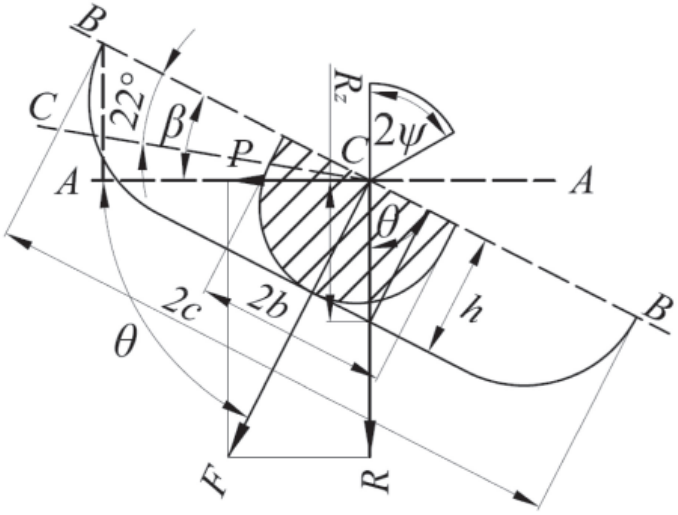

Рис. 7. Схема образования боковых трещин при обработке синтеграна сверлением: h – глубина пластических деформаций, b – ширина, R_z – шероховатость

При образовании боковых трещин (рис. 6, 7) сила F – перпендикулярна плоскости B–B; Пересечение плоскости резания (A–A) с боковыми трещинами создает расстояние холостого хода сверла, обозначенное буквой e; C–C – конусная трещина, возникающая под углом 22° [16, 19], которая вместе с боковыми трещинами создает стружку в направлении движения резца. Нижняя боковая трещина не развивается дальше, так как при сколе сила F равняется нулю.

Из рис. 7 геометрически выводим отношение:

$$\frac{R_z}{h}=\frac{F}{R}\rightarrow R_z=\frac{F}{R}\cdot h \qquad (7)$$

так как,

$$\frac{b}{a}=\left(\frac{E}{H}\right)^{1/2}\mathrm{ctg}^{1/3}\psi\rightarrow b=a\left(\frac{E}{H}\right)^{1/2}\mathrm{ctg}^{1/3}\psi;$$

$$H=\frac{P}{\alpha_o aL},$$

тогда

$$a=\frac{P}{\alpha_o HL} \qquad (8)$$

при $\alpha_o = 1$ – коэффициент симметрии резца и $h \approx b$ и $L = r = D/2$ и сила $P = F$ получим:

$$h\approx b\approx\left(\frac{E}{H}\right)^{1/2}\left(\frac{2F}{HD}\right)\mathrm{ctg}^{1/3}\psi,$$

после сокращения получим,

$$h=\left(\frac{E}{H}\right)^{1/2}\left(\frac{2F}{HD}\right)\left(\mathrm{ctg}\psi\right)^{1/3}. \qquad (9)$$

Подставляя (7), (8), (4) и (5), получим уравнение для шероховатости. Это общее уравнение для вычисления шероховатости R_z при обработке любого хрупкого материала.

$$R_z=\frac{F}{R}\cdot\frac{(E\cdot F)^{1/2}}{H\cdot r^{1/2}}\mathrm{ctg}^{1/3}\psi \rightarrow R_z=\frac{F\cdot(E\cdot F)^{1/2}}{R\cdot H\cdot r^{1/2}}\mathrm{ctg}^{1/3}\psi;$$

$$R_z=\frac{F}{R}\left(\frac{E}{H}\right)^{1/2}\left(\frac{2F}{HD}\right)\mathrm{ctg}^{1/3}\psi. \qquad (10)$$

Уравнение для определения шероховатости (10) для синтеграна после подставления числовых значений примет вид:

$$R_z=\left(\frac{2}{HD}\right)\left(\frac{E}{H}\right)^{1/2}\frac{F^2}{R}\mathrm{ctg}^{1/3}\psi. \qquad (11)$$

Если вводить E, H в МПа, S – мм/мин, n – об/мин, D – мм, тогда R_z – мм.

Уравнение (11) примет вид для любого хрупкого материала:

$$R_z=9{,}807\left(\frac{2}{HD}\right)\left(\frac{E}{H}\right)^{1/2}\frac{F^2}{R}\mathrm{ctg}^{1/3}\psi; \qquad (12)$$

$$R_z=9{,}807\left(\frac{2}{HD}\right)\left(\frac{E}{H}\right)^{1/2}\frac{\left[D\cdot\left(11{,}94\cdot\Delta^2+56{,}85\cdot\Delta\cdot\frac{S}{n}+828{,}30\cdot\left(\frac{S}{n}\right)^2\right)^{1/2}\right]^2}{D\left(3{,}35+1{,}21\cdot\frac{S}{n}\right)}\mathrm{ctg}^{1/3}\psi. \qquad (13)$$

Для синтеграна: $\Delta = 1$ мм, $E = 300$ МПа, $H = 4{,}9\cdot10^3$ МПа, $\psi = 35°$

$$R_z=\frac{\left(11{,}94\cdot\Delta^2+56{,}85\cdot\Delta\cdot\frac{S}{n}+828{,}30\cdot\left(\frac{S}{n}\right)^2\right)}{1010\cdot\left(3{,}35+1{,}21\cdot\frac{S}{n}\right)}\mathrm{ctg}^{1/3}\psi. \qquad (14)$$

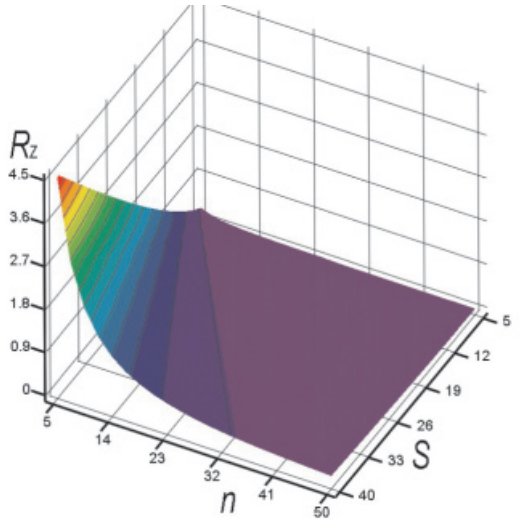

Рис. 8. График зависимости шероховатости R_z от n и S (уравнение (14))

Для $n = 1300$ об/мин и $S = 25$ мм/мин, из уравнения (13) $R_z = 0{,}0044$ мм.

После обработки получается неровная поверхность со сложной системой микротрещин. Расчетная форма гребешков шероховатости и микротрещин должна иметь вид, показанный на рис. 9.

Выводы

– Обработка синтеграна сверлением сопровождается его хрупким разрушением и образованием сложной системы микротрещин;

– Разрушение происходит согласно представлению о формировании боковых трещин, что приводит к формированию стружки на поверхности обработки.

– В процессе обработки образуется система боковых и медианных трещин, но на формирование стружки оказывают влияние только боковые трещины.

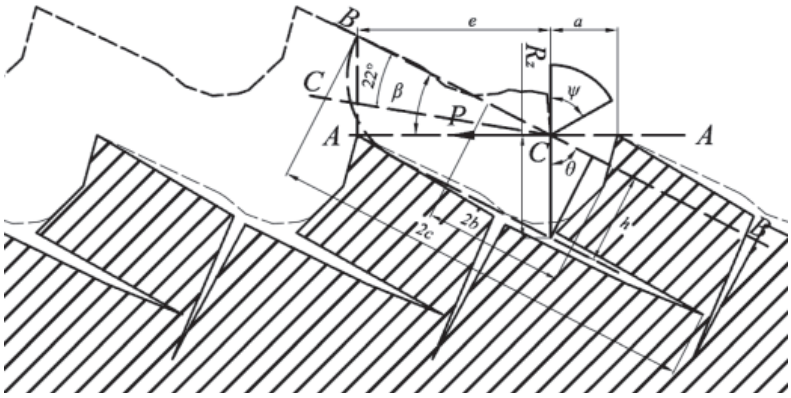

Рис. 9. Предполагаемая виртуальная поверхность синтеграна после обработки резанием

– Шероховатость R_z, рассчитанная по уравнению (14), соответствует полученной опытным путем.

Список литературы

1. Атрошенко С.Л., Кривошеее С.И., Петров А.Ю. Распространение трещины при динамическом разрушении полиметилметакрилата // Журнал технической физики. – 2002. – Вып. 72. – № 2. – С. 52–59.
2. Валид Махмуд Мохамед Э.С.Ш. Диссертация – Мат. и физ. моделирование динамики процесса резания композиционных структурно-неоднородных материалов (на примере синтеграна). – М.: РУДН, 2005. – 189 с.
3. Кабалдин Ю.Г., Бурков А.А., Виноградов С.В. Механизмы разрушения твердосплавного инструмента при прерывистом резании // Вестник машиностроения. – 2000. – № 5. – С. 31–35.
4. Кокарев В.И., Федоров В.И., Велис А.К. Исследование процесса сверления синтеграна твердосплавными сверлами с комплексным модифицированием режущей части // Вести СТАНКИНА. – 2013.
5. Кошеленко А.С., Позняк Г.Г. Теоретические основы и практика фотомеханики в машиностроении. – М.: Граница, 2004. – 296 с.
6. Латышев О.Г. Разрушение горных пород. – М.: Теплотехник, 2007. – 672 с.
7. Николаева Е.А. Основы механики разрушения. – Пермь: Изд. ПГТУ, 2010. – 103 с.
8. Рогов В.А., Кокарев В.И., Велис А.К. Исследование процесса обработки синтеграна твердосплавными сверлами. Т. 1. – М.: Фундаментальные Исследования, 2013. – С. 65–65.
9. Танович Л., Попович М., Младенович Г. Исследования в области микрорезания мрамора и гранита // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2012.
10. Тюкпиеков В.Н. Повышение эффективности обработки синтеграна на основе физ. и мат. моделирования: дис. ... – М.: РУДН, 2002.
11. Atkinson C., Martınez-Esnaola J.M., and Elizalde M.R. Contact mechanics: a review and some applications // Materials Science and Technology. – 2012. – Vol. 28.
12. Broek D. Elementary engineering fracture mechanics. – 3rd ed. – La Hague: Martinus Nijhoff, 1982. – 479 p.
13. Gdoutos E.E. Fracture Mechanics. – Netherlands: Springer, 2005. – 369 p.
14. Griffith A.A. The theory of rupture // Delft. – 1924. – P. 55–63.
15. Lawn B.R., Fuller E.R. Equilibrium penny-like cracks in indentation fracture. Vol 10 // Journal of Material of Science. – 1975. – P. 2016–2024 p.
16. Lawn B.R. Fracture of brittle solids. – Cambridge University Press, 1993. – 372 p.
17. Lise G., Niels B.S. Introduction to Fatigue and Fracture Mechanics. – Aalborg: University of Aalborg, 1991. – 68 p.
18. Marshall D.B., Lawn B.R., and G. E.A. Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Lateral Crack System. Vol 65 // Journal of The American Ceramic Society. – 1982. – P. 561–566.
19. Swain M.V., Lawn B.R. Indentation fracture in brittle rocks and glasses // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. – 1976. – Vol. 13. – P. 311–319.

References

1. Atroshenko S.L., Krivosheee S.I., and Petrov A.Yu. Rasprostranenie treshhiny pri dinamicheskom razrushenii polimetilmetakrilata // Zhurnal texnicheskoj fiziki. 2002. Vol. 72. no. 2. pp. 52–59.
2. Valid Maxmud Moxamed E'.S.Sh. Dissertaciya – Mat. i fiz. modelirovanie dinamiki processa rezaniya kompozicionnyx strukturno-neodnorodnyx materialov (na primere sintegrana). Moskva: RUDN, 2005. 189 p.
3. Kabaldin Yu.G., Burkov A.A., Vinogradov S.V. Mexanizmy razrusheniya tverdosplavnogo instrumenta pri preryvistom rezanii // Vestnik mashinostroeniya. 2000. no. 5. pp. 31 – 35.
4. Kokarev V.I., Fedorov V.I., Velis A.K. Issledovanie processa sverleniya sintegrana tverdosplavnymi sverlami c kompleksnym modificirovaniem rezhushhej chasti // Vesti STANKINA. 2013.
5. Koshelenko A.S., Poznyak G.G. Teoreticheskie osnovy i praktika fotomexaniki v mashinostroenii. Moskva: Granica, 2004. 296 p.
6. Latyshev O.G. Razrushenie gornyx porod. Moskva: Teplotexnik, 2007. 672 p.
7. Nikolaeva E.A. Osnovy mexaniki razrusheniya. Perm': Izd. PGTU, 2010. 103 p.
8. Rogov V.A., Kokarev V.I., Velis A.K. Issledovanie processa obrabotki sintegrana tverdosplavnymi sverlami. T. 1. Moskva: Fundamental'nye Issledovaniya, 2013. 65–65 p.
9. Tanovich L., Popovich M., Mladenovich G. Issledovaniya v oblasti mikrorezaniya mramora i granita // Visnik Nacional'nogo texnichnogo universitetu Ukraïni «Kiïvs'kij politexnichnij institut». 2012.
10. Tyukpiekov V.N. Dissertaciya – Povyshenie e'ffektivnosti obrabotki sintegrana na osnove fiz. i mat. modelirovaniya. Moskva: RUDN, 2002.
11. Atkinson C., Martınez-Esnaola J.M., and Elizalde M.R. Contact mechanics: a review and some applications // Materials Science and Technology. 2012. Vol. 28.
12. Broek D. Elementary engineering fracture mechanics. 3rd ed. La Hague: Martinus Nijhoff, 1982. 479 p.
13. Gdoutos E.E. Fracture Mechanics. Netherlands: Springer, 2005. 369 p.
14. Griffith A.A. The theory of rupture // Delft. 1924. pp. 55–63.
15. Lawn B.R., Fuller E.R. Equilibrium penny-like cracks in indentation fracture. Vol 10. Journal of Material of Science, 1975. pp. 2016–2024.
16. Lawn B.R. Fracture of brittle solids. Cambridge University Press, 1993. 372 p.
17. Lise G., Niels B.S. Introduction to Fatigue and Fracture Mechanics. Aalborg: University of Aalborg, 1991. 68 p.
18. Marshall D.B., Lawn B.R., and G. E.A. Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Lateral Crack System. Vol 65. Journal of The American Ceramic Society, 1982. pp. 561–566.
19. Swain M.V., Lawn B.R. Indentation fracture in brittle rocks and glasses // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. 1976. Vol. 13. pp. 311–319.

Рецензенты:

Гусаков С.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теплотехники и тепловых двигателей инженерного факультета РУДН, г. Москва;

Расторгуев Г.А., д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов РУДН, г. Москва.

Работа поступила в редакцию 02.06.2014.