

Порошковая металлургия, композиционные материалы и покрытия

УДК 621.922

DOI: 10.14529/met200406

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ И КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ АБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ*

Б.А. Чаплыгин, В.В. Широков, Т.А. Лисовская, Р.А. Лисовский
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Прочность абразивных кругов является одним из основных факторов, определяющих производительность абразивной обработки. В статье рассматриваются пути повышения прочности абразивных кругов. Представленная в статье математическая модель напряжённого состояния обобщает уже известные модели. С её помощью впервые установлено, что существует множество оптимальных сочетаний модуля упругости и плотности материала упрочняющей части, обеспечивающих одно и то же минимальное значение целевой функции. Установлено, что с увеличением радиуса упрочняющей части в сочетании с оптимизацией механических характеристик ее материала допустимая разрывная скорость круга может быть увеличена в несколько раз. Представлены уравнение регрессии и номограмма для определения оптимального сочетания управляющих факторов.

Традиционные методы определения механических характеристик материалов, хорошо рекомендовавшие себя при испытаниях металлов и сплавов, при испытании абразивных материалов не показали себя как надежные методы, обеспечивающие стабильность и необходимую точность результатов. Поэтому предложен альтернативный метод, выгодно отличающийся тем, что его реализация не требует специального оборудования и специальных исследований.

Ключевые слова: абразивный инструмент, прочность, композитные абразивные материалы, испытания на прочность.

Введение

Центробежные силы, действующие на абразивный круг при его вращении, вызывают в объеме круга радиальные (σ_r) и тангенциальные (σ_t) нормальные напряжения. При увеличении окружной скорости круга напряжения растут, достигая при определенном значении скорости предельного значения, приводящего к разрушению круга [1, 2]. Таким образом, допустимая окружная скорость круга косвенным образом характеризует его прочность на разрыв. Повышение прочности, а следовательно, и рабочих скоростей абразивного инструмента, является одним из важнейших направлений мировой практики абразивной обработки [3–5]. Основное преимущество высокоскоростной обработки усматривается

в комбинации высокого показателя съема материала с хорошей чистотой обрабатываемых поверхностей заготовки, обеспечивающей возможность черновой и чистовой обработки заготовки с одной установки [6, 7].

Известны два направления решения рассматриваемой проблемы:

- 1) повышение прочности композиционного материала круга;
- 2) снижение напряжений во вращающемся круге.

В основе первого направления лежит повышение прочности материала увеличением его плотности, оптимизацией состава структуры и т. д. [8–12]. В основе второго направления – снижение напряжений во вращающемся круге за счет конструктивных решений [13].

* Оригинальная статья на английском языке опубликована в сборнике конференции «Форум по материаловедению», т. 946, Trans Tech Publications, Ltd., февраль 2019 г., с. 380–385. Crossref. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.946.380.

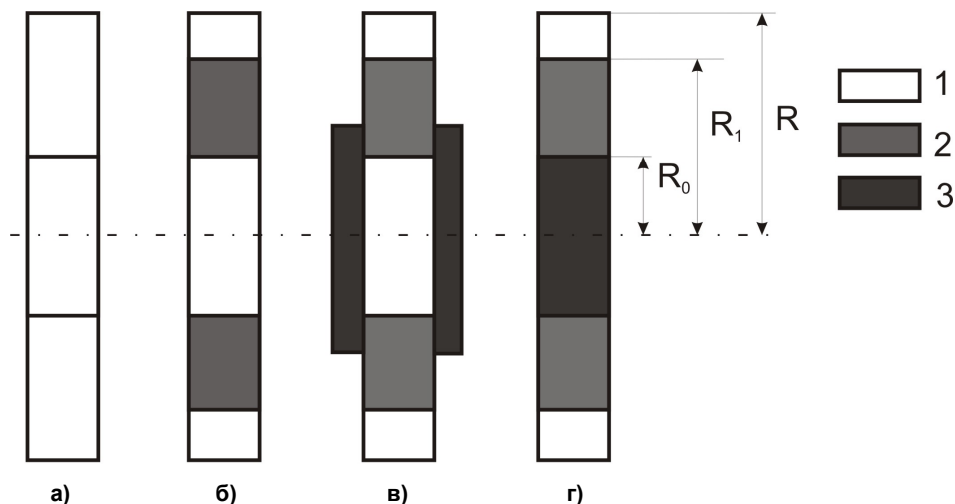


Рис. 1. К вопросу моделирования составных абразивных кругов:
1 – режущая часть, 2 – упрочняющая часть, 3 – приводная часть

К этому направлению в частности относятся составные абразивные круги [14–16]. Максимальный эффект повышения прочности абразивных кругов на основе разработок первого направления прогнозируем и достаточно ограничен, поскольку прочность абразивной смеси не может быть выше прочности наиболее прочного компонента смеси (рис. 1а).

Большими возможностями располагает второе направление, в частности работы, связанные с совершенствованием составных абразивных кругов (рис. 1б). Составной круг наряду с режущей частью имеет упрочняющую часть, изготовленную из более прочного материала и имеющую своей целью снижение напряжений в рабочей части круга. При этом основная задача сводится к оптимальному выбору механических и геометрических параметров упрочняющей части круга.

Определение параметров упрочняющей части составного абразивного круга

Оптимальный выбор параметров упрочняющей части в составных кругах достигается на основе анализа напряженного состояния во вращающемся круге.

Традиционно при анализе напряженного состояния принимается модель виртуально вращающегося (без приводной части) составного абразивного круга (см. рис. 1б). Подобное моделирование следует считать некорректным с точки зрения удовлетворения граничным условиям. Фактические граничные условия должны учитывать жесткую связь круга с приводным валом (в дальнейшем приводной частью круга). Например, при закреп-

лении круга по схеме рис. 1, с граничное условие $\sigma_r = 0$ при $r = R$ будет некорректным. Отсюда следует в частности ошибочность вывода о влиянии внутреннего отверстия круга на напряженное состояние.

Напряженное состояние составного круга, включающего приводную, упрочняющую и режущую части, описывали девятью уравнениями с шестью константами, которые определялись из граничных условий и условий неразрывности на границе составных частей круга:

$$\sigma_{rj} = \frac{E_j}{1-\mu_j^2} \left(C_{1j}(1+\mu_j) - C_{2j}(1-\mu_j) \frac{1}{r^2} \right) - \frac{\rho_j \omega^2}{8} (3 + \mu_j) r^2; \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta j} = \frac{E_j}{1-\mu_j^2} \left(C_{1j}(1+\mu_j) + C_{2j}(1-\mu_j) \frac{1}{r^2} \right) - \frac{\rho_j \omega^2}{8} (3 + \mu_j) r^2; \quad (2)$$

$$U_{rj} = -\frac{1-\mu_j^2}{8E_j} \rho_j \omega^2 r^3 + C_{1j} r + \frac{C_{2j}}{r}. \quad (3)$$

В уравнениях (1)–(3) нижний индекс j последовательно должен принять значения r , u и v , означающие принадлежность уравнения режущей, упрочняющей и приводной части круга; C_{1j} , C_{2j} – константы, значения которых определяются граничными условиями; U_{rj} – радиальное перемещение; E_j , μ_j , ρ_j – модули упругости, коэффициенты Пуассона и

плотности материала соответствующей части круга; r – радиальная координата; ω – угловая скорость.

Для определения шести констант располагаем шестью уравнениями:

- 1) $\sigma_{rp} = 0$ при $r = R$;
- 2) $\sigma_{ry} = \sigma_{rp}$ при $r = R_1$;
- 3) $\sigma_{ry} = \sigma_{rv}$ при $r = R_0$;
- 4) $U_{ry} = U_{rp}$ при $r = R_1$;
- 5) $U_{ry} = U_{rv}$ при $r = R_0$;
- 6) $U_{rv} = 0$ при $r = 0$.

Математическая модель обобщает известные модели: при $E_v = E_y$, $\mu_v = \mu_y$ описывает напряженное состояние виртуально вращающегося составного круга с внутренней упрочняющей частью, а при $E_v = E_y = E_p$, $\mu_v = \mu_y = \mu_p$ – напряженное состояние обычного виртуально-вращающегося сплошного круга.

Имеются три характерные участка эпюр напряжений (рис. 2), принадлежащие приводной, упрочняющей и режущей частям круга. Наиболее нагруженными (опасными) сечениями являются: для режущей части – $r = R_1$, упрочняющей – $r = R_0$ и приводной – $r = 0$. Разрушение круга связывали с предельным

значением инвариантной характеристики напряженного состояния σ_i – интенсивностью нормальных напряжений. Для плоского осесимметричного напряженного состояния:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_r^2 - \sigma_r \sigma_t + \sigma_t^2}. \quad (4)$$

Задача свелась к минимизации целевой функции – интенсивности нормальных напряжений в опасном сечении режущей части круга при наличии трёх управляющих факторов R_1 , E_y , ρ_y .

Поиск минимального значения целевой функции при наличии ограничений осуществлялся с помощью программных средств *Mathcad Pro*.

Впервые установлено, что для каждого значения R_1 существует множество оптимальных сочетаний модуля упругости и плотности материала упрочняющей части, обеспечивающих одно и то же минимальное значение целевой функции. Возможность минимизации целевой функции до некоторого определенного уровня на основе выбора материала упрочняющей части круга, допускающего различные комбинации модуля упругости и плотности, является весьма важным в практическом отношении, так как упрощает процедуру поиска такого материала.

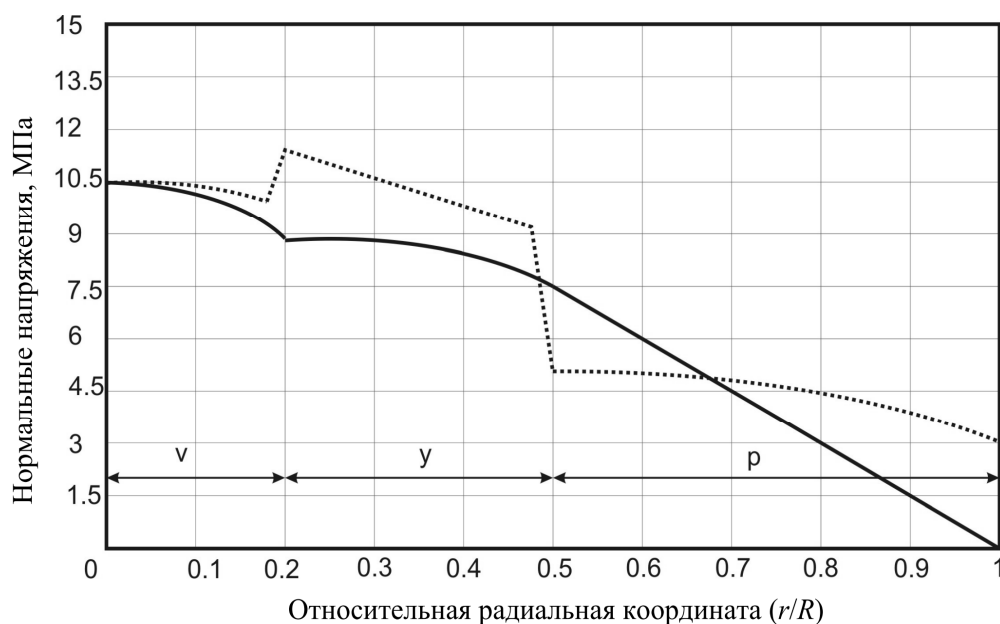


Рис. 2. Эпюры радиальных (сплошная линия) и тангенциальных (пунктирная) напряжений в круге, состоящем из приводной, упрочняющей и рабочих частей ($E_y = 2,2E_p$, $\rho_y = 1,35\rho_p$)

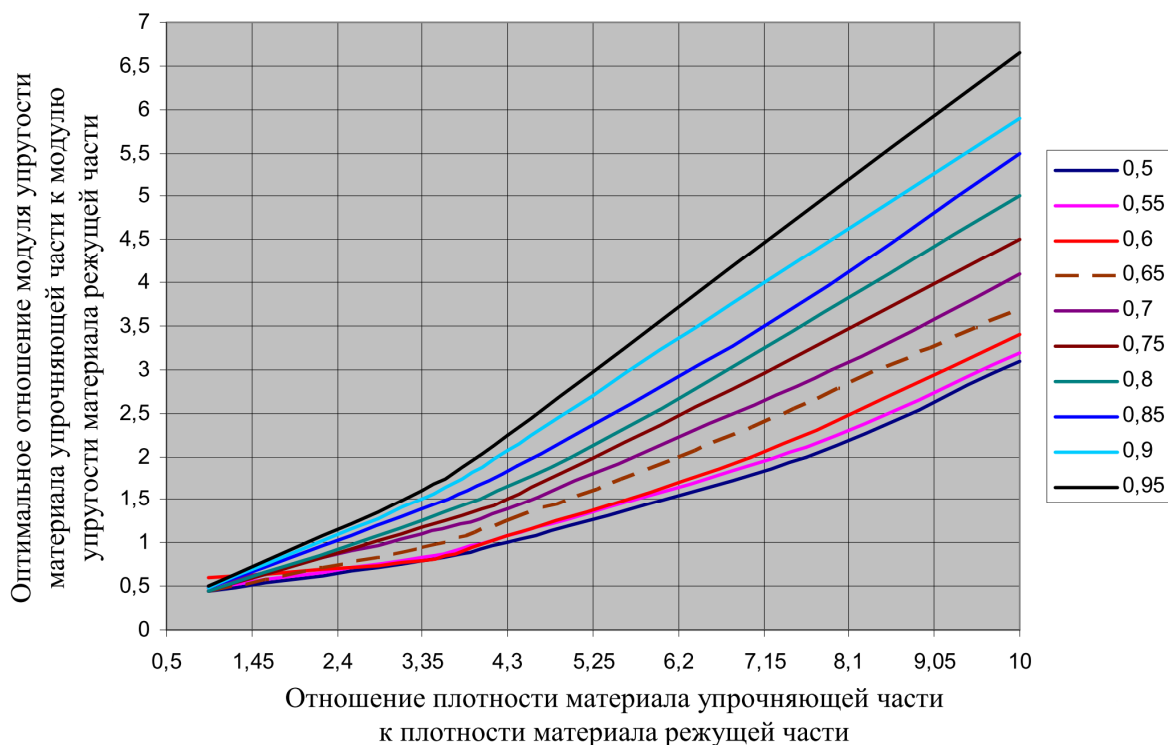


Рис. 3. Номограмма для определения оптимального сочетания плотности и модуля упругости материала упрочняющей части при различных значениях \bar{R}_1 ($R = 200$ мм, $R_0 = 80$ мм, $E_p = 10^5$ МПа, $\rho_p = 2,4$ г/см³, $\sigma_{вр} = 20$ МПа)

Получена номограмма для определения оптимального сочетания управляющих факторов (рис. 3), а также уравнение регрессии:

$$E_{yopt} = E_p \left[a_0 + a_1 \frac{\rho_y}{\rho_p} + a_2 \frac{R_1}{R} + a_3 \left(\frac{\rho_y}{\rho_p} \right)^2 + a_4 \left(\frac{R_1}{R} \right)^2 + a_5 \frac{\rho_y}{\rho_p} \frac{R_1}{R} \right], \quad (5)$$

где a_0, a_1, \dots, a_5 – числовые коэффициенты.

Установлено, что увеличением радиуса упрочняющей части в сочетании с оптимизацией механических характеристик ее материала допустимая разрывная скорость круга может быть увеличена в несколько раз.

Разработана математическая модель напряженного состояния торцешлифовального абразивного круга с наружной упрочняющей частью.

В отличие от кругов с внутренней упрочняющей частью минимальное значение интенсивности нормальных напряжений в опасном сечении режущей части круга ($r = R_0$) всегда достигается при наименьшей плотности и наибольшем модуле упругости. Иначе

говоря, в рассматриваемом случае отсутствует экстремум (минимум) целевой функции и взаимосвязь плотности и модуля упругости, которая бы обеспечивала минимальное значение напряжений в опасном сечении круга. Практически это означало бы, что из арсенала имеющихся материалов для упрочняющей части необходимо выбирать материал, характеризующийся максимальным модулем упругости, минимальной плотностью и обладающий необходимой прочностью. Анализ показал, что увеличение радиуса наружной упрочняющей части способствует снижению напряжений в опасном сечении круга, однако эффект снижения напряжений падает по мере увеличения радиуса, экспоненциально приближаясь к некоторому пределу. Сформулированы рекомендации по параметрам торцешлифовальных кругов с наружной упрочняющей частью.

Метод определения предела прочности абразивного материала

Основным показателем прочности абразивного круга в настоящее время является разрывная скорость круга. Указанный показа-

тель прочности является косвенным и характеризует прочность круга, а не прочность материала круга. Разрывная скорость круга определяется не только пределом прочности материала круга, но его размерами и конструкцией [17]. В связи с этим разрывная скорость круга позволяет лишь качественно судить о прочности материала круга, ограничивая возможности при принятии решений, направленных на повышение прочности материала круга.

Разрушение материала следует отождествлять с достижением в опасном сечении критического значения интенсивности нормальных напряжений (формула (4)). Критическое значение интенсивности нормальных напряжений, при котором происходит разрушение, вероятно, следует рекомендовать в качестве прямого показателя прочности материала и отождествлять с пределом прочности материала на разрыв. Суть предлагаемого экспериментально-аналитического метода определения предела прочности абразивного материала состоит в следующем.

Абразивный круг испытывают на разрыв, т. е. экспериментально определяют окружную скорость, при которой круг разрушается. Зная разрывную скорость, рассчитывают в опасном сечении режущей части круга интенсивность нормальных напряжений по формуле (4), величина которой полагается равной пределу прочности материала круга на разрыв.

Традиционные методы определения механических характеристик материалов, хорошо

зарекондовавшие себя при испытаниях металлов и сплавов, при испытании абразивных материалов не показали себя как надежные методы, обеспечивающие стабильность и необходимую точность результатов. Среди известных методов предпочтение отдают испытаниям на изгиб – методу, который также имеет серьезные недостатки.

Предлагаемый метод следует оценивать как альтернативу известным методам, выгодно отличающийся тем, что его реализация не требует специального оборудования и специальных исследований, так как предлагаемый метод сводится к дополнительной несложной аналитической обработке результатов уже существующих испытаний кругов на разрывную скорость.

Выводы

1. Установлено, что для каждого значения радиуса упрочняющей части существует множество оптимальных сочетаний модуля упругости и плотности материала упрочняющей части, обеспечивающих одно и то же минимальное значение целевой функции.

2. Установлено, что увеличением радиуса упрочняющей части в сочетании с оптимизацией механических характеристик ее материала допустимая разрывная скорость круга может быть увеличена в несколько раз.

3. Предложен экспериментально-аналитический метод определения предела прочности абразивного материала.

Литература

1. Краевой, С.Ю. Оценка эксплуатационных показателей отрезных кругов / С.Ю. Краевой // *Абразивный инструмент и металлообработка: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – С. 132–135.*
2. Frank, H. *Strength of bonded abrasive wheels* / H. Frank, D. Mewes, S. Schulz // *Ceram. Forum Int./Ber. DKG. – 1998. – Vol. 75, no. 1. – P. 44–49.*
3. Марченко, С.В. Исследование ультразвукового метода контроля механических характеристик абразивного инструмента / С.В. Марченко, Б.А. Чаплыгин // *Абразивное производство: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – С. 106–117.*
4. Абрашкевич, Ю.Д. Механическая прочность усиленных абразивных отрезных кругов / Ю.Д. Абрашкевич, В.М. Беликович, Е.С. Лещов // *Станки и инструмент. – 1986. – Т. 57, № 8. – С. 20–21.*
5. Soler, Ya.I. *Selection of abrasive wheels by surface topography of parts from hardened steel 30ChGSA* / Ya.I. Soler, Van Le Nguyen // *Journal of engineering research. – 2018. – Vol. 6, no. 2. – P. 191–208.*
6. Солер, Я.И. Исследование микрогеометрии поверхности при плоском шлифовании закаленных сталей высокопористыми абразивными кругами с использованием статистических методов / Я.И. Солер // *Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2004. – № 3. – С. 91–95.*

7. Torrance, A.A. Relation between the traverse dressing of vitrified grinding wheels and their performance / A.A. Torrance, J.A. Badger // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2000. – Vol. 40 (12). – P. 1787–1811. DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00015-8
8. Судаков, Н.В. К вопросу интенсификации процесса приготовления абразивной формовочной смеси на вулканитовой связке / Н.В. Судаков, С.В. Марченко // *Теория, технология и оборудование для производства абразивного инструмента: сб. науч. тр.* – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – С. 25–29.
9. Samodurova, M.N. High Velocity Compaction of Carbon Compositions / M.N. Samodurova, L.A. Barkov, Yu.S. Latfulina // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 115–121. DOI: 10.14529/met170314
10. К вопросу производства высоких абразивных кругов / В.Н. Дятлов, В.Г. Шеркунов, С.В. Марченко, Б.А. Чаплыгин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. – 2007. – № 11 (83).
11. A novel technique for dressing metal-bonded diamond grinding wheel with abrasive waterjet and touch truing / Zhenzhong Zhang, et al. // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017). – Vol. 93 (9-12) – P. 3063–3073. DOI: 10.1007/s00170-017-0738-7
12. Jackson, M.J. Materials Selection Applied to Vitrified Alumina & CBN Grinding Wheels / M.J. Jackson, B. Mills // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – Vol. 108 (1). – P. 114–124. DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00829-3
13. Nguyen, T. Performance of a new segmented grinding wheel system / T. Nguyen, L.C. Zhang // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2009. – Vol. 49 (3–4). – P. 291–296. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2008.10.015
14. Албагачиев, А.Ю. К вопросу оценки качества опорной поверхности при шлифовании сборным абразивным кругом / А.Ю. Албагачиев, В.А. Яиков, Л.В. Силин // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. – 2012. – № 4. – С. 24–27.
15. Nohara, K. Study on design of light-weight super-abrasive wheel / K. Nohara, K. Yanagihara, M. Ogawa // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 297. – 012048. DOI: 10.1088/1757-899X/297/1/012048
16. Nadolny, Krzysztof. Potential for improving efficiency of the internal cylindrical grinding process by modification of the grinding wheel structure – Part I: Grinding wheels made of conventional abrasive grains / Krzysztof Nadolny, Witold Habrat // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. – 2017. – 231.4. – P. 621–632. DOI: 10.1177/0954408916637100
17. Чаплыгин, А.Б. Оценка износостойкости композиционных материалов и изготовленных из них шлифовальных кругов / А.Б. Чаплыгин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 137–141. DOI: 10.14529/met160222

Чаплыгин Борис Александрович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; chba51@mail.ru.

Широков Вячеслав Вячеславович, канд. техн. наук, доцент кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; shirokovvv@susu.ru; ORCID ID: 0000-0003-1663-9362.

Лисовская Татьяна Александровна, преподаватель кафедры мехатроники и автоматизации, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; lisovskaiata@susu.ru; ORCID ID: 0000-0002-1899-9209.

Лисовский Роман Александрович, аспирант кафедры мехатроники и автоматизации, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; johnkoffee.work@gmail.com; ORCID ID: 0000-0002-8857-2606.

Поступила в редакцию 7 марта 2020 г.

IMPROVING THE STRENGTH OF ABRASIVE WHEELS AND OPTIMIZING THE CONTROL OVER THE STRENGTH OF COMPOSITE ABRASIVE MATERIALS*

B.A. Chaplygin, *chba51@mail.ru*,

V.V. Shirokov, *shirokovvv@susu.ru*,

T.A. Lisovskaya, *lisovskaiata@susu.ru*,

R.A. Lisovskiy, *johnkoffee.work@gmail.com*

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The strength of abrasive wheels is one of the key factors affecting the performance of abrasive machining. The paper discusses ways to improve the strength of abrasive wheels. The stress-state mathematical model presented herein is a generalization of the existing models. It is used herein to find for the first time that there are numerous optimal combinations of the elastic modulus and reinforcing material density, which result in the same minimum value of the objective function. It is found out that increasing the radius of the reinforcing component while also optimizing the mechanical properties of its material may increase the permissible breaking speed of the wheel several times. We herein present a regression equation and a nomogram for finding the optimal combination of control factors.

Conventional methods for testing the mechanical properties of materials, which have been proven reliable for testing metals and alloys, are not as reliable for testing abrasive materials, as the test results they generate are not sufficiently stable or accurate. We therefore propose an alternative method that does not require any special equipment or special studies.

Keywords: abrasive tools, durability, composite abrasive materials, strength tests.

References

1. Krayevoy S.Yu. [Performance evaluation of cutting wheels]. *Abrazivnyy instrument i metalloobrabotka*. Chelyabinsk, SUSU Publ., 2002, pp. 132–135. (in Russ.)
2. Frank H., Mewes D., Schulz S. Strength of bonded abrasive wheels. *Ceram. Forum Int./Ber. DKG*, 1998, vol. 75, no. 1, pp. 44–49.
3. Marchenko S.V., Chaplygin B.A. [Study of the ultrasonic method for monitoring the mechanical characteristics of an abrasive tool]. *Abrazivnoye proizvodstvo*. Chelyabinsk, SUSU Publ., 2005, pp. 106–117. (in Russ.)
4. Abrashkevich Yu.D., Belikovich V.M., Leshchov E.S. Mechanical Strength of Reinforced Abrasive Parting-Off Wheels. *Sov. Eng. Res.*, 1986, 6.12, pp. 75–76.
5. Soler Ya.I., Van Le Nguyen. Selection of abrasive wheels by surface topography of parts from hardened steel 30ChGSA. *Journal of engineering research*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 191–208.
6. Soler Ya.I. [Study of surface microgeometry in plane polishing of hardened steels by high-porous abrasive round with the use of statistical methods]. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii*, 2004, no. 3, pp. 91–95. (in Russ.)
7. Torrance A. A., Badger J.A. Relation between the traverse dressing of vitrified grinding wheels and their performance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, Vol. 40 (12), pp. 1787–1811. DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00015-8
8. Sudakov N.V., Marchenko S.V. [On the question of the intensification of the process of preparing an abrasive molding mixture on a volcanic bond]. *Teoriya, tekhnologiya i oborudovaniye dlya proizvodstva abrazivnogo instrumenta*. Chelyabinsk, SUSU Publ., 2003, pp. 25–29. (in Russ.)

*Original Paper: Chaplygin BA, Shirokov VV, Lisovskaya TA, Lisovskiy RA. Improving the Strength of Abrasive Wheels and Optimizing the Control over the Strength of Composite Abrasive Materials. *MSF*, 2019; 946: 380–385. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.946.380.

9. Samodurova M.N., Barkov L.A., Latfulina Yu.S. High Velocity Compaction of Carbon Compositions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 115–121. DOI: 10.14529/met170314
10. Dyatlov V.N., Sherkunov V.G., Marchenko S.V., Chaplygin B.A. [On the issue of high abrasive wheels]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Engineering*, 2007, № 11 (83). (in Russ.)
11. Zhenzhong Zhang, et al. A novel technique for dressing metal-bonded diamond grinding wheel with abrasive waterjet and touch truing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 93 (9-12), pp. 3063–3073. DOI: 10.1007/s00170-017-0738-7
12. Jackson M.J., Mills B. Materials Selection Applied to Vitrified Alumina & CBN Grinding Wheels. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, vol. 108 (1), pp. 114–124. DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00829-3
13. Nguyen T., Zhang L.C. Performance of a new segmented grinding wheel system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, vol. 49 (3–4), pp. 291–296. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2008.10.015
14. Albagachiyev A.Yu., Yashkov V.A., Silin L.V. [On the issue of assessing the quality of the bearing surface when grinding with a team abrasive wheel]. *Mashinostroyeniye i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2012, no. 4, pp. 24–27. (in Russ.)
15. Nohara K., Yanagihara K., Ogawa M. Study on design of light-weight super-abrasive wheel. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 297, 012048. DOI: 10.1088/1757-899X/297/1/012048
16. Krzysztof Nadolny, Witold Habrat. Potential for improving efficiency of the internal cylindrical grinding process by modification of the grinding wheel structure – Part I: Grinding wheels made of conventional abrasive grains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2017, 231.4, pp. 621–632. DOI: 10.1177/0954408916637100
17. Chaplygin A.B. Assessment of Wear Resistance of Composite Materials and Grinding Wheels Made of Them. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 137–141. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160222

Received 7 March 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

К вопросу повышения прочности абразивных кругов и контроля прочности композиционных абразивных материалов / Б.А. Чаплыгин, В.В. Широков, Т.А. Лисовская, Р.А. Лисовский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 48–55. DOI: 10.14529/met200406

FOR CITATION

Chaplygin B.A., Shirokov V.V., Lisovskaya T.A., Lisovskiy R.A. Improving the Strength of Abrasive Wheels and Optimizing the Control over the Strength of Composite Abrasive Materials. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 48–55. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200406