

УДК 621.923

DOI: 10.12737/article_5aacd85759b3d2.20343595

В.М. Шумячер, д.т.н.,

(ФГБУ ВО Волгоградский государственный технический университет,
400005, Россия, Волгоград, пр. им. Ленина, 28),

E-mail: vms22@yandex.ru

А.В. Славин, д.т.н.,

(Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов,
105005, Россия, Москва, ул. Радио, д. 17),

E-mail: slavina@viam.ru

А.В. Кадильников, к.т.н.

(ФГБУ ВО Волгоградский государственный технический университет,
400005, Россия, Волгоград, пр. им. Ленина, 28)

E-mail: zakaz@intelectdom.ru

Проектирование абразивного инструмента на основе данных автоматизированного мониторинга процесса шлифования

Описан разработанный, изготовленный и апробированный авторами автоматизированный измерительный комплекс (АИК) «Шлифование», решающий задачу мониторинга процесса шлифования на всех этапах абразивной обработки и дающий возможность осуществления корректировки на всех этапах технологического процесса с учетом свойств абразивного инструмента, смазочно-охлаждающих технологических средств, а также режимов обработки. Принцип работы автоматизированной системы основан на статистическом анализе выходных энергетических параметров работы технологического оборудования.

Ключевые слова: шлифование; диспергирование; удельная энергия диспергирования; структурно-механические свойства.

V.M. Shumyacher, D. Eng.,

(FSBI HE Volgograd State Technical University, 28, Lenin Avenue, Volgograd, Russia 400005)

A.V. Slavin, D. Eng.,

(All-Russian Research Institute of Aircraft Materials, 17, Radio Str., Moscow, Russia 105005)

A.V. Kadilnikov, Can. Eng.

(FSBI HE Volgograd State Technical University, 28, Lenin Avenue, Volgograd, Russia 400005)

Abrasive tool design based on automated monitoring data of grinding

An automated measuring complex (AMC) "Grinding" developed, manufactures and approbated is described, which solves a problem of grinding process monitoring at all stages of abrasion and gives an opportunity to carry out an adjustment at all stages of an engineering process taking into account both the properties of an abrasive tool, cooling engineering mixtures, and also machining modes. The principle of the automated system operation is based on the statistical analysis of output energy data of manufacturing equipment operation.

Keywords: grinding; dispersion; specific energy of dispersion; structural and stress-strain properties.

Повышение качества выпускаемой продукции на предприятиях машиностроительной отрасли связано с постоянным ростом требо-

ваний к точности геометрии и размеров деталей, качеству их рабочих поверхностей.

В этой связи особенно важной проблемой

является повышение эффективности финишных процессов обработки, в ходе реализации которых достигаются заданные параметры деталей машины и механизмов. В отечественной индустрии до 30 % металлообработки осуществляется абразивным инструментом. При производстве подшипников, деталей двигателей, топливной аппаратуры до 70 % составляет абразивная обработка. Как показывает анализ зарубежной практики, объем абразивной обработки достигает более 50 % в технологии производства машин и механизмов.

Отечественными и зарубежными учеными выполнено значительное число исследований в области абразивной обработки, которые позволили сформировать научные основы шлифования, разработать модели управления этими процессами [1].

Вместе с этим отсутствует методология проектирования абразивного инструмента, позволяющая вести целенаправленный выбор характеристик шлифовального круга (твердость, структура, пористость материала, форма абразивных зерен, связки), обеспечивающего требуемые технологические показатели: режущая способность, стойкость, шероховатость абразивной поверхности.

В отсутствии обоснованной методологии проектирования абразивного инструмента с требуемыми показателями потребители вынуждены применять универсальные шлифовальные круги, выпускаемые отечественными предприятиями, которые не позволяют достигнуть нужного результата.

При выборе импортного абразивного инструмента отечественные потребители сталкиваются с серьезной проблемой, сущность которой заключается в том, что ведущие мировые производители практикуют специализацию под конкретную операцию, выполняемую на заданном оборудовании.

Вследствие этого резко возрастают издержки на предприятиях, эксплуатирующих абразивный инструмент, снижается производительность и качество обработки. Предприятия абразивной отрасли при выполнении заказа на выпуск шлифовальных кругов имеют минимум информации об условиях его эксплуатации и ориентируются на рекомендации по изготовлению универсальной продукции.

Попытки производителей шлифовальных кругов наладить их производство на основе результатов стендовых испытаний в значительной степени неуспешны, т.к. расхождение в показателях абразивной обработки в лабораторных и производственных условиях весьма

значительно. Шлифовальный круг является сложной многопараметрической системой, которая взаимодействует с обрабатываемой заготовкой и обеспечивает заданный съем металла, шероховатость поверхности и требуемые физико-механические показатели: микротвердость, износостойкость, виброустойчивость. Согласно существующих представлений основой составляющей абразивного инструмента является абразивный материал, от взаимодействия которого с обрабатываемой поверхностью заготовки зависит эффективность обработки.

Информация о принципах выбора структурно-механических характеристик шлифовального круга: твердость, номер структуры, вид связки носит размытый общий характер.

На основании изложенного можно констатировать, что разработка научных основ проектирования абразивного инструмента с заданными эксплуатационными показателями является важной и актуальной проблемой, требующей решения в короткий срок.

Работы, выполняемые за последние 30 лет позволили получить данные о математическом описании взаимосвязей: характеристики поверхностного слоя круга (ПС) – структурные параметры его матрицы, математических моделей связей: показатели процесса шлифования – характеристика поверхностного слоя круга – параметры структуры матрицы [2]. В работах описана теория взаимодействия абразивных зерен и связки при изготовлении абразивных инструментов.

Предпринята попытка описания основ создания высокоэффективных абразивных инструментов на основе представления физико-химической механики материалов [3, 4].

Разработаны феноменологические модели структурообразования черепка шлифовального круга, установлены закономерности, возникающих при эксплуатации и термообработке инструмента, напряжений и трещинообразования.

Авторами в работе [5] показано, что в зависимости от требований к показателям эксплуатации инструмента должны быть реализованы те или иные структурно-механические характеристики шлифовального круга. Для профильного шлифования деталей топливной, гидравлической, пневматической аппаратуры необходимы шлифовальные круги с высокой твердостью и плотностью, имеющие хорошую кромкостойкость. Заточка лезвийного инструмента реализуется кругами с низкой твердостью и плотностью.

Глубинное шлифование с высокими скоростями реализуется при использовании инструмента с низкой твердостью, но высокопористого и прочного. Доводочные процессы выполняются инструментом с высокой упругостью, прочностью и износостойкостью. Согласно существующим представлениям, формирование структуры абразивного инструмента реализуется на операциях формования и термообработки. При формовании заготовки шлифовального круга наряду с формообразованием абразивной смеси происходит распределение ее составляющих: связки и абразивных зерен, т.е. фиксация структуры. Между частицами дисперсной фазы образуются коагуляционные обратимые контакты, которые под воздействием температуры обжига трансформируются в конденсационные (необратимые). В результате инструмент приобретает окончательные структурно-механические параметры: плотность, прочность, пористость.

На основании проведенного анализа исследований процессов абразивной обработки можно отметить, что реализуемый сегодня технологический подход по выбору рациональных характеристик шлифовального круга, базирующийся на проведении стендовых испытаний в широком диапазоне режимных факторов шлифования образцами, выпускаемыми на основании рекомендаций, не учитывает изменений, происшедших в станкостроении и абразивной промышленности.

На практике, на конкретной операции шлифования при заданных режимах методом перебора инструмента с разными характеристиками, выбирается шлифовальный круг, обеспечивающий требуемые производительность и качество. Вполне очевидно, что данный метод весьма дорогостоящий, а главное не позволяет ответить на запросы производителей абразивного инструмента, которые хотят располагать информацией о требуемых характеристиках шлифовального круга.

Для решения этой проблемы необходимо разработать надежный метод и средства мониторинга процесса шлифования в реальном производстве. Информация, полученная при мониторинге реального процесса, должна позволить назначать требуемые характеристики инструмента, обеспечивающие производительность и качество шлифования.

Нормирование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов является сложной задачей вследствие широкого спектра видов шлифования, реализуемых на различных станках. Для решения задачи мониторинга

процесса шлифования с учетом указанных выше особенностей в Научно-технологическом центре ВНИИАШ авторами был разработан и изготовлен автоматизированный измерительный комплекс (АИК) «Шлифование». Данный комплекс позволяет вести мониторинг процесса шлифования на реальном оборудовании в условиях производства. В качестве показателя, характеризующего работу шлифовального круга, была принята удельная энергия диспергирования, определяемая как отношение затраченной на удаление заданного припуска энергии к его объему. Использование этого показателя доказано многочисленными исследованиями процессов обработки, изнашивания разных материалов [6].

АИК «Шлифование» состоит из датчика тока двигателя привода шлифовального круга, бесконтактных датчиков продольного и поперечного перемещения инструмента. Датчики подключены к контроллеру, который соединен с сенсорной панелью.

Программный комплекс АИК позволяет рассчитывать значения удельной энергии диспергирования E металла за цикл обработки детали с временным шагом 0,01 с и выводить на панель график функции $E = f(t)$, а также износа инструмента.

На рис. 1 представлен вид протоколов исходных данных, выводимых на сенсорную панель.

В результате проведения мониторинга процесса шлифования с помощью АИК «Шлифование» представляется возможным получить информацию о значении удельной энергии диспергирования, характере ее изменения в течение цикла обработки.

Взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью приводит к воздействию на рабочую поверхность инструмента высокочастотных знакопеременных нагрузок. Гетерогенность структуры шлифовального круга является причиной непостоянства его прочности в разных частях рабочей поверхности. Как результат происходит развитие микротрещин в мостиках связки и абразивных зернах.

Период стойкости шлифовального круга между правками обеспечивается соотношением между процессами затупления абразивных зерен и обновления их режущих граней за счет микроскола изношенной части абразива под действием сил шлифования. Абразивный инструмент должен обладать структурой с определенным соотношением прочности абра-

живного зерна и силой его удержания в связке. В связи с этим необходимо обеспечить контроль и управление процессом развития под нагрузкой микротрещин в матрице инструмента и в абразивных зернах.

В рамках кинетической модели разрушение композитов начинается при достижении критического напряжения [7], оцениваемого по зависимости:

$$K_{Ic} = \lambda_1 (1 - \Pi) K_{Ic_0} + \lambda_2 \Pi \sigma \sqrt{d_0} \quad (1)$$

где λ_1 и λ_2 – константы; Π – объемная доля пор в композите; d_0 – средний диаметр пор; K_{Ic_0} и σ – вязкость разрушения и прочность частиц дисперсной фазы (зерен).

Как следует из (1) увеличение вязкости разрушения и прочности абразивных зерен приводит к росту K_{Ic} .

В соответствии с ранее разработанной методологией оценки физико-механических характеристик абразивных зерен и значительным объемом экспериментальных данных представляется возможным прогнозировать значения K_{Ic} для материала шлифовальных кругов [8].

Эффективная работа разрушения пористого композита определяется из зависимости [7]:

$$\gamma_F = \gamma_{F_0} \exp(-c\Pi) \quad (2)$$

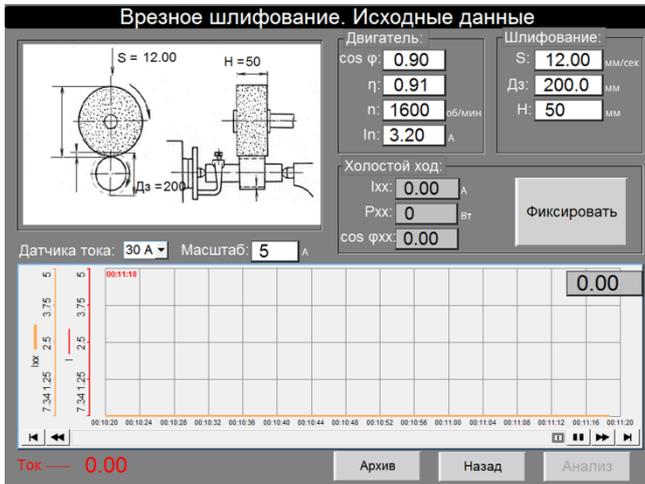
где γ_{F_0} – удельная работа разрушения беспористого тела; c – константа.

В зависимости от структурно-механических характеристик абразивного инструмента: вязкости разрушения, эффективной работы разрушения, прочности связки и абразивного зерна, пористости и размера пор преобладает один из видов разрушения шлифовального круга при его эксплуатации: развитие межзеренных трещин в мостиках связки или контакте ее с абразивом или разрушение самих зерен. Тепло, выделяющееся в контакте «круг – заготовка» передается композиту, что вызывает развитие растягивающих напряжений, а так как коэффициенты термического растяжения (КТР) зерна и связки не равны, в матрице развиваются микротрещины.

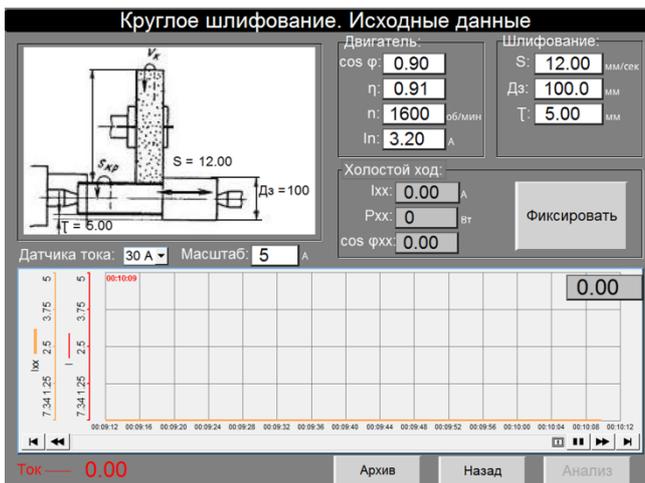
Согласно нашим исследованиям, деформация абразивного круга в пределах дуги контакта с обрабатываемой поверхностью можно рассчитать с помощью зависимости

$$\varepsilon = \frac{3 - \Pi(1 - \Pi)}{36\mu_0(1 - \Pi)^2} \left(\frac{\Pi}{1 - \Pi} + 4 \right) \sigma_Z \quad (3)$$

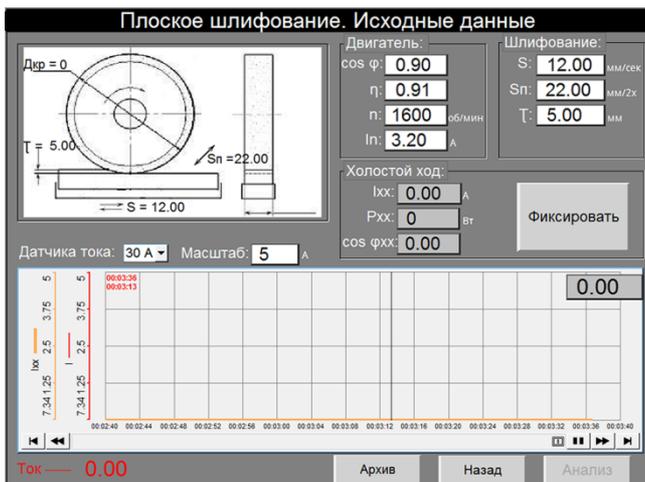
где μ_0 – модуль упругости связки; σ_Z – напряжение от действия составляющей силы резания P_Z .



а)



б)



в)

Рис. 1. Протоколы исходных данных АИК: а – врезное шлифование; б – круглое шлифование; в – плоское шлифование

Полученные с помощью АИК значения энергии диспергирования металла E и износа круга используются для определения структурно-механических характеристик инструмента: модуля упругости связки, критического коэффициента интенсивности напряжений (1).

Экспериментальная проверка предложенной методологии проектирования шлифовального круга на основе мониторинга процесса шлифования с помощью автоматизированного измерительного комплекса (АИК) была реализована при шлифовании отверстия кольца подшипника из стали ШХ15 кругами:

1.57×63×2025AF80J6V80 м/с,
1.57×63×2025AF80H7V80 м/с,
1.57×63×2025AF80H6V80 м/с.

В результате проведенных испытаний установлено, что не один из испытанных кругов не обеспечивает достижение требуемых качества и производительности.

Обработка данных мониторинга позволила рассчитать структурно-механические характеристики кругов, которые обеспечат требования техпроцесса.

Расчет величины деформации ε (3), эффективной работы разрушения композита (2), коэффициента интенсивности напряжений (1) позволил, используя данные работы [8], рассчитать рецептуру высокоэффективного круга: материал абразивного зерна, зернистость, фракции зернового состава, структуры, твердость, количество и вид порообразователя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Байкалов, А.К. Введение в теорию шлифования материалов. – Киев: Наукова думка, 1978. – 207 с.
2. Курдюков, В.И. Научные основы проектирования, изготовления и эксплуатации абразивного инструмента: дисс.... докт. техн. наук. – Курган, 2000. – 496 с.
3. Курдюков, В.И. Научные основы проектирования абразивных инструментов / В.И. Курдюка. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2005. – 159 с.
4. Носов, Н.В. Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путем направленного регулиро-

вания их функциональных показателей: дисс.... докт. техн. наук. – Самара, 1997. – 452 с.

5. Славин, А.В., Шумячер, В.М. Механо-химические процессы взаимодействия абразивного инструмента и заготовки при шлифовании металла // Технология машиностроения. – 2008. – №1. – С.29–32.

6. Поверхностная прочность материалов при трении / Под общ. ред. д-ра техн. наук Б.И. Костецкого. – Киев: Техніка. – 1976. – 285 с.

7. Красулин, Ю.Л., Баринов, С.М., Иванов, В.С. Структура и разрушение материалов из порошков тугоплавких соединений. – М.: Наука, 1985. – 146 с.

8. Пушкарев, О.И., Шумячер, В.М. Методы и средства контроля физико-механических характеристик абразивных материалов: монография. – Волгоград: ВолгГАСУ. 2004. – 144 с.

REFERENCES

1. Baikalov, A.K. *Introduction to Theory of Material Grinding*. – Kiev: Scientific Thought, 1978. – pp. 207.
2. Kurdyukov, V.I. Scientific fundamentals of design, manufacturing and operation of abrasive tool: *D. Eng. Degree Thesis*. – Kurgan, 2000. – pp. 496.
3. Kurdyukov, V.I. *Scientific Fundamentals of Abrasive Tool Design* / V.I. Kurdyukov. – Kurgan: Publishing House of Kurgan State University, 2005. – pp. 159.
4. Nosov, N.V. Abrasive tools efficiency and quality increase by directed adjustment of their functional indices: *D. Eng. Degree Thesis*. – Samara, 1997. – pp. 452.
5. Slavin, A.V., Shumyacher, V.M. Mechanical and chemical processes of abrasive tool and blank interaction at metal grinding // *Engineering Techniques*. – 2008. – No.1. – pp. 29–32.
6. *Material Surface Strength at Friction* / under the general editorship of B.I. Kostetsky, D. Eng. – Kiev: Technique. – 1976. – pp. 285.
7. Krasulin, Yu.L., Barinov, S.M., Ivanov, V.S. *Structure and Destruction of Refractory Powder Compound Materials*. – M.: Science, 1985. – pp. 146.
8. Pushkaryov, O.I., Shumyacher, V.M. *Methods and Means of Abrasive Physical and Stress-Strain Characteristics Control*: monograph. – Volgograd: VolgaSASU. 2004. – pp. 144.

Рецензент д.т.н. В.А. Носенко

