

НГТУ



НЭТИ

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

 Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov


Моделирование конструкций сборного абразивного инструмента

Дмитрий Лобанов^{1, a, *}, Вадим Скиба^{2, b}, Иван Голушов^{1, c}, Валентин Смирнов^{1, d},
 Егор Зверев^{2, e}

¹ Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, пр. Московский, 15, г. Чебоксары, 428015, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>, lobanovdv@list.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeebea_vadim@mail.ru;

^b <https://orcid.org/0000-0001-9757-1368>, ivan.golyushov.97@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0003-2721-9849>, vms53@inbox.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0003-4405-6623>, zverev@corp.nstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.047

История статьи:

Поступила: 07 марта 2024

Рецензирование: 21 марта 2024

Принята к печати: 27 апреля 2024

Доступно онлайн: 15 июня 2024

Ключевые слова:

Абразивный инструмент

Сборный шлифовальный круг

Конструкция инструмента

Моделирование

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00945, <https://rscf.ru/project/23-29-00945/>

Благодарности

Исследования выполнены на оборудовании ИЦ «Проектирование и производство высокотехнологичного оборудования» и ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из самых распространенных видов финишной обработки является шлифование. Шлифование позволяет получать поверхности с требуемыми качественными параметрами, это один из доступных и производительных способов при обработке высокопрочных и труднообрабатываемых материалов. Наиболее широкое применение в машиностроении для обработки изделий находят шлифовальные круги. Использование данного абразивного инструмента способствует увеличению производительности обработки за счет обеспечения съема значительного слоя материала. Кроме того, шлифовальные круги имеют более продолжительный срок службы и находят широкое применение при реализации гибридных технологий, основанных на совмещении механического (абразивного), электрического, химического и теплового воздействий в различном их сочетании. Разнообразие форм корпуса инструмента и видов абразива позволяет использовать круги в самых разнообразных сферах производства. Одним из способов анализа и проектирования нового инструмента является численное моделирование. В рамках данной научной работы было выбрано графовое моделирование, поскольку оно более наглядно и понятно отображает будущую конструкцию инструмента, что позволяет упростить процесс концептуального проектирования объекта по сравнению с другими видами моделирования. **Целью работы** является разработка методики графового моделирования сборного абразивного инструмента, позволяющей повысить эффективность инструментального обеспечения производства. **Методика исследований.** Теоретические исследования выполнены с использованием основных положений системного анализа, геометрической теории формирования поверхностей, проектирования режущего инструмента, теории графов, математического и компьютерного моделирования. Для решения вышеописанной задачи нами были изучены имеющиеся конструкции сборных шлифовальных кругов. Производился анализ видов абразивной части, методов закрепления абразивной режущей части на корпусе круга, применяемых материалов для изготовления корпуса, характеристик корпуса круга и схем крепления. **Результаты и обсуждения.** Разработана методика моделирования, основанная на теории графов. В результате анализа известных конструкций сборных абразивных инструментов выявлены их основные особенности, позволяющие описать конструкцию кругов. На основании полученных данных представлена обобщенная графовая модель сборного абразивного инструмента, интегрирующая в себе все составляющие компоненты и отображающая условную конструктивную связь между ними. Произведена апробация разработанной методики на примере двух конструкций сборных шлифовальных кругов. В процессе теоретических исследований было установлено, что эффективность проектирования сборного абразивного инструмента может быть повышена в 2–4 раза за счет применения разработанной методики моделирования.

Для цитирования: Моделирование конструкций сборного абразивного инструмента / Д.В. Лобанов, В.Ю. Скиба, И.С. Голушов, В.М. Смирнов, Е.А. Зверев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 158–173. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-158-173.

Введение

С каждым годом повышаются требования к качеству продукции, выпускаемой машиностроительными предприятиями. Это, в свою очередь, приводит к внедрению в производство большего количества традиционных и гибридных технологий чистовой и доводочной обра-

*Адрес для переписки

Лобанов Дмитрий Владимирович, д.т.н., профессор
 Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова,
 пр. Московский, 15,
 428015, г. Чебоксары, Россия
 Тел.: +7 908 303-47-45, e-mail: lobanovdv@list.ru

ботки. Одним из самых распространенных видов финишной обработки является шлифование, которое в процессе формообразования обеспечивает получение поверхности с требуемыми качественными параметрами и представляет собой доступный и производительный способ обработки высокопрочных и труднообрабатываемых материалов [1–6].

Основу номенклатуры абразивных инструментов, которые изготавливаются и применяются в производственных процессах, составляют шлифовальные и отрезные круги, головки, бруски, а также другие, более редкие типы конструкций инструментов [7].

В машиностроении шлифовальные круги являются одними из наиболее востребованных инструментов для обработки деталей благодаря их высокой эффективности. Использование такого инструмента обеспечивает возможность съема значительного слоя материала. Кроме того, шлифовальные круги имеют более продолжительный срок службы и находят широкое применение в современных гибридных технологиях [8–17], совмещающих в себе механическое (абразивное), электрическое, химическое и тепловое воздействие в различном их сочетании [18–31], что позволяет достигать уникальных результатов в обработке. Благодаря разнообразию форм и типов абразивных материалов шлифовальные круги могут быть адаптированы под широкий спектр производственных задач и использоваться в самых различных сферах производства.

Выбор сборных шлифовальных кругов в качестве объекта исследований обусловлен рядом стратегических преимуществ, которые делают их применение выгодным и эффективным решением в различных областях промышленности.

1. Экономия абразивного материала. В сборных шлифовальных кругах основная часть состоит из корпуса, который может быть изготовлен из стали или алюминиевых сплавов. Это означает, что абразивный материал используется лишь в той части, которая непосредственно участвует в процессе шлифовки. Следовательно, более дорогие и качественные абразивные материалы применяются там, где это действительно необходимо, что способствует снижению расходов на абразивы.

2. Возможность повторного использования корпуса. Благодаря тому, что корпус сборного шлифовального круга не изнашивается в процессе эксплуатации (не находится непосредственно в контакте с обрабатываемой поверхностью), его можно использовать повторно, т. е. после износа абразивной части корпус можно оснастить новой, что снижает необходимость в полной замене круга и способствует экономии конструкционных материалов корпуса.

3. Гибкость замены абразивной части. Ещё одним значимым преимуществом является возможность варьирования абразива или его зернистости в зависимости от текущих задач с сохранением того же корпуса круга. Это делает сборные круги чрезвычайно гибкими и универсальными, а также поддерживает высокую эффективность их применения для выполнения разнообразных операций обработки, минимизируя необходимость использования специализированных инструментов [32–35].

Учитывая вышесказанное, сборные шлифовальные круги являются предпочтительным выбором для многих производственных задач. Их экономическая и технологическая эффективность делает эти инструменты приоритетными в условиях постоянно растущих требований к качеству обработки для сокращения производственных издержек и увеличения долговечности инструментов.

Одним из перспективных путей совершенствования сборных шлифовальных кругов является разработка конструкций, которые позволяют снизить выделение тепла в зоне обработки при шлифовании. Конструкции кругов с прерывистой рабочей частью способны снизить температуру в зоне обработки до приемлемых значений, при которых не происходит структурных и фазовых изменений в обрабатываемом материале [36–41].

Выбор абразивного круга играет немаловажную роль в процессе обработки детали [42–44], так как от его правильного выбора зависят производительность, качество обработанной поверхности, стоимость инструмента и, как следствие, изготавливаемой детали.

Однако в последнее время номенклатура сборных шлифовальных кругов стала настолько большой, что подобрать подходящий инструмент под конкретную задачу становится доста-

точно сложно. Для устранения данной проблемы требуется скрупулёзный анализ и верификация большого объема собранной информации. Иногда единственно возможным решением становится разработка новой уникальной конструкции инструмента, обеспечивающего требуемый результат.

Численное моделирование играет ключевую роль в анализе и разработке новых инструментов, оно включает в себя различные методы [45], каждый из которых имеет свои преимущества и области применения. В нашем исследовании в качестве предпочтительного метода мы выбрали графовое моделирование [46], поскольку созданная обобщенная модель позволяет не только эффективно анализировать и визуализировать взаимосвязи и зависимости между различными частями проектируемого абразивного инструмента, но и упрощает процесс идентификации ключевых элементов и их функционального назначения.

Целью работы является разработка методики графового моделирования сборного абразивного инструмента, позволяющей повысить эффективность инструментального обеспечения производства.

Методика исследований

Теоретические исследования выполнены с использованием основных положений системного анализа, геометрической теории формирования поверхностей, конструирования режущего инструмента, теории графов, математического и компьютерного моделирования.

При укомплектовании производственного процесса шлифовальными кругами выбор конструктивных особенностей абразивного инструмента осуществляется на разных этапах:

- 1) выбор абразивного материала в зависимости от поставленной задачи;
- 2) поиск необходимого типа профиля круга с учетом его промышленного назначения;
- 3) разработка новой конструкции сборного шлифовального круга.

Достижение требуемых показателей качества обрабатываемой поверхности и производительности в процессе шлифования в большинстве своем зависит от применяемого круга и его характеристик: сочетания обрабатываемого

и абразивного материалов, размеров, особенностей конструкции круга, а также условий и режимов обработки. Каждая из вышеописанных характеристик оказывает определенное влияние на процесс обработки изделия.

Особое влияние на процесс шлифования и достижение требуемых качественных показателей изделия оказывают выбор абразивного материала и определение оптимальной зернистости. При этом важно сохранить высокую производительность процесса шлифования [47–49].

Использование моделирования конструктивного решения обеспечивает возможность проведения выбора и анализа инструмента на различных этапах конструкторской, технологической и инструментальной подготовки производства. Нами была разработана методика моделирования, основанная на теории графов, с целью эффективного решения поставленных задач.

Для решения вышеописанной задачи нами были изучены существующие конструкции сборных шлифовальных кругов. Осуществлен анализ видов абразивной части, методов закрепления абразивной режущей части на корпусе круга, применяемых материалов для изготовления корпуса, характеристик корпуса круга и схем крепления [50]. В результате проведенного анализа выявлены основные элементы, которые позволят описать конструктивные особенности сборного шлифовального круга.

Абразивная часть шлифовального круга описывается следующими элементами: конструкция исполнения абразивной части – цельная или сегментная; размерные характеристики абразивной части, позволяющие определить размеры и точность изготовления шлифовальных абразивных элементов; абразивный материал; твердость круга; зернистость; связка; форма элементов и их количество.

Корпусную часть характеризуют тип профиля, размерные параметры корпуса, материал корпуса (стальные и алюминиевые сплавы), наличие или отсутствие покрытия.

Крепежная часть характеризуется способом крепления: вид соединения абразивной части с корпусной частью; наличие либо отсутствие регулировочных и крепежных винтов, их количество (при наличии); размерные параметры крепежной части.

Помимо этого, в модели имеется информация о назначении круга, классе неуравновешенности, классе точности, максимальной скорости, а также об изготовителе.

Исходя из изученных данных нами построена обобщенная графовая модель конструкций сборного шлифовального инструмента, содержащая все составляющие компоненты, которые входят в конструкции различных сборных шлифовальных кругов, и отображающая условную конструктивную связь.

Конструкция шлифовального круга представляет собой систему отдельных частей конструкции круга, взаимосвязанных между собой компонентов, и представлена в виде ориентированного графа

$$\Gamma = (X, E),$$

где X – вершины, E – иллюстрация множества X в X или взаимосвязи между вершинами графа (представленная линиями соединения).

Связь между элементами круга и их характеристиками показана вершинно-реберными связями $\{X_1, l_{x1}\}$, $\{X_2, l_{x2}\}$, ... и т. д. Каждое ребро связанного графа представляет собой множество вершин, которое описано подмножеством вершин и подмножеством ребер.

Ребро графа l_i является набором вершин графа $l_i X_i$ и одновременно состоит из элементов X_1, X_2, \dots, X_n , которые также могут быть множествами (рис. 1). Таким образом, $l_i = \bigcup_{i=1}^n X_i$.

Рассмотрим ориентацию ребер и вершин графа $\Gamma = (X, E)$.

Шлифовальный круг в нашем случае показан в виде следующих частей и характеристик: абразивной части (вершина X_1), корпуса (вершина X_2), крепления (вершина X_3), класса неуравновешенности (вершина X_4), класса точности (вершина X_5), максимальной скорости (вершина X_6), изготовителя круга (вершина X_7), прочих параметров (дополнения, примечания – вершина X_8) и иных элементов (вершины $X_9 \dots X_n$). Эта совокупность представлена множеством l_X :

$$l_X = \bigcup_{i=1}^n X_i.$$

Абразивная часть (вершина X_1) описана параметрами l_{X_1} , которые являются вершинами ребра: X_{11} – конструкция исполнения абразивной части; X_{12} – геометрические размеры; X_{13} – абразивный материал; X_{14} – зернистость; $X_{nr} X_1$ – дру-

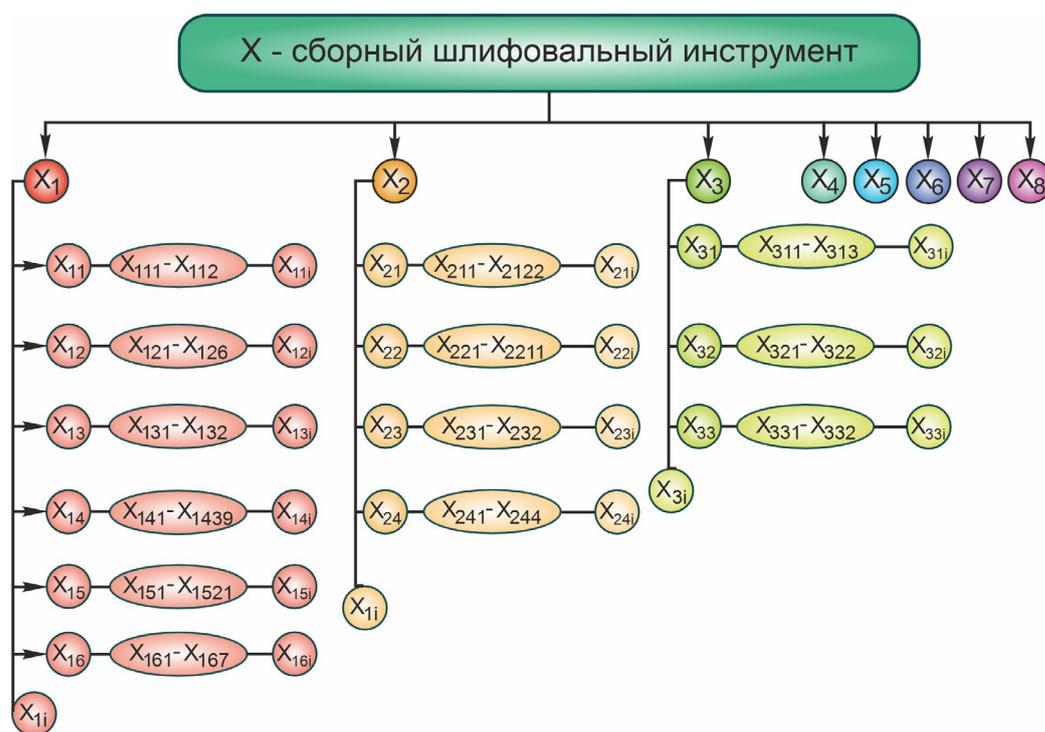


Рис. 1. Графовая модель сборного круга
Fig. 1. Graph-based model of a modular wheel

гие параметры. Эта часть представлена множеством l_{X_1} :

$$l_{X_1} = \bigcup_{i=1}^n X_{1i}.$$

Конструкция исполнения абразивной части (вершина X_{11}) описана параметрами, которые являются вершинами ребра $l_{X_{11}}$: X_{111} – цельная режущая часть; X_{112} – прерывистая (сегментная); $X_{nt}X_{11}$ – иные варианты исполнения. Эта часть представлена в виде множества $l_{X_{11}}$:

$$l_{X_{11}} = \bigcup_{i=1}^n X_{11i}.$$

Размеры абразивной части (вершина X_{12}) описаны параметрами, которые являются вершинами графа $l_{X_{12}}$: X_{121} – форма вставки; X_{122} – размеры вставки; X_{123} – высота абразивного слоя; X_{124} – ширина абразивного слоя; X_{125} – форма абразивного слоя; X_{126} – конструкция вставки; $X_{nt}X_{12}$ – другие параметры. Эта совокупность представлена в виде множества $l_{X_{12}}$:

$$l_{X_{12}} = \bigcup_{i=1}^n X_{12i}.$$

Абразивный материал (вершина X_{13}) целесообразно представить в виде следующих вариантов, являющихся вершинами графа $l_{X_{13}}$: X_{131} – природные (естественные); X_{1311} – алмаз; X_{1312} – корунд; X_{1313} – наждак; X_{1314} – пемза; X_{1315} – кварц; X_{132} – искусственные (синтетические); X_{1321} – синтетический алмаз; X_{1322} – карбид кремния (карборунд); X_{1323} – карбид бора; X_{1324} – эльбор; X_{1325} – кубический нитрид бора; X_{1326} – электрокорунд; X_{1327} – нормальный электрокорунд; X_{1328} – белый электрокорунд; X_{1329} – монокорунд; X_{13210} – циркониевый электрокорунд; X_{13211} – легированный электрокорунд. Эта совокупность представлена в виде множества $l_{X_{13}}$:

$$l_{X_{13}} = \bigcup_{i=1}^n X_{13i}.$$

Зернистость (вершина X_{14}) представлена различными вариантами исполнения, являющимися вершинами графа $l_{X_{14}}$: X_{141} – F4; X_{142} – F5; X_{143} – F6; X_{144} – F7; X_{145} – F8; X_{146} – F10; X_{147} –

F12; X_{148} – F14; X_{149} – F16; X_{1410} – F20; X_{1411} – F22; X_{1412} – F24; X_{1413} – F30; X_{1414} – F36; X_{1415} – F40; X_{1416} – F46; X_{1417} – F54; X_{1418} – F60; X_{1419} – F70; X_{1420} – F80; X_{1421} – F90; X_{1422} – F100; X_{1423} – F120; X_{1424} – F150; X_{1425} – F180; X_{1426} – F220; X_{1427} – F230; X_{1428} – F240; X_{1429} – F280; X_{1430} – F320; X_{1431} – F360; X_{1432} – F400; X_{1433} – F500; X_{1434} – F600; X_{1435} – F800; X_{1436} – F1000; X_{1437} – F1200; X_{1438} – F1500; X_{1439} – F2000; $X_{nt}X_{14}$ – другие варианты. Эта совокупность представлена в виде множества $l_{X_{14}}$:

$$l_{X_{14}} = \bigcup_{i=1}^n X_{14i}.$$

Твердость круга (вершина X_{15}) со стандартом DIN ISO 525 описывается следующими параметрами, служащими вершинами ребра $l_{X_{15}}$: X_{151} – F; X_{152} – G; X_{153} – H; X_{154} – I; X_{155} – J; X_{156} – K; X_{157} – L; X_{158} – M; X_{159} – N; X_{1510} – O; X_{1511} – P; X_{1512} – Q; X_{1513} – R; X_{1514} – S; X_{1515} – T; X_{1516} – U; X_{1517} – X; X_{1518} – Y; X_{1519} – Z; X_{1520} – V; X_{1521} – W; $X_{nt}X_{15}$ – другие варианты. Эта совокупность представлена в виде множества $l_{X_{15}}$:

$$l_{X_{15}} = \bigcup_{i=1}^n X_{15i}.$$

Вид связки (вершина X_{16}): X_{161} – металлические, $X_{1611} \dots X_{161n}$ – маркировка; X_{162} – керамические, $X_{1621} \dots X_{162n}$ – маркировка; X_{163} – силикатные, $X_{1631} \dots X_{163n}$ – маркировка; X_{164} – магнезиальные, $X_{1641} \dots X_{164n}$ – маркировка; X_{165} – бакелитовая, $X_{1651} \dots X_{165n}$ – маркировка; X_{166} – вулканитовая, $X_{1661} \dots X_{166n}$ – маркировка; X_{167} – грифталева, $X_{1671} \dots X_{167n}$ – маркировка. Эта совокупность параметров представлена в виде множества $l_{X_{16}}$:

$$l_{X_{16}} = \bigcup_{i=1}^n X_{16i}.$$

Для кругов с абразивным материалом алмазом (синтетическим или природным) учитываются также концентрация алмаза (вершины X_{13111} и X_{13211}) и параметры, образующие вершину графа $l_{X_{13111}}$: X_{131111} – 25 %; X_{131112} – 50 %; X_{131113} – 75 %; X_{131114} – 100 %; X_{131115} – 150 %; $X_{nt}X_{13111}$ – другие варианты.

Корпус сборных кругов (ГОСТ Р 52781–2007) (вершина X_2) описывается следующими параметрами, образующими вершины ребра l_{X_2} : X_{21} –

тип профиля; X_{22} – размерные параметры корпуса; X_{23} – материал корпуса; X_{24} – износостойкое покрытие и упрочнение; $X_{nl}X_{21}$ – другие параметры. Эта совокупность описывается множеством I_{X_2} :

$$I_{X_2} = \bigcup_{i=1}^n X_i.$$

X_{21} – тип профиля, где X_{211} – тип 1; X_{212} – тип 2; X_{213} – тип 3; X_{214} – тип 4; X_{215} – тип 5; X_{216} – тип 6; X_{217} – тип 7; X_{218} – тип 10; X_{219} – тип 11; X_{21101} – тип 12; X_{21102} – тип 14; X_{2111} – тип 20; X_{2112} – тип 21; X_{2113} – тип 22; X_{2114} – тип 23; X_{2115} – тип 24; X_{2116} – тип 25; X_{2117} – тип 26; X_{2118} – тип 35; X_{2119} – тип 36; X_{2120} – тип 37; X_{2121} – тип 38; X_{2122} – тип 39. Типы профиля описываются множеством $I_{X_{21}}$:

$$I_{X_{21}} = \bigcup_{i=1}^n X_{21i}.$$

X_{22} – размерные параметры корпуса: X_{221} – наружный диаметр круга; X_{222} – диаметр посадочного отверстия; X_{223} – диаметр опорного торца; X_{224} – толщина базовой части корпуса; X_{225} – диаметр внутренней выточки; X_{226} – радиус; X_{227} – внешний угол корпусного конуса; X_{228} – высота круга; X_{229} – высота рабочей части; X_{2210} – ширина рабочей части; X_{2211} – рабочий угол. Эта совокупность параметров представлена в виде множества $I_{X_{22}}$:

$$I_{X_{22}} = \bigcup_{i=1}^n X_{22i}.$$

X_{23} – материал корпуса: X_{231} – стали конструкционные; X_{2311} – сталь 3; X_{2312} – Ст-20; X_{2313} – Ст-25; X_{2314} – Ст-30; X_{2315} – Ст-35; X_{2316} – Ст-45; X_{2317} – У8А; X_{2318} – 9ХФ; X_{232} – алюминиевые сплавы; X_{2321} – АК6; X_{2322} – Д16. Перечисленные параметры описываются множеством $I_{X_{23}}$:

$$I_{X_{23}} = \bigcup_{i=1}^n X_{23i}.$$

X_{24} – износостойкое покрытие и упрочнение: X_{241} – вид упрочнения; X_{242} – глубина упрочнения; X_{243} – материал покрытия; X_{244} – толщина покрытия; $X_{nl}X_{24}$ – другие варианты. Эта совокупность параметров представлена в виде множества $I_{X_{24}}$:

$$I_{X_{24}} = \bigcup_{i=1}^n X_{24i}.$$

Крепление абразивной части сборных шлифовальных кругов (вершина X_3) описывается параметрами, образующими вершину графа I_{X_3} :

X_{31} – вид соединения абразивной части с корпусом, X_{32} – регулировочные винты, X_{33} – крепежные винты. Крепежная часть представлена в виде множества I_{X_3} :

$$I_{X_3} = \bigcup_{i=1}^n X_{3i}.$$

X_{31} – вид соединения абразивной части с корпусом: X_{311} – механическое; X_{3111} – крепление радиальным винтом; X_{3112} – крепление осевой гайкой; X_{3113} – крепление осевым болтом; X_{3114} – крепление радиальной гайкой; X_{312} – паяное; X_{3121} – припой ПСр 40; X_{3122} – припой ПСр 50; X_{313} – клеевое; X_{3131} – фенолкаучуковый клей (ВК-32-20); X_{3132} – эпоксидная смола (ЭД-6). Перечисленные способы соединения представлены в виде множества $I_{X_{31}}$:

$$I_{X_{31}} = \bigcup_{i=1}^n X_{31i}.$$

X_{32} – регулировочные винты: X_{321} – количество винтов; X_{322} – параметры резьбы. Описываются множеством $I_{X_{32}}$:

$$I_{X_{32}} = \bigcup_{i=1}^n X_{32i}.$$

X_{33} – крепежные винты: X_{331} – количество винтов; X_{332} – параметры резьбы; $X_{nl}X_{33}$ – другие составляющие. Описываются множеством $I_{X_{33}}$:

$$I_{X_{33}} = \bigcup_{i=1}^n X_{33i}.$$

Класс неуравновешенности (1, 2, 3, 4) обозначен вершиной X_4 .

Класс точности (АА, А, Б) обозначен вершиной X_5 .

Максимально разрешенная скорость обработки обозначена вершиной X_6 .

Завод-изготовитель обозначен вершиной X_7 .

Дополнительные параметры (примечания, дополнения) представлены вершиной X_8 .

Графовая структура, предложенная для описания вариантов конструкций шлифовальных кругов, позволяет разбить любую конструкцию на составляющие компоненты для получения полного представления о круге.

Как было отмечено ранее, при точном определении вершин графа любую конструкцию круга можно представить в виде матрицы **B**, которая соответствует графовой модели:

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1j} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{i1} & b_{i2} & \dots & b_{ij} \end{pmatrix},$$

где $b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } v_{ij} \in v_n; \\ 0, & \text{если } v_{ij} \notin v_n. \end{cases}$

Чтобы показать связь между процессом проектирования шлифовального круга и задачами, для решения которых подбираются оптимальные параметры, и служит в данном случае матрица **B**.

Преобразование графовой модели в матричную форму позволит создать единую базу данных конструкций шлифовальных кругов, что, в свою очередь, будет способствовать систематизации имеющихся в наличии у предприятий шлифовальных кругов. Кроме того, данная модель может быть расширена при разработке конструкций с новыми компонентами.

Результаты и их обсуждение

С использованием вышеописанной методики проведено моделирование двух конструкций сборных шлифовальных кругов с различными размерами, способами крепления абразивной части и другими особенностями конструкции.

$$B_1 = \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{matrix} \begin{vmatrix} X_{111} & X_{121} & X_{122} & X_{123} & X_{124} & X_{126} & X_{1321} & X_{13214} & X_{1423} & X_{152} & X_{1652} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} X_{216} & X_{221} & X_{222} & X_{223} & X_{224} & X_{225} & X_{228} & X_{229} & X_{2210} & X_{2322} & X_{3131} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Далее по аналогии проанализируем другую конструкцию сборного абразивного инструмента.

Первая конструкция сборного шлифовального круга представлена кругом алмазным типа 6A2 (рис. 2).



Рис. 2. Круг алмазный плоскошлифовальный типа 6A2

Fig. 2. Surface diamond grinding wheel type 6A2

Этот круг имеет цельную абразивную часть в виде кольца, закрепленную на корпусе при помощи фенолкаучукового клея. Абразивная часть состоит из бакелитовой В2-01 связки и синтетического алмаза. Корпусная часть изготовлена из алюминиевого сплава Д16 и имеет тип 6 с размерами корпуса 200×20×4×29×76 мм. Круг имеет максимальную разрешенную скорость обработки 50 м/с.

Модель данного круга показана на рис. 3.

Теперь представим эту модель в виде упрощенной матрицы **B₁**. Матрица имеет только элементы, которые присутствуют в данной конкретной модели круга, а компоненты, которые не входят в конструкцию, не учитываем. За счет этого матрица сокращается:

Следующий круг предназначен для алмазно-абразивной обработки [8, 51–52] и представлен на рис. 4.

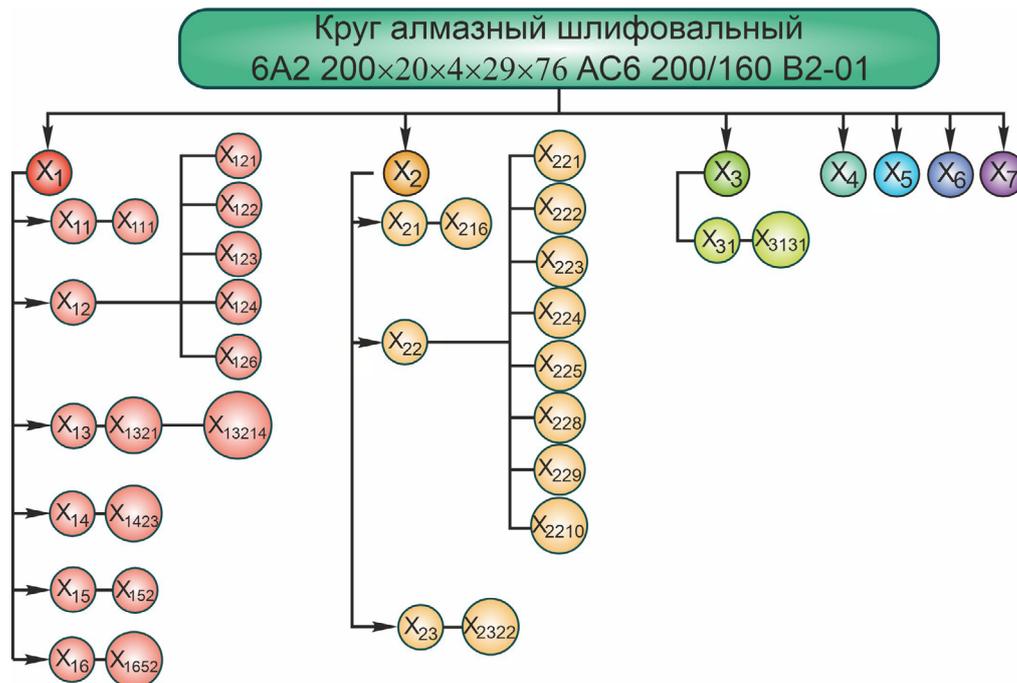


Рис. 3. Графовая модель круга 6A2 200×20×4×29×76 AC6 200/160 B2-01
 Fig. 3. Graph-based model of the wheel type 6A2 200×20×4×29×76 AC6 200/160 B2-01

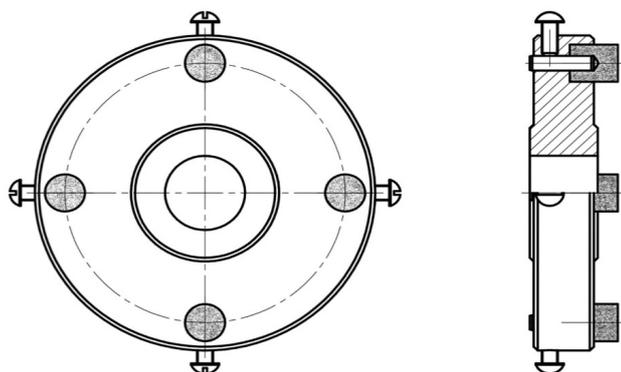


Рис. 4. Шлифовальный круг для алмазно-абразивной обработки
 Fig. 4. Grinding wheel for diamond abrasive machining

Этот круг имеет прерывистую (сегментную) абразивную часть в виде цилиндрических головок, закрепленных в корпусе при помощи радиальных винтов. Абразивная часть состоит из бакелитовой B2-01 связки и синтетического алмаза. Корпусная часть изготовлена из стали и имеет тип 36 с размерами корпуса 250×10×7×34×51 мм. Круг имеет максимальную разрешенную скорость обработки 270 м/с.

Графовая модель данного круга показана на рис. 5.

Теперь по аналогии строим матрицу B_2 , описывающую данную конструкцию круга:

$$B_2 = \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{matrix} \left| \begin{matrix} X_{112} & X_{121} & X_{122} & X_{123} & X_{124} & X_{126} & X_{1321} & X_{13214} & X_{1423} & X_{152} & X_{1652} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \right.$$

$$\begin{matrix} X_{216} & X_{221} & X_{222} & X_{223} & X_{224} & X_{225} & X_{228} & X_{229} & X_{2210} & X_{2322} & X_{3111} & X_{321} & X_{322} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{matrix} \left| \right.$$

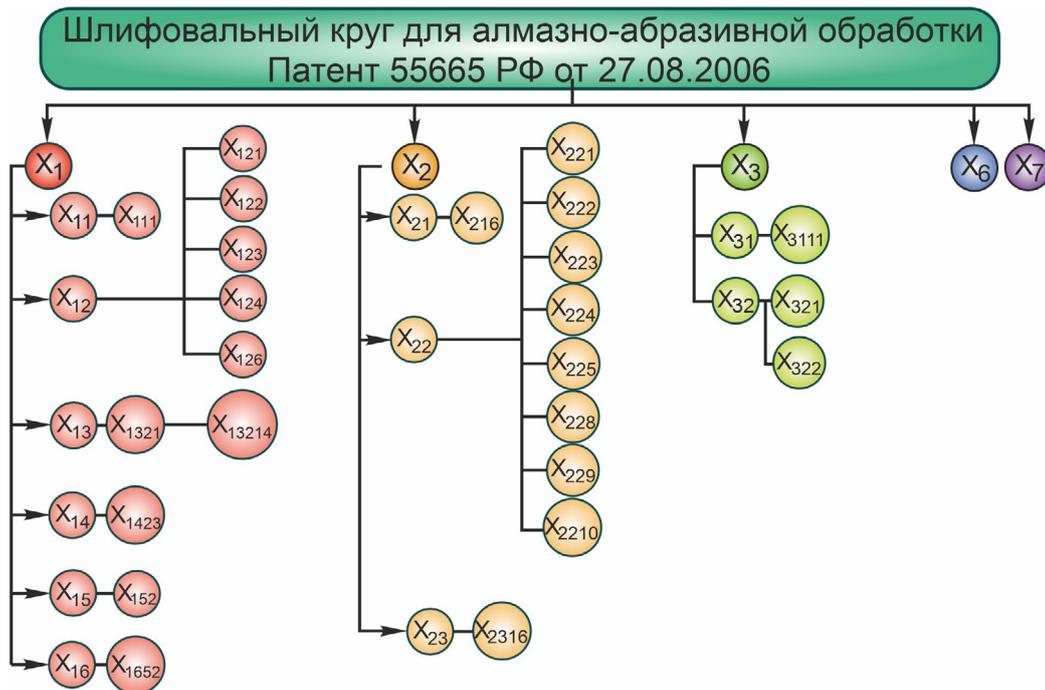


Рис. 5. Графовая модель шлифовального круга для алмазно-абразивной обработки

Fig. 5. Graph-based model of the wheel for diamond abrasive machining

При сравнении этих моделей можно наглядно увидеть конструктивную разницу. В рассматриваемом случае на модели отличаются ветви X_3 (рис. 3 и 5), которые описывают крепежную часть, поскольку крепление абразивной части кардинально отличается. Это видно как на графах, так и на матрицах \mathbf{B}_1 и \mathbf{B}_2 , которые описывают данные модели. Таким образом, показано, что каждая конструкция круга индивидуальна и при смене хотя бы одного конструктивного элемента модель круга также меняется.

Заклучение

Предложена методика моделирования сборного абразивного инструмента, основанная на теории графов и матричного анализа, позволяющая проводить анализ, синтез конструктивных решений и повышать эффективность инструментального обеспечения производства изделий из высокопрочных и труднообрабатываемых материалов традиционными или гибридными технологиями обработки.

Обобщенная графовая модель представляет собой инновационный подход к проектированию и анализу сборного абразивного инструмента. Она включает в себя все ключевые конструктивные элементы и характеристики, ко-

торые могут применяться в таких инструментах. Основное преимущество модели – ее гибкость и расширяемость, благодаря чему она может быть легко обновлена или дополнена новыми компонентами, соответствующими текущим или будущим требованиям к сборному абразивному инструменту. Эта модель позволяет не только визуализировать существующие конструкции абразивного инструмента, но и экспериментировать с созданием новых вариантов конструкций путем добавления, изменения или удаления определенных элементов. Подобный графический подход облегчает понимание взаимодействия между различными компонентами инструмента и их влияния на общие характеристики и эффективность инструмента. Одной из наиболее важных характеристик обобщенной графовой модели является ее способность к представлению конечной информации о конструктивном решении в матричном виде. Это не только позволяет систематизировать и структурировать информацию об абразивных инструментах, но и облегчает процесс анализа, синтеза и выбора оптимального инструментария. Матричная форма представления информации обеспечивает возможность учета специфических характеристик каждого инструмента, она является эффективным средством для управления ассор-

тиментом инструментального обеспечения на предприятии. Это играет ключевую роль в оптимизации производственных процессов и повышении их эффективности за счет максимально обоснованного подбора инструментов.

Произведена апробация разработанной методики проектирования на примере реализации модели для двух конструкций сборных шлифовальных кругов. В результате проведенных теоретических исследований было установлено, что применение разработанной методики моделирования может повысить эффективность проектирования сборного абразивного инструмента в 2–4 раза (в зависимости от сложности конструкции инструмента).

Список литературы

1. *Старков В.К.* Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с. – ISBN 978-5-217-03386-7.
2. Влияние на вероятность удаления материала относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки при чистовом шлифовании / С.М. Братан, С.И. Рощупкин, А.С. Часовитина, К. Гупта // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 33–47. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47.
3. Керамические нанокompозиты на основе диборида циркония / Е.Г. Скрипняк, Д.В. Лобанов, В.В. Скрипняк, А.С. Янющкин, В.А. Скрипняк, Д.А. Рычков // *Системы. Методы. Технологии*. – 2011. – № 2 (10). – С. 95–98.
4. *Саятин Г.И., Носенко В.А., Богомолов Н.И.* Выбор инструмента и СОЖ при шлифовании титановых сплавов // *Станки и инструмент*. – 1981. – № 11. – С. 15–17.
5. Шлифовальный инструмент на основе силикокарбида титана / Г.И. Смагин, В.Н. Филимоненко, Н.Д. Яковлев, М.А. Корчагин, В.Ю. Скиба // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2011. – № 1 (50). – С. 27–30.
6. *Новоселов Ю.К., Братан С.М., Богуцкий В.Б.* Влияние случайной составляющей отклонений профиля инструмента на динамику процесса круглого наружного шлифования // *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. – 2016. – № 5 (59). – С. 10–17.
7. Повышение эффективности концевой алмазного абразивного инструмента на металлической связке за счет совершенствования технологии изготовления / В.М. Смирнов, Д.В. Лобанов, В.Ю. Скиба, И.С. Голюшов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 66–80. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-66-80.
8. Высокоскоростное шлифование жаропрочного никелевого сплава ЖС6-К / А.Ю. Попов, Д.С. Реченко, К.В. Аверков, В.А. Сергеев // *СТИН*. – 2012. – № 2. – С. 32–34.
9. *Макаров В.М.* Комплексированные технологические системы: перспективы и проблемы внедрения // *Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация*. – 2011. – № 6 (64). – С. 20–23.
10. *Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V.* Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 91. – P. 012051. – DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.
11. *Mitsuishi M., Ueda K., Kimura F.* Manufacturing systems and technologies for the new frontier: the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, May 26–28, Tokyo. – London: Springer-Verlag, 2008. – 556 p. – ISBN 978-1-84800-267-8. – DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.
12. Hybrid processes in manufacturing / В. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. Mcintosh // *CIRP Annals*. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 561–583. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.
13. *Garro O., Martin P., Veron M.* Shiva a multiarms machine tool // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 1993. – Vol. 42 (1). – P. 433–436. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.
14. *Скиба В.Ю.* Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 62–83. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.
15. *Brecher C., Özdemir D.* Integrative production technology: theory and applications. – Cham: Springer International, 2017. – 1100 p. – ISBN 978-3-319-47451-9. – ISBN 978-3-319-47452-6. – DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.
16. *Moriwaki T.* Multi-functional machine tool // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2008. – Vol. 57 (2). – P. 736–749. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.
17. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю.* Гибридное металлообрабатывающее оборудование. Технологические аспекты интеграции операций поверхностной закалки и абразивного шлифования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 348 с. – ISBN 978-5-7782-3988-3.
18. *Yamazaki T.* Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 42. – P. 81–86. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

19. Sun S., Brandt M., Dargusch M.S. Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials – A review // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2010. – Vol. 50 (8). – P. 663–680. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.04.008.
20. Advances in laser assisted machining of hard and brittle materials / K. You, G. Yan, X. Luo, M.D. Gilchrist, F. Fang // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 58. – P. 677–692. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.034.
21. Скиба В.Ю., Иванцовский В.В. Повышение эффективности поверхностно-термического упрочнения деталей машин в условиях совмещения обрабатываемых технологий, интегрируемых на единой станочной базе // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 45–71. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-45-71.
22. Борисов М.А., Лобанов Д.В., Яньюшкин А.С. Гибридная технология электрохимической обработки сложнопрофильных изделий // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 25–34. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-25-34.
23. Макаров В.М., Лукина С.В. Уникальная синергия гибридных станков // *Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация*. – 2016. – № 8. – С. 18–25.
24. Madhavulu G., Ahmed B. Hot machining process for improved metal removal rates in turning operations // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1994. – Vol. 44. – P. 199–206. – DOI: 10.1016/0924-0136(94)90432-4.
25. Laser-assisted grinding of silicon nitride ceramics: Micro-groove preparation and removal mechanism / C. Wu, T. Zhang, W. Guo, X. Meng, Z. Ding, S.Y. Liang // *Ceramics International*. – 2022. – Vol. 48 (21). – P. 32366–32379. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.07.180.
26. Rao T.B. Reliability analysis of the cutting tool in plasma-assisted turning and prediction of machining characteristics // *Australian Journal of Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 20. – P. 1020–1034. – DOI: 10.1080/14484846.2020.1769458.
27. Cryogenic and hybrid induction-assisted machining strategies as alternatives for conventional machining of refractory tungsten and niobium / M. Olsson, V. Akujärvi, J.-E. Ståhl, V. Bushlya // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2021. – Vol. 97. – P. 105520. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105520.
28. Boivie K., Karlsen R., Ystgaard P. The concept of hybrid manufacturing for high performance parts // *South African Journal of Industrial Engineering*. – 2012. – Vol. 23, iss. 2. – P. 106–115.
29. Патент на полезную модель №145108 U1 Российская Федерация, МПК В23Н 5/10. Абразивный круг для электрохимического шлифования с параллельным расположением токопроводящих вставок: № 2014105639/02: заявл. 14.02.2014: опублик. 10.09.2014 / А.С. Яньюшкин, Д.А. Рычков, Д.В. Лобанов, В.Ю. Попов, А.А. Сурьев, П.В. Архипов, А.М. Кузнецов, О.И. Медведева; заявитель Братский государственный университет.
30. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power / D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, V.Yu. Skeebea // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 736. – P. 81–85. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.81.
31. Патент № 2489236 С2 Российская Федерация, МПК В23Н 5/06. Способ электроабразивной обработки токопроводящим кругом: № 2011122895/02: заявл. 06.06.2011: опублик. 10.08.2013 / В.А. Мишин, М.А. Борисов, Д.В. Александров.
32. Албагачиев А.Ю., Яиков В.А. Внутреннее шлифование на основе сборных абразивных кругов // *РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация*. – 2014. – № 5 (93). – С. 102–104.
33. Козлов А.М., Долгих П.П., Косых А.Е. Влияние несимметричности хвостовика на работу сборного прерывистого шлифовального круга // *Современные фундаментальные и прикладные исследования*. – 2011. – № 3. – С. 72–76.
34. Косых А.Е. Влияние угла поворота сегмента сборного круга с упруго-демпфирующим элементом на производительность шлифования // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 2-3 (286). – С. 3–6.
35. Худобин Л.В., Муслина Г.Р., Правиков Ю.М. Сборные шлифовальные круги и их технологические возможности // *Справочник. Инженерный журнал*. – 2019. – № 6 (267). – С. 21–29. – DOI: 10.14489/hb.2019.06.pp.021-029.
36. Богущкий В.Б. Оценка применения абразивного инструмента с прерывистой поверхностью для заточки инструментов из быстрорежущих сталей // *Журнал технических исследований*. – 2019. – Т. 5, № 4. – С. 3–8.
37. Roshchupkin S., Kharchenko A. Method of building dynamic relations, estimating product and grinding circle shape deviations // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 224. – P. 01001. – DOI: 10.1051/matecconf/201822401001.
38. Козлов А.М., Косых А.Е. Определение критической ширины сегмента сборных прерывистых шлифовальных кругов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 4-3 (288). – С. 19–23.
39. Домбрачев А.Н. Разработка автоматизированной системы определения сложности и прогнозной



трудоемкости изготовления деталей инструментального производства: дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск, 2005. – 128 с.

40. Голобурдин Д.А., Козлов А.М. Анализ абразивного инструмента прерывистого резания // За нами будущее: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества : сборник научных статей Всероссийской молодежной научной конференции: в 4 т., Курск, 5 июня 2020 года. – Курск, 2020. – Т. 3. – С. 227–231.

41. Реченко Д.С. Повышение качества высокоскоростного затачивания твердосплавных инструментов алмазными кругами с прерывистой поверхностью: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2009. – 162 с.

42. Лукина С.В. Повышение эффективности проектирования сборного режущего инструмента на базе установленных взаимосвязей конструкторско-технологических и экономических решений: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1999. – 448 с.

43. Лялин В.Е. Математические модели и интеллектуальные информационные технологии для повышения эффективности организации производства: автореф. дис. ... д-ра экон. наук. – М., 2006. – 48 с.

44. Рычков Д.А. Совершенствование процесса подготовки режущего инструмента при фрезеровании стеклотекстолита: дисс. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2011. – 190 с.

45. Чемборисов Н.А. Профилирование дисковых режущих инструментов для обработки винтовых поверхностей цилиндрических и конических деталей: дис. ... д-ра техн. наук. – Казань, 2003. – 399 с.

46. Емельянов С.Г., Куц В.В. Графовые модели конструирования и изготовления сборных дисковых фрез // СТИН. – 1999. – № 5. – С. 20–22.

47. Патент № 2644225 С1 Российская Федерация, МПК В24Д 3/06, В24Д 3/34. Связка на основе меди для изготовления алмазного инструмента: № 2017114103: заявл. 24.04.2017: опубл. 08.02.2018 / В.М. Смирнов, Е.П. Шалунов, Д.А. Тимофеев; заявитель Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова.

48. ГОСТ Р 52381–2005 (ИСО 8486-1:1996, ИСО 6344-2:1998, ИСО 9138:1993, ИСО 9284:1992). Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава. – М.: Стандартинформ, 2005. – 15 с.

49. ГОСТ 21445–84 (СТ СЭВ 4403–83). Материалы и инструменты абразивные. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 1984. – 26 с.

50. ГОСТ Р 52781–2007. Круги шлифовальные и заточные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2020. – 32 с.

51. Патент на полезную модель № 55665 U1 Российская Федерация, МПК В24Д 17/00. Шлифовальный круг для алмазно-абразивной обработки: № 2006111080/22: заявл. 05.04.2006: опубл. 27.08.2006 / Д.С. Реченко, Ю.Р. Нуртдинов, А.Ю. Попов; заявитель Омский государственный технический университет.

52. Патент на полезную модель № 101666 U1 Российская Федерация, МПК В24Д 7/06. Шлифовальный круг для высокоскоростной обработки: № 2010139548/02: заявл. 24.09.2010: опубл. 27.01.2011 / А.Ю. Попов, Д.С. Реченко, К.В. Аверков; заявитель Омский государственный технический университет.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

Design simulation of modular abrasive tool

Dmitry Lobanov^{1,a}, Vadim Skeebe^{2,b}, Ivan Golyushov^{1,c}, Valentin Smirnov^{1,d}, Egor Zverev^{2,e}

¹ I. N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>,  lobanovdv@list.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>,  skeebe_vadim@mail.ru;

^b  <https://orcid.org/0000-0001-9757-1368>, ivan.golyushov.97@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0003-2721-9849>,  vms53@inbox.ru;

^e  <https://orcid.org/0000-0003-4405-6623>,  zverev@corp.nstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 07 March 2024

Revised: 21 March 2024

Accepted: 27 April 2024

Available online: 15 June 2024

Keywords:

Abrasive tools

Modular grinding wheel

Tool design

Simulation

Funding

This research was funded by Russian Science Foundation project N 23-29-00945, <https://rscf.ru/en/project/23-29-00945/>

Acknowledgements

The research was carried out at the equipment of the Engineering Center “Design and Production of High-Tech Equipment” and the shared research facility” Structure, mechanical and physical properties of materials”.

ABSTRACT

Introduction. Grinding is one of the most common types of finishing. It allows the production of surfaces with the required quality parameters and is one of the most available and productive methods for machining high-strength and difficult-to-machine materials. Grinding wheels represent the most prevalent application of grinding technology in mechanical engineering. The use of this abrasive tool helps to increase processing productivity by ensuring the removal of a significant layer of material. In addition, grinding wheels have a longer service life and are widely used in the implementation of hybrid technologies based on the combination of mechanical (abrasive), electrical, chemical, and thermal effects in various combinations. A variety of tool body shapes and types of abrasives allow the use of wheels in a wide variety of production areas. One of the ways to analyze and design a new tool is numerical simulation. In this research, graphic modeling was selected as the most appropriate method for representing the future design of the tool. This approach allows for a more straightforward conceptualization process compared to other modeling techniques. **The purpose of the work** is to simulate a modular abrasive tool in order to analyze and synthesize structures to increase the efficiency of tool support for the manufacture of products made of high-strength and difficult-to-process materials using traditional or hybrid processing technologies. **Research methodology.** Theoretical studies are carried out using the basic principles of system analysis, geometric theory of surface formation, cutting tool design, graph theory, mathematical and computer simulation. To solve the problem, we have studied the available designs of modular grinding wheels. There has also been the analysis of the types of abrasive parts, methods of fastening of the abrasive cutting part on the wheel’s body, the materials used for the manufacture of the body, the characteristics of the body of the wheel, and fastening schemes. **Results and discussions.** A simulation technique based on graphic modelling theory has been developed. A comprehensive investigation of the existing design of the grinding wheel has enabled the identification of the key structural elements that define its design. The data obtained has been used to create a generalized graphic simulation of a modular abrasive tool. This simulation integrates all the components and displays a conditional constructive relationship between them. The developed design methodology was tested on an example of two designs of modular grinding wheels. The theoretical studies established that the design efficiency of modular abrasive tools can be increased by 2–4 times by using the developed simulation technique.

For citation: Lobanov D.V., Skeebe V.Yu., Golyushov I.S., Smirnov V.M., Zverev E.A. Design simulation of modular abrasive tool. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 158–173. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-158-173. (In Russian).

References

1. Starkov V.K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [Grinding of high-porous wheels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 688 p. ISBN 978-5-217-03386-7.
2. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Chasovitina A.S., Gupta K. Vliyanie na veroyatnost’ udaleniya materiala otnositel’nykh vibratsii abrazivnogo instrumenta i zagotovki pri chistovom shlifovanii [The effect of the relative vibrations of the abrasive tool and the workpiece on the probability of material removing during finishing grinding].

* Corresponding author

Lobanov Dmitry V., D.Sc. (Engineering), Professor
I.N. Ulianov Chuvash State University,
15 Moskovsky Prospekt,
428015, Cheboksary, Russian Federation
Tel.: + 7 908 303-47-45, e-mail: lobanovdv@list.ru



Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 33–47. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47.

3. Skripnyak E.G., Lobanov D.V., Skripnyak V.V., Yanyushkin A.S., Skripnyak V.A., Rychkov D.A. Keramicheskie nanokompozity na osnove diborida tsirkoniya [Ceramic nanocomposites on the basis of zirconium diboride]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2011, no. 2, pp. 95–98.

4. Sayutin G.I., Nosenko V.A., Bogomolov N.I. Vybora instrumenta i SOZh pri shlifovanii titanovykh splavov [Choice of tools and coolant for grinding titanium alloys]. *Stanki i instrument = Machines and Tooling*, 1981, no. 11, pp. 15–17. (In Russian).

5. Smagin G.I., Filimonenko V.N., Yakovlev N.D., Korchagin M.A., Skeebe V.Y. Shlifoval'nyi instrument na osnove silikokarbida titana [The grinding tool on a basis titan silicon karbid]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2011, no. 1 (50), pp. 27–30.

6. Novoselov Yu.K., Bratan S.M., Bogutskii V.B. Vliyanie sluchainoi sostavlyayushchei otklonenii profilya instrumenta na dinamiku protsessa kruglogo naruzhnogo shlifovaniya [Effect of random component in tool profile deviations upon dynamics of external circular grinding]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2016, no. 5 (59), pp. 10–17.

7. Smirnov V.M., Lobanov D.V., Skeebe V.Yu., Golyushov I.S. Povyshenie effektivnosti kontsevnogo almaznogo abrazivnogo instrumenta na metallicheskoj svyazke za schet sovershenstvovaniya tekhnologii izgotovleniya [Improving the efficiency of metal-bonded diamond abrasive end tools by improving manufacturing technology]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 66–80. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-66-80.

8. Popov A.Yu., Rechenko D.S., Averkov K.V., Sergeev V.A. Vysokoskorostnoe shlifovanie zharoprochnogo nikelovogo splava ZhS6-K [High-speed grinding of ZhS6-K high-temperature nickel alloy]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2012, no. 2, pp. 32–34. (In Russian).

9. Makarov V.M. Kompleksirovannyye tekhnologicheskie sistemy: perspektivy i problemy vnedreniya [Well integrated technological systems: prospects and problems of implementation]. *Ritm: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2011, no. 6 (64), pp. 20–23.

10. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 91, p. 012051. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.

11. Mitsuishi M., Ueda K., Kimura F. *Manufacturing systems and technologies for the new frontier: the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, May 26–28, Tokyo. London, Springer-Verlag, 2008. 556 p. ISBN 978-1-84800-267-8. DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.

12. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., McIntosh D. Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63 (2), pp. 561–583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.

13. Garro O., Martin P., Veron M. Shiva a multiarms machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1993, vol. 42 (1), pp. 433–436. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.

14. Skeebe V.Yu. Gibridnoe tekhnologicheskoe oborudovanie: povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya kompleksirovannykh metallobrabatyvayushchikh stankov [Hybrid process equipment: improving the efficiency of the integrated metalworking machines initial designing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 62–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

15. Brecher C., Özdemir D. *Integrative production technology: theory and applications*. Cham, Springer International, 2017. 1100 p. ISBN 978-3-319-47451-9. ISBN 978-3-319-47452-6. DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.

16. Moriwaki T. Multi-functional machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57 (2), pp. 736–749. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.

17. Ivantsivsky V.V., Skeebe V.Yu. *Gibridnoe metallobrabatyvayushchee oborudovanie. Tekhnologicheskie aspekty integratsii operatsii poverkhnostnoi zakalki i abrazivnogo shlifovaniya* [Hybrid metal working equipment. Technological aspects of integrating the operations of surface hardening and abrasive grinding]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019. 348 p. ISBN 978-5-7782-3988-3.

18. Yamazaki T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 81–86. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

19. Sun S., Brandt M., Dargusch M.S. Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials – A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50 (8), pp. 663–680. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2010.04.008.

20. You K., Yan G., Luo X., Gilchrist M.D., Fang F. Advances in laser assisted machining of hard and brittle materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 58, pp. 677–692. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.034.
21. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. Povyshenie effektivnosti poverkhnostno-termicheskogo uprochneniya detalei mashin v usloviyakh sovmeshcheniya obrabatyvayushchikh tekhnologii, integriruemykh na edinoi stanochnoi baze [Improving the efficiency of surface-thermal hardening of machine parts in conditions of combination of processing technologies, integrated on a single machine tool base]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 45–71. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-45-71.
22. Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Gibrinaya tekhnologiya elektrokhimicheskoi obrabotki slozhnopofil'nykh izdelii [Hybrid technology of electrochemical processing of complex profiles]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 25–34. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-25-34.
23. Makarov V.M., Lukina S.V. Unikal'naya sinergiya gibrinnykh stankov [Unique synergy of hybrid machines]. *Ritm: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2016, no. 8, pp. 18–25.
24. Madhavulu G., Ahmed B. Hot machining process for improved metal removal rates in turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, vol. 44, pp. 199–206. DOI: 10.1016/0924-0136(94)90432-4.
25. Wu C., Zhang T., Guo W., Meng X., Ding Z., Liang S.Y. Laser-assisted grinding of silicon nitride ceramics: Micro-groove preparation and removal mechanism. *Ceramics International*, 2022, vol. 48 (21), pp. 32366–32379. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.07.180.
26. Rao T.B. Reliability analysis of the cutting tool in plasma-assisted turning and prediction of machining characteristics. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2020, vol. 20, pp. 1020–1034. DOI: 10.1080/14484846.2020.1769458.
27. Olsson M., Akujärvi V., Ståhl J.-E., Bushlya V. Cryogenic and hybrid induction-assisted machining strategies as alternatives for conventional machining of refractory tungsten and niobium. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, vol. 97, p. 105520. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105520.
28. Boivie K., Karlsen R., Ystgaard P. The concept of hybrid manufacturing for high performance parts. *South African Journal of Industrial Engineering*, 2012, vol. 23, iss. 2, pp. 106–115.
29. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V., Popov V.Yu., Sur'ev A.A., Arkhipov P.V., Kuznetsov A.M., Medvedeva O.I. *Abrazivnyi krug dlya elektrokhimicheskogo shlifovaniya s parallel'nym raspolozheniem tokoprovodyashchikh vstavok* [Abrasive wheel for electrochemical grinding with parallel arrangement of conductive inserts]. Patent RF, no. 145108 U1, 2014.
30. Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 81–85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.81.
31. Mishin V.A., Borisov M.A., Aleksandrov D.V. *Sposob elektroabrazivnoi obrabotki tokoprovodyashchim krugom* [Method of electroabrasive processing with a conductive wheel]. Patent RF, no. 2489236 C2, 2013.
32. Albagachiev A.Yu., Yashkov V.A. Vnutrennee shlifovanie na osnove sbornyykh abrazivnykh krugov [Internal grinding based on prefabricated abrasive wheels]. *Ritm: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2014, no. 5 (93), pp. 102–104.
33. Kozlov A.M., Dolgikh P.P., Kosykh A.E. Vliyanie nesimmetrichnosti khvostovika na rabotu sbornogo preryvistogo shlifoval'nogo kruga [Effect nonsymmetric shank for work team flash grinding wheels]. *Sovremennye fundamental'nye i prikladnye issledovaniya = Modern Fundamental and Applied Researches*, 2011, no. 3, pp. 72–76.
34. Kosykh A.E. Vliyanie ugla povorota segmenta sbornogo kruga s uprugo-dempfiruyushchim elementom na proizvoditel'nost' shlifovaniya [Effect of the angle of rotation of segment with elastic damping elements on grinding performance]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2011, no. 2-3 (286), pp. 3–6.
35. Khudobin L.V., Muslina G.R., Pravikov Yu.M. Sbornye shlifoval'nye krugi i ikh tekhnologicheskie vozmozhnosti [Build-up combined abrasive wheels and their the technology possibilities]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal = Handbook. An Engineering Journal*, 2019, no. 6, pp. 21–29. DOI: 10.14489/hb.2019.06.pp.021-029.
36. Bogutsky V.B. Otsenka primeneniya abrazivnogo instrumenta s preryvистой poverkhnost'yu dlya zatochki instrumentov iz bystrorezhushchikh staley [Evaluation of the application abrasive tool with a discontinuous surface for sharpening tools from high-speed steels]. *Zhurnal tekhnicheskikh issledovaniy = Journal of Technical Research*, 2019, vol. 5, no. 4, pp. 3–8.
37. Roshchupkin S., Kharchenko A. Method of building dynamic relations, estimating product and grinding circle shape deviations. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 224, p. 01001. DOI: 10.1051/mateconf/201822401001.



38. Kozlov A.M., Kosykh A.E. Opredelenie kriticheskoi shiriny segmenta sbornykh preryvistykh shlifoval'nykh krugov [Definition of critical width in segment of collection intermittent grinding disks]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2011, no. 4-3, pp. 19–23.

39. Dombrachev A.N. *Razrabotka avtomatizirovannoi sistemy opredeleniya slozhnosti i prognoznoi trudoemkosti izgotovleniya detalei instrumental'nogo proizvodstva*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of an automated system for determining the complexity and predictive labor intensity of manufacturing parts for tool production. PhD eng. sci. diss.]. Izhevsk, 2005. 128 p.

40. Goloburdin D.A., Kozlov A.M. [Analysis of abrasive intermittent cutting tools]. *Za nami budushchee: vzglyad molodykh uchenykh na innovatsionnoe razvitie obshchestva* [Proceedings of the All-Russian youth scientific conference “The future is ours: the view of young scientists on the innovative development of society”]. Kursk, 2020, vol. 3, pp. 227–231. (In Russian).

41. Rechenko D.S. *Povyshenie kachestva vysokoskorostnogo zatachivaniya tverdosplavnykh instrumentov almaznymi krugami s preryvистой poverkhnost'yu*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the quality of high-speed sharpening of carbide tools with diamond wheels with an intermittent surface. PhD eng. sci. diss.]. Omsk, 2009. 162 p.

42. Lukina S.V. *Povyshenie effektivnosti proektirovaniya sbornogo rezhushchego instrumenta na baze ustanovlennykh vzaimosvyazei konstruktorsko-tekhnologicheskikh i ekonomicheskikh reshenii*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Increasing the efficiency of designing prefabricated cutting tools on the basis of established relationships between design, technological and economic solutions. Dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 1999. 448 p.

43. Lyalin V.E. *Matematicheskie modeli i intellektual'nye informatsionnye tekhnologii dlya povysheniya effektivnosti organizatsii proizvodstva*. Avtoref. diss. dokt. ekon. nauk [Mathematical models and intelligent information technologies for increasing the efficiency of production organization. Author's abstract of Dr. of econ. Sci. diss.]. Moscow, 2006. 48 p.

44. Rychkov D.A. *Sovershenstvovanie protsessa podgotovki rezhushchego instrumenta pri frezerovanii steklotekstolita*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the process of preparing cutting tools when milling fiberglass. PhD eng. sci. diss.]. Irkutsk, 2011. 190 c.

45. Chemborisov N.A. *Profilirovaniye diskovykh rezhushchikh instrumentov dlya obrabotki vintovykh poverkhnostei tsilindricheskikh i konicheskikh detalei*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Profiling of disk cutting tools for processing screw surfaces of cylindrical and conical parts: Dr. tech. sci. diss.]. Kazan, 2003. 399 p.

46. Emel'yanov S.G., Kuts V.V. Grafovye modeli konstruirovaniya i izgotovleniya sbornykh diskovykh frez [Graph models for the design and manufacture of prefabricated disk cutters]. *STIN = Russian Engineering Research*, 1999, no. 5, pp. 20–22. (In Russian).

47. Smirnov V.M., Shalunov E.P., Timofeev D.A. *Svyazka na osnove medi dlya izgotovleniya almaznogo instrumenta* [Copper-based bond for making diamond tools]. Patent RF, no. 2644225 C1, 2018.

48. GOST R 52381–2005 (ISO 8486-1:1996, ISO 6344-2:1998, ISO 9138:1993, ISO 9284:1992). *Materialy abrazivnye. Zernistost' i zernovoi sostav shlifoval'nykh poroshkov. Kontrol' zernovogo sostava* [State standard 52381–2005. Abrasive materials. Grain and grain size distribution of grinding powders. Test of grain size distribution]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 15 p.

49. GOST 21445–84. *Materialy i instrumenty abrazivnye. Terminy i opredeleniya* [State standard 21445–84. Abrasive materials and tools. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 1984. 26 p.

50. GOST R 52781–2007. *Krugi shlifoval'nye i zatochnye. Tekhnicheskie usloviya* [Grinding and tool-grinding wheels. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 32 p.

51. Rechenko D.S., Nurdinov Yu.R., Popov A.Yu. *Shlifoval'nyi krug dlya almazno-abrazivnoi obrabotki* [Grinding wheel for diamond abrasive machining]. Patent RF, no. 55665 U1, 2006.

52. Popov A.Yu., Rechenko D.S., Averkov K.V. *Shlifoval'nyi krug dlya vysokoskorostnoi obrabotki* [Grinding wheel for high speed machining]. Patent RF, no. 101666 U1, 2011.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.