



**З. И. Кремень
В. Г. Юрьев
А. Ф. Бабошкин**

ТЕХНОЛОГИЯ ШЛИФОВАНИЯ в машиностроении

ПОЛИТЕХНИКА

Электронный аналог печатного издания: Кремень З. И. Технология шлифования в машиностроении / З. И. Кремень, В. Г. Юрьев, А. Ф. Бабошкин ; под общ. ред. З. И. Кремня. — СПб. : Политехника, 2007. — 424 с. : ил.

УДК 621.795.2
ББК 34.5
К79



**ПОЛИТЕХНИКА
ИЗДАТЕЛЬСТВО**

Санкт-Петербург 2015

www.polytechnics.ru

Издано при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям в рамках Федеральной целевой программы «Культура России»

Рецензенты: В. А. Щеголев — проф. кафедры «Технология машиностроения» Новгородского гос. ун-та им. Ярослава Мудрого, д-р техн. наук;
Л. В. Худобин — заслуженный деятель науки и техники РФ, проф. кафедры «Технология машиностроения» Ульяновского гос. техн. ун-та, д-р техн. наук

Кремень З. И. Технология шлифования в машиностроении / К79 З. И. Кремень, В. Г. Юрьев, А. Ф. Бабошкин; под общ. ред. З. И. Кремня. — СПб.: Политехника, 2015. — 424 с.: ил. ISBN 978-5-7325-0517-7

В книге рассмотрены основные составляющие технологии шлифования: абразивные материалы и инструменты, особенности контактного взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью, кинематика и динамика процесса шлифования, правка шлифовальных кругов и т. д. Особое внимание уделено применению кругов из кубического нитрида бора (эльбора), в том числе новых кругов АЭРОБОР, вопросам технологии высокоскоростного и глубинного шлифования, обработки жаропрочных сплавов, износостойких и эластомерных покрытий. Приведены рекомендации по выбору оптимальных характеристик шлифовальных кругов и режимов шлифования.

Книга предназначена для специалистов-технологов различных отраслей машиностроения, а также для студентов и преподавателей машиностроительных специальностей высших и средних учебных заведений.

**УДК 621.795.2
ББК 34.5**

ISBN 5-7325-0517-2



9 785732 505177

**ЭЛЕКТРОННОЕ
ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПРАКТИЧЕСКОЕ ИЗДАНИЕ**

**Кремень Зиновий Ильич, Юрьев Валентин Григорьевич,
Бабошкин Александр Федорович**

ТЕХНОЛОГИЯ ШЛИФОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Заведующая редакцией *Е. В. Шарова*. Редактор *Е. Ю. Гомзякова*. Технический редактор *Т. М. Жилич*. Корректоры *Т. Н. Гринчук, Е. П. Смирнова, З. С. Романова*. Операторы *С. В. Барашкова, А. А. Имамгалиев*.

Подписано в печать 20.12.2014.

Электронных текстовых данных 169 Мб.

Электронный текст подготовлен АО «Издательство «Политехника»»

191023, Санкт-Петербург, Инженерная ул., д. 6.

www.polytechnics.ru

ISBN 978-5-7325-0517

© Издательство «Политехника», 2015

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	7
Перечень основных обозначений	9
Глава 1. АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	10
1.1. Традиционные абразивы	—
1.2. Микрористаллический корунд	12
1.3. Суперабразивы	13
1.3.1. Эльбор — кубический нитрид бора	14
1.3.2. Алмаз	17
1.3.3. Эльбор и алмаз — различные области применения ...	17
1.4. Зернистость шлифовальных материалов	20
1.4.1. Порошки традиционных абразивов. Понятие зернистости. Зерновой состав	—
1.4.2. Применение кругов различной зернистости	24
1.4.3. Порошки суперабразивов	25
1.4.4. Применение кругов различных зернистостей из суперабразивов	27
Глава 2. СВЯЗКИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ	28
2.1. Керамические связи	—
2.2. Органические связи	30
2.3. Металлические связи	31
2.4. Наполнители	33
Глава 3. СВОЙСТВА ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ	35
3.1. Твердость круга	—
3.1.1. Степени твердости	—
3.1.2. Контроль твердости	36
3.1.3. Правила выбора твердости круга	40
3.2. Структура круга	41
3.2.1. Понятие структуры. Группы структур и их применение ..	—
3.2.2. Концентрация эльбора и алмаза в круге	42
3.3. Пористость. Высокопористые круги	43
3.4. Точность и неуравновешенность кругов	45
3.4.1. Классы точности	—
3.4.2. Классы неуравновешенности	46
3.5. Прочность кругов. Высокоскоростные круги	48
3.5.1. Результаты исследований прочности шлифовальных кругов	—
3.5.2. Контроль прочности кругов	51
3.5.3. Высокоскоростные круги	52
3.6. Выбор характеристики шлифовального круга	53
Глава 4. ТИПЫ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ	56
4.1. Круги из традиционных абразивов	—
4.2. Круги на основе эльбора и алмаза	59
4.3. Маркировка кругов	64

Глава 5. ПОДГОТОВКА ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ К ЭКСПЛУАТАЦИИ	66
5.1. Балансировка шлифовальных кругов	—
5.2. Правка шлифовальных кругов	70
5.2.1. Цель и задачи правки	—
5.2.2. Способы правки. Алмазные правящие инструменты ...	71
5.2.3. Стационарные правящие инструменты	72
5.2.4. Вращающиеся правящие инструменты	77
5.2.5. Правка кругов из эльбора и алмаза	80
Глава 6. ОСНОВЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА С ЗАГОТОВКОЙ	86
6.1. Особенности взаимодействия рабочей поверхности шлифовального круга с обрабатываемым материалом	—
6.1.1. О механизме действия единичного абразивного зерна ...	—
6.1.2. Рабочая поверхность шлифовального круга, ее характеристики. Вероятностно-статистический подход	90
6.2. Изнашивание абразивных инструментов	93
6.3. Силы резания и режущая способность круга	103
6.3.1. Силы резания при шлифовании	—
6.3.2. Режущая способность шлифовального круга	107
Глава 7. ЭЛЕМЕНТЫ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ	110
7.1. Кинематика процесса шлифования	—
7.2. Колебательные процессы при шлифовании	113
7.2.1. Вынужденные колебания	—
7.2.2. Колебания, самовозбуждающиеся при шлифовании ...	117
7.3. Акустическая эмиссия как отражение микродинамических процессов при шлифовании	129
Глава 8. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕПЛОФИЗИКИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ. СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДЫ	133
8.1. Тепловой баланс при шлифовании	—
8.2. Температурное поле при шлифовании	135
8.3. Методы измерения температуры при шлифовании	139
8.4. Влияние режимов и условий обработки на температуру шлифования	142
8.5. Смазочно-охлаждающие технологические среды, применяемые на операциях шлифования	145
8.5.1. Механизм действия СОТС	146
8.5.2. Эксплуатационные свойства СОТС	149
8.5.3. Классификация СОТС	151
8.6. Методы подачи СОТС в зону обработки на операциях шлифования	157
8.6.1. Подача СОЖ струйными методами	—
8.6.2. Методы подачи пластичных СОТС и твердых смазок ...	160
8.6.3. Комбинированный метод подачи СОТС	162

8.7. Импрегнирование и композиционные шлифовальные круги . . .	164
8.8. Очистка и повторное использование СОТС	166
Глава 9. ТОЧНОСТЬ И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ	170
9.1. Общие вопросы обеспечения точности при шлифовании	—
9.2. Исправление исходных погрешностей при шлифовании	174
9.3. Микрогеометрия шлифованной поверхности	181
9.3.1. Волнистость поверхности	182
9.3.2. Шероховатость обработанной поверхности	183
9.4. Состояние поверхностного слоя металла	190
Глава 10. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ШЛИФОВАНИЯ	194
10.1. Высокоскоростное шлифование	—
10.1.1. Примеры применения технологии высокоскоростного шлифования	200
10.2. Глубинное шлифование	203
10.2.1. Примеры применения технологии глубинного шлифования	210
10.3. Шлифование высокопористыми кругами	212
10.3.1. Шлифование кругами из традиционных абразивов . . .	213
10.3.2. Шлифование кругами АЭРОБОР	217
10.4. Шлифование специальных труднообрабатываемых материалов	222
10.4.1. Шлифование износостойких покрытий	—
10.4.2. Шлифование эластопolyмерных покрытий	225
10.5. Шлифование алмазными кругами на керамической связке	228
Глава 11. КРУГЛОЕ НАРУЖНОЕ ШЛИФОВАНИЕ	230
11.1. Схемы круглого наружного шлифования	—
11.1.1. Круглое наружное центровое шлифование	—
11.1.2. Бесцентровое круглое наружное шлифование	236
11.2. Технологическая оснастка и оборудование	248
11.3. Выбор характеристики шлифовального круга. Назначение режимов шлифования	264
11.4. Формирование циклов операций шлифования	279
Глава 12. ВНУТРЕННЕЕ ШЛИФОВАНИЕ	286
12.1. Схемы и оборудование для внутреннего шлифования	287
12.2. Выбор кругов для внутреннего шлифования	292
12.3. Технология внутреннего шлифования	299
Глава 13. ПЛОСКОЕ ШЛИФОВАНИЕ	305
13.1. Основные схемы плоского шлифования	—
13.2. Технологическая оснастка и оборудование	314
13.3. Технологические особенности операций плоского шлифования	320
13.4. Выбор характеристики круга и режимов обработки	324
Глава 14. ШЛИФОВАНИЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	331

14.1 Основные методы шлифования фасонных поверхностей	331
14.2. Шлифование зубьев зубчатых колес	335
14.2.1. Шлифование методом обкатывания	—
14.2.2. Шлифование методом копирования	342
14.3. Шлицешлифование	348
14.4. Резьбошлифование	351
Глава 15. ТЕХНОЛОГИЯ ЗАТОЧКИ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ	361
15.1. Технологические особенности процесса заточки	—
15.2. Заточка инструмента из быстрорежущей стали кругами из эльбора	363
15.3. Заточка твердосплавного инструмента	373
15.4. Заточка инструментов, оснащенных поликристаллами композитов на основе эльбора и алмаза	375
15.5. Технология заточки основных видов режущих инструментов	376
Глава 16. ЛЕНТОЧНОЕ ШЛИФОВАНИЕ	396
16.1. Абразивные ленты и их классификация	—
16.2. Оборудование для шлифования абразивными лентами	400
16.3. Технологические особенности обработки абразивными лентами	408
Список стандартов	000
Литература	000

АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Основой шлифовального инструмента являются зерна абразивного материала, выполняющие функции микрорезцов, осуществляющих микрорезание обрабатываемого материала и пластическое деформирование поверхностного слоя металла.

Существует несколько видов абразивных материалов, отличающихся составом и свойствами. Для производства шлифовального инструмента используют следующие абразивные материалы:

- традиционные абразивы — электрокорунд и карбид кремния;
- микрокристаллический (золь-гелевый) корунд, полученный по специальной химической технологии;
- суперабразивы (сверхтвердые материалы) — кубический нитрид бора и алмаз.

1.1. ТРАДИЦИОННЫЕ АБРАЗИВЫ

Электрокорунд (название обусловлено плавкой в электропечах) — состоит, в основном, из минерала корунда (химическая формула Al_2O_3) и, в зависимости от состава, производится следующих видов.

Электрокорунд белый — наиболее чистый по химическому составу, содержит 98...99,5 % корунда. Микротвердость $(20...22) \cdot 10^3$ Н/мм². Зерна электрокорунда белого более хрупкие и острые по сравнению с зернами нормального и легированного электрокорунда. Марка — 25А.

Электрокорунд нормальный — содержит 93...96 % корунда. Микротвердость $(18...20) \cdot 10^3$ Н/мм². Зерна менее хрупкие и острые, чем у электрокорунда белого, имеют более высокую прочность по отношению к действующим при шлифовании ударным нагрузкам. Марки — 14А, 15А.

Введение при плавке легирующих добавок позволило получить различные виды *легированного электрокорунда*.

Электрокорунд хромистый (легированный хромом) производят двух видов: розовый (содержание хрома $\leq 0,5$ %) и рубиновый (содержание хрома 2...3 %), который обладает повышенной ударной прочностью, что позволяет применять круги из него при более интенсивных режимах шлифования.

Электрокорунд хромтитанистый (легированный хромом и титаном) также обладает повышенной ударной прочностью, круги из него имеют повышенную стойкость и работают при интенсивных режимах шлифования. Марки — 92А, 95А.

Электрокорунд циркониевый (легированный цирконием). Наиболее прочный из всех видов электрокорунда; его прочность в 5...10 раз больше, чем у других видов. Круги из этого материала применяют при силовом обдирочном шлифовании проката, отливок, поковок.

Монокорунд — разновидность электрокорунда, отличающаяся специальной технологией; зерна монокорунда представляют собой монокристаллы с гладкими гранями и наиболее острыми вершинами из всех видов электрокорунда.

Электрокорундовые материалы используют для шлифования всех марок сталей, как нетермообработанных, так и закаленных, цементированных, азотированных, а также жаропрочных сплавов.

Карбид кремния (химическая формула SiC). Более твердый материал, чем электрокорунд, микротвердость $(32...35) \times 10^3 \text{ Н/мм}^2$. Однако карбид кремния более хрупкий, его зерна способны выдержать значительно меньшие ударные нагрузки, что ограничивает область его применения как по обрабатываемым материалам, так и по режимам шлифования. Так, шлифование сталей кругами из карбида кремния возможно лишь при легких, малопроизводительных режимах.

Производят карбид кремния следующих видов: зеленый и черный (по цвету материалов).

Зеленый карбид кремния — наиболее чистый материал (99 % кристаллического SiC), *черный карбид кремния* содержит большее количество примесей и менее хрупок, чем зеленый. Марки карбида кремния: зеленого — 64С, черного — 54С. Области применения обоих видов карбида кремния отличаются незначительно: черный карбид кремния позволяет шлифовать при более интенсивных режимах, зеленый — обеспечивает меньшую шероховатость поверхности и лучшую режущую способность при обработке мягких и вязких сплавов — алюминиевых, титановых, медных и др.

Для изготовления шлифовальных кругов часто используют смеси абразивных материалов: электрокорунда белого и нормального, белого и легированного, карбида кремния зеленого и черного. Это делается как по экономическим соображениям (цены на различные материалы различны), так

Т а б л и ц а 1.1

Обозначения абразивных материалов иностранных фирм

Материал	Обозначения иностранных марок
Электрокорунд белый	38A, 42A, 89A, E
Электрокорунд нормальный	A, NK
Электрокорунд хромистый: розовый рубиновый	57A, 88A, EKd 86A, 68A, 26A
Электрокорунд циркониевый	ZF, ZS, 28A
Монокорунд	67A, 29A
Карбид кремния: зеленый черный	37C, SC, C GC, 1C, 39C

и из-за возможности улучшить эксплуатационные свойства кругов.

В табл. 1.1 приведены некоторые обозначения абразивных материалов, выпускаемых зарубежными фирмами. Эти данные помогут идентифицировать круги иностранного производства.

1.2. МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КОРУНД

Этот новый вид абразивного материала получен по специальной химической технологии (его часто называют «*золь—гелевым*» корундом). Принципиальным отличием этого материала является его кристаллическая структура: зерно состоит из субмикрокристаллов размером менее 1 мкм (для сравнения — зерно электрокорунда состоит из кристаллов размерами 5...20 мкм). Такое различие в структуре обуславливает различный характер износа зерен при шлифовании: на зернах электрокорунда образуются площадки износа, что, в конечном счете, приводит к затуплению рабочей поверхности круга либо к отрыву от зерна крупных частиц (рис. 1.1, а). На зернах микрокристаллического корунда износ происходит в виде скалывания микрочастиц (рис. 1.1, б), непрерывно образуются острые вершинки субмикрокристаллов, что обеспечивает длительное сохранение высокой режущей способности и, как следствие, увеличение стойкости круга между правками.

Исследования немецких ученых [71, 75, 78] показали, что при резании—царапании единичным зерном со скоростью 30 м/с износ зерен микрокристаллического корунда

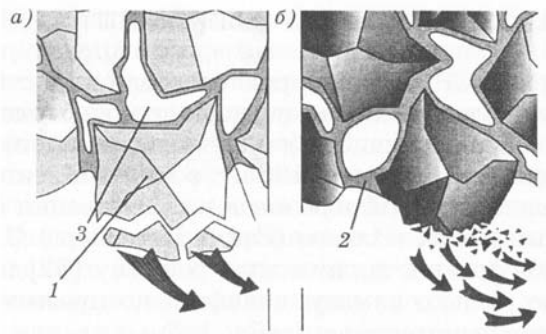


Рис. 1.1. Схема изнашивания зерен электрокорунда (а) и микрокристаллического корунда (б):
1 — абразивное зерно; 2 — связка; 3 — поры [79]

в 7...9 раз меньше, чем износ зерен белого электрокорунда. При шлифовании кругами из этих материалов износ круга из микрокристаллического корунда составляет 10...15 мкм при производительности 10...13 мм³/мм·с, тогда как износ круга из белого электрокорунда составляет 35...40 мкм при производительности 0,5...1,0 мм³/мм·с. Приведенные данные показывают возможность эффективного применения нового материала.

Микрокристаллический корунд имеет следующие основные марки: SG (производится фирмой «Нортон», США) и «Кубитрон» (производится фирмой «ЗМ», США). Как правило, микрокристаллический корунд используют в смеси с белым электрокорундом; количество микрокристаллического корунда в смеси составляет 30...50 %, обозначения таких смесей 3SG, 5SG.

Решая вопрос о применении нового материала, следует иметь в виду, что его стоимость значительно выше, чем стоимость белого электрокорунда. Поэтому должно быть определено соотношение «цена—качество», в котором понятие «качество» включает производительность шлифования, стойкость круга, шероховатость обработанной поверхности, брак по прижогам.

1.3. СУПЕРАБРАЗИВЫ

К суперабразивам относятся два наиболее твердых абразивных материала: *кубический нитрид бора* (КНБ, в зарубежных источниках обозначение CBN, ABN) и *алмаз*, как синтетический (АС), так и природный (А).

1.3.1. ЭЛЬБОР — КУБИЧЕСКИЙ НИТРИД БОРА

Впервые в СССР КНБ был синтезирован в Институте физики высоких давлений Академии наук под руководством академика Л. Ф. Верещагина. Эльбор — название кубического нитрида бора, синтезируемого с 1965 г. в промышленном масштабе по технологии ВНИИ абразивов и шлифования (ВНИИАШ) и абразивного завода «Ильич» (Санкт-Петербург). Эльбор имеет алмазоподобную кристаллическую решетку [62] и по твердости уступает только алмазу, значительно превосходя остальные абразивные материалы (табл. 1.2).

Высокая твердость эльбора, в 3...4 раза превосходящая твердость традиционных абразивов, является важным преимуществом, так как значительно уменьшает износ зерен эльбора при шлифовании и длительное время сохраняет их остроту.

Другим важным свойством и преимуществом эльбора является температурная устойчивость: заметное окисление поверхности зерен эльбора начинается с 1100...1200 °С. Такие температуры при шлифовании являются мгновенными (время контакта зерна с обрабатываемой поверхностью заготовки составляет 10^{-4} ... 10^{-6} с) и возникают только при очень жестких режимах шлифования. Очевидно, что зерна эльбора очень мало изнашиваются от термических нагрузок.

Важным свойством и преимуществом эльбора является также его высокая химическая стойкость. Эльбор не реагирует с кислотами и щелочами, инертен практически ко всем химическим элементам, входящим в состав сталей и сплавов. Особо следует отметить инертность эльбора к железу, являющемуся основой всех сталей, тогда как алмаз активно взаимодействует с железом, что является причиной интенсивного износа алмазных кругов при шлифовании сталей.

Т а б л и ц а 1.2
Свойства абразивных материалов

Материал	Микротвердость, $\times 10^2$ МПа	Температурная устойчивость, °С
Алмаз	1000	650–700
Эльбор	800–900	1100–1300
Карбид кремния	300–320	1200–1300
Электрокорунд	180–220	1500–1700

Таким образом, эльбор как абразивный материал обладает следующими преимуществами при шлифовании:

- длительно сохраняет остроту зерен, что обуславливает высокую режущую способность и стойкость кругов;

- выдерживает высокие термические нагрузки, что позволяет интенсифицировать режимы шлифования;

- позволяет шлифовать сложнолегированные стали и сплавы без адгезионного и диффузионного износа зерен эльбора.

Все это делает эльбор уникальным абразивным материалом; использование шлифовальных кругов из эльбора способствует значительному повышению производительности, точности и качества обработанных поверхностей деталей на разных операциях шлифования.

Уникальные свойства КНБ (эльбора) предопределили быстрый рост применения шлифовальных инструментов на его основе в различных отраслях машиностроения. Так, мировое (кроме России и Китая) потребление инструментов из КНБ в 1998 г. составило 46 млн карат. Годовой прирост потребления за 1996–1998 гг. составил 9,5 %. В 2000–2004 гг. годовой прирост составил около 5 %.

В мировой практике наиболее широко инструмент из КНБ применяют в автомобильной промышленности — 27 %, в производстве режущего инструмента — 19 %, в подшипниковой промышленности — 13 %.

В России объем потребления инструментов из эльбора составил в 2000 г. около 5 млн карат. Наиболее широко — в автомобильной промышленности — 24 %, подшипниковой — 13 %, но большая часть — в инструментальном производстве предприятий.

Ранее производились порошки эльбора марок ЛО и ЛП, содержащие небольшое количество монокристаллических зерен и имеющие невысокую прочность. Так, например, средняя разрушающая нагрузка на сжатие для зерен основной фракции порошка 125/100 мкм марки ЛО составляет 2,7 Н, марки ЛП — 5,7 Н (рис. 1.2, а). Разработанная более совершенная технология синтеза эльбора позволила перейти к выпуску порошков марок ЛКВ40 и ЛКВ50, отличающихся более высокой прочностью зерен: 7 Н для порошка ЛКВ40, 9 Н для порошка ЛКВ50 (см. рис. 1.2 а). Данные по прочности порошков эльбора на истирание приведены на рис. 1.2, б и также свидетельствуют о преимуществе новых марок порошков.

На рис. 1.3 показано, как повышение прочности влияет на работоспособность кругов: коэффициент шлифования уве-

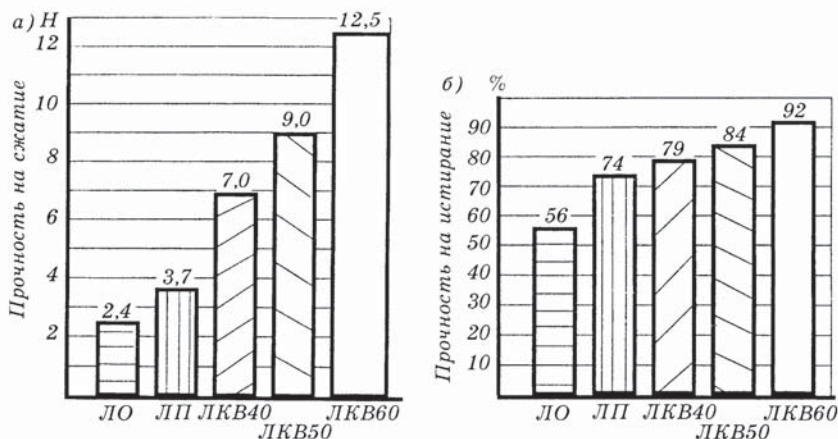


Рис. 1.2. Прочность зерен эльбора различных марок на сжатие (а) и на истирание (б)

личивается в 1,2...1,4 раза при легких режимах и в 1,6...2,4 раза при жестких режимах шлифования.

На заводе «Ильич» начато промышленное освоение эльбора марки ЛКВ60, отличающегося еще более высокой прочностью по сравнению с марками ЛКВ40 и ЛКВ50 (см. рис. 1.2, а). Эльбор марки ЛКВ60 может оказаться наиболее эффективным при таких процессах шлифования, как высокоскоростное и глубинное, где нагрузки на зерно наиболее велики.

Для использования в кругах на органических связках порошки эльбора металлизуют: на поверхность зерен наносят

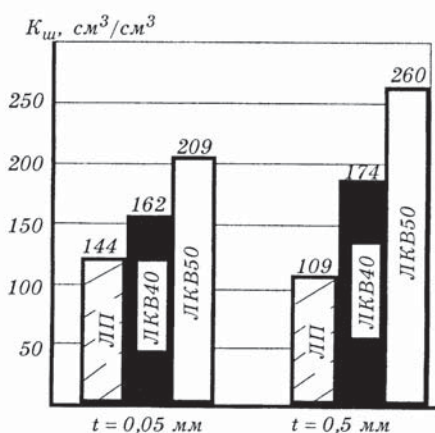


Рис. 1.3. Коэффициент шлифования для кругов из эльбора различных марок

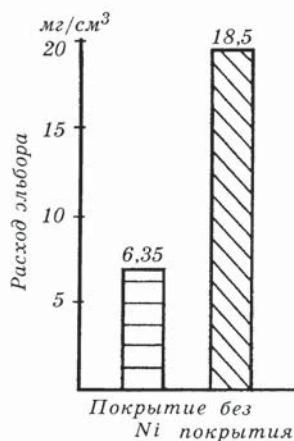


Рис. 1.4. Влияние металлизации зерен на удельный расход эльбора

тонкий слой никеля. Это значительно увеличивает адгезию зерен и органической связки, снижая расход кругов (рис. 1.4).

Марки металлизированного эльбора — ЛКВ40М, ЛКВ50М. Круги из более прочного эльбора марок ЛКВ50, ЛКВ50М применяют при интенсивных режимах шлифования, например, при вышлифовке по-целому стружечных канавок в режущем инструменте, а также при шлифовании наиболее труднообрабатываемых материалов.

В инструментах для чистового и финишного шлифования широко используют микропорошки эльбора, получаемые дополнительным измельчением и классификацией. Микропорошки имеют марку ЛМ.

1.3.2. АЛМАЗ

Алмаз является наиболее твердым из всех известных материалов: микротвердость $100 \cdot 10^3$ Н/мм². Однако алмаз имеет низкую температурную стойкость (~ 650 °С) и отличается высоким химическим сродством к железу. Эти недостатки не позволяют эффективно применять алмазные круги для шлифования основного машиностроительного материала — стали, основой которой является железо.

Марки синтетических алмазов (ГОСТ 9206–80), применяемые в инструментах для машиностроительного производства, следующие: АС4, АС6, АС15, АС20, АС32. С увеличением индекса прочность алмазных зерен повышается: так, средняя прочность на сжатие зерна фракции 125/100 мкм марки АС4 составляет 4,1 Н, зерна марки АС32 — 21,6 Н. Для использования алмаза в кругах на органической связке алмазные порошки также металлизуют (марки АС6М и т. п.). В некоторых случаях используют природные алмазы марок АЗ...А5. Микропорошки синтетических алмазов имеют марку АСМ, природных алмазов — марку АМ.

В промышленности России используют 13,5 млн карат алмазных инструментов, из них в машиностроении — 34 % (данные 2000 г.).

1.3.3. ЭЛЬБОР И АЛМАЗ — РАЗЛИЧНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Как показано выше, эльбор менее твердый материал, чем алмаз, но обладает более высокой температурной устойчивостью (1100...1200 °С против 600...650 °С у алмаза) и хими-

ческой инертностью, тогда как алмаз при высокой температуре в зоне шлифования активно реагирует с железом. Такая разница в свойствах предопределила различные области эффективного применения эльборовых и алмазных шлифовальных кругов.

Круги на основе эльбора применяют при шлифовании деталей из различных сталей: подшипниковых, штамповых, инструментальных, сложнолегированных, азотированных, цементированных. Особенно эффективны эльборовые круги при шлифовании быстрорежущих сталей, содержащих вольфрам, ванадий, молибден, кобальт в виде соединений высокой твердости, в ряде случаев превосходящей твердость традиционного абразивного материала — электрокорунда.

Как правило, детали из указанных сталей подвергают термической обработке до твердости HRC 55...65. Разработанные в ООО «Петербургский абразивный завод „Ильич“» высокопористые эльборовые круги АЭРОБОР [76] позволили расширить область эффективного применения на менее твердые, HRC 40...50, стали и сплавы, в том числе на жаропрочные сплавы на основе никеля, широко используемые в аэрокосмической технике. Следует отметить также высокую эффективность шлифования эльбором специальных износостойких покрытий — плазменных, детонационных, хрома, а также закаленного чугуна.

Шлифовальные круги из эльбора широко используют в основном производстве таких отраслей машиностроения, как автомобильная, подшипниковая, авиационная, станкостроение, производство зубчатых колес, винтовых пар качения.

В инструментальном производстве круги из эльбора обеспечивают высокую эффективность при шлифовании, в том числе заточке, режущих инструментов из быстрорежущих сталей, штампов и прессформ, калибров, мерительного инструмента.

Алмазные круги применяют в машиностроении, главным образом, в инструментальном производстве для шлифования и заточки твердосплавного режущего инструмента. Кроме того, алмазные круги используют для шлифования различных твердосплавных деталей: пуансонов и матриц, штампов и прессформ, прокатных валков, калибров, фильер. Алмазные круги обеспечивают наиболее высокие показатели производительности и качества при шлифовании деталей из технической керамики, твердых и хрупких магнитных материалов, чугуна, а также при обработке абразивных инструментов.

Т а б л и ц а 1.3

Сравнительные данные при шлифовании кругами из эльбора и алмаза

Обрабатываемый материал	Удельный расход, q , мг/г		$\frac{q_a}{q_b}$	Удельная работа шлифования, A , Дж/мм ³		$\frac{A_a}{A_b}$
	Эльбор	Алмаз		Эльбор	Алмаз	
Быстрорежущая сталь	1,98	16,8	0,12	270	700	0,38
Твердый сплав	16,6	0,8	21,0	650	190	3,40

Относительно новой областью применения алмазных кругов является шлифование режущих пластин из композитов на основе кубического нитрида бора и алмаза (названия в зарубежной литературе соответственно PCBN и PCD).

Большой объем алмазного инструмента используется не в машиностроении, а в других областях: при резке и шлифовании природного камня (гранита, мрамора и др.); для обработки строительных материалов (бетона, строительной керамики); при шлифовании и резке стекла, в том числе кварцевого, оптического, автомобильного; для обработки драгоценных и полудрагоценных камней; для обработки огнеупоров, графитовых электродов.

Технология шлифования и резки алмазными кругами в этих областях, не относящихся к машиностроению, в данной книге не рассматривается.

Таким образом, эльбор и алмаз не являются конкурентами в технологии шлифования, а имеют существенно различные области эффективного применения.

В табл. 1.3 приведены сравнительные данные по шлифованию кругами из эльбора и алмаза быстрорежущей стали и твердого сплава. При шлифовании стали показатели эльбо-

Т а б л и ц а 1.4

Применение различных абразивных материалов

Обрабатываемый материал	Электрокорунд	Карбид кремния	Эльбор	Алмаз
Углеродистая сталь Низколегированная сталь Нетермообработанная сталь	+	—	—	—
Легированная сталь, закаленная	+	—	+	—
Инструментальная сталь, закаленная	+	—	+	—
Азотированная, цементированная сталь	+	—	+	—
Быстрорежущая сталь	—	—	+	—

Обрабатываемый материал	Электро-корунд	Карбид кремния	Эльбор	Алмаз
Подшипниковая сталь	+	—	+	—
Нержавеющая сталь: незакаленная закаленная	+	—	+	—
Жаропрочные сплавы	+	—	+	—
Титановые сплавы	—	+	—	—
Цветные сплавы на основе меди, алюминия	—	+	—	—
Твердые сплавы	—	+	—	+
Чугун: серый закаленный	— —	+	+	+
Магнитные сплавы Ферриты	—	—	—	+
Износостойкие покрытия — плазменные, детонационные, твердый хром	—	—	+	+
Резиновые, полимерные покрытия	+	+	—	—
Техническая керамика	—	—	—	+

ровых кругов выше в 3...8 раз (расход эльбора и удельная работа шлифования меньше). При шлифовании твердого сплава, наоборот, показатели алмазных кругов выше в 3...20 раз (особенно возрастает расход эльбора). Приведенные данные убедительно подтверждают положение о разных областях применения эльбора и алмаза. В табл. 1.4 приведены обобщенные данные по применению абразивных материалов для шлифования различных групп материалов.

1.4. ЗЕРНИСТОСТЬ ШЛИФОВАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.4.1. ПОРОШКИ ТРАДИЦИОННЫХ АБРАЗИВОВ. ПОНЯТИЕ ЗЕРНИСТОСТИ. ЗЕРНОВОЙ СОСТАВ

Используемые для изготовления кругов шлифовальные материалы, полученные в результате измельчения и классификации исходных абразивов, состоят из совокупности зерен, условно подразделяемых на *фракции* (ГОСТ 3647–80). Фракция, содержащая наибольшее количество (% по массе) зерен, называется основной.

Шлифовальные материалы, в соответствии с ГОСТ 3647–80, делятся на следующие группы:

— *шлифзерно* — размер зерен основной фракции от 2000 до 160 мкм;

— *шлифпорошки* — размер зерен основной фракции от 125 до 40 мкм;

— *микрошлифпорошки* (в дальнейшем «микропорошки») — размер зерен основной фракции от 63 до 3 мкм.

Кроме основной фракции группы «шлифзерно» и «шлифпорошки» содержат предельную, крупную, комплексную, мелкую фракции. Комплексная фракция включает фракции: основную, крупную и смежную с основной.

В группе «микропорошки» комплексная фракция состоит из основной и смежной фракций. В стандарте ISO¹ 8486 термин «фракция» и названия фракций отсутствуют.

Условное числовое обозначение определенной совокупности зерен, соответствующее размеру зерен основной фракции, названо *зернистостью* шлифовального материала. Это число определено следующим образом: для групп «шлифзерно» и «шлифпорошки» это число равно 0,1 размера стороны ячейки сита в мкм, на котором задерживаются зерна основной фракции. Так, например, зернистость 40 соответствует 0,1 размера ячейки сита, равного 400 мкм.

Для группы «микропорошки» это число равно наибольшему размеру частиц основной фракции в мкм (с индексом М). Так, зернистость М20 соответствует наибольшему размеру частиц основной фракции 20...14 мкм.

Совокупность количеств (в % по массе) зерен всех фракций называется *зерновым составом* шлифовального материала.

В различных группах шлифовальных материалов содержание фракций различно (табл. 1.5). Данные ГОСТ 3647–80

Таблица 1.5

Состав групп шлифовальных материалов по фракциям. Традиционные абразивы

Группа материала	Содержание фракций, % по массе				
	Предельная, не более	Крупная, не более	Основная, не менее	Комплексная, не менее	Мелкая, не более
Шлифзерно	—	20	45	90	3
Шлифпорошки	—	20	40...45	80...85	3, 10, 15
Микропорошки	3...5	20...27	40...45	67...75	7...9

¹ ISO — Международная организация по стандартизации.

Т а б л и ц а 1.6

Зернистость шлифовальных материалов (традиционные абразивы)

Группа шлифовального материала	Обозначение по ГОСТ 3647-80	Размер зерен основной фракции, мкм	Обозначение по стандарту ISO 8486-1	Размер зерен основной фракции, мкм
Шлифзерно	200	2500...2000	F10	2360...2000
	160	2000...1600	F 12	2000...1700
	125	1600...1250	F 16 (14)	1700...1400
	100	1250...1000	F 20	1180...1000
	80	1000...800	F 22	1000...850
	63	800...630	F 30	700...600
	50	630...500	F 36	600...500
	40	500...400	F 40	500...425
	32	400...315	F 54 (46)	355...300 (425...355)
	25	315...250	F 60	300...250
	20	250...200	F 70	250...212
	16	200...160	F 80	212...180
Шлифпорошки	12	160...125	F 100	150...125
	10	125...100	F 120	125...106
	8	100...80	F 150	106...75
	6	80...63	F 220	75...63
	5	63...50	—	—
	4	50...40	—	—
Микропорошки	M63	63...50	F 230	56...50
	M50	50...40	F 240	46...42
	M40	40...28	F 280 (320)	30,7...27,5
	M28	28...20	F 360	24,3...21,3
	M20	20...14	F 400	18...16
	M14	14...10	F 500	13,8...11,8
Тонкие микропорошки	M10	10...7	F 600	10,3...8,3
	M7	7...5	F 800	7,5...5,5
	M5	5...3	F 1000	5,3...3,7
	M3	3...2	F 1200	3,5...2,5

Таблица 1.7

Показатели зернового состава микропорошков по стандарту ISO 8486-2

Обозначение зернистости	Размер зерна, мкм, при содержании 3 %, не более	Размер зерна, мкм, при содержании 50 %, не менее	Размер зерна, мкм, при содержании 94 %, не менее
F230	82	53 ± 3	34
F 240	70	$44,5 \pm 2$	28
F 280	59	$36,5 \pm 1,5$	22
F 320	49	$29,2 \pm 1,5$	16,5
F 360	40	$22,8 \pm 1,5$	12
F 400	32	$17,3 \pm 1$	8
F 500	25	$12,8 \pm 1$	5
F 600	19	$9,3 \pm 1$	3
F 800	14	$6,5 \pm 1$	2
F 1000	10	$4,5 \pm 0,8$	1
F 1200	7	$3 \pm 0,5$	1

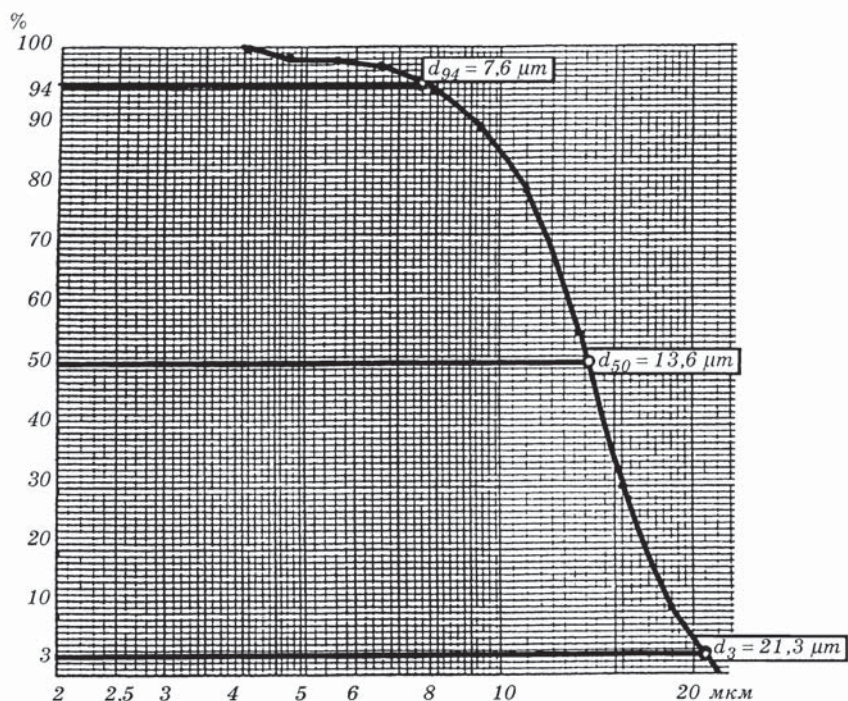


Рис. 1.5. Пример кривой распределения зернового состава микропорошка F500 по стандарту ISO 8486-2