

Д. х. н. **А. В. Беляков**<sup>1</sup> (✉), **С. И. Церман**<sup>2</sup> (✉)

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «Дельта» ГК «Адель», Москва, Россия

УДК 621.923.4:621.921.34

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ «УМНЫХ СЕГМЕНТОВ» ПРИ ПЕРИФЕРИЙНОМ И ТОРЦЕВОМ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ АБРАЗИВНЫХ И НЕАБРАЗИВНЫХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ\*

Приведен сравнительный анализ механической обработки периферийной и торцевой частями алмазного инструмента. Показана актуальность применения модульных сегментов при торцевом шлифовании. Рассмотрены особенности их конструкции в инструменте для торцевого шлифования изделий из твердых материалов: бетона, керамики и природного камня. Предложена условная классификация материалов при обработке на операциях торцевого шлифования на абразивные и неабразивные. На основе модульных «умных сегментов» создана гамма высокопроизводительных и стойких инструментов для последовательной обработки от операции калибровки до тонкого шлифования поверхности обоих классов материалов. Предложены специальные конструкции заменяемых (сменных) шлифовальных элементов для оснащения стационарных и мобильных шлифовальных установок.

**Ключевые слова:** алмазный инструмент, шлифование, зона резания, «умные сегменты», режущие модули.

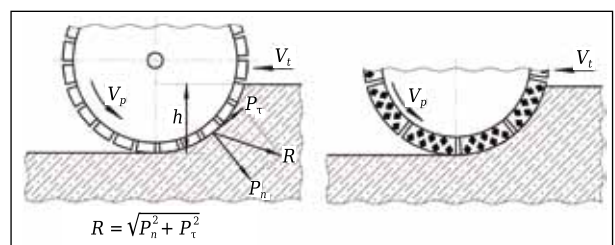
**М**еханическую обработку проводят на заключительных операциях технологического процесса изготовления изделий из хрупких материалов: керамики, огнеупоров, бетона, природного камня. Как правило, для этого используют алмазный инструмент; при этом сьем припусков при шлифовании, срезание объемов на отрезных операциях, высверливание при сверлении происходят за счет вращения этого инструмента. В зависимости от расположения режущей поверхности инструмента относительно оси его вращения резание может быть периферийным либо торцевым. Традиционно к периферийной обработке относят главным образом циркулярное резание (а также шлифование, фрезерование), а к торцевой — фрезерование, шлифование и сверление. Отличительные особенности этих схем резания легко выявляются при рассмотрении их кинематики. На рис. 1 и 2 показаны кинематические схемы периферийного резания (или — шлифования) и торцевого шлифования (фрезерования).

\* По материалам Международной конференции огнеупорщиков и металлургов (16–17 мая 2019 г., Москва).

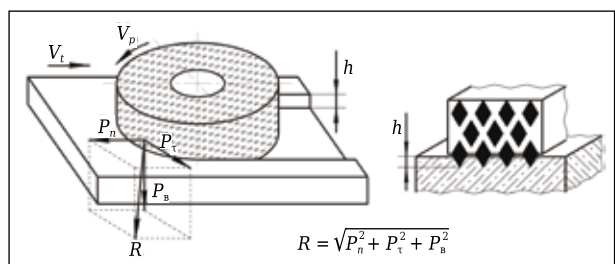


А. В. Беляков  
E-mail: av\_bel@bk.ru  
С. И. Церман  
E-mail: cs@deltaplant.ru

Об особенностях периферийной обработки дает представление, например, рассмотрение схемы циркулярного резания [1, 2]. При этой



**Рис. 1.** Схема распиловки периферийным сегментным инструментом и дуга контакта в зоне резания [1]:  $V_p$  — окружная скорость периферии инструмента, м/с;  $V_t$  — скорость подачи, м/с (м/мин);  $h$  — глубина резания, мм;  $P_n$ ,  $P_t$  и  $R$  — нормальная, тангенциальная составляющие и равнодействующая сил резания



**Рис. 2.** Схема шлифования торцевым инструментом и область контакта в зоне резания по данным [1]:  $P_a$  — сила прижима, Н; остальные обозначения такие же, как на рис. 1

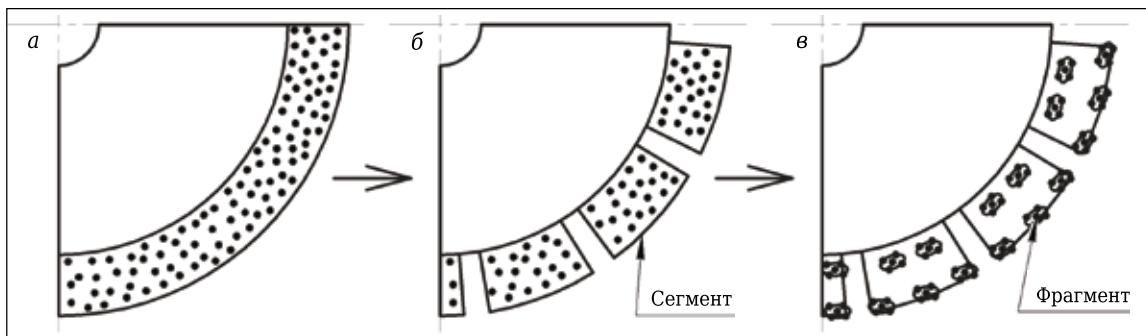
схеме небольшая площадь контакта в сочетании с вращением инструмента создает большое контактное давление и вызывает импульсные контактные напряжения, эквивалентные соударениям алмазов с деталью. Это приводит к дроблению детали алмазными зернами (энергетически выгодное хрупкое разрушение материала), заостряющему скалыванию режущих кромок алмазов, свободному интенсивному выносу из зоны резания продуктов шлифования и охлаждению.

При торцевом воздействии на операциях шлифования область контакта с деталью может составить значительную часть режущей поверхности инструмента, а то и всю ее площадь. Поэтому в условиях шлифования торцом инструмента контактное давление в зоне резания и интенсивность взаимодействия алмазов с деталью снижаются. Это приводит к разрушению материала при малых нагрузках (растет доля неэффективной пластической деформации в разрушении) [2]; заполировыванию режущих кромок зерен с потерей режущей способности инструмента [3]; затруднению удаления продуктов шлифования из контактной зоны и ее охлаждения. Поэтому торцевая схема проигрывает периферической обработке в эффективности. Чтобы повысить давление алмазов (напряжение) в контактной зоне и облегчить удаление шлама, необходимо уменьшить площадь контакта. Для этого режущий слой инструмента разделяют на обособлен-

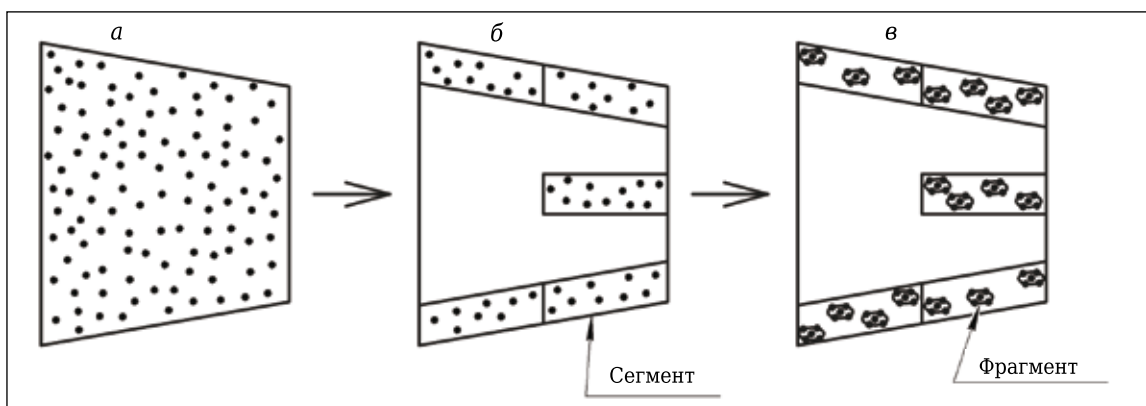
ные участки — сегменты. Чаще всего сегменты изготавливают отдельно и напаивают на корпус шлифовального инструмента или сменного элемента для инструмента. Для дополнительного вклада в повышение эффективности торцевого шлифования можно продолжить дробление режущего слоя, предложив такую конструкцию сегментов, в которой они сами разделены на отдельные минисегменты — так называемые «фрагменты». Эта конструкция, названная «умными сегментами» (или смарт-сегментами, или модульными сегментами) и разработанная для периферийного отрезного сегментного инструмента, оказалась еще более эффективной для обработки торцевым шлифованием. «Умные сегменты» [5] не только улучшают режущие свойства инструмента, но и адаптируют его работу к условиям процесса резания.

Алгоритм модификации сплошного слоя на сегменты и дальнейшее дробление сегментов на фрагменты с образованием смарт-сегментов показаны на рис. 3 для периферийного отрезного инструмента и на рис. 4 для сменного алмазного элемента торцевого шлифовального инструмента. «Умные сегменты» построены по модульному принципу [6]. Они состоят из трех типов модулей, разделяющихся по размеру и решаемым задачам (рис. 5):

1 — режущие модули (или фрагменты сегмента) содержат закрепленные во фрагментной



**Рис. 3.** Преобразование отрезного круга со сплошной алмазосодержащей режущей кромкой 1А1R (а) в сегментный отрезной круг 1А1RSS (б) и фрагментирование сегментов круга (в)



**Рис. 4.** Преобразование сплошного рабочего слоя сменного алмазного элемента (а) в бруски-сегменты (б) и фрагментирование брусков (в)

связке алмазные зерна, которые воздействуют на обрабатываемую деталь;

2 — несущие модули образуют матрицу, разделяющую и удерживающую режущие модули;

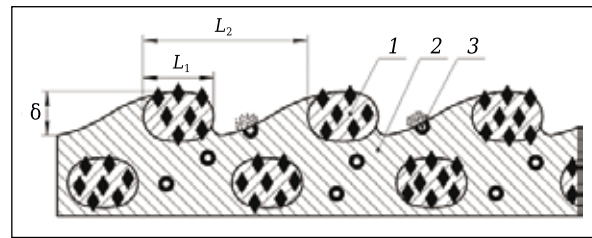
3 — функциональные модули, предназначенные для дозированного впрыскивания в зону резания небольшого количества частиц материалов, облегчающих процесс резания.

Термин «модуль» взят из технологического процесса изготовления «умных сегментов»: их составляют смешиванием соответствующих гранул (модулей) с последующим их прессованием и спеканием. На рис. 5 показана схема структуры модульного сегмента. Результаты применения «умных сегментов» в инструменте для периферического резания гранита и некоторых огнеупорных материалов приведены в публикации [7].

На рис. 6 показана фотография излома режущего сегмента в инструменте для калибровки и грубого шлифования изделий из абразивных материалов средней и низкой прочности: шамотных огнеупоров, пористой керамики, низкомарочных бетонов, некоторых мягких пород природного камня. Видно темное поле связки, окружающей алмазные зерна, заключенные в режущих модулях, на фоне более светлого поля безалмазной несущей матрицы, разделяющей и удерживающей режущие модули.

Из-за внутренней структуры модульных сегментов [5] при шлифовании на их режущей поверхности скорости износа материалов режущего и несущего модуля различаются, что приводит к образованию специфического режущего рельефа (см. рис. 5). Повышенная твердость режущих модулей по сравнению с матрицей замедляет их износ и создает выступание над уровнем матрицы. Такой сегмент обладает повышенной режущей способностью: поверхность несущей матрицы выводится из контакта с обрабатываемым материалом; из-за уменьшения площади контакта возрастает контактное давление на режущие кристаллы алмаза, что создает предпосылки для реализации самозатачивания алмазных зерен в процессе работы [3, 4]. Кроме того, образующиеся углубления между режущими модулями служат для удаления продуктов резания (см. рис. 5). Оптимизируя в рабочих «умных сегментах» размеры и объемную долю режущих модулей, а также варьируя составы связок, можно получить торцевой инструмент, приближающийся по эффективности к периферийному.

За прототип для конструирования модульного рабочего сегмента предложено [5] взять конструкцию выбранного или подобранного опытным путем традиционного сегмента со случайным расположением отдельных режущих алмазов: их марку, размер зерен и концентрацию. Затем комбинацией технологических при-



**Рис. 5.** Схема модульного сегмента [5]:  $L_1$  — размер режущего модуля;  $L_2$  — модульный шаг;  $\delta$  — углубление, образующееся между режущими модулями в процессе эксплуатации



**Рис. 6.** Фото поверхности излома твердого шлифовального модульного сегмента ( $\times 10$ ). Относительно темные режущие модули распределены в более светлой безалмазной матрице

емов алмазы группируют в режущих модулях. Необходимую концентрацию режущих зерен в этих модулях (фрагментах) технологически задают объемным количеством связки при изготовлении алмазных гранул. На рис. 7 показаны гранулы для 2-мм режущих модулей при разном содержании в них алмазов. Увеличение количества связки в режущем модуле уменьшает удельное содержание в нем алмазов. Концентрация алмазов в модулях (см. рис. 6) соответствует 150 (37,5 об. %); покрывающая их сверху связка режущих модулей частично удалена при раскалывании рабочего сегмента.

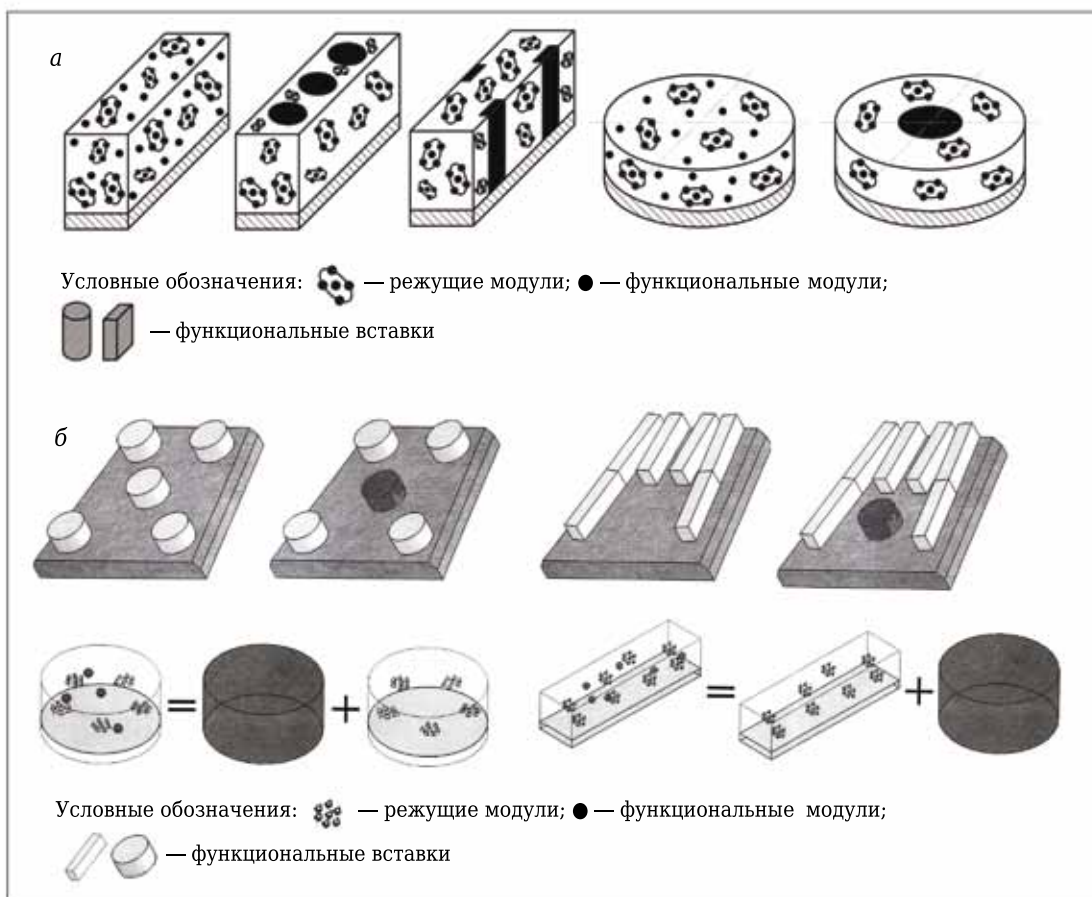
При торцевом шлифовании еще больше, чем при периферийных процессах, повышается роль таких элементов рабочих «умных сегментов», как функциональные модули. Накопление продуктов износа материала и сегментов (шлама) в зоне резания приводит к увеличению количества активных частиц и их воздействия на процесс (снижение трения, температуры, восстановление заполированных граней алмазов, расклинивание шлифуемого материала) [6]. За счет повышения содержания функциональных модулей в инструменте можно создавать в контактной зоне любую концентрацию активных частиц. Но объем функциональных модулей в режущем сегменте ограничен технологическими возможностями при прессовании сегментов. При периферийном резании предъявляют высокие требования к прочности сегментов. При



**Рис. 7.** Гранулы для режущих модулей с разным содержанием алмазов (×3): *а* — для концентрации алмазных зерен 150–200 (37,5–50 об. %); *б* — для концентрации 100–150 (25–37,5 об. %); *в* — для концентрации ≤ 100 (≤ 25 об. %). Концентрация алмазов принимается равной 100, когда зерна занимают ровно 25 % объема рабочего слоя [10]

торцевом шлифовании риск разрушения инструмента меньше, и появляется возможность повысить содержание функциональных модулей, невзирая на некоторое конструктивное ослабление прочности сегментов. Значительно повысить количество модулей можно, сосредоточив их во вставках различной формы в объеме сегмента, например в цилиндрах, призмах, которые могут занимать значительно большую долю объема сегмента, чем рассредоточенные модули. Технологически это обеспечивают прессованием брикетов сегментов сложной конструк-

ции, в которые перед спеканием вкладывают заранее отпрессованные брикеты из активных материалов (вставки). На рис. 8, *а* показаны варианты размещения функциональных модулей в таблеточных и брусковых сегментах в виде вставок различного профиля взамен случайным образом распределенных по всему объему сегмента при периферийной обработке (см. рис. 5). Еще более эффективным способом размещения функциональных материалов является сосредоточение их в отдельных безалмазных сегментах (дополнительно к алмазным), напавиваемых



**Рис. 8.** Два дополнительных варианта конструкции функциональных элементов в шлифовальном инструменте, включающие специальные вставки и сегменты: *а* — функциональные модули сосредоточены в функциональных вставках; *б* — функциональные модули сосредоточены в функциональных сегментах

на корпуса сменных шлифовальных элементов инструмента (см. рис. 8, б). Для устранения интенсивного разрушения их кромок при шлифовании оптимальной формой функциональных сегментов является таблетка. На рис. 8, б схематически показано, как функциональные элементы из напаянных на корпус инструмента модульных алмазосодержащих сегментов можно сосредоточить и разместить в отдельной функциональной таблетке.

Такие свойства инструмента для торцевого шлифования, как режущая способность, стойкость и чистота обработки плоскости, можно широко регулировать параметрами модульных сегментов. Это в первую очередь регулирование объемной доли режущих модулей в сегменте, размера и концентрации алмазных зерен в модуле. К этому можно добавить сочетание таких свойств несущей и режущей матриц, как твердость и стойкость к абразивному износу. Такая регулировка позволит учесть разнообразие свойств обрабатываемых материалов.

Накопленный практический опыт шлифования различных материалов позволил сделать ряд выводов. Первый вывод состоит в том, что по обрабатываемости модульным шлифовальным инструментом большинство материалов можно условно разделить на две большие группы, о которых пойдет речь ниже. Механические свойства и структуру материалов в этих группах определяют технологию их обработки, а также конструкцию (формулу) алмазного инструмента.

Первая группа — легкообрабатываемые абразивные материалы — объединяет непрочные материалы, как правило, пористые, в абразивном шламе которых при шлифовании образуется большое количество крупных частиц с высокой абразивной способностью. Их образование связано с высокими припусками на операции шлифования и с возможностью повышенной скорости обработки непрочных материалов. При этом преобладает хрупкое разрушение материала [2], а размер и абразивность частиц в основном зависят от такого технологического параметра, как горизонтальная и вертикальная подача (заглубление) [4]. Благодаря высокой нагрузке на зерна при использовании режущих модулей режущие кромки алмазов редко заполировываются [3], что обеспечивает высокую режущую способность инструмента. Таким образом, самозатачивание и ресурс инструмента обеспечиваются в основном за счет своевременного износа связки в режущих модулях, а повышенная режущая способность — за счет опережающего износа несущей матрицы. Такой инструмент оказалось рационально оснащать режущими модулями с повышенным содержанием алмазов со стойкими к абразивному износу связками. К абразивным материалам относят мягкие песчаники, шамотные огнеупоры, «тощий» и свежий бетоны.

Вторая группа — труднообрабатываемые материалы, которые при алмазной обработке ведут себя как неабразивные, объединяющие малопористые прочные материалы, при шлифовании которых из-за их твердости образуются мелкодисперсные малоабразивные частицы. Из-за высокой прочности и малой пористости обработку таких образцов проводят с невысокой интенсивностью, а припуски стараются минимизировать. По минимуму выбирают и подачу (горизонтальную и вертикальную). Наряду с хрупким разрушением может появиться квазипластическая составляющая деформации материала, которую многие называют пластичной [2, 8]. В результате в единицу времени образуется небольшое количество мелкодисперсных неабразивных частиц [4], не оказывающих значительного воздействия на несущий модуль (матрицу). В то же время при неинтенсивном взаимодействии алмазных зерен с прочным материалом возникает тенденция к сильному затуплению режущих кромок, которое накапливается и замедляет резание [3]. Таким образом, самозатачивание инструмента обеспечивается алмазной конструкцией режущего сегмента, например варьируя содержание зерен. А для своевременного обновления алмазов из режущего слоя выбирают нестойкие мягкие связки как для несущих, так и для режущих модулей. К неабразивным материалам относят кварциты, твердые граниты, корундовые, циркониевые огнеупоры, монокристаллы, топ-бетоны, прочные спецбетоны.

Второй практический вывод состоит в том, что обработку каждой из этих групп материалов можно обеспечить всего одной унифицированной модификацией модульных режущих сегментов. При этом, разрабатывая конструкцию сегментов, для сохранения режущей способности алмазных зерен приходится учитывать характеристики оборудования и правильно планировать скорость механической обработки. Шлифование камня и некоторых изделий из бетона производят как на стационарных шлифовально-полировальных станках в условиях предприятий, так и на мобильных установках при шлифовании каменных полов. Обработку бетонных полов и покрытий из мозаичной каменно-бетонной плитки ведут на мобильных установках, а огнеупорные изделия шлифуют в стационарных условиях. Некоторые элементы технологии плоского шлифования торцевым инструментом изделий и конструкций из различных материалов (твердых горных пород, бетонов, огнеупоров) представлены с учетом официальных рекомендаций [9], а также опыта применения шлифовального инструмента группой компаний «Адель» и других отечественных и зарубежных производителей алмазного инструмента. Рассмотрены только операции шлифования; полировка в тему исследования не входила.

Сравнение типовой (традиционной) технологии компании «Адель» для шлифования непрочного бетона марок М200–М300 и изделий из шамотных огнеупоров с технологией на базе применения модульных сегментов предприятия «Дельта» приведено в табл. 1. Переходы обозначены по классификации компании «Адель» в соответствии с зернистостью алмазных порошков: обдирка, калибровка, грубое, среднее и тонкое шлифование. Смарт-операции шлифования — это операции с применением инструмента на базе модульных сегментов (смарт-сегментов). Составы сегментов для обработки бетона и шамота, а также технология шлифования для них одинакова. Сведения о шероховатости поверхностей на операциях приведены в табл. 1 для бетонных полов.

Из табл. 1 следует, что инструмент, напаянный модульными сегментами для смарт-калибровки, за счет повышенной производительности резания дополнительно выполняет функции обдирки и грубого шлифования в типовой технологии; при этом за счет повышенной концентрации алмазов в режущих модулях обеспечивается чистота обработки на уровне среднего шлифования. Это означает, что вместо трех-четырех операций с применением традиционного инструмента можно провести только одну, но с применением модификации «умного»

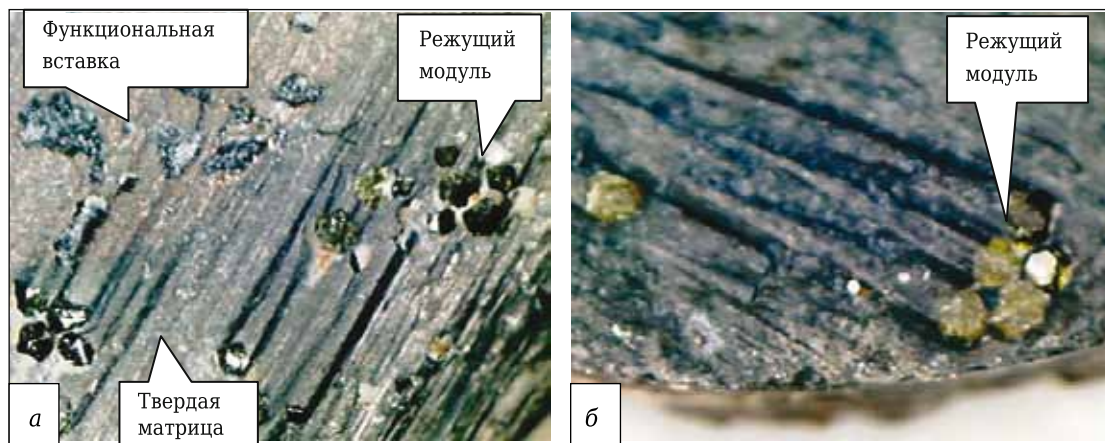
инструмента для смарт-калибровки. Аналогично использование «умных сегментов» всего на одной операции перехода смарт-среднего шлифования заменяет среднее и тонкое шлифование, применяемое в типовой технологии. На рис. 9 показаны микрофотографии рабочей поверхности сегмента для смарт-калибровки абразивных материалов. Высокое содержание карбида вольфрама в составах обеих матриц сегмента позволяет значительно повысить стойкость инструмента. Видно, что алмазы (АС300 630/400) сгруппированы в режущие модули, производящие резание. Значительное выступание зерен из матрицы, а также четко сформированные «хвосты» за алмазами свидетельствуют о сохранении хороших режущих свойств сегментов несмотря на высокую твердость (износостойкость) связки.

На рис. 10 показана фотография режущей поверхности сегмента для тонкого шлифования (или лощения) абразивных бетонов. Видна четкая граница между алмазной и безалмазной составляющими сегмента. Такое строение алмазосодержащего слоя обеспечивает высокие режущие свойства инструмента. Черные включения в светлом поле рис. 10, б — антифрикционные элементы.

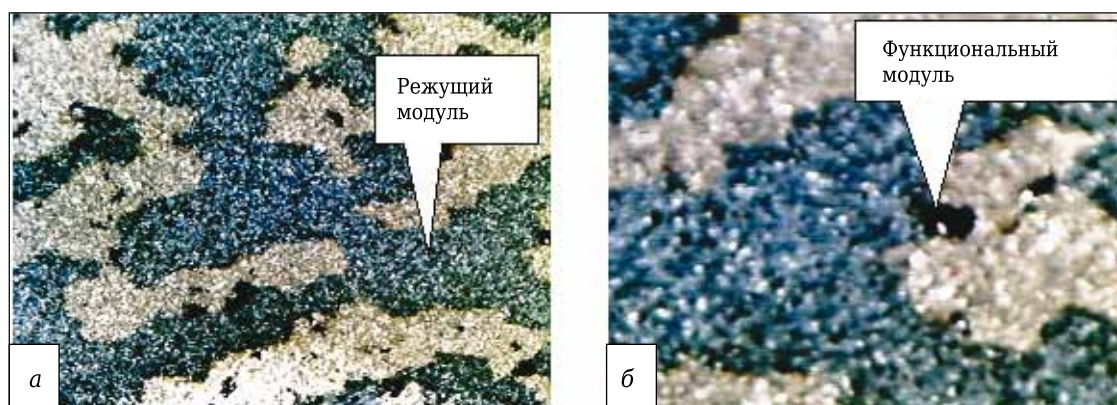
В табл. 2 приведен сравнительный анализ применения операций торцевого шлифования традиционным инструментом по типовой тех-

**Таблица 1. Сравнение типовой технологии шлифования мягких абразивных материалов (бетонных полов) инструментом с серийными сегментами предприятия «Дельта» и новой технологии с использованием «умных сегментов»**

| № п/п | Размер алмазного зерна, мкм | Типовая технология            |                     | Смарт-технология              |                     |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|
|       |                             | операция шлифования (переход) | глубина царапин, мм | операция шлифования (переход) | глубина царапин, мм |
| 1     | 1600/1250                   | Калибровка-1                  | 0,95                | Не требуется                  | –                   |
| 2     | 800/630                     | Калибровка-2                  | 0,47                | » »                           | –                   |
| 3     | 630/400                     | Калибровка-3                  | 0,32                | Смарт-калибровка              | 0,20                |
| 4     | 315/250                     | Грубая                        | 0,20                | Не требуется                  | –                   |
| 5     | 125/100                     | Средняя -1                    | 0,08                | Смарт-средняя                 | 0,05                |
| 6     | 80/63                       | Средняя -2                    | 0,05                | Не требуется                  | –                   |
| 7     | 40/28                       | Тонкая                        | 0,03                | Смарт-тонкая                  | 0,03                |



**Рис. 9.** Фото рабочего слоя режущего сегмента для калибровки абразивных материалов: а — общий план поверхности сегмента (×8); б — режущий модуль при большем увеличении (×12)



**Рис. 10.** Фото рабочего слоя сегмента для тонкого шлифования абразивных материалов: *а* — общий план поверхности сегмента ( $\times 5$ ); *б* — режущий модуль при большом увеличении ( $\times 10$ ); темное поле — режущие модули (алмазы ACM 40/28); светлое — несущая матрица

нологии (предприятие «Адель») и модульным инструментом (смарт-технология) для разных твердых неабразивных материалов: твердых гранитов, прочных бетонов и плотных огнеупоров. По аналогии с табл. 1 наименования технологических операций приведены в соответствии с зернистостью применяемых алмазных порошков.

Для каменных плит из твердых горных пород типовая технология была реализована на базе стационарной шлифовально-полировальной линии Simes за один проход изделия через набор шлифовальных инструментов со смежной зернистостью алмазов. Смарт-технология обработки каменных плит реализовали на однопереходной шлифовально-полировальной установке Sirio (Breton). Для осуществления каждой из набора последовательных операций устанавливали отдельный инструмент. Дополнительно смарт-технология опробовали при шлифовании гранитных полов с применением мобильной мозаично-шлифовальной машины GM-245. При помощи такого же мобильного оборудования шлифовали поверхность бетона (полы, различные покрытия). Информация о последовательности операций шлифования полов при применении сравниваемых технологий приведена в табл. 2. Такая же информация представлена и для обработки твердых огнеупоров, которые шлифуют на стационарных однопереходных установках. Как и в табл. 1, названия переходов процесса соответствуют указанной в табл. 2 зер-

нистости алмазов, однако охватывают операции от калибровки до среднего шлифования.

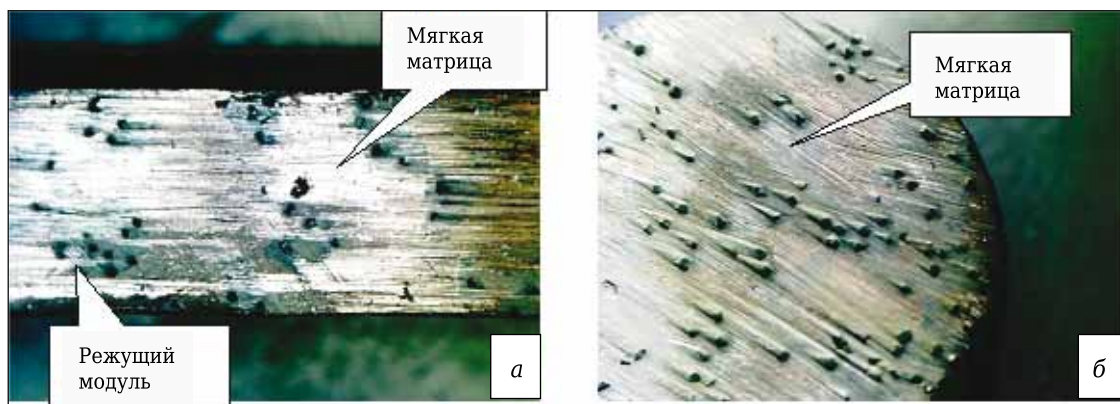
Из табл. 2 видно, что аналогично обработке мягких абразивных материалов (см. табл. 1) за счет повышенной режущей способности модульных смарт-сегментов и высокого качества шлифования ими твердых материалов можно сократить число шлифовальных переходов, а при небольших припусках на обработку вообще обойтись без инструмента с крупными алмазами. Однако основным преимуществом инструмента с «умными сегментами» является возможность повышения и стабилизации скорости обработки этих материалов.

На рис. 11 показаны фотографии режущей поверхности модульных сегментов для калибровки неабразивных материалов. Высокая стойкость сегментов обеспечивается чрезвычайно твердой связкой, удерживающей алмазы в режущей матрице (темное поле вокруг алмазных агрегатов), а их высокая режущая способность — очень мягкой безалмазной матрицей (светлое поле); представлены модули с алмазами AC300 630/400 в вольфрамовой и безвольфрамовой связках для смарт-калибровки твердого гранита. Замена вольфрама, как дорогого и дефицитного материала, на другие твердые компоненты сейчас актуальна.

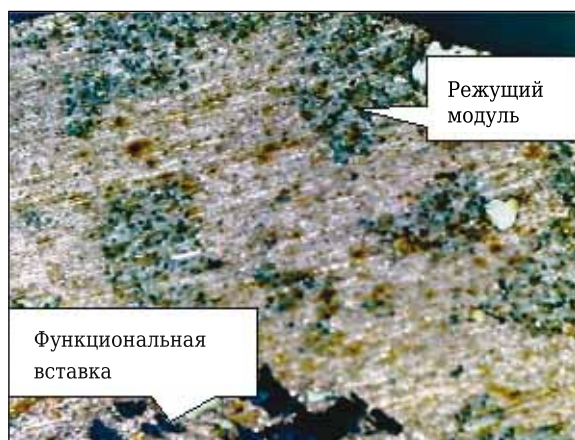
Таблеточный сегмент для среднего смарт-шлифования-1 чрезвычайно твердых неабразивных материалов (см. табл. 2) показан на рис. 12.

**Таблица 2. Сравнение типовой технологии шлифования неабразивных материалов инструментом с серийными сегментами предприятия «Дельта» и новой технологии с использованием модульных сегментов**

| № п/п | Размер зерна, мкм | Твердый гранит     |                    | Топ-бетон          |                  | Бакор              |                  |
|-------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|
|       |                   | типовая технология | смарт-технология   | типовая технология | смарт-технология | типовая технология | смарт-технология |
| 1     | 630/400           | Не применяют       | Смарт-калибровка-1 | Нет                | Нет              | Нет                | Нет              |
| 2     | 400/315           | Калибровка-2       | Нет                | »                  | »                | »                  | »                |
| 3     | 315/250           | Грубая-1           | »                  | Грубая-1           | »                | Грубая-1           | »                |
| 4     | 200/160           | Грубая-2           | »                  | Нет                | »                | Нет                | »                |
| 5     | 160/125           | Грубая-3           | »                  | »                  | »                | »                  | »                |
| 6     | 125/100           | Средняя-1          | Смарт-средняя-1    | Средняя-1          | Смарт-средняя-1  | Средняя-1          | Смарт-средняя-1  |
| 7     | 80/63             | Средняя-2          | Смарт-средняя-2    | Средняя-2          | Смарт-средняя-2  | Средняя-2          | Смарт-средняя-2  |



**Рис. 11.** Фото режущей поверхности сегментов для калибровки неабразивных материалов: а — вольфрамосодержащий брусок (×3); б — безвольфрамовая таблетка (×3)



**Рис. 12.** Рабочая поверхность сегмента для среднего шлифования неабразивных материалов (×8)

Сегмент представляет собой таблетку коаксиальной конструкции, в которой все режущие модули с алмазами АС100 125/100 расположены в стенках цилиндра, а функциональные абразивные элементы сосредоточены в центральном сердечнике, как показано на рис. 8. Выкрашиваясь из функциональной вставки и смешиваясь с неабразивными продуктами шлифования, они способствуют дополнительному вскрытию алмазных зерен.

Применение модульных режущих сегментов в жестких условиях торцевого шлифования так же, как и при периферийной обработке, по-

зволяет создавать эффективный инструмент. Основные преимущества таких инструментов — возможность высокой скорости обработки при сохранении их стойкости и режущей способности, а также повышенная чистота обработанной поверхности.

Условно разделив твердые неметаллические материалы по обрабатываемости на два широких класса: легко- и труднообрабатываемые, для каждого из них можно предложить особые конструкции универсальных модульных сегментов и сократить до минимума (двух) количество модификаций инструмента.

С учетом того, что при производстве модульных режущих сегментов не требуется затрат на специальное оборудование и значительного усложнения технологии их изготовления, возрастает экономическая эффективность применения алмазного инструмента на их базе при обработке различных материалов.

Условия торцевого шлифования допускают расширение конструктивных возможностей для использования в инструменте активных материалов, облегчающих шлифование, в повышенных количествах. Показанные на рис. 8 конструкции модульных сегментов и сменных шлифовальных элементов типа «франкфурт», напаянных этими сегментами, позволяют создать в зоне резания практически любые концентрации таких материалов и дополнительно повысить эффективность шлифовального инструмента.

#### Библиографический список

1. **Сычев, Ю. И.** Шлифовально-полировальные работы по камню / Ю. И. Сычев, Ю. Я. Берлин. — М.: Стройиздат, 1985. — 312 с.
2. **Konstanty, J.** Cobalt as a matrix in diamond impregnating tools for stone sawing applications / J. Konstanty. — Krakow: Wydawnictwa AGN, 2002. — 158 p.
3. **Davis, P. R.** An indicator system for saw grit / P. R. Davis, M. L. Fish, S. Peacock, D. N. Wright // Industrial Diamond Review. — 1996. — Vol. 56, № 570. — P. 78–87.
4. **Tönshoff, H. K.** Research on stone sawing / H. K. Tönshoff, G. Warnecke // Materials Applications Technology. — 1982. — Vol. 1. — P. 36–49.

5. **Tserman, S. I.** Segments of A diamond tool with compound structure for cutting of hard brittle materials — an approach to the creation of «smart segments» / S. I. Tserman, A. V. Belyakov // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 57, № 6. — P. 618–624. DOI: 10.1007/s11148-017-0034-y.

**Церман, С. И.** Сегменты алмазного инструмента с комбинированной структурой для обработки твердых хрупких материалов — путь к созданию «умных сегментов» / А. В. Беляков, С. И. Церман // Новые огнеупоры. — 2016. — № 11. — С. 52–58.

6. Пат. 2650459, Российская Федерация, МПК В 24 D 3/06, В 24 D 18/00 (2006/01). Структурированный алмазный инструмент и способ его изготовления / Церман С. И., Беляков А. В., Романов В. В. ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Дельта». — № 2917124547 ; заявл. 12.07.17 ; опубл. 13.04.18, Бюл. № 11.

7. **Беляков, А. В.** Применение модульных принципов при конструировании и выборе алмазного инструмента для камнеобработки / А. В. Беляков, С. И. Церман // Добыча, обработка и применение природного камня : сб. науч. тр. Вып. 17. — Магнитогорск : Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2017. — С. 184–191.

8. **Belyakov, A. V.** Cutting brittle inorganic nonmetallic materials with a diamond tool from the position of synergetics / A. V. Belyakov, S. I. Tserman // Refract. Ind.

Ceram. — 2014. — Vol. 55, № 2. — P. 97–107. DOI: 10.1007/s11148-014-9668-1.

**Беляков, А. В.** Процесс резания алмазным инструментом хрупких неметаллических неорганических материалов с позиций синергетики / А. В. Беляков, С. И. Церман // Новые огнеупоры. — 2014. — № 3. — С. 105–118.

9. Алмазно-абразивный инструмент : укрупненные нормы расхода / НПО «ВНИИАлмаз», ИСМ АН УССР. — М. : ВНИИТЭРМ, 1988. — 52 с.

10. **Бакуль, В. Н.** Основы проектирования и технологии изготовления абразивного и алмазного инструмента / В. Н. Бакуль. — М. : Машиностроение, 1975. — 296 с. ■

Получено 21.04.19

© А. В. Беляков, С. И. Церман, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ





**Materials Congress 2020**

*21st World Congress on*

**Materials Science and Engineering**

**June 22-23, 2020 Rome, Italy**

<https://materialscience.insightconferences.com/>

**Тематика конгресса включает:**

- 2D-материалы
- Адаптивные нанотрубчатые архитектуры
- Технологии углеродных наноматериалов
- Углеродные нанотрубки
- Керамические материалы и стекло
- Алмазные наночастицы
- Новые области материаловедения
- Фуллерены
- Функциональные наноматериалы
- Графеновые материалы
- Наночастицы оксида графена
- Многостенные нанотрубки
- Наноструктуры и нанотехнологии
- Диоксид циркония