



С. И. Церман¹, д. х. н. А. В. Беляков² (✉)

¹ ООО «Дельта» группы компаний «Адель», Москва, Россия

² ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Россия

УДК 621.921.34.001.5

СЕГМЕНТЫ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА С КОМБИНИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ — ПУТЬ К СОЗДАНИЮ «УМНЫХ СЕГМЕНТОВ»*

Рассмотрены некоторые принципы конструирования алмазной составляющей сегментов режущего и шлифовального инструмента для обработки твердых хрупких материалов, в том числе огнеупоров. Приведены примеры конструкций сегментов конкретного назначения. Указаны принципы построения комбинированных «умных сегментов», оказывающих, помимо резания, дополнительные воздействия в зоне резания, адаптирующие условия резания к инструменту. Приведены примеры обработки различных материалов, показывающие универсальность и эффективность предлагаемых сегментов.

Ключевые слова: алмазный инструмент, зона резания, «умные сегменты», «фрагментные сегменты».

На предприятиях, выпускающих изделия из твердых хрупких материалов, в частности огнеупоров, часто сталкиваются с необходимостью их механической обработки: резания, шлифования, сверления; иногда необходима и тонкая обработка. Значительную часть этих операций производят при помощи алмазного инструмента на металлической связке. При этом предприятия, связанные с выпуском определенной номенклатуры изделий из конкретных материалов и обладающие определенным станочным парком, предпочитают алмазный инструмент, который обеспечивает оптимальное резание всему набору обрабатываемых материалов при оптимальном соотношении цена : качество. Однако при подборе режимов обработки интенсивность (скорость) процесса не всегда соответствует желаемому уровню, а универсальность инструмента может не совпадать с гаммой обрабатываемых материалов.

В предыдущих исследованиях авторы настоящей статьи разрабатывали сегменты, позволяющие создавать алмазный инструмент для высокоскоростной обработки широкого ряда материалов. Основное внимание в разработках было уделено учету явлений, происходящих в зоне резания — пространстве между режущей и обрабатываемой поверхностями в пределах дуги

их контакта, а также в зонах непосредственного контакта алмазных зерен и материала. Особенности такого сложного и многофакторного процесса, как алмазная обработка, описаны, например, в статьях [1, 2]. Это характер разрушения обрабатываемого материала (например, огнеупора), определяемый величиной силовой нагрузки на него в контактной зоне, зависимость разрушения алмазных зерен (износа) от величины силовой нагрузки на алмазы и кинетика этого износа. Важную роль при этом играет состав металлической матрицы (связки), несущей алмазные зерна. Процессы, происходящие в зоне резания, приводят к абразивному износу связки и обнажению новых алмазов для резания, что является одним из условий самозатачивания инструмента.

Чтобы оценить эффективность работы инструмента, требуется установить соотношение между скоростью резания конкретного материала и скоростью износа самого инструмента. Для этого предложена упрощенная условная модель процесса. Согласно модели, в зону резания поступает механическая энергия (P , Вт), которая распределяется между разрушением материала (съем) путем диспергирования его режущими зернами и разрушением алмазов при их контакте с обрабатываемой деталью. Все остальные сопутствующие явления: выделение тепла и выброс шлама из зоны резания, абразивный износ связки и прочие для упрощения модели и выделения влияния выбранных факторов не рассматривали, их учитывали через коэффициент η , выражающий долю энергии, которая идет на указанные два явления. Схема такой модели показана на рис. 1.

* По материалам Международной конференции огнеупорщиков и металлургов (7–8 апреля 2016 г., Москва).



А. В. Беляков
E-mail: av_bel@bk.ru

В работе [3] уже была предпринята попытка сопоставить количество алмазов в режущем слое со свойствами обрабатываемых материалов, в частности с их обрабатываемостью, которую оценивали комплексной твердостью Q — средним геометрическим значений двух величин: твердости по Кнупу H_c и твердости по штампу $P_{ш}$ [4]:

$$Q = (H_c \cdot P_{ш})^{1/2}. \quad (1)$$

При этом H_c отражает вертикальную, в то время как $P_{ш}$ — горизонтальную составляющие силы резания для некоторого усредненного процесса обработки. Физический смысл показателя Q определяли как энергоёмкость материала при резании. Этот показатель сопоставляли с удельной прочностью зерен режущей поверхности U , которую определяли как произведение средней статической прочности зерен данной марки $F_{сп}$ на поверхностную концентрацию алмазов N_s [3]:

$$U = F_{сп} \cdot N_s. \quad (2)$$

Однако такое сопоставление не является корректным, поскольку не связано с внешним воздействием и не раскрывает динамику процесса. Кроме того, оно не согласуется с выбранной моделью. Уравнение упрощенного энергетического баланса более корректно по отношению к резанию:

$$\eta P_0 = Q \cdot \Pi + U \cdot R, \quad (3)$$

где η — доля энергии, идущая на упомянутые процессы разрушения; P_0 — мощность станка, Вт; Q — комплексная твердость материала (энергоёмкость материала), Дж/м³; Π — производительность (скорость процесса), м³/с; U — удельная прочность алмазного слоя (энергоёмкость алмазов), Н; R — скорость расхода режущего слоя, м³/с.

Анализ размерностей позволяет говорить о допустимости выражения (3). Действительно:

1. $[Q = (H_c \cdot P_{ш})^{1/2}] = [\text{Па} = \text{Н/м}^2 = \text{кг/с}^2\text{м} = \text{кгм}^2/\text{с}^2\text{м}^3 = \text{Дж/м}^3]$.
2. $[U = F_{ст} \cdot N_s] = [\text{Н/м}^2 = \text{кг/с}^2\text{м} = \text{кгм}^2/\text{с}^2\text{м}^3 = \text{Дж/м}^3]$.
3. $[\Pi] = [\text{м}^3/\text{с}]$.
4. $[R] = [\text{м}^3/\text{с}]$.
5. $[Q \cdot \Pi, U \cdot R] = [\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с} = \text{Дж/м}^3 \cdot \text{м}^3/\text{с} = \text{Дж/с} = \text{Вт}] = [\eta P_0]$.

Авторы публикации [5] применили критерильный подход к обработке горных пород алмазным инструментом, но без конкретизации конструкции режущего слоя, хотя, как это следует из данных [1], именно его конструкция определяет диапазон применимости инструмента (зону самозатачивания). Предлагаемый же подход позволяет учитывать не только содержание режущих зерен, но также их размер и прочность.

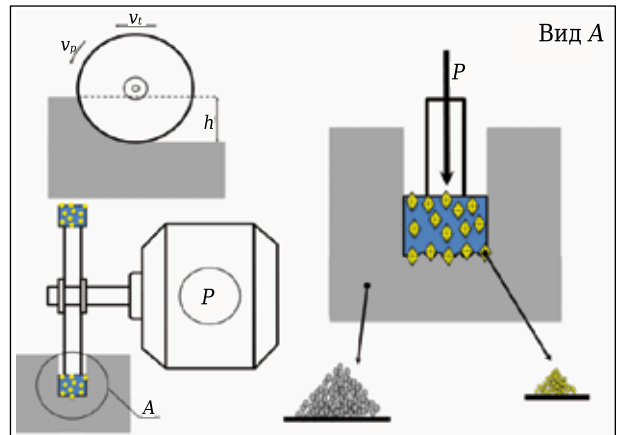


Рис. 1. Упрощенная модель резания. Здесь P — скорость подведения к зоне резания энергии (потребляемая мощность), которая расходуется на диспергирование материала огнеупора и измельчение алмазов (расход энергии на все остальные процессы: выделение тепла, износ связки, выброс шлама и пр. — упрощенная модель не учитывает)

При рассмотрении выражения (3) нужно отметить, что параметры Q , Π и U доступны прямому измерению, а параметр R определяют по результатам испытаний инструмента. Такой подход позволяет, упростив выражение баланса, экспериментально построить кривую зависимости $P(\Pi)$ для разрушения материала. Каждая точка на построенной кривой согласно выражению (3) показывает перераспределение между расходом энергии на разрушение материала и алмазов в слое. Многофакторность процесса резания обуславливает сложный характер зависимости [1].

На рис. 2 показан ход кривой $P(\Pi)$. Повышенный расход энергии при пониженных и повышенных нагрузках определяется сочетанием свойств инструмента и материала и приводит к разделению диапазона нагрузок на три области: заполировывания, самозатачивания и абразивного износа [6]. В зоне 1 невысокая нагрузка вызывает заполировку режущих граней, что

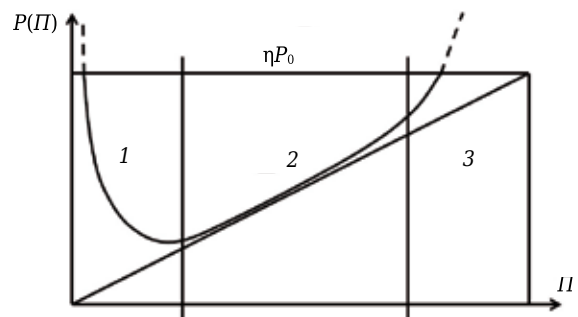


Рис. 2. Зависимость энергозатрат на разрушение материала от интенсивности процесса. Режимы износа алмазного слоя: 1 — заполировывание; 2 — самозатачивание; 3 — абразивное изнашивание

снижает эффективность резания за счет трения. Кроме того, известно [7], что при малых нагрузках растет доля квазипластической деформации в резании, что более энергозатратно по сравнению с хрупким разрушением. Эти причины и обуславливают резкое повышение расхода энергии вплоть до остановки двигателя станка. В этот момент энергия на разрушение алмазов (приводящая к образованию новых режущих граней) вообще не поступает. При повышенных нагрузках с некоторого момента наблюдается также резкое повышение энергии резания. Высокие значения сил резания и накопление микроразрушений в зернах обуславливают аномально быстрое их разрушение [1], что ведет к уменьшению зазора в зоне резания и блокированию процесса связкой. Это также приводит к остановке станка. Ширина зоны самозатачивания (см. рис. 2) определяет универсальность инструмента. В этом интервале энергии, разрушающей алмазы по остаточному принципу после энергии резания, достаточно для образования новых режущих граней. Как отмечено выше, конкретные значения $P(\Pi)$ определяют соотношение между энергиями, расходуемыми на резание и разрушение (затачивание) алмазов (напомним, что влияние связки на самозатачивание инструмента предлагаемая модель не рассматривает).

Величина $U = F_{cp} \cdot N_s$ является важной энергетической характеристикой инструмента [3], связанной с его стойкостью, что показывает выражение (3). Можно сделать предположение об энергетически эквивалентных составах, взаимозаменяемых при конструировании инструмента. Как пример: алмазы AC250 (160) 400/315 прочностью $F_{cp} = 500$ Н при концентрации $k_1 = 20$ имеют поверхностную концентрацию $N_s = 56 \text{ см}^{-2}$, что соответствует $U = 28 \text{ кПа}$. При таком же значении U алмазы AC160 прочностью 400 Н для соблюдения принципа эквивалентности должны иметь $N_s = 70 \text{ см}^{-2}$, что соответствует концентрации $k_2 = 25$. Согласно нашему предположению, два рассмотренных состава с точки зрения стойкости инструмента являются эквивалентными. Практика конструирования инструмента подтверждает удобство такого понятия, как энергетическая эквивалентность.

Сделанные предположения позволяют предложить два пути универсализации инструмен-

та. Во-первых, это уменьшение концентрации с применением высокопрочных алмазов. При этом выбирают стойкую матрицу с высоким значением алмазоудержания. При согласованном износе зерен-резцов и удерживающей их стойкой связки высокопрочные алмазы проходят соответственно все последовательные стадии разрушения [1] и их ресурс используется полностью. Склонность высокопрочных алмазов к заполировыванию при низких нагрузках предотвращается их невысокой концентрацией, обеспечивающей высокое давление зерна на обрабатываемый материал. В области высоких нагрузок режущая способность инструмента сохраняется благодаря стойкости алмазного сырья.

Вторая конструкция заключается в избыточной концентрации, как правило, низкопрочных (низкомарочных) алмазов с применением нестойкой матрицы с меньшей способностью к удержанию зерен. Низкопрочные алмазы менее склонны к заполировке при низкоинтенсивных режимах обработки, что обеспечивает расширение рабочей зоны в сторону неинтенсивных режимов. При этом за счет невысокого алмазоудержания матрицы происходит подстройка алмазов режущего слоя к режиму (обратная связь): затупленные алмазы выкрашиваются за счет сил резания, их концентрация в зоне контакта падает, нагрузка перераспределяется на оставшиеся зерна. Оставшиеся алмазные зерна частично разрушаются, что восстанавливает их режущую способность. В свою очередь, интенсивное резание (см. рис. 2, зона 3) обеспечивается за счет повышенного содержания алмазов в режущем слое. Приведенная ниже таблица, составленная исходя из накопленного нами опыта и анализа составов известных брендов алмазного инструмента, демонстрирует этот принцип для различных случаев резания применительно к камнеобработке, поскольку достаточной информацией по резанию огнеупоров мы пока не обладаем.

Упомянутые алмазные конструкции не рассматривали как универсальные — они лишь демонстрируют некоторые подходы к расширению условий эксплуатации инструмента. Существуют и другие способы расширения интервалов повышенной режущей способности сегментов, например послойное структурирование.

Оптимальные конструкции алмазосодержащих сегментов для резания

Сегмент / операция	Алмаз	Концентрация	Поверхностная плотность $N_s, \text{см}^{-2}$	Связка (твердость HRB)
Ф350мм / одиночный рез	AC250	12	35–40	95–100
	AC160	24	65–70	90–95
Ф1200мм / пакетный рез	AC300	15	40–45	110–115
	AC200	25	55–60	90–95
Ф1600мм / одиночный рез	AC300	25	52–57	95–100
	AC200	35	70–76	93–98

Здесь можно упомянуть популярное упорядоченное расположение алмазов, традиционные «сэндвич-структуры», чередование алмазных и безалмазных слоев [8].

Авторами публикации [9] предложена конструкция так называемых «фрагментных сегментов», которая позволяет как интенсифицировать процесс резания алмазным инструментом, так и расширить диапазон резания. За основу конструкции была взята идея сегментирования, широко применяемая, например, в современных конструкциях отрезных кругов. Такая конструкция интенсифицирует удаление продуктов резания из контактной зоны через зазоры между сегментами, а также разрушение материала за счет образования дополнительной межсегментной стружки. «Фрагментация» — это микросегментирование, разбиение сегментов на микросегменты-фрагменты. Конструктивно это сводится к тому, что тело сегмента разбивают на алмазосодержащие фрагменты, разделенные между собой прослойками безалмазной связки. При этом суммарное содержание алмазов во фрагментных сегментах, как правило, соответствует их количеству в сегментах традиционной конструкции. Контактное взаимодействие алмазных зерен инструмента с материалом происходит только в зоне фрагментов. Основное преимущество этой конструкции состоит в повышении контактного давления режущих алмазов в зоне резания из-за уменьшения площади алмазного контакта и интенсификации вызванного этим процесса резания. Такая схема резания позволила сохранять рабочие свойства инструмента в расширенном диапазоне нагрузок. Кроме того, как и в сегментной конструкции, происходит наложение систем межзеренных и межфрагментных стружек, которое интенсифицирует воздействие на материал, облегчает абразивное обнажение режущих зерен и создает рельеф с выступающими над режущей поверхностью фрагментами (рис. 3). Дополнительным эффектом является также облегчение отвода шлама из зоны резания. Отрезной и шлифовальный сегментный инструмент, построенный на описанном принципе, разработан в группе компаний «Адель» при участии кафедры керамики и огнеупоров РХТУ им. Д. И. Менделеева и производится серийно для обработки камня, бетона и огнеупоров.

В ходе работ по изучению перспективности фрагментной конструкции алмазосодержащего слоя авторы настоящей статьи пришли к выводу, что дальнейшую универсализацию инструмента можно проводить за счет придания сегментам новых функциональных возможностей. Если связка режущего слоя будет содержать, например, антифрикционные компоненты, то при попадании в зону резания они будут оказывать благоприятное влияние на процесс резания.

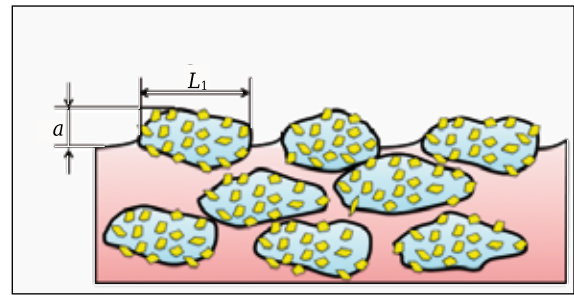


Рис. 3. Структура «фрагментного» сегмента: a — выступание фрагмента над поверхностью сегмента; L_1 — размер фрагмента

При высоких нагрузках, когда скорость разрушения алмазов может превышать скорость износа связки, снижение трения в зоне резания будет расширять диапазон использования инструмента. Варьируя функциональные добавки, можно оказывать и другие типы воздействия либо на материал, либо на сам инструмент (на алмазы или на матрицу). Однако если вводить эти добавки в матрицу инструмента в виде частиц, сопоставимых по размеру с частицами самой связки, то они будут разрушать матрицу. Кроме того, при равномерном распределении добавок их поступление в зону резания по мере износа матрицы также будет равномерным, не локализованным в важных для процесса элементах зоны резания. Применение добавок в виде крупных частиц решает вопросы их направленной транспортировки, однако создает некоторые технологические сложности.

Решить вопрос размещения добавок в сегменте в виде нейтральных частиц или взаимодействующих в зоне резания реагентов можно, разместив их в специальных капсулах, распределенных в матрице. Эти капсулы, названные авторами «функциональными элементами», состоят из частиц добавки, капсулированных в специальную связку. По мере износа этой связки выбранная добавка будет порциями поступать в зону резания. Выбирая концентрацию добавок и состав связки для капсулы, обеспечивают регулирование скорости выделения добавок из сегмента. Учитывая комплексный характер воздействия режущего инструмента на материал, можно говорить о так называемых «умных сегментах» (smart-segments), которые не только производят резание, но и способны подстраивать условия резания под себя. Через дополнительные воздействия реагентов из функциональных элементов в зоне резания и в контактных зонах можно «затачивать» сегменты, создавать дополнительные дефекты в огнеупоре, снижать трение, изменять свойства среды. Это позволяет расширить применение режущего инструмента с «умными сегментами» в область более «твердых» материалов, а также проводить процесс в более широком диапазоне

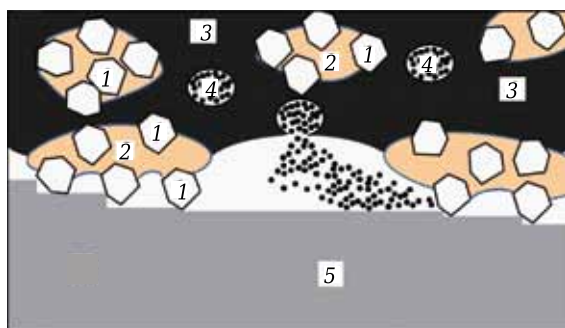


Рис. 4. Структура «умных сегментов»: 1 — алмазные зерна; 2 — матрица фрагментов (матрица А); 3 — несущая матрица (матрица В); 4 — функциональные элементы; 5 — обрабатываемый материал

нагрузок (см. рис. 2). При этом инструмент показывает повышенную режущую способность без существенного снижения его ресурса. На рис. 4 схематически показано строение «умного сегмента». В сегменте выделены элементы: режущий алмазный наполнитель (фрагменты), состоящий из алмазных зерен, распределенных в матрице; матрица, содержащая фрагменты (алмазный наполнитель) и функциональные элементы, являющиеся источником добавок для дополнительного воздействия на резание.

В результате проведенных исследований была разработана технология и начат промышленный выпуск «умных сегментов» предложенной конструкции. Сегменты предназначены для высокоинтенсивных режимов обработки: резания, калибровки поверхности, сверления изделий из таких материалов, как бетон, природный и искусственный камень, керамика, огнеупоры. При этом за счет комплексного воздействия сегмента на материал в зоне резания появляется возможность как повышения производительности процесса, так и расширения области его применения. Несмотря на то, что в настоящее время выпускаемый инструмент применяют главным образом в строительной отрасли, осуществлены поставки инструмента и для огнеупоров.

Приведенные ниже примеры позволяют проиллюстрировать эффективность инструмента, оснащенного «умными сегментами». Показана эволюция сегментов от традиционной конструкции со случайным расположением алмазов (сегмент № 1), через фрагментную конструкцию с изолированными алмазными гранулами (сегмент № 2) до «умных сегментов», сочетающих режущие фрагменты и функциональные элементы, содержащие добавки, влияющие на резание (сегмент № 3). Для наглядности общее содержание алмазов в сегментах всех трех типов одинаково.

► В примере 1 (рис. 5) показаны результаты сравнительных испытаний по резанию блоков

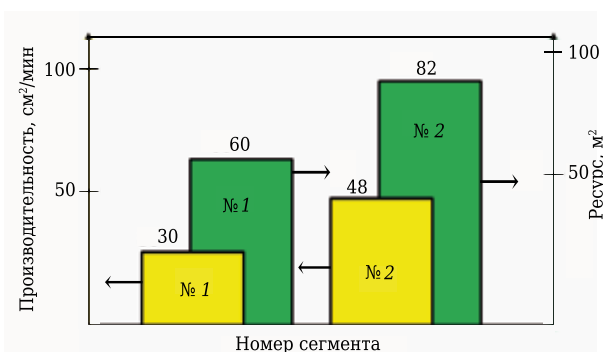


Рис. 5. Испытания инструмента с фрагментной конструкцией на операции резания багора; особенности конструкций № 1 и 2 указаны в тексте

багора Бк-38 на мостовом фрезерном станке отрезными кругами диаметром 1200 мм, напаянными традиционными (№ 1) и фрагментными сегментами (№ 2). При этом отмечено значительное повышение как производительности (более чем на 50 %), так и ресурса. В ходе дальнейших исследований были проведены работы по универсализации сегментов разработанных конструкций № 2 и 3, адаптированных к применению для обработки набора материалов: различных типов огнеупоров, природного камня, бетона. Благодаря оптимизации сочетания матриц всех трех элементов «умных сегментов» (см. рис. 4) удалось изготовить достаточно универсальные сегменты, которые прошли успешную проверку в промышленности. Пока не удалось собрать достаточно полную информацию о свойствах инструмента на различных материалах, поэтому в последующих примерах приведены сведения об обработке лишь некоторых из них.

► Так, в примере 2 приведены результаты калибровки напольного покрытия, выложенного мозаичной гранитной плиткой. Обработку вели полусухим способом. Скорость шлифования при фиксированном контактном давлении показана на рис. 6. По сравнению с сегментом № 1 ин-

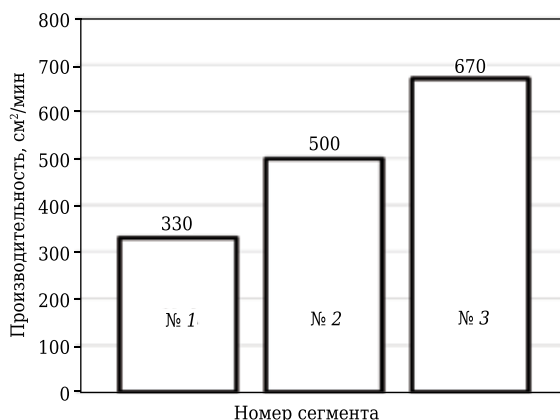


Рис. 6. Производительность различных сегментов при полусухом шлифовании мозаичной гранитной плитки; особенности конструкций № 1, 2 и 3 указаны в тексте

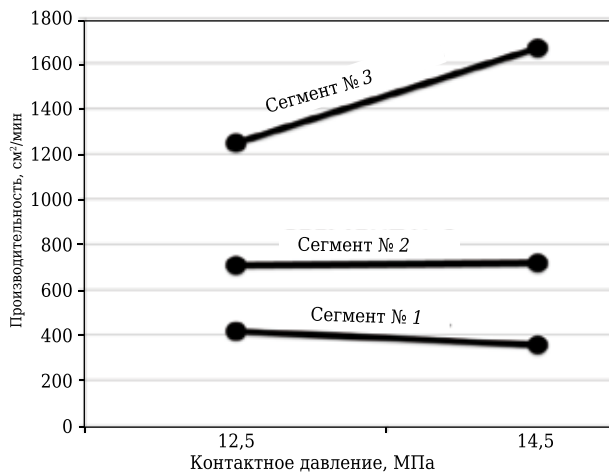


Рис. 7. Зависимость производительности (скорости) шлифования бетона от нагрузки на инструмент для сегментов различных конструкций

струмент с «умными сегментами» обеспечивает двукратное повышение скорости обработки. Имеется опыт применения инструмента из тех же сегментов на операциях грубой шлифовки огнеупоров типа бакор и шамот с аналогичным результатом.

► В примере 3 приведены результаты применения того же инструмента и на том же оборудовании, что и в примере 2, на операции сухой калибровки напольного покрытия из прочного слоя топ-бетона (марка бетона М500). Испытания инструмента проводили при нормальном и нагруженном режимах для демонстрации свойств сегментов различных конструкций. Зависимость работоспособности сегментов от интенсивности режима обработки, показанная на рис. 7, характеризует диапазон рабочих свойств инструмента. Помимо трехкратного повышения скорости съема материала при нормальной нагрузке появляется возможность дополнительного ее повышения за счет интенсификации процесса. Для огнеупоров пока не возникало необходимости эксплуатировать инструмент при повышенных нагрузках, однако такие испытания планируется провести.

На рис. 8 показаны фотографии рабочей поверхности исходного (№ 1) и «умного сегмента» (№ 3) со следами их эксплуатации в шлифовальном инструменте. На поверхности «умного сегмента» (см. рис. 8, б) можно различить вершины фрагментов с выступающими алмазными зернами. Выступление же самих фрагментов из несущей матрицы невелико ввиду относительно малой абразивности бетона. Функциональные элементы в поле зрения на фотографии не попадают. На поверхности сегмента традиционной конструкции (№ 1) можно отметить случайный характер распределения алмазов, а также значительную степень их разрушения.

Результаты резания гранита 4-го класса твердости отрезными кругами с сегментами в

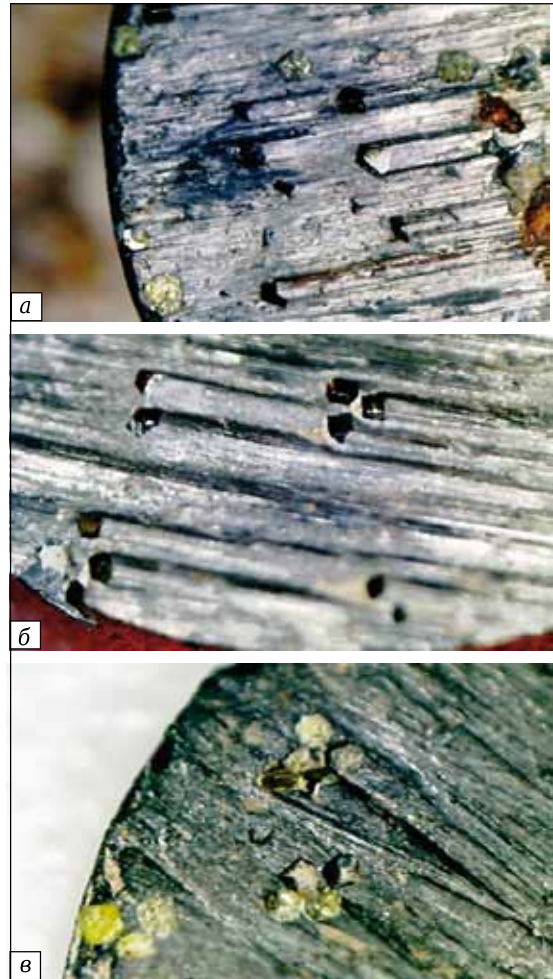


Рис. 8. Микрорельеф режущей поверхности (×10) сегмента традиционной конструкции № 1 (а) и «умного сегмента» № 3 (б) после обработки прочного бетона, а также сегмента № 3 (в) после обработки абразивного бетона

конструктивном исполнении № 1, 2 и 3 в примере 4 показаны на рис. 9. Скорость резания определяли по фиксированной полезной токовой нагрузке. Зафиксировано увеличение скорости обработки на 40 % без снижения качества

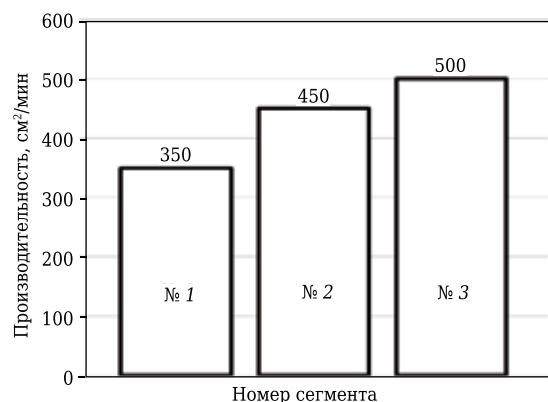


Рис. 9. Производительность (скорость) резания гранита отрезными кругами, укомплектованными сегментами различных конструкций

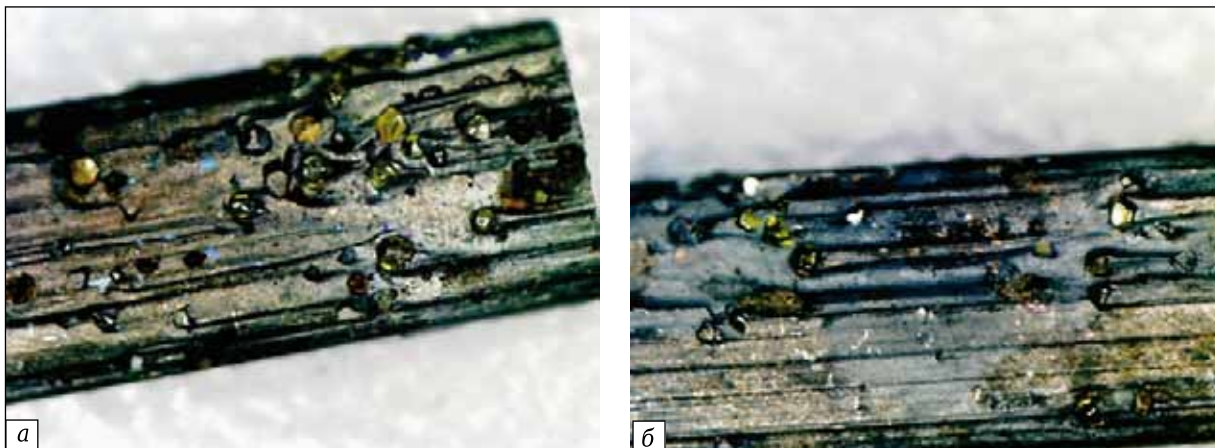


Рис. 10. Микрорельеф режущей поверхности (×10) «умного сегмента» № 3 после резания гранита (а) и базальта (б)

изделий. Инструмент различных диаметров с «умными сегментами» того же состава применяли для резания базальта и шамота с положительными результатами.

На рис. 10 показаны фотографии рабочей поверхности комбинированных сегментов № 3 после резания гранита 4-го класса твердости и базальта. Поскольку базальт намного тверже гранита, то на сегменте видны значительные разрушения на нижней части фотографии (см. рис. 10, б).

Подводя итоги проделанной работы, можно отметить, что создана новая конструкция «умных сегментов» с комбинированным воздействием на процессы в зоне резания. Эта

конструкция включает режущие алмазосодержащие фрагменты, функциональные элементы для дополнительного воздействия на резание и безалмазную матрицу. Преимуществами такого инструмента являются высокая режущая способность, расширенный диапазон применения его в сторону интенсивных режимов, расширение диапазона труднообрабатываемых материалов (универсализация) при сохранении высокой стойкости инструмента. Разработанная конструкция «умного сегмента» открывает широкие перспективы для дальнейшего совершенствования процессов резания алмазным инструментом.

Библиографический список

1. **Davis, P. R.** An Indicator Sistem for Saw Grit / P. R. Davis, M. L. Fish, S. Peacock, D. N. Wright // *Industrial Diamond Rewiev.* — 1996. — № 3. — Р. 78–87.
2. **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.
3. **Беляков, А. В.** Cutting Brittle Inorganic Nonmetallic Materials With a Diamond Tool from the Position of Synergetics / A. V. Belyakov, S. I. Tserman // *Refractories and Industrial Ceramics.* — 2014. — Vol. 55, № 2. — Р. 97–107.
4. **Церман, С. И.** Оптимизация конструкции алмазного слоя для циркулярной резки неорганических неметаллических материалов / С. И. Церман, А. В. Беляков // *Добыча, обработка и применение природного камня : сб. науч. тр. Вып. 10.* — Магнитогорск : ГОУ ВПО МГТУ, 2010. — С. 303–310.
5. **Сычев, Ю. И.** Природнокаменное материаловедение / Ю. И. Сычев, А. Ш. Махмудов. — Петропавловск-Камчатский : Камчатпресс, 2013. — 342 с.
6. **Першин, Г. Д.** Основные критерии процесса обработки природного камня алмазно-абразивным инструментом / Г. Д. Першин, В. В. Сердюков, М. Ю. Гуров // *До-*

- быча, обработка и применение природного камня : сб. науч. тр. — Магнитогорск : МГТУ, 2001. — С. 109–119.
6. **Верещагин, В. А.** Композиционные алмазосодержащие материалы и покрытия / В. А. Верещагин, В. В. Журавлев. — Минск : Навука і тэхніка, 1991. — 208 с.
7. **Konstanty, J.** Cobalt as a Matrix in Diamond Impregnating Tools for Stone Sawing Applications / J. Konstanty. — Krakow : Wydawnictwa AGH, 2002. — 158 p.
8. **Церман, С. И.** Кластерное расположение алмазов в сегментах для механической обработки природных и искусственных хрупких неметаллических материалов / С. И. Церман, А. В. Беляков // *Добыча, обработка и применение природного камня : сб. науч. тр. Вып. 11.* — Магнитогорск : Изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2011. — С. 247–252.
9. **Беляков, А. В.** Повышение эффективности алмазного циркулярного инструмента для резки изделий из природного камня / А. В. Беляков, С. И. Церман // *Добыча, обработка и применение природного камня : сб. науч. тр. Вып. 15.* — Магнитогорск : Изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2015. — С. 204–212. ■

Получено 10.05.16

© С. И. Церман, А. В. Беляков, 2016 г.