

Д. х. н. А. В. Беляков¹(✉), С. И. Церман²

¹ ФГБОУ ВПО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева», Москва, Россия

² ГК «Адель», Москва, Россия

УДК 666.3/.7:621.9.02]:536.7

ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ АЛМАЗНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ХРУПКИХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОЗИЦИЙ СИНЕРГЕТИКИ

С позиций синергетики рассмотрены процессы, происходящие при резании алмазным инструментом хрупких неорганических неметаллических материалов, особенно в рабочей области между режущим инструментом и обрабатываемым материалом, эволюция структуры разрезаемого материала и режущей поверхности алмазного инструмента, вопросы реализации режима самозатачивания режущего инструмента.

Ключевые слова: механическая обработка (МО), хрупкие неорганические неметаллические материалы (ХННМ), керамика, режущий инструмент (РИ), алмазные зерна, синергетика.

Механическая обработка (МО) является промежуточной либо заключительной операцией в технологии изготовления изделий из хрупких неорганических неметаллических материалов (ХННМ), к которым можно отнести керамику и огнеупоры, стекло и ситаллы, монокристаллические и бетонные материалы. В процессе МО удаляют технологические припуски и неровности для получения требуемых размеров изделия, а также создают требуемую чистоту поверхности изделия. Схематически организацию процесса МО представляют как взаимодействие в системе из трех элементов: механического станка, режущего инструмента (РИ) и детали, например из огнеупора.

В настоящей статье процессы при резании будут рассмотрены применительно к циркулярному резанию, хотя они весьма близки к происходящим при других видах алмазной обработки — сверлении, шлифовании и полировании. Циркулярное алмазное резание ХННМ, как частный случай МО, обеспечивает разрезание материалов при помощи алмазного круга, закрепленного на вращающемся валу отрезной установки. Алмазный отрезной круг имеет форму плоского диска из легированной стали, в центре которого имеется посадочное отверстие круглой формы, а на периферии — алмазосодержащий режущий слой сплошной или прерывистой конструкции. Толщина режущего

слоя на регламентированную величину превышает толщину корпуса (нависание), что препятствует контакту вращающегося корпуса с разрезаемой деталью и обеспечивает удаление продуктов резания. Сплошной режущий слой часто разделяют на сегменты. На рис. 1 изображен алмазный отрезной сегментный круг для резания огнеупоров типа шамота, изготовленный по ГОСТ 16115 [1]. Расстоянием между сегментами (шириной паза) и длиной сегментов оптимизируют режущие свойства и ресурс круга; их выбирают с учетом свойств ХННМ и условий резания. В сегментах алмазные режу-



Рис. 1. Алмазный отрезной сегментный круг для резания огнеупоров



А. В. Беляков
E-mail: av_bel@bk.ru

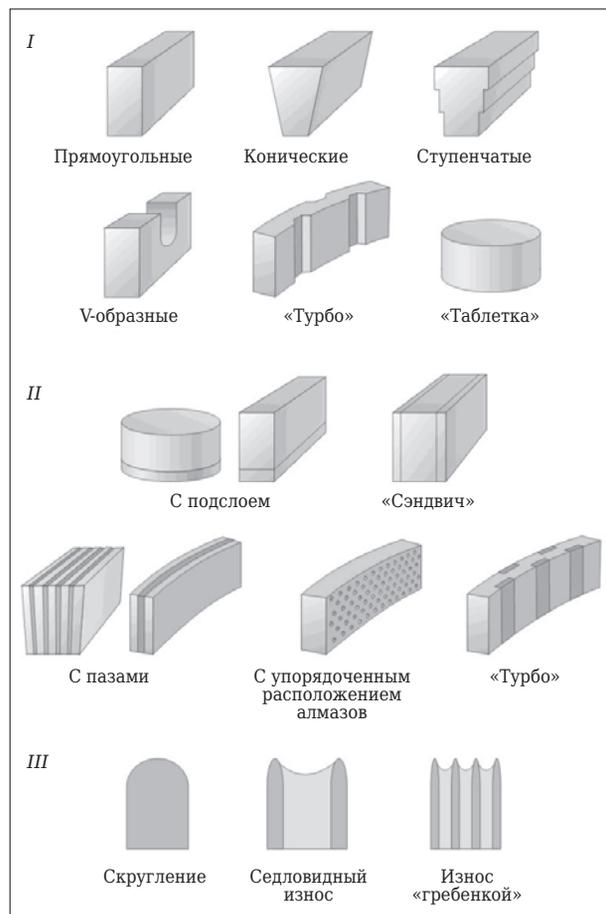


Рис. 2. Различные конструкции алмазных сегментов [2]: I — форма профиля сечения (продольного и поперечного); II — структура алмазоносного слоя сегментов: безалмазный подслои для пайки, различная концентрация алмазов в вертикальных слоях («сэндвич»), сочетание алмазных и безалмазных слоев, послойное расположение алмазов по специальной схеме; III — профиль режущего контура, образующийся при эксплуатации инструмента

щие зерна распределены в спеченной металлической связке (матрице), которая удерживает их при резании.

Сегменты изготавливают отдельно, а затем припаивают к корпусу РИ высокотемпературным припоем, как правило, содержащим серебро, или приваривают лазерной сваркой. Такая технология по сравнению с нанесением (напеканием) на корпус сплошного слоя позволяет значительно расширять диапазон применяемых при изготовлении режущего слоя температур и давлений и, соответственно, материалов для алмазоносной матрицы, а также изготавливать инструмент любых размеров. Некоторые конструкции алмазных сегментов показаны на рис. 2 [2].

Сегменты классифицируют по форме, которая определяется назначением инструмента и скоростью резания. Для повышения качества

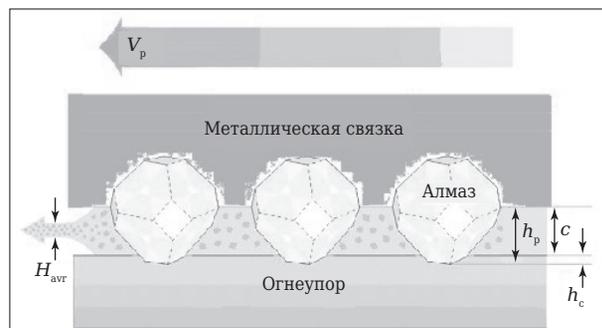


Рис. 3. Схематическое изображение зоны резания [3]: V_p — скорость движения инструмента; h_p — выступание алмазов над связкой; h_c — заглупление алмазов в заготовку; c — зазор в зоне резания, где $c = h_p + h_c$; H_{avg} — среднее значение толщины слоя огнеупора, снимаемого каждым зерном (стружкой)

резания в сегментах создают специальные структуры, например при помощи различных схем расположения алмазных зерен. Так, располагая алмазы равномерно по объему сегмента, обеспечивают равномерное нагружение режущих зерен, чем оптимизируют их расходование, а также улучшают режущие свойства инструмента. Создавая избыточную концентрацию зерен в наружных слоях сегментов по сравнению с внутренними (конструкция «сэндвич»), благодаря замедленному их износу получают рабочую седловидную форму профиля сегмента (см. рис. 2), который более устойчив в прорезаемом пазе.

Паяемая сторона сегмента должна сопрягаться с поверхностью несущего корпуса. Рабочая сторона должна по возможности вписываться в режущий контур. Для подготовки круга к резанию после напайки сегментов применяют операции правки (ликвидации биений сегментов) и вскрытия (обнажения зерен из связки).

При изучении МО условно выделяют область геометрического и физического контакта разрезаемого материала и режущего слоя инструмента, в которой локализованы все явления, связанные непосредственно с резанием как с процессом. Эту область считают зоной резания. На рис. 3 показана схема зоны резания огнеупора алмазным инструментом [3]. В рабочем слое алмазные зерна закреплены в связке. Фактически это композит с металлической матрицей, в которой распределены алмазные зерна. Разрушение алмазами материала приводит к заполнению зазора измельченными продуктами резания огнеупора (стружкой). В большинстве случаев обработки в зону резания подают смазывающе-охлаждающую жидкость (СОЖ), которая непосредственно участвует в процессе, облегчая резание, измельчение материала,

удаление продуктов резания и выделяющейся в зоне резания энергии; СОЖ обычно состоит из воды с различными добавками (поверхностно-активные вещества, ингибиторы коррозии металлов и т. д.). Смесь измельченной стружки с СОЖ называют шламом. Концентрация шлама определяется интенсивностью резания за вычетом интенсивности выноса его из зоны и играет определяющую роль в обнажении режущей части зерен из связки.

Цель данной работы — рассмотрение процессов, происходящих при алмазной обработке (преимущественно при резании) ХННМ, к которым относятся керамика, огнеупоры, бетоны, стекла, а также природные и искусственные камни. Для описания процессов привлекаются некоторые основные понятия синергетики. При резании зону контакта РИ и материала можно считать открытой системой, а сам инструмент за вычетом режущего слоя, станочное оборудование и обрабатываемую деталь удобно рассматривать как окружающую среду.

Процессы, происходящие при резании алмазным абразивным инструментом ХННМ, относят к необратимым и неравновесным. Для описания таких процессов сегодня все шире применяют методы, созданные для описания сложных систем, — физику (термодинамику) открытых систем, термодинамику необратимых процессов, неравновесную термодинамику, синергетику, которые в своих основных положениях по отношению к физико-химическим системам являются синонимами. Синергетика — наука, изучающая процессы самоорганизации, устойчивости и распада структур в необратимых открытых системах, при которых происходит обмен с внешней средой материей (веществом, энергией и информацией) [4]. Открытая система (в данном случае область контакта разрезаемого материала и РИ) обменивается энергией, веществом и информацией с окружающей средой (область вокруг контакта разрезаемого материала с РИ). При этом обмен материей происходит под влиянием управляющих воздействий, которые могут быть внешними (температура, давление, различные физические поля) или внутренними (воздействия от элементов структуры, созданных на предыдущих стадиях технологии (предыстория)) [5, 6].

Взаимодействие с окружающей средой в открытых системах может сопровождаться самоорганизацией, т. е. созданием соответствующих структур для рассеяния (диссипации) [4] или аккумуляции [5, 6] материи; при этом энтропия может не только увеличиваться, но и уменьшаться. Количество и вид аккумуляционных и диссипативных структур зависит от

конкретных условий, прежде всего от степени неравновесности обмена материей с окружающей средой. Система стремится уменьшить свою материю и передать ее в окружающую среду, используя для этого диссипативные структуры. Если обмен происходит слишком быстро или свойства системы затрудняют возникновение таких образований, то она вынуждена аккумулировать часть материи внутри себя, создавая аккумуляционные структуры. Следует отметить, что возникновение и диссипативных, и аккумуляционных структур можно рассматривать как проявление самоорганизации. В зависимости от ситуации одни и те же структуры могут играть роль или диссипативных, или аккумуляционных. Диссипативные и аккумуляционные структуры могут образовываться не только непосредственно во время взаимодействия системы с данной окружающей средой. Их можно создать в системе заранее. Тогда система сможет не создавать эти структуры произвольным образом, а использовать те, которые заранее подготовлены. Они выполняют роль мощного внутреннего управляющего воздействия, направив эволюцию системы в нужном направлении. Это было реализовано, например, при устранении дефекта типа «сборка», возникающего иногда при глазурировании керамики [7].

Развитие реальных систем происходит в ряду устойчивость — неустойчивость — устойчивость. Устойчивое состояние системы может быть упорядоченным (детерминированным) или разупорядоченным (хаотическим). Реальные системы представляют собой комбинацию упорядоченности и хаотичности и возникают под действием необратимых и неравновесных процессов. Устойчивое состояние представляет собой динамическое равновесие и сопровождается непрерывным обменом материей с внешней средой. Для устойчивого и близких к нему состояний характерно выполнение теоремы И. Р. Пригожина о минимуме производства энтропии и принципа Ле-Шателье — Брауна, согласно которому система противодействует внутренним и внешним воздействиям, выводящим ее из устойчивого состояния. Возникающая таким образом отрицательная обратная связь уменьшает небольшие воздействия, не выводящие систему из области устойчивого состояния [5].

В неустойчивом состоянии направление эволюции системы определяется прикладываемым воздействием, которое усиливается положительной обратной связью. В этом случае система характеризуется повышенной чувствительностью к шумам (небольшим не-



Рис. 4. Классификация элементов структуры, составляющих ХННМ [10]

контролируемым внутренним флуктуациям и внешним возмущениям). В некоторых ситуациях пути эволюции системы реализуются сугубо вероятностным образом (стохастически); при этом число независимых (управляющих) параметров, определяющих эволюцию системы, уменьшается. При этом эволюция системы во многом определяется степенью неравновесности обмена материей с внешней средой.

При рассмотрении, например, технологии керамики с позиций синергетики можно отметить, что реальные системы (в данном случае промежуточные продукты на различных переделах технологии керамического изделия) обычно обладают совокупностью сосуществующих устойчивых состояний (мультистабильностью) [8]. Если эти состояния сильно различаются по своим свойствам, то при близкой вероятности попадания в них это приведет к плохой воспроизводимости результатов [8]. В неустойчивом состоянии вследствие повышенной чувствительности к небольшим внешним возмущениям и внутренним флуктуациям перспективно применение управляющих воздействий на систему. Неустойчивое состояние может быть или не быть бифуркацией. Переход через бифуркацию (неравновесный фазовый переход) сопровождается «потерей памяти» о предыдущем состоянии (предыстории). Наличие мультистабильности с сильно различающимися по свойствам стабильными состояниями, в которые может попадать система после прохождения неустойчивого состояния, приводит к низкой воспроизводимости структуры и свойств материалов (например, керамических

[9]). Однако они могут быть достаточно близкими, что делает возможным создание удовлетворяющих нас по стабильности технологий. Далее мы покажем, как эти же принципы работают при рассмотрении процесса резания ХННМ, при котором проведем сопоставление интенсивности воздействия на огнеупор в зоне резания с состоянием и рельефом режущей поверхности алмазного инструмента.

Важнейшим достоинством подхода с позиций синергетики является возможность использования закономерностей, полученных при изучении одних явлений, для объяснения других, порой очень далеких, явлений. Этот прием давно с успехом применяют в научном творчестве. В истории науки имеется много таких примеров.

При различных физических и химических воздействиях на обрабатываемый материал его структура изменяется на различных уровнях масштаба. В соответствии с делением по размерному признаку будем относить к субструктуре элементы размерами <1 мкм (вплоть до электронов и атомов), к микроструктуре — элементы размерами от 1 мкм до 1 мм, к макроструктуре — элементы размерами >1 мм, вплоть до изделия в целом (рис. 4) [10]. Границы носят несколько условный характер, однако базируются на возможности применяемых измерительных приборов, причем реальные элементы, слагающие структуру, попадают в указанные области. Описание структуры материала включает определение химического и фазового составов, формы и размеров слагающих ее элементов в соответствующем масштабе, а также их взаиморасположения в пространстве и количественных соотношений. Следует особо отметить, что при предлагаемом рассмотрении химический состав включен в понятие «структура», поскольку атомы тоже различаются строением, структурой входящих в них более мелких элементов. Такой подход позволяет описывать эволюцию структуры при различных воздействиях на материал, в том числе при алмазном резании ХННМ.

Аналогично можно описать структуру рабочего слоя режущего композита, состоящего из матрицы (металлической связки) и алмазных зерен, а также изменения этой структуры в процессе резания (рис. 5). Для применения принципов синергетики при изучении резания ХННМ необходимо рассмотреть совокупность основных составляющих этого процесса. Ранее (см. рис. 3) было дано определение зоны резания и ее структурных составляющих: поверхности режущего слоя, состоящего из металлической матрицы и выступающих из нее



Рис. 5. Классификация элементов структуры композита с металлической матрицей, армированной алмазными зернами (рабочий слой РИ)

алмазных зерен, затем подвергается разрушению алмазами обрабатываемой поверхности и, наконец, разделяющего их пространства (зазора). Основным назначением алмазных зерен при МО материала является внедрение в материал (огнеупор) и локальное его разрушение. Основное назначение связки — удержание алмазных зерен. Для разработки или выбора РИ учитывают свойства алмазов, связки, обрабатываемого материала и требования к процессу, такие как скорость и качество обработки. Алмазные зерна характеризуются рядом свойств: механическими (статическая и динамическая прочность), термическими (термостойкость) и геометрическими (размер и форма зерен). При выборе связки технологов интересует в первую очередь ее способность удерживать алмазы и стойкость к износу.

При резании обычно выделяют три основных процесса: разрушение разрезаемого материала алмазами, разрушение алмазов и разрушение связки под воздействием продуктов резания.

В упрощенном виде процесс разрушения ХНМ можно представить как многократное царапание керамической поверхности выступающими над связкой алмазными зернами-микрорезцами [2, 11]. При этом силу резания применительно к зернам можно разложить на

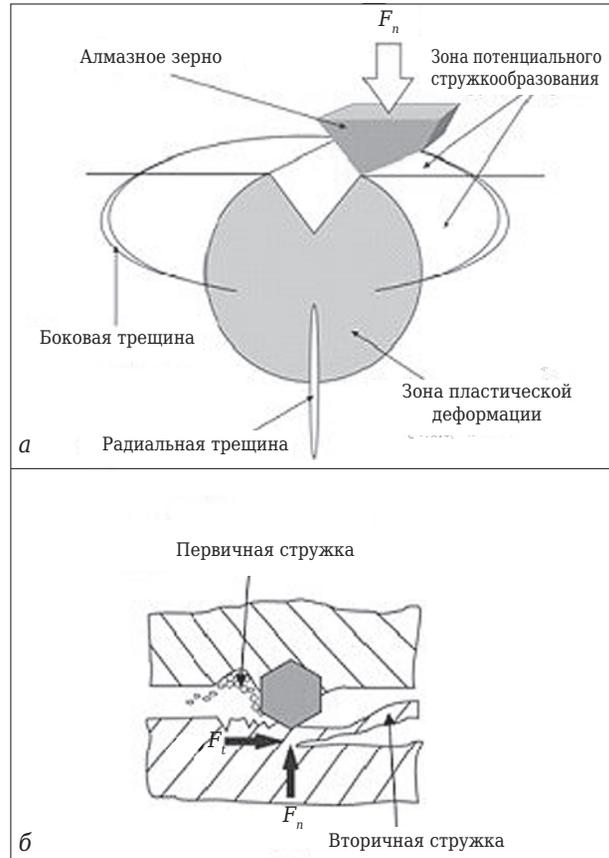


Рис. 6. Схематическое изображение измельчения и удаления материала при резании [2, 11]: а — зоны пластической деформации и хрупкого разрушения; б — образование первичной и вторичной стружки; F_n и F_t — составляющие силы резания

составляющие: нормальную F_n , индентирующую, вдавливающую зерна в материал, и тангенциальную F_t , царапающую его (рис. 6, б). При этом система РИ — обрабатываемый материал активно сопротивляется, перестраивая в соответствии с принципом Ле-Шателье — Брауна свою структуру так, чтобы противостоять внешнему воздействию. В соответствии с этим в зависимости от внешних условий меняется структура алмазных зерен.

Механизм измельчения при резании обычно представляют двумя процессами: пластической деформацией и хрупким разрушением [2, 11]. Пластическую деформацию связывают с движением зерна по поверхности разрезаемой детали в направлении резания. Зона пластической деформации локализована вокруг царапины. Хрупкое разрушение становится возможным после достижения глубины внедрения режущего зерна, достаточной для образования трещин и определяемой физико-механическими свойствами материала. В зоне резания зарождаются две главные системы трещин — радиальные и боковые. Радиальные

трещины возникают в результате расклинивающего действия абразивного зерна при приложении высокой нормальной нагрузки. При снятии нагрузки трещины могут продолжать распространяться в материале благодаря растягивающим напряжениям на концах трещин. При прекращении нагрузки вследствие релаксации упругих напряжений возникают боковые трещины. Боковое растрескивание обеспечивает основное удаление хрупкого материала при измельчении. На рис. 6, а схематически показаны зона пластической деформации и система трещин, образующихся вокруг зоны резания и создающих зону потенциального образования стружки. При этом первичная стружка создается фронтом зерна и движется перед зерном. Вторичную стружку дает релаксация упругих напряжений; она сосредоточена за алмазом, и осколки ее омывают последующие зерна (см. рис. 6, б).

Эта модель с точки зрения теории разрушения хрупких материалов весьма условна. У керамики, тем более при больших скоростях деформирования, не может быть пластической деформации. Скорее всего, локальный разогрев поверхности из-за трения вместе с поверхностным натяжением обеспечивают сохранение сплошности поверхностного слоя, что создает иллюзию пластической деформации. Поэтому правильнее называть ее квази-пластической. Это проявление принципа Ле-Шателье – Брауна. Система создает гладкую структуру поверхности, препятствующую ее износу. Под этим слоем должен находиться микро- и нанотрещиноватый слой. Так, при определении микротвердости под индентором образуется ямка, которую обычно относят к пластической деформации. На самом деле под этим слоем, который держится за счет поверхностного натяжения материала, находится микро- или нанотрещиноватый слой, играющий роль аккумулялирующей структуры. Он и аккумулялирует значительную часть подведенной энергии.

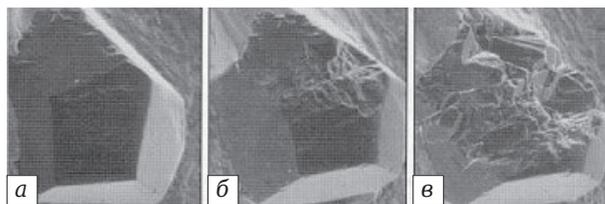


Рис. 7. Стадии износа алмазного зерна в инструменте при постоянной нагрузке [12]: а — образование плоской площадки на режущей грани («зародыш износа»); б — расширение площадки с зарождением микротрещин; в — разрушение зерна растрескиванием (развитие макротрещин)

С позиций синергетики удары алмазных зерен по разрезаемому хрупкому материалу подобны ударно-волновому воздействию, возникающему при взрыве. При движении ударной волны за зоной сжатия следует зона растяжения. В хрупких материалах прочность на сжатие обычно значительно превосходит прочность на растяжение. Поэтому именно область растяжения от волны разрушает материал. В этом смысле дискретные круги обычно лучше режут материал не только из-за облегчения удаления продуктов, но и из-за ударных воздействий фронта сегмента. Правда, за это приходится платить повышенным износом алмазов.

Удельная работа разрушения хрупкого материала при резании E_{sp} преимущественно зависит от тангенциальной составляющей силы резания F_t , ширины режущей грани зерна w и размера стружки H_{avr} [2]:

$$E_{sp} \sim F_t / (wH_{avr}). \quad (1)$$

В соответствии с формулой (1) E_{sp} зависит от определяемого ниже кинематического параметра H_{avr} (см. далее формулу (2)).

Нагрузка на алмаз — сила, действующая на зерно при его контактном взаимодействии с огнеупором. Для низких значений H_{avr} (низких нагрузок на алмазы) поверхностных трещин не наблюдали. В таких условиях система создавала диссипативную структуру — скругление режущей кромки алмазов и локальное сглаживание (уплощение) на его режущей кромке, позволяющее тратить подводимую механическую энергию на выделение тепла из-за повышения трения в зоне резания, а также увеличение F_t . Эволюция структуры алмазных зерен подтверждается данными [3]. При малой нагрузке на режущее зерно может произойти расширение уплощенной зоны на всю выступающую поверхность алмаза (рис. 7) [12]. Это явление называют заполировыванием, и оно вызывает потерю зерном режущих свойств и резкое замедление эффективности резания (см. рис. 7, а).

Для высоких значений H_{avr} более эффективной диссипативной структурой являлось интенсивное образование в материале радиальных и боковых трещин. Это понижало прочность приповерхностного слоя материала и, соответственно, облегчало его удаление в виде шлама вместе с подведенной извне энергией при меньших значениях F_t . При более высоких нагрузках образовавшееся уплощение режущей поверхности алмаза постепенно переходило в микроскалывание на кромке, при котором режущие свойства алмаза частично восстанавливались (см. рис. 7, б) [12]. Однако постепенно микротрещины проникали внутрь зерна с

последующим его разрушением (см. рис. 7, в) [12].

Таким образом, эволюция структуры алмазного зерна при резании зависит от величины нагрузки на него. При малых нагрузках она проходит по схеме: от плоских площадок к расширению на всю грань и к ее полной заповорке с потерей режущих свойств. При средних нагрузках проходят расширение площадок на гранях, затем образование в них микросколов, переходящих в макросколы и к полному разрушению зерен. При высоких нагрузках происходит либо раздавливание алмазов, либо быстрое образование макросколов.

Имеется и другой подход — кинематический, позволяющий оценить объем материала, разрушаемого зерном за один цикл резания. Для количественной оценки величины нагрузки вводят такое понятие, как $H_{авг}$ — среднее значение толщины слоя огнеупора, снимаемого одним зерном за один контакт [13]. По физическому смыслу это количество материала, удаляемого зерном № 2, следующим за предыдущим (№ 1) в последовательности зерен в слое, за один цикл резания: один оборот отрезного или шлифовального круга, один оборот сверла или фрезы, одно качание штрипсовой полосы и т. д. (рис. 8) [13].

Авторы публикаций [3, 14] приводят вывод «формулы стружки» (формула (2)), в которой связывают $H_{авг}$ как с параметрами станка (частотой вращения круга, скоростью его подачи и глубиной резания), так и с параметрами РИ (размером круга, количеством сегментов, концентрацией и качеством алмазов):

$$H_{авг} = [V_t(d/D)^{1/2}/(V_p r \lambda N)]^{1/2}, \quad (2)$$

где $H_{авг}$ — средняя толщина стружки, мм (может считаться численной характеристикой нагрузки на алмаз, геометрически близка к размеру частицы шлама при резании); V_t — скорость подачи, мм/с; d — глубина резания, мм; D — диаметр круга, мм; V_p — окружная скорость режущего контура, мм/с; r — пропорция стружки: отношение ее ширины к высоте $H_{авг}$ (коэффициент «инденции»); λ — доля алмазных элементов в режущем контуре; N — число зерен на единицу поверхности сегмента, $1/\text{мм}^2$.

Косвенно, через режимные параметры, нагрузка завязана также и на физико-механические характеристики материала. Этой формулой часто пользуются при разработке РИ, а также для оптимизации технологического процесса резания.

Третий основной процесс при резании — это износ (преимущественно истирание) металлической матрицы (связки) продуктами резания

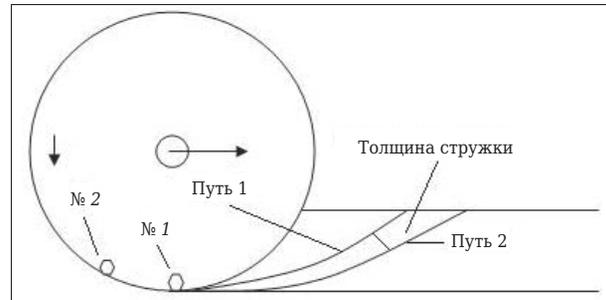


Рис. 8. Схема образования стружки при циркулярной распиловке [13]

(стружкой или шламом), образующимися при разрушении ХННМ. Исследования показывают, что в зоне резания сегмента накапливаются продукты измельчения как от данного сегмента, так и от второго или третьего предыдущих (в зависимости от схемы резания). В ходе процесса сам материал и его фрагменты (шлам) оказывают абразивное воздействие на металлическую связку. При этом возможны три случая: 1 — гидроабразивное воздействие струи шлама при низкой концентрации дисперсной фазы; 2 — абразивное воздействие шлама высокой концентрации (пасты); 3 — фрикционное воздействие при трении связки по огнеупору. Из них только случай 1 обеспечивает нормальный рабочий режим инструмента. При этом первичная стружка (см. рис. 6, б) вместе с потоком шлама на высокой скорости ($V_{абр} = 0,75V_p$) производит гидроабразивную обработку режущей поверхности. Кинетическая энергия частиц пропорциональна $mV_{абр}^2 \cdot \cos\varphi/2$, где φ — угол атаки. Это обеспечивает как своевременное обнажение новых зерен из-под поверхности сегментов, так и выступание алмазов на высоту, достаточную для формирования всех элементов зоны резания (см. рис. 3).

Чтобы перейти от процессов при резании к описанию работы циркулярного инструмента, необходимо определить параметры, характеризующие инструмент и сам технологический процесс резания. Некоторые из них входят в формулу (1). Перечислим их кратко: D — диаметр круга, мм (глубина резания примерно до $1/3D$); размер сегмента $l \times b \times h$, мм; ширина паза корпуса (узкий паз — больше зубьев, широкий паз — меньше); P — мощность привода станка, кВт; n — частота вращения вала, об/мин (или окружная скорость V_p); V_t — горизонтальная подача, м/мин; d — заглубление («опуск», вертикальная подача); Π — производительность резания, $\Pi = V_t d$, $\text{см}^2/\text{мин}$ (строго говоря, должно быть $V_t \times d \times b$, $\text{см}^3/\text{мин}$, где b — ширина сегмента, но b входит и в правую, и в левую части формулы, поэтому от объема

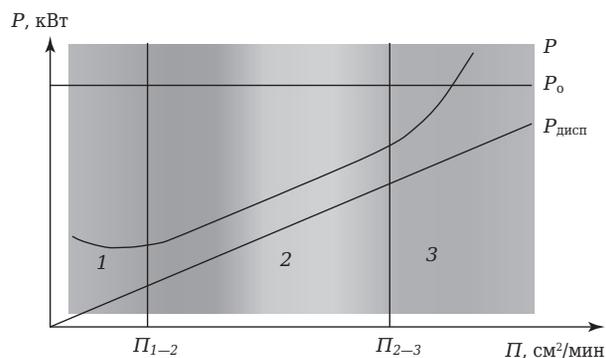


Рис. 9. Потребляемая мощность (энергия) при резании в зависимости от производительности резания [12]

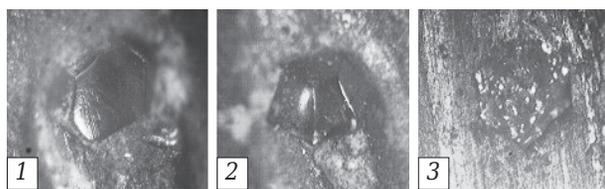


Рис. 10. Состояние алмазных зерен при различных режимных нагрузках

можно перейти к площади резания, которую легко измерить); R — ресурс («напил») круга, m^2 , или r — удельный ресурс на 1 мм высоты сегмента, m^2/mm ; A — сила тока в обмотке электродвигателя привода (нагрузка по току). Силу тока определяют как разность показаний по амперметру во время резания и на холостом ходу. Чем выше режущие свойства сегментов, тем ниже показание амперметра под нагрузкой. Некоторые современные установки снабжены ваттметром: потребляемая мощность более точно характеризует энергозатраты на резание.

Основное «полезное» расходование подводимой извне энергии E_0 идет на диспергирование ХННМ в зоне резания $E_{дисп}$, создание и сохранение режущей способности алмазосодержащего слоя $E_{сз}$ и удаление продуктов процесса из зоны $E_{шл}$. Величина $E_{дисп}$ зависит от прочности огнеупора и его структуры, $E_{сз}$ и $E_{шл}$ определяются конструктивными и режимными параметрами инструмента и процесса. Остальные статьи расхода энергии связаны с потерями $E_{тр}$. Суммируя, можно составить баланс:

$$E_0 = E_{дисп} + E_{сз} + E_{шл} + E_{тр}. \quad (3)$$

На рис. 9 показано изменение энергозатрат (P , кВт) при изменении производительности резания (Π , $см^2/мин$) [12]. Здесь прямая P_0 , соответствующая подводимой энергии E_0 , параллельна оси Π . Поскольку энергия разрушения пропорциональна разрушенному объему, то зависимость $P_{дисп} = f(\Pi)$ является линейной. На

практике, как отмечено в публикации [12], реальное потребление энергии P связано со скоростью резания Π нелинейно. Причиной этого являются дополнительные затраты энергии на процессы изменения структуры режущего слоя в зоне резания при выходе из режима самозатачивания (см. рис. 9, области 2 и 3). Если использовать РИ в этих областях, то требуется периодическое восстановление работоспособности режущего слоя.

В режиме самозатачивания (см. рис. 9, область 2) постоянного сохранения режущей способности алмазов достигают за счет своевременного абразивного удаления связки вокруг зерен, чтобы величина выступания зерен h_p была достаточной для их заглубления в материал и размещения шлама (см. рис. 3). При $\Pi < \Pi_{1-2}$ (малые нагрузки, так как величина Π пропорциональна нагрузке) ввиду заполирования режущих граней зерен интенсивность воздействия алмазов на ХННМ падает, растут потери на трение зерен, что приводит к возникновению нисходящей ветви кривой в области 1. При чрезмерных для конкретного РИ нагрузках ($\Pi > \Pi_{2-3}$) происходит быстрое разрушение алмазов, что приводит к снижению их режущей способности (см. рис. 9, область 3). Это сопровождается уменьшением выступания h_p (см. рис. 3), и подводимая энергия начинает тратиться на трение связки по огнеупору. Для режима самозатачивания необходимо обеспечить в зоне резания условия для своевременного удаления требуемого количества связки и обнажения алмазных зерен. Этого достигают частотой вращения РИ, силой его прижима к обрабатываемому материалу, свойствами СОЖ и достаточным количеством шлама. Слишком быстрое удаление шлама может привести к тому, что связка не будет успевать удаляться и начнет касаться разрезаемого материала. Аналогичные зависимости потребляемой на резание мощности можно найти в публикации [15]. Эволюцию структуры алмазных зерен подтверждают фотографии, показанные на рис. 10.

Рассмотренная модель резания позволяет сделать ряд замечаний. Во-первых, по мере изменения нагрузки на инструмент (интенсивности резания) меняется его характер. При оптимальных для данных инструмента, станка и материала скоростях съема устанавливается режим самозатачивания. Чем шире этот диапазон, тем качественнее и универсальнее считается инструмент. При снижении нагрузки можно войти в режим заполировки алмазов, а при завышенных нагрузках происходит затупление сегментов. Во-вторых, можно условно

выделить режимные границы раздела, точки P_{1-2} и P_{2-3} на рис. 9. А в-третьих, можно утверждать, что для каждого сочетания станок – инструмент – материал существует свой оптимальный режимный диапазон, называемый «рабочей зоной».

Сложным образом связанные процессы, происходящие в зоне резания, как в открытой системе, удобно иллюстрировать с позиций синергетики. Упомянутые выше взаимодействующие и взаимовлияющие элементы резания можно отнести к подсистемам процесса. В некоторых диапазонах производительности резания в подсистемах существуют неустойчивые состояния в областях, прилегающих к точкам P_{1-2} и P_{2-3} . На участке между ними система находится в состоянии метастабильного равновесия, из которого она может быть выведена, например, по причине отклонений в режимных параметрах (внешние управляющие параметры) либо в силу особенностей структуры ХНМ (внутренние управляющие параметры). Пройдя отмеченные точки, инструмент теряет режущую способность и выходит из динамически равновесного состояния (режима самозатухания).

Синергетика позволяет рассматривать достаточно далекие аналогии и переносить установленные закономерности с одной системы на другую. Так, процессы, происходящие в зоне резания при МО керамики, напоминают химическое взаимодействие жидкой и твердой фаз, где последовательно происходят три процесса: подведение химических реагентов из жидкой фазы к твердой, химическое взаимодействие на поверхности и удаление продуктов реакции в жидкую фазу. При этом частицы алмаза, закрепленные тем или иным образом в инструменте, являются аналогами растворенного реагента, процессы в зоне резания аналогичны химическому взаимодействию на границе раздела фаз, а удаляемый при помощи движения инструмента из зоны резания шлам, главным компонентом которого является измельченный обрабатываемый материал, можно сопоставить с продуктом реакции. Скорость процесса контролируется самой медленной стадией. Если это непосредственно разрушение и измельчение материала, то необходимо создать условия для эффективного удаления шлама из зоны реакции. В противном случае пространство между режущими алмазными зернами будет забиваться частицами шлама, что замедлит процесс резания. Забивание пространства между зернами частицами шлама является примером реализации известного в синергетике принципа Ле-Шателье – Брауна,

когда система под действием сильно неравновесного внешнего воздействия создает структуры, уменьшающие это воздействие.

Выше в упрощенном виде был рассмотрен обмен энергией между открытой системой, которую при резании представляет зона резания, и ее окружением. В зоне резания, находящейся между алмазным кругом и обрабатываемым ХНМ, происходят многочисленные физико-химические процессы, сопровождаемые большим выделением тепла. Рассмотрим эти процессы с позиций синергетики, учитывая необратимость и большую степень неравновесности процесса шлифования. При таких условиях в зоне резания возникают диссипативные структуры, обеспечивающие наиболее эффективное рассеяние подводимой энергии, и аккумулирующие структуры, запаасающие часть энергии, которую система не успевает рассеять в окружающую среду. Это приводит к изменению структуры рабочей поверхности РИ и обрабатываемого материала.

Механическая энергия вращающегося алмазного круга, его прижатия к детали из ХНМ и перемещения этой детали рассеивается на резание и дробление ХНМ (превращение его в стружку), на разрушение алмазных зерен и скрепляющей их связки, на преодоление сил трения между алмазными зернами и обрабатываемым материалом. В межзеренном пространстве энергия тратится на преодоление трения между зернами шлама, между зернами шлама и связкой, а также на образование кавитационных пузырьков. При этом значительная доля подводимой энергии успевает переходить в тепло. Некоторая часть тепловой энергии оказывается полезной, поскольку она разогревает обрабатываемый материал, ослабляет силу химических связей и облегчает его обработку. Но по тем же причинам разогрев алмазов и связки нежелателен. Поэтому основную часть тепловой энергии необходимо отводить. Какая-то ее часть удаляется благодаря теплопроводности через алмазные зерна, связку и обрабатываемый материал, но большая часть тепла удаляется вместе со стружкой и СОЖ. Более строгое рассмотрение процессов, происходящих при резании ХНМ алмазным инструментом, значительно усложняет этот баланс (рис. 11).

При резании механическая энергия от станка с инструментом переходит в другие виды энергии: сначала в энергию упругой деформации, которая преобразуется в кинетическую энергию атомов, приводящую к разрыву химических связей и образованию трещин и новых поверхностей. Остальная энергия расходуется на энергию образующихся частиц

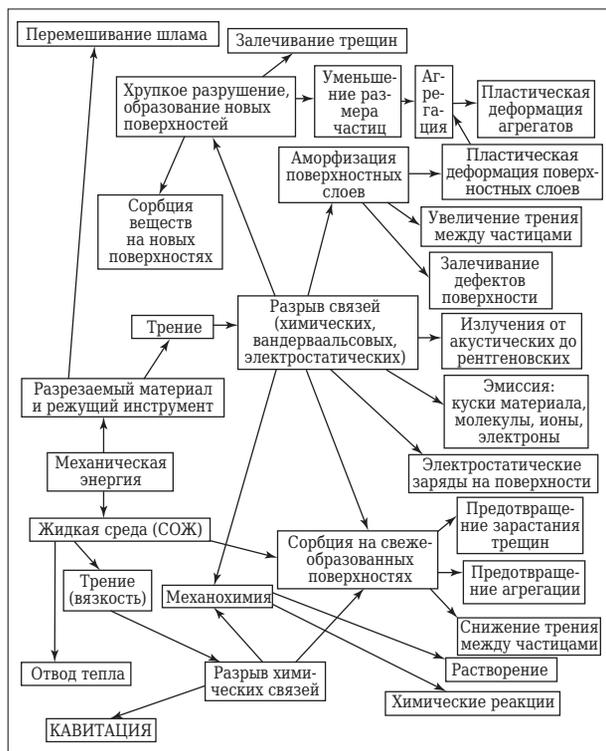


Рис. 11. Схема физических и химических явлений при резании ХННМ алмазным инструментом



Рис. 12. Схема превращений механической энергии, подводимой к твердому телу [16]

(от кусков материала разного размера до ионов и электронов) и волн различной длины и природы (акустических, электромагнитных и др.) и в конечном итоге переходит в тепловую энергию (рис. 12) [16]. Например, плотность электрических зарядов на свежем сколе кристаллов может достигать пробойных значений $10^8 - 10^9 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ [17].

Как было указано выше, к полезной можно отнести энергию, идущую на разрушение ХННМ, на удаление продуктов разрушения из зоны резания и на обнажение новых режущих зерен в режущем инструменте при разрушении в нем связки и частично самих зерен (режим

самозатачивания). Вращающийся диск создает поток шлама из зоны резания. Материал разрушаемых ХННМ и РИ измельчается и вместе с СОЖ и запасенным в них теплом удаляется из зоны резания. СОЖ не только участвует в отводе материала, снижая трение между частицами, и тепловой энергии из контактной зоны, но и облегчает измельчение частиц за счет расклинивающего действия жидкости, препятствующего залечиванию образующихся микротрещин. Последнее открывает возможности для совершенствования процессов алмазного резания. Задача состоит в том, что необходимо подобрать поверхностно-активные вещества, которые бы действовали преимущественно на обрабатываемый материал, а не на РИ. Решению этой задачи может способствовать то, что поверхностные свойства обрабатываемого материала, алмазных зерен и связки существенно различаются.

Доля полезных затрат энергии далека от 100 %, поскольку, как видно из рис. 11 и 12, существует много путей возможного использования подводимой энергии. Во время работы режущие кромки частиц абразива (алмазных зерен) затупляются, пространство между зернами и обрабатываемым материалом заполняется измельченным материалом и частицами обрабатывающего инструмента. Чрезмерное измельчение в зоне резания уже отколовшихся от ХННМ частиц также не является полезным, поскольку поглощает энергию, которая могла бы тратиться на резание.

В соответствии с принципом Ле-Шателье – Брауна система создает соответствующие структуры. Для противодействия измельчению система использует кооперативные процессы – агрегацию и аморфизацию поверхности частиц. Энергия начинает тратиться на перемешивание и пластическую деформацию агрегатов. Агрегация частиц затрудняет их удаление из зоны резания. Накопление (аккумуляция) дефектов субструктуры в приповерхностном слое создает условия для объединения частиц и аморфизации их поверхности. Аморфизация поверхности обрабатываемого материала может приводить к уменьшению трения между режущей кромкой алмазного зерна и разрезаемым материалом, уменьшая эффективность резания.

«Схлопывание» возникающих при нарушении сплошности жидкости кавитационных пузырьков, которые образуются в шлеме в зоне резания, способствует измельчению материала из-за возникающих гидравлических ударов. Нарушению сплошности жидкости и образованию кавитационных пузырьков способствуют

поверхностно-активные вещества (понижают силы поверхностного натяжения воды) и присутствие частиц твердой фазы, облегчающих зарождение пузырьков. Следует иметь в виду, что понижение энергии на образование кавитационных пузырьков одновременно уменьшает запасенную в них энергию и способность к разрушению обрабатываемого материала. К сожалению, кавитация разрушает не только измельчаемый материал, но и обрабатывающий инструмент.

Дополнительно можно рассмотреть также и обмен информацией, характеризующей структуру системы в зоне резания как открытой системы и окружающей ее среды. Условно можно считать, что на входе в систему информацию задают в виде конструкции станка, конструкции инструмента и его режущего слоя, а также технологических параметров, например: окружной скорости круга V_p , продольной и поперечной подач V_t и d . Все это перечислено в формуле (1) и существенно влияет на структуру системы и ее подсистем в зоне резания. За информацию на выходе системы можно принять структуру получаемого изделия, в основном поверхности резания. Фактически она характеризует качество готового изделия, а именно: точность габаритных размеров, плоскостность, чистоту обработанной поверхности. Ее задают и контролируют согласно нормативно-технической документации. При этом главным элементом преобразования информации является рельеф режущего слоя алмазного инструмента.

О поведении алмазных зерен при резании было сказано выше. Процесс резания алмазным инструментом возможен при условии наличия на его контактной поверхности рельефа нужной формы: режущие зерна должны выступать над поверхностью связки на необходимую для выбранных условий высоту и в необходимом количестве. Первоначально предварительный рельеф рабочей поверхности РИ создают при изготовлении инструмента на операции «вскрытия» («затачивания») режущего слоя при помощи абразивного воздействия шлифовального инструмента. При этом удаляется часть связки и из-под нее обнажаются алмазные зерна, вершины которых находятся примерно на одном уровне.

При эксплуатации вскрытого инструмента в неравновесной системе, которой является поверхность РИ, происходит «прирабатывание» рабочего слоя к условиям резания с формированием соответствующего рельефа. Этот процесс адаптирует РИ к текущим (меняющимся) условиям резания в пределах, в которых кон-

струкция алмазоносного слоя допускает его работоспособность. На поверхности рабочего слоя РИ происходят конкурирующие процессы. Удаление связки приводит к выкрашиванию алмазных зерен, но одновременно вскрывает новые зерна, которые начинают принимать участие в резании (режим самозатачивания). Главным является обеспечение условий, при которых максимально используется режущая способность алмазного зерна. Зерно не должно выкрашиваться из-за слабого закрепления в связке или слишком быстрого износа связки. При этом зерно может выкрашиваться, оставаясь еще острым. Если алмазное зерно затупится, то оно не только само перестает эффективно резать материал, но создает условия для затупления других зерен. Затупленное зерно продолжает упираться в обрабатываемый материал и снижать давление на другие зерна. Как было сказано выше, уменьшение давления на зерно создает условия для его заполировки. Оптимальным является частичное разрушение зерна в процессе резания с образованием новых режущих поверхностей, что сохраняет его режущую способность. При этом зерно должно прочно держаться в связке до максимального износа при сохранении своей режущей способности. Большую роль при этом играет скорость износа связки потоком шлама.

При возрастании интенсивности резания увеличивается скорость износа алмазов, но при этом вследствие повышения концентрации продуктов резания затрудняется их удаление. Это является реализацией принципа Ле-Шателье – Брауна и создает условия для заполировки, снижающей скорость резания. Кроме того, меняется рельеф поверхности РИ (рис. 13) [12]. Из рис. 13 видно, что имеются вскрытые из-под связки алмазы, частично разрушенные алмазы, а также углубления («дырки») после их выбивания. Для большинства кон-

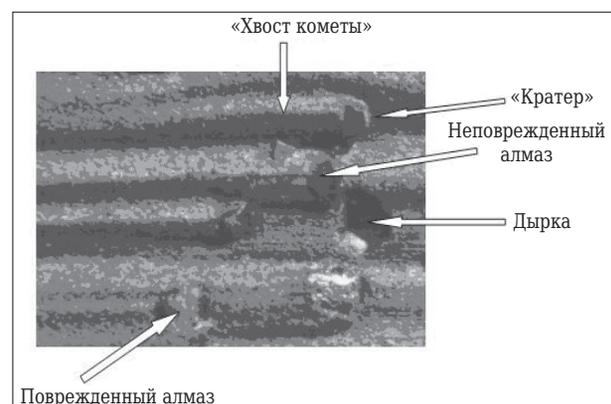


Рис. 13. Формирование рельефа на рабочей поверхности сегмента (фото авторов)

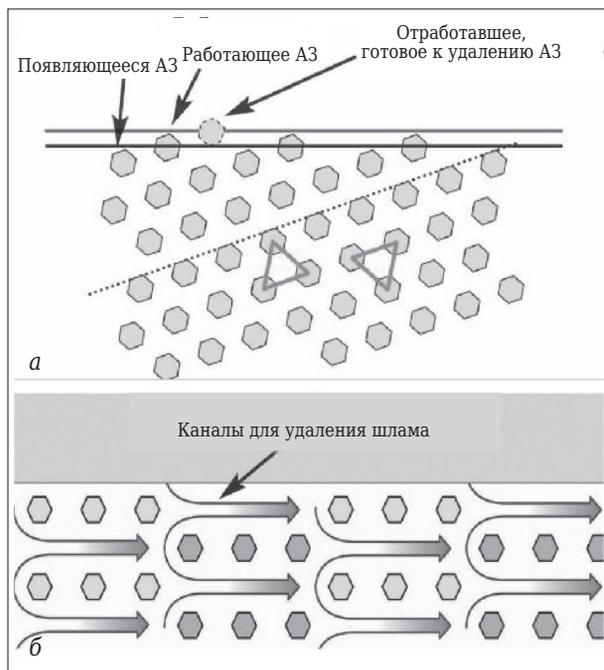


Рис. 14. Упорядоченное расположение алмазных зерен (АЗ) по ZENESIS Technology [18, 19]: а — пространственное расположение слоев АЗ, обеспечивающее их удаление с заменой новыми; б — каналы между рядами АЗ, облегчающие удаление шлама

струкций алмазосодержащего слоя и традиционных скоростей резания их доли соотносятся как $1/3 : 1/3 : 1/3$, т. е. режущими оказываются только треть всех находящихся на рабочей поверхности алмазов. Направление потоков удаляемых продуктов резания создает специфическую картину на поверхности связки: так, поток первичной стружки создает перед алмазом ямку («кратер»), а поток вторичной — образует за зерном поддерживающий бугорок, называемый «хвост кометы». Зерно алмаза защищает от абразивного износа находящаяся за ним связка, которая, в свою очередь, предохраняет зерно от выбивания. В то же время перед алмазом образуются вихри жидкости с абразивом, которые интенсивно удаляют связку, образуя кратер.

При высокой концентрации твердой фазы в шламе возникают затруднения с его отводом из зоны резания, а на поверхности связки часто можно увидеть характерные риски. Если неразрушенный материал касается связки, то образуются задиры вдоль сегментов режущего диска, а на тыльной кромке сегмента может образоваться «наклеп». При этом в зоне резания часто наблюдают искрение. Изучения рельефа на рабочей поверхности сегмента дает важную информацию об условиях его эксплуатации.

Вступая во взаимодействие с материалом, режущий слой инструмента в какой-то мере

переносит информацию о структуре своей поверхности на поверхность детали. При этом образуются заданная форма изделия, качество поверхности и степень дефектности его поверхностного слоя. В режиме самозатачивания (который реализуется при согласовании заложенных в конструкции РИ параметров, выбранной скорости резания и ее составляющих) информация доходит до ХННМ с минимальными для данных условий искажениями. При работе в других режимах входная информация искажается при передаче к поверхности обрабатываемого изделия, что проявляется в формируемом рельефе обрабатываемой поверхности. Это приводит к браку: появляются отклонения от направления резания, растут шероховатость и трещиноватость поверхности.

При правильной работе РИ можно выделить линейный износ связки в направлении, перпендикулярном направлению резания, который определяется свойствами материала и режимом обработки. При этом линейный износ связки опережает линейный износ алмазов, а вокруг алмазных зерен, упирающихся в материал между поверхностями резания и матрицы сегмента, образуется зазор («забой»), через который удаляется шлам. Увеличить область параметров резания, в которой реализуются режим самозатачивания и эффективного резания, можно с помощью внешних и внутренних управляющих сигналов, воздействующих на систему РИ — обрабатываемый материал. Кроме описанных параметров резания, задаваемых резательным станком, в качестве внешних управляющих сигналов перспективно использовать воздействия электрическими, магнитными, акустическими полями на зону обработки поверхности ХННМ. Внутренними сигналами является структура РИ в соответствии с рис. 5. В этой области ведут работу технологи, пытаясь менять структуру алмазных зерен, структуру связки (матрицы) и структуру композита алмазное зерно — связка. Для всех композитов важнейшее значение имеет граница между матрицей и армирующей фазой.

На процесс резания ХННМ большое влияние оказывает распределение алмазов в режущем композите. От него зависят давление алмазов на разрезаемый материал и процесс удаления шлама из зоны резания. Попытки простого увеличения содержания алмазов при их равномерном стохастическом распределении привели к уменьшению давления алмазов на обрабатываемый материал, снижению интенсивности резания, созданию условий для заполировки и выходу из режима самозатачивания. Более эффективным оказалось упорядоченное по опре-

деленной схеме расположение алмазов [13]. На рис. 14 показано одно из таких упорядоченных расположений алмазов, предлагаемое фирмой «EHW Diamond Industrial Co.», Ltd (Республика Корея) и названное ZENESIS Technology [18, 19]. В процессе работы вместо выбитых алмазов появляются новые при сохранении упорядоченного расположения. Пространственное расположение слоев алмазных зерен (см. рис. 14, а) обеспечивает их эффективную работу и своевременное удаление с заменой новыми. Это позволило создать оптимальные условия для работы алмазных зерен. При этом между рядами алмазных зерен создаются каналы (см. стрелки на рис. 14, б), по которым облегчается удаление шлама и абразивное удаление связки, облегчающее реализацию режима самозатачивания. Такое расположение алмазов позволило значительно увеличить производительность и ресурс инструмента, особенно отрезных алмазных кругов.

Появились работы, указывающие, что сочетание упорядоченного расположения алмазных зерен с неупорядоченным оказывается весьма эффективным [20]. Комбинация упорядоченной и хаотической структуры расположения алмазных зерен позволила повысить производительность обработки в 1,5 раза по сравнению с упорядоченной структурой. При этом микропрофиль поверхности обрабатываемой детали был упорядоченным. Поскольку микро рельеф определяется условиями шлифования, то преобладающим было управляющее воздействие упорядоченной структуры, хотя количество упорядоченных зерен в комбинированной структуре было меньше, чем в исследованной упорядоченной.

Весьма эффективным для резания и технологичным для изготовления оказалось равномерно-хаотическое расположение гранул (кластеров) с высокой концентрацией алмазов в металлической связке, предлагаемое фирмой ГК «Адель» [21]. При таком расположении гранул в металлической связке создаются возможности для адаптации входящих в них алмазных зерен к оптимальным режимам резания. При хаотическом сечении гранул, имеющих округлую форму, в зоне резания в работе оказываются различные площади их сечения. Рассмотрим максимальную площадь сечения

в середине кластера и сечения меньшей площади до него и после него. До него по мере работы площадь будет увеличиваться, а после — уменьшаться. При этом какие-то сечения будут находиться в оптимальных условиях для режима самозатачивания, какие-то — в неоптимальных условиях, близких к заполировке или быстрому износу. Но из этих неоптимальных режимов они непрерывно выходят, поскольку для каждой гранулы условия непрерывно меняются. Если на каких-то гранулах сложились условия для заполировки, то по мере износа РИ они окажутся выступающими над рабочей поверхностью, что приведет к увеличению давления на них, и они выйдут из условий заполировки. При правильном выборе условий работы круга, а также структуры композита кластеры — связка равномерно-хаотическое расположение кластеров обеспечивает поддержание оптимального режимного диапазона резания в широком интервале параметров системы станок — РИ — материал.

Подводя итоги, можно сказать, что рассмотрение сложного необратимого и неравновесного процесса алмазной обработки ХНМ с позиций синергетики позволяет глубже понять его особенности. В системах с высокой степенью неравновесности происходят процессы образования диссипативных и аккумулирующих структур. Диссипативные структуры обеспечивают отвод в окружающую среду из рабочей области РИ — обрабатываемый материал, энергии и информации. Причем эти структуры можно создавать в РИ заранее и использовать в качестве внутреннего управляющего воздействия, чтобы направить эволюцию структуры работающего РИ в желаемом направлении.

Режущие поверхности РИ являются композитом, в котором в металлической матрице распределен наполнитель (алмазные зерна). Как у всякого композита, его свойства определяются свойствами матрицы, наполнителя и их физического и химического взаимодействия, происходящего через пограничные слои. Изменяя структуру и, соответственно, свойства этих составляющих композита, можно в широком интервале менять свойства композита, обеспечивая оптимальные режимы работы РИ.

Библиографический список

1. **ГОСТ 16115-88 (ИСО 6105-88)**. Круги алмазные отрезные сегментные форм 1A1RSS/C1 и 1A1RSS/C2. Технические условия. — М. : ИПК «Известия стандартов», 1998. — 11 с.

2. **Konstanty, J.** Cobalt as a Matrix in Diamond Impregnating Tools for Stone Sawing Applications / *J. Konstanty*. — Krakow : Wydawnictwa AGH, 2002. — 158 p.

3. **Konstanty, J.** Diamond bonding and matrix wear mechanisms involved in circular sawing of stone / *J. Konstanty // Industrial Diamond Review*. — 2000. — № 1. — P. 55–65.
4. **Климонтович, Ю. Л.** Введение в физику открытых систем. В двух частях / *Ю. Л. Климонтович // Синергетика. Труды семинара. Т. 3 : Материалы круглого стола «Самоорганизация и синергетика: идеи, подходы и перспективы»*. — М. : Изд-во МГУ, 2000. — С. 100–142.
5. **Беляков, А. В.** Главные бифуркации при обжиге плотной оксидной керамики / *А. В. Беляков // Стекло и керамика*. — 2000. — № 10. — С. 13–17.
- Belyakov, A. V.** Principal Bifurcations in Firing of Compact Oxide ceramics / *A. V. Belyakov // Glass and Ceramics*. — 2000. — Vol. 57, № 10. — P. 345–349.
6. **Беляков, А. В.** Синергетический и квазихимический подходы в технологии керамики / *А. В. Беляков // Стекло и керамика*. — 2003. — № 9. — С. 21–27.
- Belyakov, A. V.** Synergistic and quasichemical approaches in ceramic technology (a review) / *A. V. Belyakov // Glass and Ceramics*. — 2003. — Vol. 60, № 9/10. — P. 274–278.
7. **Беляков, А. В.** Дефект глазури типа «сборка» с позиций синергетики / *А. В. Беляков, А. И. Захаров, Т. В. Цельковская // Стекло и керамика*. — 1998. — № 11. — С. 23–25.
- Belyakov, A. V.** Frill-like defect in glazes in the context of synergism / *A. V. Belyakov, A. I. Zakharov, T. V. Tselykovskaya // Glass and Ceramics*. — 1998. — Vol. 55, № 11/12. — P. 353–356.
8. **Лоскутов, А. Ю.** Воспроизводимость структуры и свойств изделий и их описание в рамках нелинейной динамики / *А. Ю. Лоскутов // Стекло и керамика*. — 2000. — № 7. — С. 17–19.
- Loskutov, A. Yu.** Reproducibility of the Structure and Properties of Parts and their Description within the Framework of Nonlinear Dynamics / *A. Yu. Loskutov // Glass and Ceramics*. — 2000. — Vol. 57, № 7/8. — P. 243–246.
9. **Бакунов, В. С.** Перспективы повышения воспроизводимости структуры и свойств керамики / *В. С. Бакунов, А. В. Беляков // Огнеупоры и техническая керамика*. — 1998. — № 2. — С. 16–21.
- Bakupov, V. S.** Prospects of improving the reproducibility of the structure and properties of ceramics / *V. S. Bakunov, A. V. Belyakov // Refractories and Industrial Ceramics*. — 1998. — Vol. 39, № 1/2. — P. 51–55.
10. **Бакунов, В. С.** К вопросу об анализе структуры керамики / *В. С. Бакунов, А. В. Беляков // Неорг. материалы*. — 1996. — Т. 32, № 2. — С. 243–248.
- Bakupov, V. S.** Analysing the Structure of Ceramics / *V. S. Bakunov, A. V. Belyakov // Inorganic Mater.* — 1996. — Vol. 32, № 2. — P. 220–222.
11. **Казарян, Ж. А.** Природный камень: добыча, обработка, применение : справочник. / *Ж. А. Казарян*. — М. : Петрокомплект, 2002. — 312 с.
12. **Davis, P. R.** An Indicator Sistem for Saw Grit / *P. R. Davis, M. L. Fish, S. Peacock, D. N. Wright // Industrial Diamond Review*. — 1996. — № 3. — P. 78–87.
13. **Pyun, S. P.** Study for cutting performance in arrayed diamond saw blade / *S. P. Pyun, H. W. Lee, J. H. Park // 1st International Industrial Diamond Conference, 20–21 October 2005, Barcelona*.
14. **Engels, A.** The Role of Particles per Carat in Diamond Tools Behavior / *A. Engels // Industrial Diamond Review*. — 2003. — № 2. — P. 39–45.
15. **Першин, Г. Д.** Влияние силового режима и глубины пропила на обрабатываемость природного камня алмазно-дисковым инструментом / *Г. Д. Першин, А. М. Ахметшин // Добыча, обработка и применение природного камня : сб. науч. тр.* — Магнитогорск : Изд-во МГТУ, 2006. — С. 155–163.
16. **Варенцов, Е. А.** Механохимия и механоэмиссия молекулярных органических кристаллов / *Е. А. Варенцов, Ю. А. Хрусталева // Успехи химии*. — 1995. — Т. 64, № 8. — С. 834–849.
- Varentsov, E. A.** Mechanoemission and mechanochemistry of molecular organic crystals / *E. A. Varentsov, Yu. A. Khrustaleva // Russian Chemical Reviews*. — 1995. — Vol. 64, № 8. — P. 783–798.
17. **Дусилер, Г. И.** Декорирование поверхности твердых тел / *Г. И. Дусилер, В. П. Власов, Ю. М. Герасимов [и др.]*. — М. : Наука, 1976. — 359 с.
18. **ZENESIS.** World's most advanced patterned technology. Product catalog EHW Diamond Industrial Co., Ltd (<http://www.zenesistechology.com/>).
19. **Product catalog** Jack Midhage Diamond Production AB. Diamond Tools and Machines for the Construction Industry. Oct. 2011. 63 p. (http://www.midhage.se/eng/pdf/midhage_productcatalogue_2011.pdf).
20. **Лавриненко, В. И.** Исследование особенностей спеченного композита с упорядоченной структурой / *В. И. Лавриненко, О. О. Пасичный, Б. В. Сытник, А. А. Девицкий // Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. — 2009. — Вип. 7. — С. 105–112.
21. **Беляков, А. В.** Резка бакора сегментным инструментом с кластерным расположением алмазов / *А. В. Беляков, С. И. Церман // Новые огнеупоры*. — 2011. — № 5. — С. 34–37.
- Belyakov, A. V.** Cutting of Bakor by a segmented tool with clustered diamonds / *A. V. Belyakov, S. I. Tserman // Refractories and Industrial Ceramics*. — 2011. — Vol. 52, № 3. — P. 195–198. ■

Получено 12.01.14
© А. В. Беляков, С. И. Церман,
2014 г.