

Физико-химическая механика технологических процессов обработки материалов

Г. С. Ходаков

ГЕНРИХ СОЛОМОНОВИЧ ХОДАКОВ — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделением физико-химической механики НПО «Гидротрубопровод». Область научных интересов: механохимические процессы, сорбционная механохимия, технологические проблемы процессов тонкого измельчения, шлифования и полирования, приготовления, стабилизации и транспортирования высококонцентрированных суспензий.

125206 Москва, проезд Соломенной сторожки 12, НПО «Гидротрубопровод», тел. (095)979-93-54, факс (095)210-22-58.

В данной статье представлены математические модели измельчения и шлифования, описывающие энергетику и кинетику этих процессов, а также рассмотрен подход к математическому описанию процесса полирования. Построение достаточно адекватных моделей явилось итогом всестороннего изучения и анализа всех возможных факторов и явлений, лежащих в основе рассматриваемых технологических методов обработки материалов.

Полученные модели следует рассматривать как один из этапов в последовательном развитии теоретических основ физико-химической механики.

Физико-химическая механика сложилась как самостоятельная отрасль науки о явлениях, происходящих в технологических процессах, основу которых составляют различные формы разрушения твердых материалов. Жизнеобеспечение и вся современная культура человечества зиждется на промышленном использовании этих технологий. Добыча, дробление и измельчение полезных ископаемых и пищевых продуктов, резание и точение, шлифование и полирование стекла, металлов, камней — без них не обходится ни энергетика, ни пищевая индустрия, ни машиностроение, ни оптика, ни электроника. Трудно найти область жизнедеятельности современного человеческого общества, в которой такие производства и продукты таких производств не были бы произведены или использованы.

Физико-химическую механику не следует, как иногда принято, сводить к изучению только эффекта адсорбционного понижения прочности твердых тел под действием активных жидких сред. Такая трактовка чрезмерно узка и не соответствует всей совокупности явлений, которые она охватывает, и технологических проблем, которые она призвана решать. Более того, на основании многолетних исследований технологических процессов, часть которых представлена в данной статье, можно утверждать, что адсорбционное понижение прочности (в прямом значении — обратимая адсорбция жидкостей на поверхности твердых материалов) в технологических процессах либо не прослеживается, либо оказывается несущественным на фоне других более действенных факторов, таких как меха-

нохимические и механосорбционные необратимые взаимодействия.

Заметим, что активные среды издавна успешно используют в технологиях, которые здесь обсуждаются, а многие из них, такие как резание, точение, шлифование, полирование, без применения активных сред просто немыслимы ни в наше время, ни много веков ранее. На протяжении длительного времени развития этой практической области неоднократно было констатировано весьма сильное и разнообразное влияние среды на технологические и экономические параметры процессов механической обработки материалов.

За столь солидное время прогресса этих очень масштабных производств они неизбежно совершенствовались и оптимизировались на технологическом уровне методами случайных вариаций, проб и ошибок. В результате непрерывных инженерных поисков, которые плодотворно продолжают и поныне, таким своеобразным «естественным отбором» технологические процессы и механизмы для их осуществления доведены до относительного совершенства.

В данной статье с позиций физико-химической механики и сорбционной механохимии кратко изложены результаты наших исследований трех технологических процессов — измельчения, шлифования и полирования. Их механизм в чисто технологическом аспекте оставался непонятым, а закономерности сформулированы лишь приближенно на эмпирическом уровне. В нашем изложении из всей совокупности технологических факторов выделены лишь те, которые определяют кардинальные проблемы рассматриваемых технологий, например, такие, как зависимость между затратами энергии и дисперсностью измельчаемого материала, соотношение износа детали и инструмента при шлифовании, влияние состава среды и механизм полирования.

1. Физико-химическая механика измельчения

Измельчение твердых материалов, освоенное человечеством с незапамятных доисторических времен, в наше время относится к числу самых энергоемких и материалоемких распространенных технологических

1.1. Факторы, определяющие энергетику процесса измельчения

процессов. Его осуществляют, как правило, механическим разрушением крупных фрагментов ударным и/или сдавливающим действием в аппаратах различных конструкций, назначения, мощности и производительности.

Практическая актуальность и эвристичность проблемы дробления и измельчения привлекают внимание исследователей уже более 150 лет — с того времени, когда полезные ископаемые и электроэнергия стали определяющими факторами в экономической и социальной жизни человечества. Были выявлены частные закономерности этих процессов, на основе которых разработаны методики расчета мельниц и технологических циклов помола. Закономерности в основном эмпирического происхождения выполняются в узком интервале дисперсности ограниченного ряда материалов. Эмпирические соотношения (между затратами энергии и дисперсностью измельчаемых материалов) Кика, Риттингера и Бонда, которые принято называть законами измельчения, стали классическими и широко используются в производственной практике. Многочисленные работы в этом направлении хорошо известны по статьям и монографиям [см., например, 1, 2].

Соотношение Кика (иногда его называют законом Кика) относится к процессу дробления — последовательных актов разрушения и непосредственно выводится из теории упругости идеально хрупких фрагментов твердых тел. Соотношение Риттингера описывает область среднетонкого измельчения. Оно основано на эмпирических наблюдениях пропорциональности затрат энергии на измельчение и удельной поверхности измельчаемого материала. Закон Бонда, который чаще других используют в инженерных расчетах, объединяет первые два посредством подгоночных коэффициентов, которые учитывают механические свойства измельчаемых материалов и условия их разрушения.

Однако ни одна из ранее опубликованных теорий и ни один из эмпирических законов измельчения неприменимы в области тонкого и сверхтонкого диспергирования. И, тем более, ни одна из общеизвестных математических аппроксимаций закономерностей дробления-измельчения не является одинаково корректной для всего интервала дисперсности и не учитывает влияния внешней среды на процесс и энергетику разрушения [2—4]. Исследования, выполненные в последнее время, так и не изменили данную ситуацию. Законы измельчения Кика, Риттингера и Бонда по-прежнему остаются темой анализа и дискуссий, например, состоявшегося сравнительно недавно Восьмого международного конгресса по измельчению [5—7]. П.А. Ребиндер впервые высказал мысль, что неудачи в поисках универсальных законов измельчения обусловлены односторонней механической интерпретацией происходящих при разрушении твердых тел процессов и учетом в них роли внешней среды [8—10].

Задача данного раздела нашего исследования состоит в установлении закономерностей тонкого и сверхтонкого измельчения твердых тел на основе положений физико-химической механики и особенно той ее части, которая относится к сорбционной механохимии — химическому взаимодействию активированных пластическим деформированием поверхностных слоев частиц между собой и окружающей их внешней средой [3, 4].

В результате серии наших многолетних исследований были впервые установлены явления и сформулированы факторы, определяющие физико-химическую природу процесса измельчения твердых материалов. Изучены закономерности и механизм эффекта внешней среды. Обнаружено явление молекулярноплотного агрегирования высокодисперсных частиц под действием развиваемых в помольных аппаратах механических нагрузок, определены условия принудительного и самопроизвольного разрушения таких агрегатов, выявлена их роль в анализе дисперсности продуктов измельчения. Исследованы закономерности пластического деформирования высокодисперсных частиц при их разрушении, вызываемое этим процессом деструктурирование поверхностных слоев частиц и зависимость затрат энергии на разрушение от механохимического их взаимодействия со средой измельчения — жидкостями и газами. Все эти явления оказались определяющими для развиваемой на основе физико-химической механики теории процесса измельчения твердых материалов.

Внешняя среда. На процесс измельчения оказывает весьма заметное влияние даже очень малое содержание в измельчаемом материале химически активных включений, составляющее десятые и даже сотые доли процента массы измельчаемого материала. Такое содержание жидкостей (точнее их паров) соответствует поверхностной (на частицах) концентрации, близкой к десятым долям объема насыщенного мономолекулярного слоя. Очистка от столь малых количеств воды или других жидкостей затруднительна, а зачастую практически невозможна без нарушения структуры и механических свойств измельчаемого материала.

Во всех известных нам исследованиях влияние активных включений на процесс измельчения не контролировали, что и оказалось одной из причин несогласованности экспериментальных данных и неудач в поиске их закономерностей. Если герметичность в опытах не соблюдена, содержание активных включений в измельчаемом материале остается неопределенным, а значит, их влияние не подлежит количественной оценке.

Помолам в избытке жидкости свойственны свои особенности. В наибольшей мере они обусловлены реологией помольной среды — совокупности измельчаемого материала, мелющих тел и жидкой фазы. Вязкие пасты, реологические свойства которых можно значительно варьировать подбором поверхностно-активных веществ (ПАВ), затрудняют движение мелющих тел. В разбавленных суспензиях часть энергии расходуется на бесполезное перемещение жидкости. В ряде случаев происходит известное в технологии так называемое проскальзывание помольной среды относительно барабана мельницы, что приводит к снижению эффективности измельчения и уменьшению потребления мельницей энергии.

В высокоскоростных мельницах ударного действия часть энергии привода расходуется на преодоление сопротивления воздуха мелющим телом. Доля этой энергии составляет тем большую часть энергии привода мельницы, чем выше скорость движения мелющих тел. Кроме того, в таких мельницах частицы малых размеров тормозятся встречным воздушным пото-

ком до скоростей, недостаточных для их разрушения при соударении [8, 9].

Молекулярноплотное агрегирование. По достижении удельной поверхности 5—10 м²/г (по БЭТ) дальнейшее измельчение порошков сопровождается образованием необычно плотных агрегатов частиц (своеобразных кластеров). Такие агрегаты высокодисперсных частиц упакованы настолько плотно, что внутренняя межчастичная поверхность пор становится недоступной для адсорбции азота, криптона и других газов, используемых в качестве адсорбатов при измерении удельной поверхности по БЭТ. Всеми методами дисперсионного анализа они воспринимаются как отдельные частицы. Такие агрегаты-кластеры в силу недоступности их внутренних поверхностей для сорбции простых газов были нами названы молекулярноплотными.

Вследствие образования молекулярноплотных агрегатов экспериментально наблюдается уменьшение дисперсности (удельной поверхности по БЭТ) порошков в процессе помола, наступающее после предварительного тонкого их диспергирования. С еще большим эффектом можно уменьшить удельную поверхность коллоидно-дисперсных препаратов. Зачастую, особенно в случае металлических частиц, происходит их контактное механохимическое сваривание [4].

В молекулярноплотных агрегатах минералов типа кварца, корунда и других частицы связаны между собой слабее, чем в агрегатах металлических частиц. Такие молекулярноплотные агрегаты могут быть разрушены кратковременным механическим воздействием в активных дисперсионных средах. Возможно также самопроизвольное диспергирование агрегатов при длительном контакте в обычных условиях [4]. Однако некоторые природные и синтетические высокодисперсные материалы (порошки металлов, тальк, аэросил, белая сажа и др.) переходят в молекулярноплотные агрегаты частично или полностью необратимо. Механохимическое сваривание частиц, часто необычного химического состава, является предельным случаем такого необратимого агрегирования [5].

Обнаруженное и исследованное нами явление молекулярноплотного агрегирования и его резкая зависимость от состава среды измельчения делают некорректной трактовку процесса механического измельчения без учета этого фактора. Кроме того, на образование и разрушение агрегатов затрачивается энергия, доля которой зависит от условий измельчения, физико-химических и механических свойств измельчаемого материала и состава среды измельчения, но она всегда увеличивается с ростом дисперсности твердой фазы [4, 5].

Пластическое деформирование частиц. Механическое разрушение твердых тел происходит при возникновении в них предельных упругих напряжений, неизбежно сопровождаемых пластическими деформациями, на которые затрачивается значительная доля работы внешних сил. Как нами установлено, толщина пластически деформированных слоев, непосредственно прилегающих к поверхностям раскола, и плотность затрат энергии на пластическое деформирование при предельном (разрушающем) напряжении определяются только природой твердого тела и условиями измельчения, но не размерами разрушаемых фрагментов. Следовательно, удельные (на единицу объема измельчаемого материала) затраты энергии на пластическое деформирование пропорциональны площади

поверхности уже разрушенных частиц и возрастают пропорционально уменьшению их размеров, тогда как удельные затраты энергии на предельное упругое деформирование от дисперсности не зависят. Пластическое деформирование становится определяющим в балансе затрат энергии на измельчение частиц малых размеров даже весьма хрупких материалов типа кварца и корунда.

Следствием пластических деформаций при измельчении является ряд экспериментально наблюдаемых и измеряемых необратимых превращений: изменения (уменьшение, иногда повышение) плотности, полиморфные инверсии и аморфизация поверхностных слоев частиц. Таким активированным, в частности аморфным слоям, свойственна аномально высокая химическая активность и сорбционная способность, а также аномально низкое диффузионное сопротивление. Аккумулированные в разупорядоченной структуре поверхностных слоев значительные запасы энергии и низкое диффузионное их сопротивление могут вызывать и инициировать низкотемпературные химические реакции, механохимические и механосорбционные процессы.

Как и упругие деформации, пластические деформации с течением времени частично или полностью релаксируют и их энергия переходит в тепловую. Однако период релаксации пластических деформаций значительно больше, чем упругих. Его величина определяется природой материала, составом среды измельчения, размером частиц и температурой.

Абразивный износ мелющих тел. Энергия, затрачиваемая на трение и образование новой поверхности при диспергировании частиц, как и энергия пластического деформирования, пропорциональна удельной поверхности порошков. Наряду с этим, износ мелющих тел и затрачиваемая на него энергия по мере увеличения дисперсности за редким исключением уменьшаются. Исключения составляют материалы, которые в высокодисперсном состоянии вследствие механохимических воздействий испытывают полиморфные инверсии с переходом их в более абразивную форму [4]. Так, например, тонкое измельчение глинозема переводит его частично в более плотную корундовую фазу, а тонкое измельчение частиц графита вызывает в них структурную перестройку (через промежуточное аморфизованное состояние) в частицы с очень высокой абразивной способностью.

Попутно заметим, что удельные (на единицу массы измельчаемого материала) затраты металла — материала мелющих тел в результате абразивного и коррозионного износа мельниц в стоимостном выражении сопоставимы с удельными энергозатратами на диспергирование, а зачастую превосходят их. Поэтому износ мелющих тел в равной мере следует учитывать в расходах на процесс измельчения. На практике часто наблюдается пропорциональность в стоимостном выражении удельных затрат металла и энергии на измельчение, что упрощает расчеты. Кроме того, для процесса измельчения в отличие, например, от родственного ему процесса шлифования, износ инструмента (мелющих тел) и показатель работы мельницы — дисперсность измельчаемого материала связаны не функционально, а корреляционными соотношениями.

Особенности гранулометрического состава измельченных материалов. В теории измельчения используются хорошо известные законы разрушения твердых тел конечных размеров, разделяемых на фрагменты

конечных размеров. Порция механической энергии, затраченной на совершившееся разрушение тела конечных размеров, также всегда конечна (как и для усталостного разрушения, энергоемкость которого многократно больше энергозатрат на обычное предельное упруго-пластичное воздействие). Это, казалось бы, должно исключать запись закономерностей процессов измельчения в виде дифференциальных уравнений.

В качестве предпосылки для привлечения аппарата математического анализа к теории измельчения нами использован тот факт, что во множестве частиц дисперсной системы всегда имеются такие их группы, размеры которых можно полагать отличающимися от размеров других групп частиц на бесконечно малую величину. Это означает, что распределение частиц по размерам аппроксимировано непрерывной функцией, причем безразличны вид гранулометрического распределения и величина его используемого участка. Другие предпосылки для математического анализа процесса измельчения не потребовались. Отметим, что такой прием общепринят, но в теории измельчения его ранее не применяли.

Масштабное упрочнение (разупрочнение) частиц. Эффект масштабного упрочнения частиц как физического явления известен, однако проявление его в процессах измельчения вряд ли значительно. Дело в том, что в процессах измельчения, которые представляют собой последовательное предельное нагружение частиц с их разрушением до фрагментов все более малых размеров, в частицах накапливаются дефекты, вызванные такими воздействиями. Поэтому корректность приложения по классической схеме эффекта масштабного упрочнения (в силу непрерывного пополнения объема каждой из частиц в последовательных актах разрушения разного рода дефектами) к процессу измельчения весьма проблематична. Тем не менее, в своих работах мы провели анализ этого явления и показали, что учет эффекта масштабного упрочнения не приводит к заметным изменениям в математической формулировке закона измельчения.

Критерием корректности изложенных предпосылок является не только доказанная в наших и других исследованиях их экспериментальная обоснованность [например, 12—15]. Полученные на их основе математические соотношения не противоречивы и преемственны с общепринятыми «законами измельчения» Кика, Риттингера и Бонда в тех интервалах дисперсности, в которых корректность этих законов проверена не только в исследованиях, но и производственной практикой.

1.2. Математическая модель физико-химического механизма и кинетики измельчения

Для удобства изложения нижеприведенного материала дадим список основных величин, использованных при описании математической модели измельчения и результатов ее экспериментальной проверки.

b — объемный фактор формы частиц

e — объемная плотность энергии предельной упругой деформации частицы [Дж/см³]

E_0 — модуль Юнга

E_d — удельные (на единицу объема) затраты энергии на измельчение [Дж/см³]

E_s — поверхностная плотность затрат энергии на разрушение частиц [Дж/см²]

E_{dm} — максимальная плотность энергии механического напряжения в мельнице

k — константа скорости измельчения

n — кратность разрушения

n^3 — среднее число фрагментов в каждом акте разрушения

P — прочность

s — площадь поверхности, образованной в результате разрушения

S — удельная поверхность

S_m — удельная поверхность максимально измельченного порошка

U — энергия, затрачиваемая на разрушение произвольной частицы

t — продолжительность измельчения

V_0 — суммарный объем всех частиц в зоне измельчения

V_m — объем максимально измельченных частиц в зоне измельчения

X — размер разрушаемой частицы

X_1 — средний размер фрагментов единичного акта разрушения

β — объемная плотность энергии предельного пластического деформирования частицы [Дж/см³]

β_n — удельная энергия предельного пластического деформирования частицы

γ — поверхностная плотность работы «поверхностных» сил трения, износа, образования и разрушения агрегатов

λ — толщина слоя пластических деформаций

σ — удельная свободная энергия поверхности частиц в дисперсионной среде

ω — кратность сепарации

Как указано выше, пластическое деформирование совершается в тонких слоях частиц, прилежащих к поверхности образующихся при их разрушении фрагментов. В каждом отдельном акте разрушения затраты энергии на пластические (квазиобратимые) деформации определяются объемом деформированной области, который для частиц любой формы и размера принят равным:

$$b[X^3 - (X - 2n\lambda)^3] = bn^3[X_1^3 - (X_1 - 2\lambda)^3] \quad (1)$$

Значение n — кратность разрушения — согласно экспериментальным данным принято одинаковым для частиц всех размеров и формы.

Энергия, необходимая для разрушения частицы, размеры которой $X > 2n\lambda$, определяется суммой работ упругого и пластического предельного деформирования, а также работой поверхностных сил (в условиях опыта):

$$U = b\{eX^3 + \beta[X^3 - (X - 2n\lambda)^3]\} + (\gamma + \sigma)6nX^2 \quad (2)$$

$$dU/dX = 3b\{eX^2 + \beta[X^2 - (X - 2n\lambda)^2]\} + 12n(\gamma + \sigma)X = 3b\{eX^2 + 4\beta n\lambda(X - n\lambda)\} + 12n(\gamma + \sigma)X \quad (3)$$

Уместно отметить, что удельная работа разрушения упругих макрочастиц равна:

$$e = P^2/2E_0$$

В результате разрушения частиц размером X образуется новая поверхность, площадь которой составляет:

$$s = 6nX^2; ds = 12nXdX$$

Приросту площади поверхности ds соответствует разность затрат энергии dU на разрушение. Поэтому с точностью до величин второго порядка малости соотношение между затратами энергии на разрушение и

его результатом в дифференциальной форме закономерно записать в виде:

$$dU/ds = beX/4n + b\lambda\beta(1 - n\lambda X^{-1}) + \gamma + \sigma \quad (4)$$

Уравнение (4), выраженное для удельных величин (S — удельная поверхность, E_d — удельные (на единицу объема) затраты энергии на измельчение), описывает энергетику процесса измельчения:

$$dE_d/dS = 3/2be(nS^{-1}) + [b\lambda\beta(1 - n\lambda S/6) + \gamma + \sigma] \quad (5)$$

В уравнении (5) первое слагаемое отражает удельные затраты энергии на упругое разрушающее напряжение, второе — на пластические предельные деформации и работу поверхностных сил. Произведение $n\lambda S$ — поправка на кривизну слоя пластического деформирования, которая существенна лишь для очень малых частиц, размеры которых сопоставимы с толщиной пластически деформированного слоя. Величина $\beta\lambda$ для частиц $X \gg \lambda$ ($n\lambda S/6$ — малая величина) представляет собой поверхностную плотность энергии пластического деформирования.

Для процесса грубого помола — дробления (удельная поверхность S — малая величина) уравнение (6) переходит в уравнение Кика, а для процесса среднетонкого измельчения (величина S — значительна, $\lambda\beta S$ составляет порядка e) — в уравнение Риттингера, описывающее прямолинейный участок кинетической кривой измельчения по обобщенному уравнению. Значение поправки на кривизну в уравнении (6) относительно мало в области среднетонкого измельчения, когда толщина слоя λ , в котором сосредоточены пластические деформации, остается значительно меньше размеров частиц.

Для всех хрупких, а тем более пластичных твердых тел, объемная плотность энергии предельных пластических деформаций многократно больше, чем для упругих материалов. Поэтому закон Кика выполняется только тогда, когда размеры кусков измельчаемого материала на несколько порядков больше толщины слоя пластических деформаций. Выполнимость закона Кика в процессах дробления материалов подтверждается всеми экспериментальными данными и производственной практикой.

Из изложенного следует, что принятые предпосылки и способ математического моделирования позволяют получить уравнение (закон) измельчения, которое удовлетворяет принципу преемственности с уже известными уравнениями, выполняемыми в широком интервале дисперсности. Однако уравнение (5) строго выполняется лишь для частиц, размеры которых больше удвоенной толщины слоя пластического деформирования и, кроме того, при условии, что энергия мелющих тел всегда достаточна для разрушения частиц. Между тем, с уменьшением размера частиц удельная работа их разрушения увеличивается. Действительно, для частиц размером $X \gg \lambda$ с точностью до коэффициента формы (близкого единице) плотность затрат энергии на разрушение (затраты энергии разрушения, отнесенные к объему разрушаемого тела) равна:

$$\begin{aligned} UX^{-3} = E_d = X^{-3} [n(\beta\lambda + \gamma + \sigma)6X^2 + eX^3] = \\ = 6X^{-1}n(\beta\lambda + \gamma + \sigma) + e = E_s S + e \end{aligned} \quad (6)$$

Поскольку величины E_s и e от размера частиц не зависят ($e = \text{const}$ для каждого измельчаемого мате-

риала), то согласно уравнению (6) удельные затраты энергии на разрушение ($UX^{-3} = E_d$) растут с уменьшением размера (с увеличением удельной поверхности) частиц. Однако плотность энергии, которую мелющие тела могут передать на разрушение частиц, всегда ограничена и, как правило, постоянна.

Если максимальная плотность механической энергии E_{dm} , получаемой частицей в единичном акте нагружения, меньше суммы удельной энергии ее предельного пластического и объемного деформирования, т.е.

$$E_{dm} < E_s S_m + P^2/2E_0,$$

то разрушение таких частиц (размер которых меньше $X_m = 6/S_m$) может происходить только в результате накопления в них дефектов до предельной величины — крайне невыгодным в энергетическом плане усталостным путем, который ни в одном из промышленных помольных аппаратов не используется. По мере протекания процесса измельчения таких частиц, потребляющих энергию, но практически неразрушающихся, становится все больше, и все большая доля суммарной энергии E , расходуемой мелющим агрегатом, затрачивается на их деформацию и перемещение.

С учетом неразрушающихся «балластных» частиц размером $X \leq X_m$, объем которых составляет часть (V_m) от суммарного объема всех частиц (V_0) в зоне измельчения, доля энергии, результативно затрачиваемой на разрушение частиц, пропорциональна удельной поверхности частиц, которые можно еще разрушить в заданных условиях ($S_m - S$), и обратно пропорциональна дисперсности частиц, размеры которых настолько малы, что в данных условиях они далее не разрушаются.

С учетом такого распределения затрачиваемой энергии зависимость между суммарными затратами энергии и результатом измельчения — удельной поверхностью ансамбля частиц можно представить в виде:

$$\begin{aligned} dE/dS = (1 - S/S_m)^{-1} [3/2be(nS)^{-1} + \\ + b\lambda\beta(1 - n\lambda S/6) + \gamma + \sigma] \end{aligned} \quad (7)$$

Если при этом принять как данность гипотетическое для процесса измельчения масштабное упрочнение частиц по общепринятой модели [4, 9, 11], то уравнение для затрат энергии на измельчение до заданного среднего размера частиц или удельной поверхности приобретает вид:

$$\begin{aligned} (P/P_0)^{1/2} = e/e_0 = [1 + 1,6(C/X)^{-1/2} + 0,6C/X] = \\ = 1 + 3,9(CS)^{-1/2} + 3,6CS \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dE/dS = (1 - S/S_m) \{ 3/2be_0(nS)^{-1} [1 + 3,9(CS)^{-1/2} + \\ + 3,6CS] + b\lambda\beta(1 - n\lambda S/6) + \gamma + \sigma \} \end{aligned} \quad (8)$$

где C — постоянная для данного материала, значение которой составляет не более нескольких долей размера частицы.

Поскольку, как показано далее, удельные затраты энергии на разрушение очень мелких частиц определяются не упругими, а более энергоемкими предельными пластическими деформациями, слагаемое, характеризующее дополнительные затраты энергии на гипотетическое для процесса измельчения масштабное упрочнение, пренебрежимо мало.

Уравнение (8), как и уравнение (5), переходит в закон Кика при малых значениях S и в закон Риттингера при достаточно больших значениях удельной поверхности, но обязательно при $S \ll S_m$, т.е. для области среднетонкого измельчения. Таким образом, масштабное упрочнение частиц не изменяет и не определяет вид уравнения процесса измельчения.

Максимальный размер неразрушающихся частиц можно определить из условия:

$$E_{dm}X_m^3 = eX_m^3 + \beta[X_m^3 - (X_m - 2n\lambda)^3] + 6(\gamma + \sigma)nX_m^2 \quad (9)$$

С точностью до величин порядка λ^2 имеем:

$$X_m = 6n(\beta\lambda + \gamma + \sigma)(E_{dm} - e)^{-1} \quad (10)$$

Максимальная плотность энергии механического напряжения E_{dm} , которая может быть передана разрушаемой частице мелющим телом, характеризует известную в помольной технике энергонапряженность мельницы.

Удельная поверхность предельно измельченного материала и его физико-механические свойства связаны с энергонапряженностью выражением:

$$S_m = 6(X_m/n)^{-1} = (E_{dm} - e)(\beta\lambda + \gamma + \sigma)^{-1} \quad (11)$$

Предельно достигаемая степень измельчения тем выше, чем больше энергонапряженность мельничного агрегата и чем ниже прочность и пластичность частиц. Значение E_{dm} определяется конструкцией и параметрами мельниц. Для класса шаровых мельниц оно тем выше, чем больше диаметр барабана (пропорционально $D^{1/2}$) и масса шаров. Энергонапряженность зависит также от объема помещенного в мельницу материала и его реологических свойств.

Параметры β и e характеризуют механические свойства измельчаемого материала, а толщина слоя пластических деформаций (параметр λ) и удельные затраты энергии на пластическое деформирование (параметр β) определяются не только пластичностью его частиц, но и эффектом механосорбционного и механохимического взаимодействия механически активированных поверхностных слоев частиц с окружающей средой. Подбором состава дисперсионной среды толщину слоя и, следовательно, работу пластического деформирования можно изменять в несколько раз (для кварца с добавками воды — в 10–15 раз). Почти всегда реальные значения $\beta \gg (E_{dm} - e)$. При малых значениях $\beta\lambda$ (очень хрупкие материалы и активная дисперсионная среда) величина X_m определяет затраты энергии на образование новой поверхности, на трение в помольном ансамбле, на образование и разрушение агрегатов.

Современные помольные аппараты, оптимизированные на процесс среднетонкого помола, сконструированы так, что E_{dm} составляет не больше нескольких e_0 . Это означает, что создаваемые в них предельные давления примерно в два-три раза превышают предел прочности измельчаемых частиц. Из уравнения (11) следует, что для тонкого измельчения необходимо, чтобы выполнялось более жесткое условие: $E_{dm} > \beta + e_0$. Это соотношение реализуют на практике в мельницах сверхтонкого измельчения — планетарных, вибрационных, аттриторах.

Интегрированием дифференциального уравнения (8) в пределах от начальной дисперсности S_0 при

$E = 0$ до текущей $S(E)$ получена зависимость между затратами энергии на измельчение и его результатом (по удельной поверхности):

$$E = 3/2ben^{-1}\{\ln(S_0S^{-1}) + \ln[(S_m - S_0)(S_m - S)^{-1}]\} + S_m(b\lambda\beta + \gamma + \sigma)\ln[(S_m - S_0)(S_m - S)^{-1}] + 1/6b\beta n\lambda^2 S_m^2\{(S - S_0)S_m^{-1} - \ln[(S_m - S_0)(S_m - S)^{-1}]\} \quad (12)$$

Уравнение (12) представляет собой обобщенный закон измельчения для всего интервала дисперсности измельчаемого материала. Частными случаями этого закона являются общеизвестные соотношения Кика, Риттингера, Бонда и ряд других. Уравнение (12) охватывает и область сверхтонкого измельчения, которая ранее не была описана. Этот закон получен на основе изученных нами закономерностей измельчения и происходящих в процессе измельчения механохимических и механосорбционных явлений, значительно изменяющих механические свойства измельчаемых материалов.

Примечательно, что в законе (12) представлены параметры мельниц, свойства измельчаемого материала и среды, в которой он измельчается.

1.3. Экспериментальная проверка физико-химической модели измельчения

В наших, как и в последующих исследованиях, установлены закономерности и особенности механохимического взаимодействия со внешней средой (жидкости, их пары или газы) активированных в процессе механического разрушения поверхностных слоев частиц. Одним из результатов такого необычного взаимодействия оказался эффект интенсивной механодеструкции сорбированных на поверхности частиц молекул внешней по отношению к ним среды. Фрагменты таких разрушенных молекул химически связываются с механически активированным веществом поверхностных слоев частиц, глубоко проникая в них. Скорость диффузии в слоях частиц, подвергшихся пластическому деформированию, на несколько порядков превосходит скорость диффузии в обычных кристаллах и стеклах. Этот вид взаимодействия как по интенсивности, так и по механизму существенно не идентичен физической (обратимой) адсорбции и классической хемосорбции. Из анализа экспериментальных данных убедительно следует, что именно таким типом механосорбционного взаимодействия при разрушении твердых тел и обусловлены основные эффекты (кроме реологических) внешней среды в кинетике и энергетике измельчения [3, 4]. Основным эффектом взаимодействия частиц со внешней жидкой и парообразной фазами является не столько уменьшение их поверхностной энергии, сколько значительное снижение удельной работы предельного пластического деформирования при разрушении. Энергетический эффект уменьшения работы предельного пластического деформирования на несколько порядков превосходит возможный эффект снижения поверхностной энергии твердых частиц.

Как известно, применительно к твердым телам понятие поверхностной энергии (поверхностного натяжения) весьма проблематично. Экспериментальное измерение этой величины представляют собой трудную задачу и нуждается в специально поставленных опытах на отдельных «идеальных» кристаллах. Расчетные методы также не дают достоверных данных. Тем

более мало корректны расчетные значения поверхностной энергии разупорядоченных механическими воздействиями измельченных частиц, которые к тому же практически невозможно изолировать от непредсказуемого взаимодействия со внешней средой.

Жидкости, растворенные в них ПАВ и даже сорбированные на частицах пары жидкостей (сорбционные монослой и прослойки) во многих случаях меняют реологические свойства измельчаемого материала — сыпучесть и связность частиц в порошках, вязкость суспензий и паст. Реологические свойства измельчаемой массы в силу конструктивных особенностей аппарата механического диспергирования определяют долю энергии привода мельницы, трансформируемой в энергию разрушения частиц и тем самым влияют на формально определяемую на приводе мельницы удельную работу диспергирования. В ряде случаев реологический фактор, который также следует отнести к разряду категорий физико-химической механики, определяет энергетику и кинетику (особенно) процесса измельчения в большей мере, чем механосорбционные и другие эффекты, традиционно считающиеся областью физико-химической механики.

По мере измельчения в мельнице накапливается все больше частиц, размеры которых меньше минимального размера частиц, которые еще могут быть разрушены в заданных условиях. Такие частицы продолжают подвергаться механическим воздействиям, энергия которых расходуется на дальнейшее их необратимое пластическое деформирование. Вследствие этого скорость диспергирования по сравнению со скоростью пластического деформирования уменьшается.

Глубину слоя пластического деформирования в процессе измельчения можно определить корректно только для некоторых материалов. В частности, это возможно сделать в случае измельчения кристаллического кварца, в котором пластическое деформирование поверхностных слоев приводит к их необратимой аморфизации, хорошо измеряемой методами рентгеновского и термографического анализа.

Толщина пластически деформированного слоя частиц кварца измерена для области пропорционального роста степени его аморфизации при измельчении с различными добавками ПАВ (вода) (рис. 1).

Как следует из экспериментальных данных, степень аморфизации кварца, измельченного с малыми добавками ПАВ, всегда больше, чем в сухом помоле.

Это обусловлено тем, что существенное уменьшение поверхностной концентрации малых добавок ПАВ наступает при более высокой, чем для сухого кварца дисперсности. В результате за одинаковый период измельчения и соответственно при равных затратах энергии происходит дополнительная аморфизация более мелких частиц, чем при сухом помоле. Разумеется, толщина аморфного слоя на частицах, измельченных с ПАВ, всегда меньше, чем для измельченных с сухим помолем. Степень аморфизации максимальна в области очень малого содержания воды, поверхностная концентрация которой соответствует образованию от одного до половины насыщенного мономолекулярного слоя на поверхности (по БЭТ) частиц.

Если принять, что прочность твердых тел остается неизменной в условиях их механического разрушения, то удельная энергия разрушения по Гуку для кварца составит: $e_0 = P_0^2/2E_0 = 0,2 \text{ Дж/см}^3$.

Плотность энергии предельных пластических деформаций частиц кварца не может быть меньше разности энтальпий аморфного и кристаллического состояния. Эта разность равна $9,7 \text{ кДж/моль}$ ($4,4 \text{ Дж/см}^3$) и составляет нижнюю границу удельной энергии его предельного пластического деформирования β_n .

По расчетным данным предельное напряжение сдвига τ_c в идеальных кристаллах составляет от $G/30$ до $G/2\pi$ (G — модуль сдвига). Для кварца имеем: $\tau_c = E_0/10$; $G = E_0$ и $\beta_n = \tau_c^2/2E_0 = 5 \cdot 10^2 \text{ Дж/см}^3$, что вполне согласуется с экспериментальным значением, вычисленным по теплоте аморфизации. Фактическое значение величины β_n больше здесь приведенной, поскольку структура аморфизованного при измельчении кварца более разупорядочена, чем кварцевого стекла, и плотность аморфизованного кварца меньше плотности кристаллического кварца, но больше плотности кварцевого стекла. При прокаливании он выделяет энергию, которая сопоставима с теплотой аморфизации кристаллического кварца. Избыточная энтальпия аморфизованного кварца примерно в 1,5—2 раза превосходит энергию плавления кварца и, следовательно, значительные величины β_n находится в пределах $(7-10) \cdot 10^2 \text{ Дж/см}^3$.

Удельные затраты энергии на трение в мелющей массе, в которой не образуются агрегаты, — величина γS примерно на два порядка меньше удельной работы предельного пластического деформирования частиц (β).

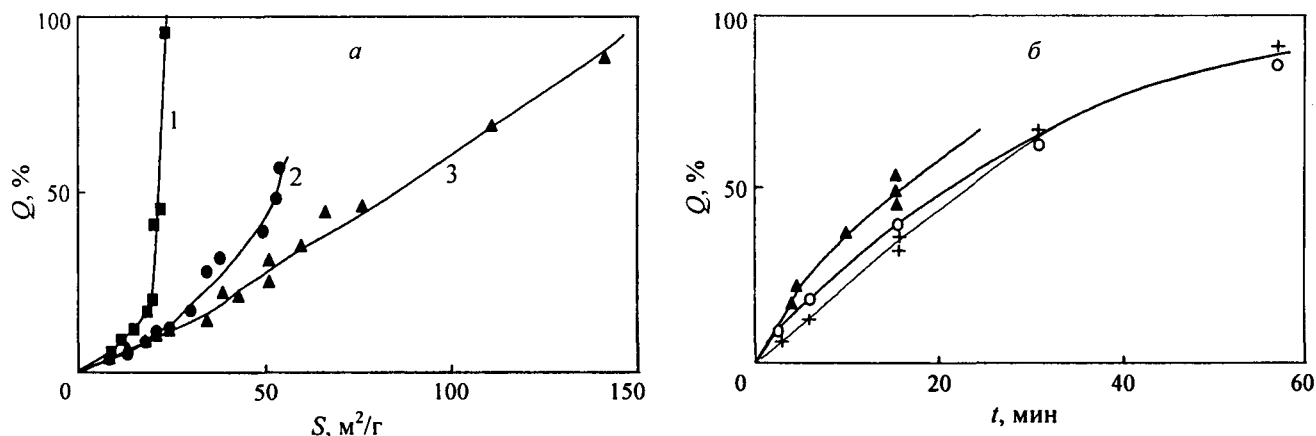


Рис. 1. Влияние среды измельчения на степень аморфизации Q и дисперсность (а) и кинетику аморфизации (б) кварца при измельчении в вибромельнице:

1 — в сухом воздухе; 2 — с 1,2% воды; 3 — с 80% воды.

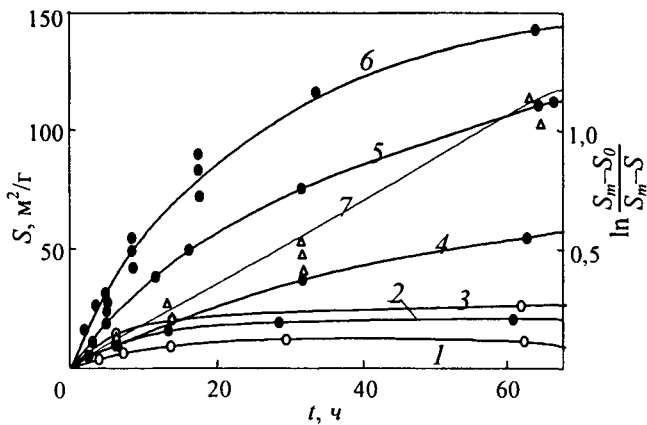


Рис. 2. Кинетические кривые виброизмельчения кварца:

1, 2, 3 — в сухом воздухе; 4, 5, 6 — с 80% воды, 7 — кривые 4, 5, 6 выраженные в координатах уравнения (14) соответственно. Амплитуды колебаний вибромельницы: 3 мм (1, 4); 4 мм (2, 5); 5 мм (3, 6)

Другие затраты энергии поверхностного типа еще меньше работы сил трения и потому их роль в измельчении, как и роль масштабного упрочнения частиц при всех условиях незначительна и в энергетических расчетах процесса измельчения их можно не учитывать.

Подставляя численные значения n , e , β , γ , σ в уравнение (12) получим уравнение измельчения, которое можно проверить по экспериментальным данным:

$$E = 10^6 \{ \ln(SS_0^{-1}) + \ln[(S_m - S_0)(S_m - S)^{-1}] \} + S_m \lambda \ln[(10^{10} S_m - S_0)(S_m - S)^{-1}] + 9 \cdot 10^8 \lambda^2 S_m^2 \{ (S - S_0) S_m^{-1} - \ln[(S_m - S_0)(S_m - S)^{-1}] \} \quad (13)$$

В области средней и высокой дисперсности закон измельчения можно представить в следующей кинетической форме:

$$E = a \ln[(S_m - S_0)(S_m - S)^{-1}] = KNt \quad (14)$$

где $a = S_m(b\lambda\beta + \gamma + \sigma)$; K и N — соответственно КПД и мощность привода мельницы; t — продолжительность измельчения (от удельной поверхности S_0 до S).

Кинетика измельчения кварца с водой (рис. 2, $a = 10^{10} \lambda S_m$), реализуемая в лабораторной вибромельнице при различных амплитудах колебаний и частоте 60 Гц хорошо согласуется с уравнением (14). Согласно экспериментальным данным, константы скорости диспергирования для всех амплитуд практически одинаковы, что обусловлено пропорциональностью величин S_m потребляемой мельницей мощности привода. Соотношение величин S_m для амплитуд колебаний 3, 4 и 5 мм составляет 1 : 2,0 : 2,8, что вполне согласуется с соотношением квадратов амплитуд, определяющих потребляемую мельницей мощность привода 1 : 1,8 : 2,8. Рассчитанная по уравнению (9) константа скорости диспергирования кварцевого песка равна 10^{-4} с^{-1} , КПД мельницы — 1%.

Уравнение (14) было проверено также в экспериментах по измельчению кварцевого песка в среде, содержащей этиловый спирт, воду и водный аммиак в соотношении 1 : 0,74 : 0,26 [14]. Малые дозы этой смеси значительно влияют на кинетику помола, но уравнение (14) во всех случаях согласуется с экспериментальными данными (рис. 3). Экспериментально исследованы также закономерности измельчения ряда металлов, их оксидов и карбидов (циркония, ниобия и

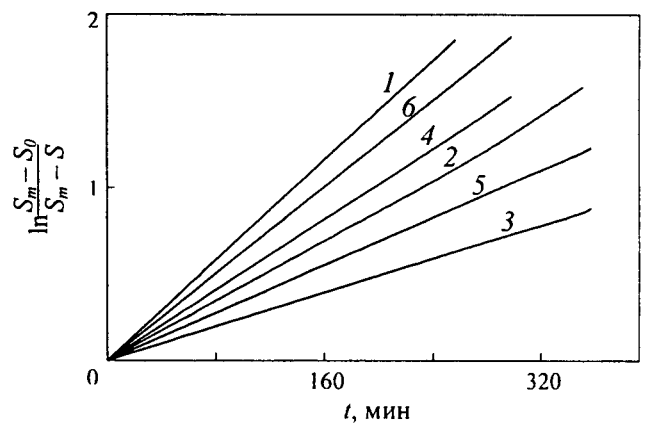


Рис. 3. Влияние среды на кинетику виброизмельчения кварца

1 — в сухом воздухе, 2 — 6 — соответственно с добавками 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 и 4,0% смеси воды, этилового спирта и водного аммиака

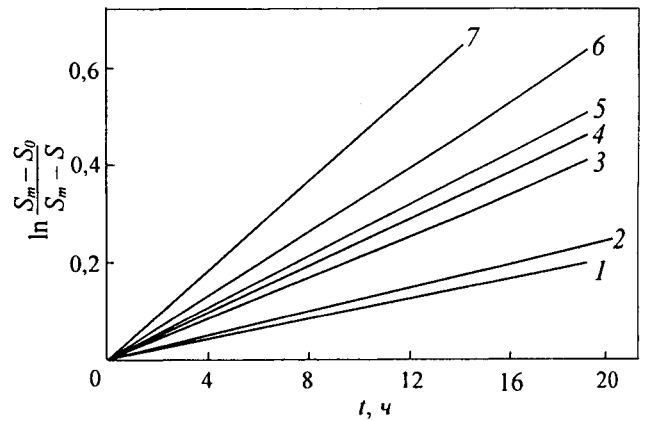


Рис. 4. Кинетические кривые измельчения порошков в среде этилового спирта:

1 — титан; 2 — никель; 3 — карбид ниобия; 4 — оксид циркония; 5 — карбид кремния; 6 — карбид циркония; 7 — оксид алюминия

кремния) в среде этилового спирта, который предотвращает молекулярноплотную агрегацию этих материалов (рис. 4). Измельчение проводили в вибромельнице при частоте вибраций 1500 мин^{-1} и амплитуде 3,5 мм. Удельную поверхность измеряли по методу БЭТ. Было установлено, что и для этих материалов и условий измельчения уравнение (14) хорошо выполняется [14].

Согласно (14) получаем:

$$S = S_m - (S_m - S_0)e^{-kt} = S_m(1 - e^{-kt}) + S_0e^{-kt} \\ dS/dt = k(S_m - S_0)e^{-kt} = k(S_m - S) \quad (15)$$

где величина $k = KN[S_m(b\lambda\beta + \gamma + \sigma)]^{-1}$ имеет смысл константы диспергирования.

Уравнение (15), выражающее прямолинейное уменьшение скорости измельчения с увеличением удельной поверхности, удобно для экспериментального определения константы скорости измельчения k и предельного значения удельной поверхности измельчаемого материала S_m (наклон и отрезок экстраполяции прямой к оси абсцисс). Результаты опытов по измельчению карбида бора в планетарной и вихревой мельницах подтверждают справедливость уравнения (15) для этих материалов и условий их измельче-

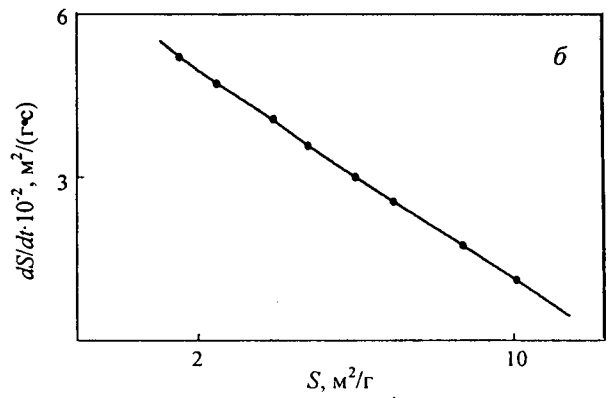
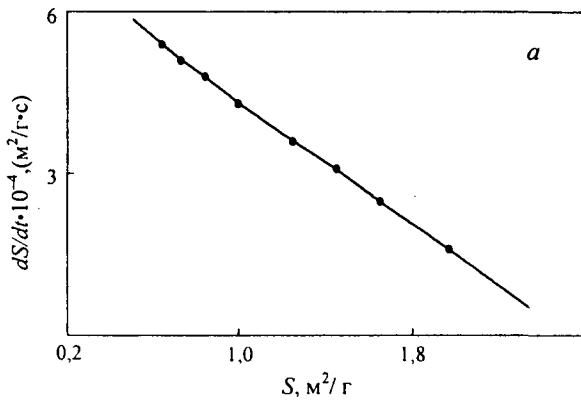


Рис. 5. Экспериментальная зависимость между скоростью измельчения и удельной поверхностью карбида бора.

a — эксперимент в магнитно-вихревой мельнице; *b* — эксперимент в планетарной мельнице

ния (рис. 5) [15]. Отметим, что константа скорости измельчения и предельные значения удельной поверхности карбида бора в высокоэнергонапряженной планетарной мельнице оказались в несколько раз выше, чем в вихревой (соответственно $k = 5,3 \cdot 10^{-3}$ и $4,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, $S_m = 14,1$ и $1,9 \text{ м}^2/\text{г}$).

Для удельных затрат энергии на измельчение, выраженных величиной dE/dS , характерна экстремальная зависимость от дисперсности материала (рис. 6). Эта зависимость тем более резкая, чем меньше энергонапряженность процесса, которая связана с параметром S_m . При обработке результатов эксперимента плотность энергии предельных упругих деформаций была рассчитана по макропрочности кварца и принята равной работе его аморфизации для предельных пластических деформаций.

Практическая ценность приведенных выше формул состоит в применимости их к расчету помольного цикла, а именно в возможности их использования для выбора или расчета производительности и режима работы мельниц согласно их техническим параметрам и физико-механическим свойствам предназначенного к измельчению материала, его исходной и заданной дисперсности. В отличие от законов Риттингера, Чарльза, Свенсона, Бонда, а тем более Кика, они ап-

проксируют и область высокой дисперсности, в которой все остальные законы «не работают» [16, 17].

Величина S_m , пропорциональная квадрату амплитуды колебаний вибрационных мельниц или квадратному корню диаметра барабанных мельниц, характеризует предел разрушаемости частиц и является обобщенной помольной характеристикой материала в конкретных условиях процесса. В частности, она учитывает влияние состава и свойств среды измельчения. Для струйных мельниц величина S_m пропорциональна квадрату скорости частиц в струе газа [18].

В заключение рассмотрим процесс сепарационного измельчения по замкнутому циклу. Применение в технологии тонкого измельчения сепараторов-классификаторов, отделяющих измельченные до требуемой дисперсности частицы и возвращающих на доизмельчение крупные частицы, позволяет существенно снизить удельные затраты энергии. Физическую и технологическую сущность этого явления с очевидностью отражают предложенные нами уравнения измельчения, по которым можно рассчитать эффективность сепарационного цикла. Результаты расчетов затрат энергии удобно представить в виде зависимости $E(S)$ или $W(S)$ (рис. 7). Плотность затрат энергии на из-

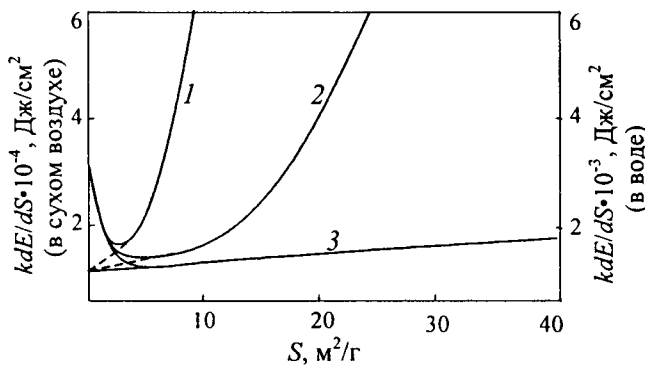


Рис. 6. Зависимость удельных затрат энергии на виброизмельчение кварца от его дисперсности и энергонапряженности мельницы.

Левая шкала: среда измельчения — вода, толщина слоя предельного пластического деформирования $\lambda = 2 \text{ нм}$; 1 — $S_m = 10 \text{ м}^2/\text{г}$; 2 — $S_m = 30 \text{ м}^2/\text{г}$; 3 — $S_m = 100 \text{ м}^2/\text{г}$. Правая шкала: среда измельчения — сухой воздух, толщина слоя предельного пластического деформирования $\lambda = 20 \text{ нм}$. Штрих — для сухого измельчения с $\lambda = 20 \text{ нм}$.

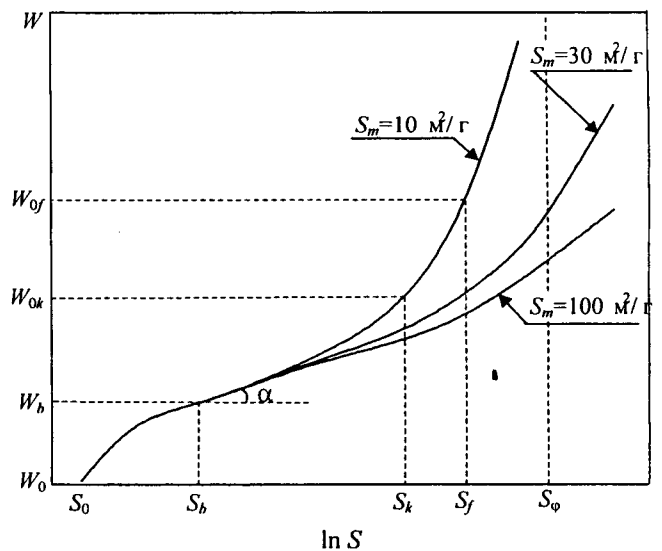


Рис. 7. К расчету сепарационного цикла измельчения. Зависимость затрат энергии на измельчение от логарифма дисперсности измельчаемого материала для трех значений энергонапряженности мельницы (S_m)

мельчение исходного материала от начальной удельной поверхности S_0 до заданной величины S обозначена как W_{of} .

В сепарационном цикле исходный материал измельчают до удельной поверхности $S_k < S$ с удельными затратами энергии, равными W_{ok} . Грубодисперсную фракцию с удельной поверхностью $S_b < S_k$ отправляют на домол в ту же мельницу вместе с исходным материалом. Эту смесь измельчают до удельной поверхности S_k с плотностью затрат энергии $W_{bk} = W_{ok} - W_b$.

В установившемся режиме скорость поступления исходного материала в мельницу равна производительности мельницы по готовому продукту с удельной поверхностью S_f . Следовательно, скорость поступления в мельницу материала равна $(Q_v + \omega Q_v)$, где ω — кратность сепарации, Q_v — производительность мельницы по готовому продукту, ωQ_v — объемная доля материала, возвращаемая в мельницу из общего объема на входе в сепаратор, равная $Q_v(1 + \omega)$.

Удельные затраты энергии на измельчение с сепарацией до удельной поверхности S_f , но без учета относительно незначительных затрат на сепарацию, равны:

$$W_k = W_{ok} + \omega W_{bk}$$

Мера выгодности процесса сепарации определяется значением величин S_b и W_b . Если все четыре значения удельной поверхности S_0 , S_b , S_k и S_f находятся в пределах прямолинейного участка зависимости $W(S)$ (см. рис. 7) с тангенсом угла наклона равным α , то:

$$\alpha(S_f - S_k) = W_{fk}, \alpha(S_k - S_b) = W_{kb}, W_k = W_{ok} + W_{kf} = W_{of}$$

Эффективность сепарации в этом случае нулевая. Однако обычно значение S_f находится в экспоненциальной области зависимости $W(S)$. Сепарация тем выгоднее, чем тоньше измельчение. В случае же, когда требуемая дисперсность готового продукта $S_p > S_m$, сепарация является единственной возможностью его получения.

Затраты энергии на сепарацию составляют, как правило, малую, но вполне заметную долю от общих затрат на измельчение. Если эта доля известна или ее удастся определить, то можно полностью рассчитать и оптимизировать процесс измельчения в замкнутом цикле.

2. Физико-химическая механика шлифования

Основной проблемой технологии шлифования является создание условий, обеспечивающих оптимальные его параметры — максимальную производительность процесса при минимальном износе — и самозатачивание инструмента. В наших исследованиях [19—22] эта задача была последовательно решена. Конечным результатом этих работ было конструирование и организация производства алмазного инструмента с расчетными параметрами, а также организация технологии шлифования с подбором оптимального состава смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Принципы же, составляющие основу расчетов, в значительной мере сходны с теми, которые используются в математическом описании процесса измельчения.

При математическом описании процесса шлифования, как оказалось, требуется учитывать значительно больше факторов, чем в теории измельчения. Это

обусловлено следующими обстоятельствами. Измельчение производится сравнительно простым и хорошо изученным способом — сжатием и ударом измельчаемых частиц мелющими телами. Износ мелющих тел мало влияет на результат диспергирования, поскольку они изнашиваются сравнительно медленно, а в непрерывных производственных процессах их состав (распределение по размерам) и масса постоянно возобновляются. В шлифовании же разрушение поверхностного слоя детали осуществляется по сложному механизму пластического оттеснения, а износ инструмента (абразивных зерен и связки) определяет технологичность всего процесса, его производительность и качество обработанных деталей. Само собой разумеется, что роль состава и скорости подачи в зону обработки СОЖ с входящими в их состав ПАВ не меньше, чем при измельчении.

Технологическая задача совершенствования процесса шлифования деталей разного назначения сводится к нескольким, как правило, неразрывно связанным подзадачам. К ним относятся прежде всего повышение производительности и снижение трудоемкости (экономичности) обработки, уменьшение шероховатости поверхности детали, характеризуемой, например, величиной R_z или R_a , придание детали или сохранение при обработке необходимой формы (часто с высокой точностью).

Математическая модель процесса шлифования учитывает следующие факторы:

- 1) износ шлифовальных зерен и связки инструмента, в котором эти зерна закреплены;
- 2) размер шлифовальных зерен и плотность их распределения в связке инструмента — зависимость их абразивной способности и шероховатости детали от этих параметров;
- 3) физико-механические свойства связки инструмента и обрабатываемой детали, абразивную способность алмазных зерен и изменение их пластичности и прочности под действием СОЖ;
- 4) исходную и требуемую шероховатости детали, ее абразивную способность по отношению к материалу связки инструмента в зависимости от шероховатости и степень ее уменьшения в процессе шлифования.

Математическое описание процесса шлифования должно включать определение условий самозатачивания абразивного инструмента и минимального его износа, условия максимальной производительности процесса по перечисленным параметрам, расчет оптимальных параметров цикла шлифования — его длительности, усилия прижима инструмента к детали, скорости перемещения, скорости подачи и состав СОЖ [19—22].

Модель шлифования основана на большом объеме накопленных в технологических исследованиях экспериментальных данных, на ряде установленных эмпирических закономерностей, определяющих технологические условия применения и изготовления алмазного инструмента для шлифования оптических деталей из стекла, керамики, сапфира и других материалов [23—26]. Однако теории этого процесса, описывающей его закономерности и позволяющей прогнозировать результаты и оптимизировать условия шлифования, как и математической модели конструирования алмазного инструмента до нашего исследования создано не было.

Задача была решена методом последовательных приближений, причем на первом этапе была проана-

лизирована работа закрепленного в связке инструмента единичного алмазного зерна как сферического резца с отрицательным углом резания. Далее задача последовательно усложнялась. Была рассмотрена работа шлифовального инструмента с монослойно закрепленными в нем алмазными зернами одинаковых размеров. На конечном этапе были получены математические закономерности модели алмазного шлифования инструментом со статистически распределенными в объеме его связки алмазными зернами. В расчетах учтены технологические параметры реального процесса шлифования, такие как износ и количество удаленных из зоны резания изношенных алмазных зерен, износ и физико-механические свойства связки алмазного инструмента, твердость и пластичность обрабатываемой детали, включая явление пластического оттеснения ее материала из зоны резания, свойства и особенности применения СОЖ.

Прежде чем приступить к изложению результатов наших работ, запишем основные параметры, использованные в математической модели шлифования.

A — механическая характеристика связки

E — модуль упругости материала связки

f — сила внедрения алмазного зерна в деталь, действующая на зерно нормально к поверхности

h — глубина внедрения зерна с радиусом рабочей кромки r

h_0 — первоначальная глубина внедрения зерна

h_1 — глубина заделки алмазного зерна в связку

h_2 — глубина внедрения изношенного алмазного зерна в обрабатываемую деталь

κ , ϵ , C_n — численные коэффициенты, характеризующие упруго-пластичные свойства материала, а также среду и скорость приложения тангенциальных и нормальных нагрузок

L — равновесное расстояние между связкой и деталью

r_0 — радиус сферического алмазного зерна

r — радиус рабочей кромки алмазного зерна

v — скорость шлифования

γ — плотность обрабатываемого материала

Δ — минимально необходимая для осуществления шлифования глубина внедрения резца

μ — коэффициент Пуассона

σ — предел текучести связки

τ — прочность материала на срез

На первом этапе нашего исследования согласно общепринятым положениям алмазное зерно рассмотрено как сферический резец с отрицательным углом резания (рис. 8). Шлифование таким резцом осуществляется вытеснением материала по следу резания [23]. Зерно-резец внедряется в поверхностный слой обрабатываемой детали под действием нормальной силы, а перемещается по поверхности под действием танген-

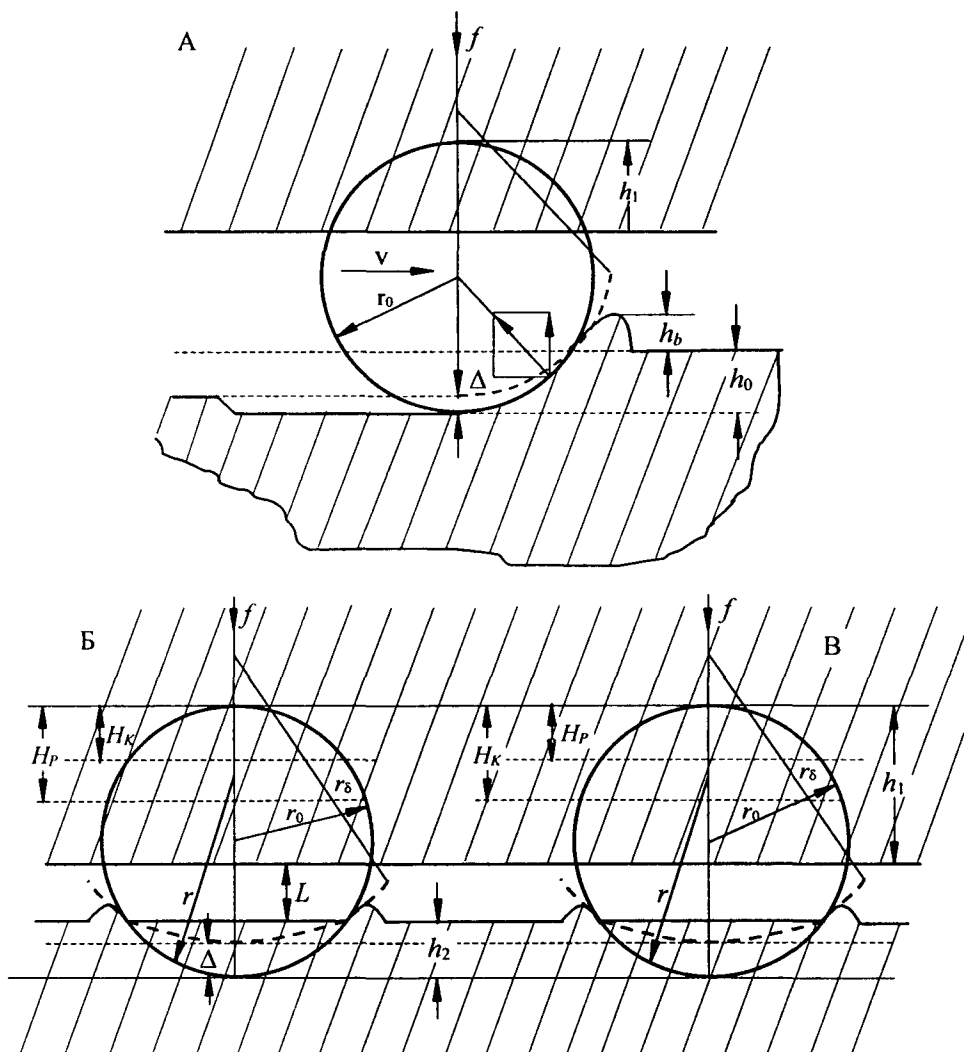


Рис. 8. Схема резания единичным сферическим алмазным зерном.

A — вид на алмазное зерно со стороны, перпендикулярной направлению резания, т.е. по направлению тангенциальной силы резания. B и B' — вид шлифовального зерна со стороны направления резания. (Обозначения см. в тексте)

циальной силы привода. Если зерно (радиус сферы r_0) внедрено на глубину h_0 , то объем его погруженной части при условии, что $h_0 \leq r_0$, равен:

$$v_0 = 1/3\pi \cdot h_0(3r_0 - h_0)^2 \quad (16)$$

При этом поперечное сечение внедренной части зерна-шара составляет:

$$s_0 = r_0^2 \cdot \arccos[(r_0 - h_0)/r_0] - (r_0 - h_0)[r_0^2 - (r_0 - h_0)^2]^{0.5} \approx 4/3 \cdot h_0[r_0^2 - (r_0 - h_0)^2]^{0.5} \approx 4/3 \cdot h_0[2r_0h_0 - h_0^2]^{0.5} \quad (17)$$

Если $h_0 \ll 2r_0$, что можно считать оправданным для шлифования твердых материалов, то величина s_0 будет равна:

$$s_0 = 4 \cdot 2^{0.5} \cdot 3^{-1} \cdot h_0^{1.5} \cdot r_0^{0.5} \quad (18)$$

Прилагаемые к инструменту усилия прижатия ограничены прочностью обрабатываемой детали и алмазного зерна на скол, что лимитирует тангенциальную силу шлифования. На движущееся зерно действует «подъемная сила», пропорциональная квадрату скорости его перемещения и площади поверхности внедренной его части (рис. 8 А). Эта «подъемная сила» равна:

$$f_n = 2\pi \cdot h_0 r_0 v \gamma C_n$$

При этом отношение силы резания к прилагаемой к инструменту нормальной силе составляет 0,1—0,2 [23—28] и «подъемная сила» значительно меньше нормальной, так что ее можно не учитывать в рассматриваемой модели.

Согласно теории Герца глубина внедрения твердого шара в упругое полупространство под действием нормальной к поверхности силы f определяется выражением:

$$h_0 = [3f(1 - \mu^2)(4E)^{-1}]^{2/3} r_0^{-1/3} \quad (19)$$

Глубина внедрения зерна в обрабатываемую поверхность в динамическом состоянии (в процессе шлифования) может отличаться от статического варианта, поскольку площадь опоры движущегося зерна вдвое меньше, чем неподвижного (без учета пластического валика перед его фронтом). С учетом пластического оттеснения материала глубина внедрения шара в плоскую пластину определяется выражением, которое обобщает все частные случаи, в том числе и формулу Герца [26—29]:

$$h_0 = (Af)^{\varphi} r_0^{1-2\varphi} \quad (20)$$

где $A = [3(1 - \mu^2)(4E)^{-1}]^{2/3}$ — величина, постоянная для рассматриваемого материала; φ — численный коэффициент, характеризующий упруго-пластические свойства материала, а также среду и скорость приложения тангенциальных и нормальных нагрузок.

Численные значения коэффициента φ ограничены пределами $0,5 < \varphi < 1$; при $\varphi = 2/3$ выражение (20) сводится к формуле Герца.

Как известно [23, 25, 29], процесс шлифования (вытеснение материала внедренными в него резцами) осуществляется только при условии превышения нормальной силой усилия прижима резцов (в рассматриваемом случае алмазных зерен) некоторого порогового значения. Если сила нагружения недостаточно велика, происходит только упругая деформация поверхностного слоя и энергия привода резца расходуется на внешнее трение. При достаточно большом усилии

упругая деформация переходит в пластическую и тангенциальное перемещение резца вызывает оттеснение и вытеснение материала, отделение его в виде стружек и дисперсных частиц.

Граничная глубина внедрения для пластического деформирования составляет [1]:

$$h_n \geq 2,4r_0(c\sigma)^2 E^{-2} \quad (21)$$

а при переходе к микрорезанию выполняется соотношение [1, 8]:

$$h_p \geq 0,5r_0(1 - 2\tau\sigma^{-1}) \quad (22)$$

Укажем, что прочность на срез τ адгезионной связи при больших значениях глубины внедрения резца эквивалентна прочности материала на срез.

В шлифовальном инструменте алмазные зерна закреплены металлической или пластмассовой связкой и при шлифовании зерно механически воздействует не только на шлифуемый материал, но и на материал связки. От соотношения между прочностью закрепления зерна в связке, ее износом и усилиями, развиваемыми в процессе резания, зависят технологические свойства инструмента — его производительность, способность к самозатачиванию.

Предельная глубина заделки сферического алмазного зерна в связку инструмента, определяющая его устойчивость в нормальном к поверхности направлении описывается выражением:

$$h_1 \geq H_p = (A_1 f)^{\varphi} r_0^{1-2\varphi} = h_2(A_1 A_2^{-1})^{\varphi} (r^{-1} r_0)^{1-2\varphi} \quad (23)$$

где r — радиус рабочей кромки зерна, который в результате его износа может отличаться от начального значения r_0 , причем $r \geq r_0$.

Условие тангенциальной устойчивости зерна в связке может быть определено из равенства сил, действующих на зерно в процессе шлифования. Если сила трения мала по сравнению с усилием резания, то в предельном случае, когда шлифование может привести к разрушению связки:

$$s_1 \tau_1 = s_2 \tau_2; 4 \cdot 3^{-1} \cdot 2^{0.5} \cdot \tau_1 \cdot H_k^{1.5} \cdot r_0^{0.5} = 4 \cdot 3^{-1} \cdot 2^{0.5} \cdot \tau_2 \cdot h_2^{1.5} \cdot r^{0.5}; H_k = h_2(r \cdot r_0^{-1})^{1/3} (\tau_2 \cdot \tau_1^{-1})^{2/3} \quad (24)$$

Очевидно, что если $H_k > H_p$ (рис. 8 В), изношенные зерна по мере износа связки будут удаляться из зон обработки. Если же $H_k < H_p$ (рис. 8 Б), изношенные зерна накапливаются в поверхностном слое связки работоспособность инструмента снижается. Условие $H_k > H_p$ отвечает соотношению:

$$(r \cdot r_0^{-1})^{4/3-2\varphi} (\tau_2 \cdot \tau_1^{-1})^{2/3} (A_2 \cdot A_1^{-1})^{\varphi} > 1$$

Из математических выкладок и анализа физических химических условий в зоне резания (которые здесь не приведены) следует критерий самозатачивания инструмента в процессе шлифования (рис. 8 В):

$$H_p < H_k < (2r_0 - L - \Delta) \quad (25)$$

Значение глубины заделки зерна в интервале $(2r - L - h_2)$ до H_k составляет ресурс его работы при износе связки, который можно выразить в виде:

$$R = 2r_0 - L - h_2 - H_k = 2r - L - h_2 - h_2(r \cdot r_0^{-1})^{1/3} (\tau_2 \cdot \tau_1^{-1})^{2/3} = 2r - L - h_2 [1 + (r \cdot r_0^{-1})^{1/3} (\tau_2 \cdot \tau_1^{-1})^{2/3}] \quad (26)$$

При незначительном износе алмазных зерен ($r = r_0$) рабочий ресурс связки инструмента определяется соотношением предельных значений прочности материалов на срез и уменьшается с глубиной заделки зерна:

$$R = 2r_0 - L - (A_2 f)^\varphi r_0^{1-2\varphi} [1 + (\tau_2 \cdot \tau_1^{-1})^{2/3}] = r_0 \{2 - Lr_0^{-1} - (A_2 f)^\varphi (r_0)^{-2\varphi} [1 + (\tau_2 \cdot \tau_1^{-1})^{2/3}]\} \quad (27)$$

При значительном износе ресурс связки равен:

$$R = r_0 \{2 - Lr_0^{-1} - (A_2 f)^{1-\varphi} (r_0)^{-2(1-2\varphi)} [1 + (r \cdot r_0^{-1})^{1/3} + (\tau_2 \cdot \tau_1^{-1})^{2/3}]\} \quad (28)$$

Износ связки существенно снижает рабочий ресурс алмазных зерен при постоянном усилии прижатия инструмента к детали. Фактически же в реально работающем инструменте действующая на алмазное зерно сила, нормальная к поверхности трущейся пары, постоянно увеличивается, а радиус зерна-резца (r_0) из-за износа постоянно увеличивается.

Для технологии шлифования и изготовления алмазного инструмента с заданными параметрами и оптимизации условий его использования существенно, что физико-механические свойства поверхностных слоев связки и шлифуемых материалов довольно сильно изменяются (в сравнении с табличными значениями) в результате действия на них смазочно-охлаждающих жидкостей с растворенными в них ПАВ. Изменяется склерометрическая твердость, предельное напряжение сдвигу и микротвердость [26]. С увеличением шероховатости, глубины и степени разрушенности поверхностного слоя его микротвердость и работа поверхностного диспергирования значительно снижаются, а эффективность СОЖ возрастает. Чем мельче зернистость алмазов, тем больше влияние состава СОЖ на процесс шлифования [24].

Приведенные выше результаты исследований соответствуют модели резца, представленном отдельным алмазным зерном, закрепленным в связке шлифовального инструмента. В других наших исследованиях были разработаны математические модели абразивного шлифования инструментом с монослоем и объемно распределенными алмазными зёрнами [21, 22]. При этом учитывался износ алмазных зерен и связки инструмента при шлифовании, а также роль ПАВ в этом процессе. Определены критерии самозатачивания инструмента и стабильности его работы до полного износа, сформулированы требования к алмазным порошкам, материалам связки и оптимальные условия изготовления инструмента. Математические выкладки этих моделей оказались слишком громоздкие и изложить их сколь-нибудь кратко в объеме данной статьи не представляется возможным. Приведем лишь одно из системы уравнений процесса шлифования, описывающее его производительность, выражаемую удельным съемом вещества со шлифуемой поверхности:

$$Q = 2^{0.5} \rho (5\pi)^{-2} - h_m^{2.5} r_0^{-2.5} \{ (1 + \delta_p/h_m)^{0.5} (1 - 5\Delta/3h_m) + (1 - \Delta/h_m)(1 + \delta_m/h_m)^{1.5} - (1 + \delta_m/h_m)^{1.5} \} \quad (29)$$

где ρ — объемная плотность алмазного абразива в связке, h_m — максимальная глубина внедрения алмазных зерен в поверхностный слой связки, δ_p — линейный износ алмазных зерен за период внедрения их до глубины h_m , δ_m — полный износ алмазных зерен до

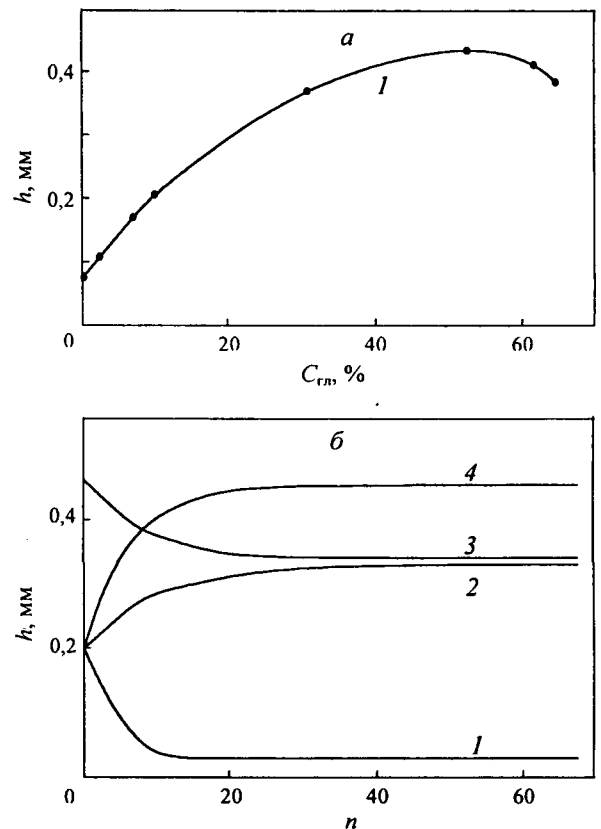


Рис. 9. Зависимость линейного съема стекла за один цикл шлифования от содержания глицерина в водном растворе смазочно-охлаждающей жидкости (а) и от числа циклов шлифования n одним алмазным инструментом в различных условиях (б):

1 — СОЖ — вода, инструмент заточен к первому циклу; 2 и 3 — СОЖ — вода с глицерином от 2,3 до 30%, 2 — инструмент заточен, 3 — инструмент затауплен предшествующей работой; 4 — СОЖ — вода с 40% глицерина, инструмент в начале шлифования тупой

механического удаления их из связки в шлам, Δ — предельная величина остаточной деформации поверхностного слоя детали, равная минимально необходимой для осуществления шлифования глубина внедрения резца (см. рис. 8).

Производительность операции шлифования и условия самозатачивания шлифовального инструмента, как и для процесса измельчения, в значительной мере зависят от состава СОЖ в зоне контакта поверхностей детали и инструмента (рис. 9).

3. Физико-химическая механика полирования

Полирование — завершающий и самый ответственный этап механической обработки деталей оптического назначения (линзы, зеркала), электронных плат, пар трения и др. Именно в этом процессе создаются поверхности высокой степени чистоты, гладкости и точности формы. Самым удивительным является тот факт, что высочайшее совершенство изделий и точность их обработки достигаются на станках и технологическими приемами, которые кажутся примитивными и архаичными на фоне современных станков и технологий.

На протяжении столетий процесс полирования привлекал внимание крупнейших ученых мира (Ньютон, Гук, Рэлей, Ломоносов). В наше время исследова-

ния в этой области проводили Бэйльби, Гребенщиков, Качалов, Крагельский. Однако многочисленные экспериментальные факты и производственный опыт не укладываются в созданные ими модели и представления о механизме этого процесса.

Определяющие для понимания механизма и актуальные для технологии полирования исследования были выполнены только в последнее время [3, 31–33]. Исследования в области физико-химической механики и механохимии процесса диспергирования твердых тел [3, 4, 8] позволили с новых позиций осветить механизм полирования. По-новому понята роль среды, материала полировальника, полировального порошка и механических воздействий.

Полирование, как и рассмотренные выше виды механической обработки — измельчение и шлифование, является многофакторным процессом. К тому же математическое описание его осложнено тем, что полирование не является, как полагали ранее, разновидностью абразивного разрушения поверхностных слоев частицами чрезвычайно малых размеров. Поэтому для расчета процесса полирования оказалось невозможным привлечение приведенных выше выкладок.

Экспериментально показано, что представление о сущности полирования оптического стекла как о чрезвычайно тонком шлифовании зернами микронных и субмикронных размеров и, можно полагать, также поверхностей других материалов, ошибочно [31–33]. Процессу полирования не свойственны закономерности, характерные для шлифования. Скорость полирования не зависит от размеров и твердости зерен по-

рошка, но коррелирует с их химическим составом, причем эта скорость наибольшая для порошков, которые обладают химическим сродством к продуктам гидратации (в случае стекла) поверхностного слоя. Продукты химического взаимодействия малорастворимых соединений материала полируемой детали и полировального порошка обнаружены в разбавленных полировальных суспензиях. По мере накопления в них таких соединений интенсивность полирования уменьшается и становится нулевой в насыщенном растворе. И ни в одном из опытов с использованием полировальных суспензий не были обнаружены частицы абразивного износа полируемых деталей.

Механические воздействия полировальника на деталь настолько малы, а материал полировального инструмента настолько мягче полируемой детали, что в сочетании с весьма малыми размерами полировальных зерен процесс резания или даже усталостного износа исключается. Роль механических воздействий при полировании сводится к механохимическому активированию только фрагментов, выступающих над поверхностью полируемой детали. Полирование — настолько тонкий механохимический процесс, что без такого «деликатного» механического активирования химические реакции на поверхности обрабатываемой детали не идут и съема материала не происходит.

Полировальную суспензию можно активировать добавлением веществ, химически активных к материалу полируемой детали. Такие опыты неоднократно проводили и их результатом неизменно оказывалось увеличение съема стекла при полном блокировании

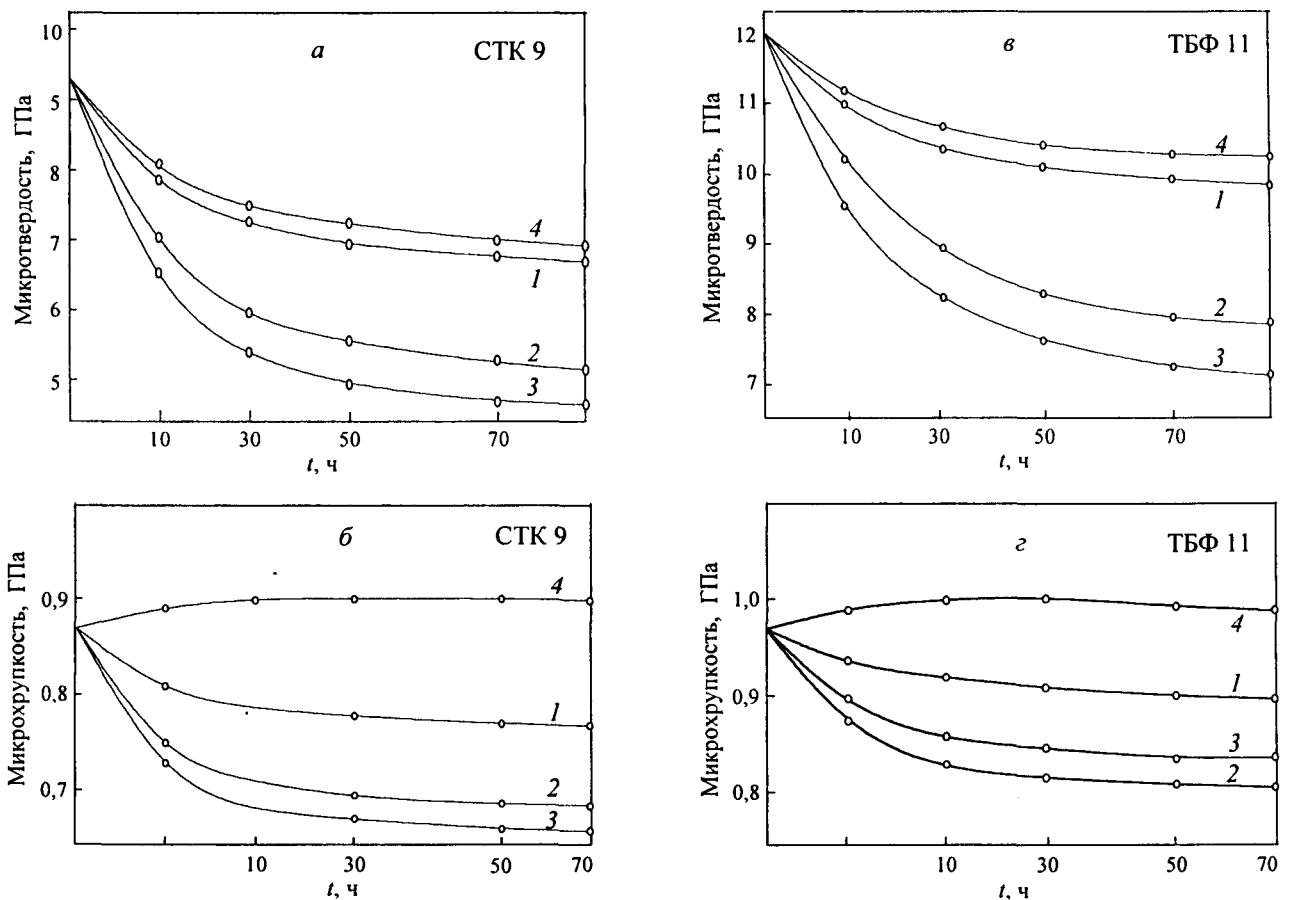


Рис. 10. Зависимость микротвердости (а, в) и микрохрупкости (б, г) стекла СТК9 и ТБФ11 от длительности выдержки его в различных средах полирования:

1 — вода; 2 — суспензия основного сульфата циркония; 3 — суспензия кремнезема; 4 — суспензия оксида лантана

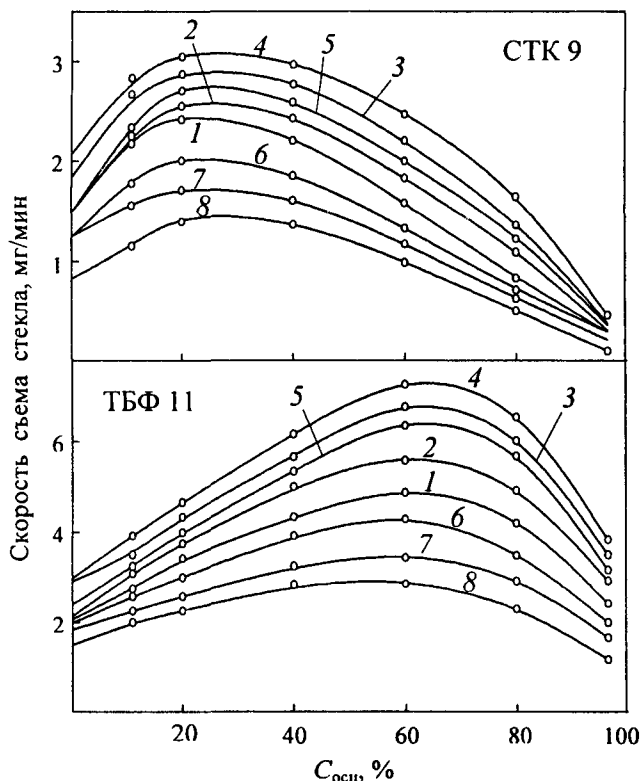


Рис. 11. Зависимость скорости съема стекла СТК 9 и ТБФ11 от содержания основного сульфата циркония (ОСЦ) в полировальном порошке при различном содержании полировального порошка в воде:

1 — 8: 50; 33; 28; 25; 20; 16; 10; 6%, соответственно

одной из основных целей полирования — достижения совершенной гладкости обрабатываемой поверхности и ее формы. Характерно, что микротвердость и микрорукость поверхностного слоя стекла заметно изменяются в контакте с водой и разбавленными в процессе суспензиями для полирования (рис. 10).

Исключительно механохимический механизм процесса полирования (даже механосорбционный — в столь тонком поверхностном слое он происходит) определяет его специфичность. Производительность полирования и его результат — гладкость и форма обрабатываемой детали обусловлены химическим составом полируемой детали, полировального порошка и полировальной среды (рис. 11). Насыщение полировальной среды растворенными в ней продуктами механохимического взаимодействия полировального порошка с компонентами полируемой детали приводит к резкому уменьшению скорости процесса. Химическая очистка полировальной суспензии от таких продуктов (вывод их из раствора путем осаждения) восстанавливает скорость полирования до первоначального значения, а периодическая добавка веществ-осадителей в полировальную суспензию поддерживает скорость полирования на постоянном высоком уровне.

На основе изложенных здесь представлений о механизме полирования были разработаны новые высокоэффективные полировальные порошки и составы. Было налажено их промышленное производство и применение на всех предприятиях оптико-механической промышленности бывшего Советского Союза.

В отличие от описанных в статье процессов измельчения и шлифования математическая модель полирования еще не создана. Однако все предпосылки для ее создания имеются. Самое главное — выявлен механизм этого тонкого процесса. Из всех известных нам видов механической обработки, активируемых химическими и сорбционными воздействиями, полирование является механохимическим процессом в самом его классическом виде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1990, 300 с.
2. Schonert K. Advances in the physical fundamentals of comminution. In: Advances in mineral Processing. Littleton, 1986, p. 28.
3. Ходаков Г.С. Коллоид. ж., 1994, т. 56, № 1, с. 113.
4. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972, 240 с.
5. Lin I., Schonert K. Comminution 1994; p. 101; Proc. of the Eur. Symp. on Comminution, 1996, Elsevier, Amsterdam.
6. Straziar J., Ranove F. См. ссылку 5, p. 673.
7. Clerc I., Oaumtoa M., Bethassaine A. См. ссылку 5, p. 603.
8. Ходаков Г.С. Коллоид. ж., 1998, т. 60, № 5, с. 684–697.
9. Лихтман В.И., Шукин Е.Д., Ребиндер П.А. Физико-химическая механика металлов. АН СССР, 1962, 305 с.
10. Ходаков Г.С., Ребиндер П.А. Докл. АН СССР, 1959, т. 127, с. 1070.
11. Яминский В.В., Пчелин В.А., Амелина Е.А., Шукин Е.Д. Коагуляционные контакты в дисперсных системах. М.: Химия, 1982, 311 с.
12. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. М.: Стройиздат, 1972, 240 с.
13. Ruzek Josef, Phan Van Chuoc. Silikaty, Bratislava, 1977, № 4, p. 341.
14. Августинник А.И., Вигдергауз В.Ш., Гропянов В.П., Дроздецкая Г.В. Порошковая металлургия, 1963, № 2, с. 3
15. Струк Л.М., Федорус В.Б., Макаренко Г.Н., Прилуцкий Э.В. Там же, 1985, № 6, с. 29.
16. Лесин А. Д. Помольное оборудование ВНИИЭСМ, сер. 7, вып. 3. М., 1988, 60 с.
17. Лесин А.Д. Обзорная информация ВНИИЭСМ, Вибрационные мельницы. М., 1989, 97 с.
18. Акунов В.И. Струйные мельницы. М: Машиностроение, 1967, 264 с.
19. Ходаков Г.С., Коровкин В.П., Альтшуллер В.М. Оптико-мех. пром-сть, 1980, № 9, с. 46.
20. Ходаков Г.С., Глухов Ю.А. Там же, 1985, № 7, с. 49.
21. Ходаков Г.С. Там же, 1985, № 9, с. 17.
22. Ходаков Г.С. Там же, 1985, № 5, с. 31.
23. Ходаков Г.С. Там же, 1985, № 8, с. 8.
24. Яцерицин П.И., Мартынов А.Н., Гридин А.Д. Финишная обработка деталей уплотненным потоком свободного абразива. Минск: Наука и техника, 1978, 243 с.
25. Ардамацкий А.Л. Алмазная обработка оптических деталей. Л.: Машиностроение, 1978, 356 с.
26. Цеснек Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей. Л.: Машиностроение, 1979, 289 с.
27. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. Киев: Наукова думка, 1978, 178 с.
28. Кузнецов С.М., Бурман Л.Л. Сверхтвердые материалы, 1980, № 3, с. 42.
29. Чеповецкий И.Х. Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке. Киев: Наукова думка, 1978, с. 117, с. 120, с. 150.
30. Филмонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, 1979, 185 с.
31. Ходаков Г.С., Кудрявцева Н.Л. Физико-химические основы полирования стекла, 1985, 221 с.
32. Яковлева Т.П., Ходаков Г.С. Оптический ж., 1994, № 6, с. 32.
33. Яковлева Т.П., Ходаков Г.С. Там же, 1994, № 6, с. 64.