

## КРИТЕРИИ ФИЗИКИ РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД ПРИ АБРАЗИВНО-МЕХАНИЧЕСКОМ УДАРНОМ БУРЕНИИ

*А.Н. Давиденко, А.А. Игнатов, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет», Украина*

Детально рассмотрены основные положения теории разрушения горных пород в приложении к абразивно-механическому ударному методу углубки скважины. Обоснованы ведущие критерии механизма разрушения пород указанным способом. Показано наличие тесной взаимосвязи между параметрами процесса очистки скважины и результативностью акта разрушения пород.

**Введение.** Авторами работы на протяжении нескольких лет ведутся исследования в направлении совершенствования гидромеханического метода сооружения скважин, результатом чего явилось обоснование довольно перспективного способа бурения – абразивно-механического ударного. Главенствующие принципы таких научных работ это минимизация энергоемкости процесса разрушения и сокращение затрат на вспомогательные операции, которые, как известно, занимают в общем балансе времени на сооружение скважин до 40%. Предлагаемые конструкции моделей снарядов абразивно-механического ударного бурения являются полностью оригинальными работами авторов, что подтверждено серией патентов Украины. Вместе с тем, такой результат является следствием изучения большого числа научно-практических работ, в той или иной мере посвященных вопросам физических способов разрушения и прочих смежных направлений [1]. Однако достижение указанных целей совершенствования во многом определяется степенью изученности механизма разрушения горных пород на забое при использовании разработанных снарядов.

Целью работы является установление влияния различных факторов процесса разрушения горных пород на эффективность углубки скважин при работе усовершенствованных гидромеханических снарядов.

**Основной материал.** За счет многократного силового воздействия инструмента в породе развивается система трещин, поэтому твердость ее снижается, и периодически на забое возникают условия для объемного разрушения. Большинство горных пород можно отнести к разряду микронеоднородных трещиноватых хрупких тел, разрушение которых начинается вблизи включений и трещин вследствие локальной концентрации напряжений. На практике значительные сдвиги и разрушения возникают вследствие развития поверхностей скольжения (т.е. трещин сдвига).

Если к свободной поверхности твердого тела, например горной породе, приложить через жесткий пуансон (породоразрушающий инструмент) внешнюю механическую нагрузку, то при достаточной величине последней в теле начнут проявляться упругие, а затем остаточные деформации. Вместе с пуансоном по направлению его движения будет смещаться материал, находящийся в зоне контакта пуансона с твердым телом, а также некоторая часть материала, находящаяся за пределами контактной зоны [2 – 3].

Таким образом, разрушение материала происходит путем чередования определенных явлений, которые могут быть объединены в периоды и циклы. Каждый такой цикл будет заканчиваться отделением от основного массива некоторого объема разрушенного материала и скачкообразным продвижением инструмента. Промывочные жидкости могут оказывать существенное влияние на эффективность этих процессов.

Все твердые тела, в том числе и металлы, из которых сделан буровой породоразрушающий инструмент, неоднородны по прочностным свойствам. Поверхность металла имеет сложный геометрический микрорельеф. В результате трения и износа породоразрушающий инструмент теряет часть какого-либо слабейшего элемента, превращаемого в порошок, и выходит из строя. Постепенное разрушение поверхностного слоя происходит вследствие медленного докритического роста трещин вдоль граней

кубиков, из которого состоит поверхностный слой, до тех пор, пока трещины не достигнут критического размера, после чего происходит отделение целых кубиков и всего слоя. Далее процесс повторяется [3]. Основные причины докритического роста трещин в металлах при сравнительно низких нагрузках следующие:

- нестационарность внешних нагрузок (особенно периодичность или цикличность нагружения);
- наличие водорода во внешней среде (особенно электростатического водорода в водных растворах солей, кислот и щелочей);
- наличие влаги (воды или водяного пара) во внешней среде с коррозионно-активными веществами.

Первая причина приводит к росту трещин в результате локальных пластических деформаций в вершине трещины (усталостные трещины), вторая – к водородному износу, третья – к росту трещины вследствие различных электрохимических процессов локального анодного растворения в ее вершине (коррозионное растрескивание металлов). Все эти причины присутствуют при работе породоразрушающего инструмента на забое скважины. При этом в процессе разрушения трещины вследствие изменения коэффициента интенсивности напряжений, возможен переход от одного механизма к другому. Если имеет место последовательное влияние отдельных механизмов, результирующая скорость роста трещины может быть определена как сумма от сложения приращений трещин.

Из многообразия трудов, посвященных изучению взаимодействия пары «буровой инструмент – горная порода», особое внимание привлекают к себе те, в которых данное явление рассматривается с позиций быстро прогрессирующей и находящей широкое применение в практике триботехнике – науке о трении в машинах и механизмах и заключающейся в исследовании контактного взаимодействия перемещающихся твердых тел, в результате которого возникают силы трения. Они не только поглощают энергию, но и производят изменение размеров контактирующих тел. В основе молекулярно-механической теории сухого и граничного трения и износа, лежит учет двойственной природы процесса трения, которая обусловлена как преодолением сил молекулярного взаимодействия между поверхностями, так и преодолением механического сопротивления, связанного с формоизменением поверхностного слоя. Первый протекает в зоне контакта двух тел и обусловлен изменением формы только поверхностного слоя и преодолением молекулярных, атомарных связей, возникающих в точках реального контакта. Второй захватывает весь объем и обусловлен формоизменением всего объема. Другим важным положением этой теории является учет дискретности контакта двух твердых тел, обусловленный шероховатостью, линейной разновысотностью и волнистостью поверхности контакта, которые имеют место на любых твердых поверхностях. В зависимости от условий контактирования возможен один из следующих видов взаимодействия: упругое; упруго-пластичное; хрупкое и вязкое разрушения. Неотъемлемой частью этой теории является установление критических точек, характеризующих изменение свойств фрикционного контакта и определяющих износостойкость двух взаимодействующих тел.

В процессе трения можно выделить две главные функции смазки: способность создавать прочные пленки на поверхности трущихся материалов, хорошо удерживаясь на краях трещин в результате адсорбции молекул, и взаимодействовать с поверхностными слоями трущихся пар, изменяя их структуру и свойства. Эти функции смазки оказывают существенное влияние на коэффициент трения, износ и предельное значение давления и скорости скольжения, при которых происходит переход к недопустимым процессам повышения вибрации и разрушения бурового инструмента. Смазывающее действие объясняют образованием полярными группами на поверхности твердого тела ориентированных слоев.

Приблизить процесс трения к идеальному можно с помощью смазки. В связи с этим к смазочным материалам предъявляют следующие требования. Во-первых, они должны обеспечить легкое скольжение одного слоя относительно другого, а во-вторых, смазка не

должна вытекать из зазора. В первом случае необходима низкая вязкость смазки, т.е. когезия должна быть минимальна, а адгезия – максимальна. В этом отношении ПАВ должны удовлетворять обоим требованиям, так как полярная группа активно адсорбируется на поверхности, а когезия алифатических радикалов слабая. Условием оптимальной работы ПАВ, как компонента смазки, будет превышение работы адгезии над силой сдвига на единицу поверхности, обуславливающим десорбцию защитного слоя. Применение ПАВ в качестве смазок не является специфическим свойством именно этих веществ. Для жирных масел, которые относят к поверхностно-активным веществам, это скорее совпадение свойств, и поверхностная активность жиров не является мерой их смазочного действия в отношении величины силы трения. Положительное влияние высокой поверхностной активности жиров сказывается на их способности образовывать прочные пленки, снижающие величину поверхностной энергии на границе системы «масло – твердое тело».

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований поведения горных пород и бурового инструмента при механическом нагружении показал, что промывочная жидкость во многих случаях контролирует их прочность и срок службы. Для объяснения влияния различных сред на уменьшение прочности твердых тел в большинстве случаев использовали критерий разрушения Гриффитса [4]

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\alpha E}{\pi l(1-\mu^2)}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – удельная свободная поверхностная энергия;  $E$  – модуль Юнга;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $l$  – длина микротрещины.

В последнее время для объяснения поведения твердых тел при механическом нагружении используют наиболее физически обоснованную кинетическую концепцию прочности, сущность которой впервые сформулировал С.Н. Журков [5]. В ее основе лежит положение о разрушении как процессе, в котором ведущая роль принадлежит тепловому движению, тепловым колебаниям и особенно тепловым флуктуациям. В физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Академии наук бывшего СССР под руководством С.Н. Журкова были проведены исследования зависимости прочности на разрыв более 50 разнообразных твердых тел с различной структурой и природой межатомных связей от времени и температуры, которая в результате испытаний металла, полимера и монокристалла каменной соли была представлена в форме термофлуктуационного уравнения

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{k \cdot T}\right), \quad (2)$$

где  $\tau$  – долговечность разрываемого тела;  $\tau_0$  – предэкспоненциальный множитель, имеющий размерность времени;  $U_0$  – величина энергии активации или величина энергетического барьера, который управляет скоростью процесса разрушения тела;  $\gamma$  – структурно-чувствительный коэффициент, величина которого равна произведению активационного объема на коэффициент локального перенапряжения;  $\sigma$  – растягивающее напряжение;  $T$  – температура.

На основании представлений Я.И. Френкеля о тепловом движении в твердых телах, был сделан вывод о том, что механизм разрушения твердых тел представляет собой кинетический процесс постепенного разрыва межатомных связей под действием тепловых флуктуаций и механического напряжения, который можно разделить на три стадии:

- возбуждение разрываемых связей механической нагрузкой;
- разрыв связей под действием тепловых флуктуаций;
- накопление разорванных связей с образованием микротрещин, в результате чего тело теряет устойчивость и разрывается на части.

Опубликованные экспериментальные данные дают основание считать, что для большинства твердых тел механическое разрушение под нагрузкой на различных стадиях

процесса следует рассматривать как механохимическую реакцию распада межатомных связей.

Силовое возмущение межатомных связей горных пород при нагружении, связанное с деформированием электронных оболочек и возбуждением межатомных связей, в присутствии промывочной жидкости, способствует разрыву связей за счет резкого снижения энергии активации.

Проведенный анализ теоретических и экспериментальных исследований поведения твердых тел в механическом поле дает основание считать, что важным аспектом является также изучение роли дисперсных систем, как участников процесса разрушения и во многих случаях контролирующих прочность и срок службы материалов. В связи с этим, особый интерес представляют существующие гипотетические объяснения и модели влияния рабочих сред на водной основе на процесс разрушения и прочность твердых тел.

Исследования влияния жидкостей и добавок к ним на процессы разрушения твердых тел, начатые П.А. Ребиндером еще в 30-х гг. минувшего столетия, показали, что вода, а также вещества, вводимые в ее состав, адсорбируясь на поверхности твердого тела, могут принимать активное участие в процессах разрушения. Эти вещества были названы понизителями твердости, а сам метод – способом адсорбционного понижения твердости («эффект Ребиндера») [6]. Давно известно, что при пропитке пористых тел (известняков, песчаников) водой их прочность понижается на 25 – 40 % причем это процесс обратимый, т.е. первоначальная прочность восстанавливается при просушивании.

Механизм влияния жидкости на свойства пористых тел можно понять, учитывая значения поверхностной энергии. Опыты показывают, что при смачивании водой известняков и песчаников их прочность понижается, следовательно, поверхностная энергия твердого тела на границе с водой меньше, чем на границе с воздухом. Это естественно, так как вода хорошо смачивает известняки и песчаники. Возможно, что прочность тех же песчаников и известняков возрастет при погружении в жидкости, их не смачивающие. Дело значительно усложняется при переходе к телам не пористым, например, к хорошо образованным кристаллам различных минералов. Они не могут быть пропитаны жидкостями, следовательно, влияние на прочность такого кристалла жидкость оказать не может. Следует отметить, что облегчение и ускорение процессов механического разрушения хрупкого тела производят только те жидкости, которые хорошо смачивают тело или содержат вещества, обладающие способностью адсорбироваться на поверхности тел. Жидкости, не смачивающие тела, напротив, затрудняют процесс разрушения.

Механизм влияния жидкостей можно представить в следующем виде. При разрушении хрупкого тела на поверхности и во внутренних частях появляются постепенно возрастающие микротрещины. Если разрушение происходит в вакууме, то края микротрещин могут вновь смыкаться при удалении разрушающей силы, и тело восстанавливается, при условии, конечно, что не произошло полного разделения на части. Теперь предположим, что разрушение хрупкого тела происходит в какой-либо жидкости, которая совершенно не смачивает его поверхность и в составе которой нет ПАВ. При образовании трещин жидкость по капиллярам не может войти в трещины, и разрушение тела происходит, так как будто оно находится в вакууме. Поверхностная энергия тела остается такой же, как в вакууме. Трещина заполняется парами жидкости, осаждающимися на ее стенках в виде микроскопических капелек, которые при удалении разрушающей силы вытесняются, и целостность тела может восстановиться.

Теперь рассмотрим другой предельный случай, когда жидкость абсолютно смачивает тело. При образовании трещины жидкость тотчас же по капиллярам заполняет ее, проникая в самую узкую часть, где расстояние между поверхностями немногим более межатомного или межмолекулярного порядка. Следовательно, в этом случае мы имеем дело с поверхностной энергией тела не относительно вакуума, а относительно смачивающей жидкости [6]. Если процесс образования трещин в вакууме может быть обратимым, то в смачивающей жидкости он является, необратимым.

Рассмотрим частный случай разрушения – процесс абразивного шлифования в присутствии смачивающей жидкости. Зерна абразива вызывают в поверхностном слое напряжения, которые сопровождаются образованием трещин (микротрещин) и откалыванием частиц. Трещины и микротрещины в момент образования заполняются жидкостью и образуют некоторую зону, названную зоной предразрушения, в которой прочность всегда понижена по сравнению с прочностью цельного тела. Если разрушение ведется в неактивной среде, то после удаления разрушающей силы самые тонкие трещины в зоне предразрушения исчезают и целостность зоны отчасти восстанавливается. Если же разрушение происходит в присутствии ПАВ, которые проникают в самые тонкие трещины, образуя адсорбционные слои на их поверхности, то они препятствуют смыканию разрывов после удаления приложенной силы. В этой связи в зоне предразрушения возрастает трещиноватость и прочность зоны уменьшается.

Если зона предразрушения отсутствует, то жидкости не могут оказывать какого-либо действия на процесс разрушения.

Исследования показали, что зона предразрушения образуется не только при механическом разрушении твердого тела, т.е. при образовании в нем новых поверхностей, но и при любом его деформировании как в области упругих, так и в области пластических деформаций. Чем выше напряжения, чем ближе они к пределу прочности, тем больше развита зона предразрушения. Характерно, что в области упругих деформаций зона предразрушения постепенно исчезает, как бы «залечивается» под влиянием молекулярных сил после удаления внешних усилий. В области пластических деформаций эта зона также может постепенно «заживляться», но при разрушении твердого тела зона предразрушения развивается необратимо, что имеет место при применении ПАВ. Следует обратить внимание на весьма важное обстоятельство: одной зоны предразрушения недостаточно, чтобы проявилось действие жидкостей или адсорбционных слоев. Зона предразрушения возникает при всяком разрушении, например, при измерении твердости по методу вдавливания, но если действие разрушающей силы не повторяется, то жидкости или совсем не дают эффекта, или он сводится к смазывающему действию. Для проявления влияния жидкости или адсорбционных слоев необходимо, чтобы процесс разрушения повторялся периодически и зона предразрушения могла превращаться в зону разрушения.

Механика коррозионного разрушения использует известные положения физической химии и представления А.А. Гриффитса, который впервые ввел понятие о трещине, как об основном факторе разрушения хрупких твердых тел. Следует выделить два наиболее распространенных вида коррозионного разрушения твердых тел – усталость и растрескивание, которые происходят в результате зарождения и развития, специфических коррозионно-механических трещин. Металлы и сплавы, применяемые в горном деле, имеют в себе дефекты различного происхождения (трещины, остrokонечные полости и неметаллические включения), которые понижают их прочность, являясь источником зарождения трещин. При механическом нагружении поликристаллических материалов, учитываются размеры уже имеющихся в теле начальных дефектов, которые перерастают в трещины. Разупрочняющее действие среды в процессе зарождения и развития трещины коррозии под механическим напряжением сводится к трем основным факторам [7]:

- локальной коррозии напряженного металла в вершине трещины;
- водородному разупрочнению металла вследствие наличия в нем растворенного водорода, поступающего в металл из среды;
- адсорбционному понижению прочности металла вследствие адсорбции на его поверхности компонентов среды.

Необходимо отметить, что перечисленные факторы зачастую проявляются одновременно, комбинируясь друг с другом и воздействуя друг на друга. Коррозионно-механическое разрушение происходит в три этапа:

- на поверхности напряженного металла возникает множество коррозионно-механических питтингов, на дне которых и зарождаются трещины (этап зарождения

трещины);

– зародившиеся трещины, разветвляясь, углубляются в тело материала. При этом одна из них, обгоняя остальные в своем развитии, со временем становится концентратором напряжений, развивающихся с все нарастающей скоростью (этап развития трещины);

– лавинообразное разрушение материала по месту магистральной трещины (этап долома материала по месту магистральной трещины).

**Выводы.** Приведенные сведения по механике разрушения горных пород являются базисными для построения теории абразивно-механического ударного способа бурения.

#### Список литературы

1. Давиденко А.Н., Игнатов А.А. Конструктивные и технологические особенности снарядов абразивно-механического ударного бурения // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2013». – Д.: РВК НГУ, 2013. – С. 107–115.

2. Кучерявый Ф.И. О механизме разрушения горных пород резцом по данным скоростной киносъемки // Известия ДГИ, т. XXX, кн. 2. – Д. – 1957. С. 31 – 37.

3. Кожевников А.А. Исследования процессов разрушения горных пород при колонковом бурении твердосплавными коронками: Автореф. дис... к-та техн. наук: 04.00.19 / Днепроп. горн. ин-т. – Д., 1975. – 32 с.

4. Griffith A.A. The phenomena of fracture and flow in solids / Phil. Trans. Roy. Soc. – 1920. – Ser. A. V. 221. –p. 163 – 198.

5. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердого тела. – Вестник АН СССР № 3. – 1968. – С. 46 – 52.

6. Ребиндер П.А. Избранные труды: Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. □– М.: Наука, 1979. – 382 с.

7. Конесев Г.В., Мавлютов М.Р., Спивак А.И. Противоизносные и смазочные свойства буровых растворов. – М.: Недра, 1980. – 144 с.