УДК 622.243.3

Л.К.ГОРШКОВ, *д-р техн. наук, профессор, spmi@mail.wplus.net*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург
А.И.ОСЕЦКИЙ, *д-р техн. наук, alexio@polimetal.ru*
ОАО «ПолиметаллУК», Санкт-Петербург

L.K.GORSHKOV, *Dr. in eng. sc., professor, spmi@mail.wplus.net*
National Mineral Resources University (University of Mines), Saint Petersburg
A.I.OSECKIY, *Dr. in eng. sc., alexio@polimetal.ru*
OJSC «PolymetallUK»

РАЗВИТИЕ ПРИНЦИПОВ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ НОВОГО АЛМАЗНОГО ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

В статье рассмотрены вопросы создания математико-механической модели разрушения горных пород, аномального износа алмазного инструмента, механических и температурных напряжений в буровых алмазах, технология бурения новыми алмазными коронками.

***Ключевые слова*:** горные породы, алмазные коронки, технология бурения.

DEVELOPMENT OF PRINCIPLES OF CONSTRUCTION AND OPERATION OF NEW DIAMOND BITS

In the article questions of development of mathematical-mechanical model of rock destruction process, abnormal wearout of diamond bits, mechanical and temperature tensions in drill diamonds, technology of drilling with new diamond bits were observed.

***Key words*:** rock destruction, diamond bit, drilling technology.

Целью настоящей работы является использование известных теорий разрушения-упрочнения материалов и создание на их основе в высокоэффективного алмазного породоразрушающего инструмента, например, буровых коронок, и, одновременно, для максимально возможного ослабления буримых пород. Основой для этого должны стать современные аналитические представления о механизмах действия как разрушающих факторов, так и факторов повышения эффективности работы самих породоразрушающих инструментов.

Кроме того, целесообразно проведение детального анализа форм аномального износа коронок, чтобы с учетом этого фактора дать соответствующие рекомендации по совершенствованию алмазного бурового инструмента для проходки геологоразведочных скважин. Одновременно следует показать и современные тенденции в указанном направлении, реализуемые на ряде предприятий-изготовителей алмазного инструмента. При этом все мероприятия такого рода должны базироваться на фундаментальных представлениях механики сплошной среды, в том числе:

- общей математико-механической модели разрушения горных пород при бурении, механизме зарождения и развития трещин;
- соотношении сжимающих и растягивающих напряжений в породах забоя;

• влиянии сопутствующих разрушению породы и сохранению работоспособности коронок технико-технологических факторов;

• действии колебательных процессов, влиянии очистного агента.

Особую актуальность перечисленные принципы и факторы, определяющие конструктивные и технологические особенности породоразрушающего инструмента, приобретают для алмазных коронок нового поколения. К этой группе относятся инструменты, специально созданные для конкретных горно-геологических условий эксплуатации с учетом структурно-текстурных, прочностных и абразивных свойств буримых пород применительно к какому-либо месторождению и/или какой-либо разведываемой площади. В этой связи остановимся более подробно на некоторых основных из названных выше факторов и принципов.

Бурение скважин, особенно в твердых и крепких породах, например, алмазными инструментами, носит колебательный характер по причине непостоянства как осевой нагрузки, так и крутящего момента. Такой процесс может быть описан дифференциально-разностным уравнением типа $m\ddot{x} = C - R$, где: m – суммарная масса породоразрушающего инструмента, колонкового набора и соответствующей длины нижней сжатой части колонны бурильных труб (КБТ), обеспечивающая необходимую осевую нагрузку на забой: C – осевая нагрузка; R – реакция забоя; X – перемещение забоя в процессе бурения вдоль осевой линии ствола скважины, то есть, в процессе углубки скважины.

При интегрировании приведенного выше уравнения следует учитывать и уравнения вращения вала приводного двигателя, передающего крутящий момент на КБТ, то есть следует учитывать работу трансмиссии буровой установки, состоящей из двух составляющих одно целое частей: жесткой – коробки передач и других механизмов, передающих крутящий момент от двигателя к шпинделю вращателя, и гибкой – КБТ.

Опыты бурения разведочных скважин различными инструментами (алмазными, твердосплавными, шарошечными, композитными и др.) показывают, что случайные составляющие сопротивления вращению бурового снаряда играют существенную роль при высокочастотных колебаниях последнего, что характерно, например, для высокоскоростного алмазного бурения. Но в процессе проходки скважины могут реализовываться и достаточно интенсивные низкочастотные колебания, отрицательно сказывающиеся на прочности и работоспособности бурового снаряда и на технологии бурения в целом. При этом основную роль играют детерминированные силы сопротивления, что является основной причиной аномального износа алмазного породоразрушающего инструмента.

Аномальный износ и его интенсивность объясняется наличием в инструменте участков и зон с различной износостойкостью режущей поверхности в тангенциальных и радиальных направлениях, что можно объяснить также недостаточным качеством изготовления и неодинаковостью условий изнашиваемости. Вероятность образования аномального износа можно снизить за счет устранения его генетических видов: проектирования и технологии изготовления. Стратегия совершенствования инструмента при этом заключается в следующем: изнашиваемая поверхность должна быть спроектирована в соответствии с формой, размером и локализацией аномального износа; способы же управления скоростью износа выбираются в зависимости от механизма износа. Тактических решений этой проблемы много, но из числа главных следует выделить два направления:

• традиционный и самый распространенный принцип разработки коронок с равноизнашиваемойпородоразрушающей поверхностью;

• разработка коронок, закон изнашивания породоразрушающей поверхности которых принят неравномерным, но заданным уже в процессах проектирования и изготовления по определенной схеме, основанной на учете закономерностей аномального износа, что и будет коренным образом отличать коронки нового поколения.

При разрушении горных пород в процессе бурения алмазы испытывают разнообразные напряжения: механические (сжимающие) – от действия осевой нагрузки и изгибающие от тангенциального усилия на забое; температурные – из-за перепада температур нагретых работающих алмазов и холодного очистного агента.

Если первые два вида механических напряжений зависят только от нормальной и тангенциальной нагрузок и размеров алмазов, то на величину температурных напряжений, кроме того, оказывают свое влияние и фактическое значение забойной мощности, и физико-механические свойства самих алмазов, таких как: модуль упругости, коэффициенты Пуассона и линейного расширения, теплопроводность и теплоемкость и т.п.

Для крупных алмазов (20-90 шт./кар) разрушающие напряжения имеют место при нагреве от 300 до 600 °С, более мелкие разности (120-400 шт./кар) выдерживают нагрев до 700-1000 °С без нарушения целостности. Однако при таком высоком уровне нагрева алмаз подвержен значительной потере механической прочности, что становится причиной пластических деформаций.

При бурении наиболее крепких пород, даже коронками с мелкими алмазами, температурные напряжения значительно превышают механические. В случае использования алмазов зернистостью 30-40 и 40-60 шт./кар при бурении пород VIII-IX категорий по буримости температурные напряжения составляют 0,3-0,5 предела прочности алмазов.

Для объемных алмазов зернистостью 100-400 шт/кар температурные напряжения могут достигать значения предела допускаемых напряжений и даже разрушающих. В породах VII-VIII категорий по буримости вероятность появления разрушающих напряжений не превышает одной трети, следовательно, в этих породах такова и доля алмазного бурения, где необходимо учитывать действие температурного фактора. При бурении в породах VIII-IX категорий эта доля колеблется в пределах 0,3-0,5, а в породах высших категорий (X-XII) эта доля приближается к 1, то есть 100 % объема алмазного бурения.

При достаточно быстром нагревании торца матрицы с выступающими из нее алмазами, что имеет место в начале процесса бурения, торцевые слои матрицы расширяются и давят на более холодные вышележащие слои. Это вызывает появление в матрице механических напряжений, могущих стать критическими при наличии даже малых дефектов в матрице и корпусе коронки, что может вызвать хрупкое разрушение с развитием трещин. При этом опасными будут трещины поперечного и продольного сдвигов, то есть трещины II и III видов, так как явные трещины нормального разрыва, вдоль вертикальной оси коронки (трещины I вида), как показывает практический опыт, маловероятны. Однако могут возникнуть и дополнительные деформации, пропорциональные скачку температуры в призабойной зоне. Эти дополнительные деформации могут изменить равновесное состояние коронки при бурении и привести к появлению дополнительной объемной силы, действующей на матрицу с торцевого направления.

Таким образом, матрица алмазной коронки испытывает сложное напряженное состояние, включающее в себя плоскую деформацию в поперечных сечениях, а также комбинацию осевого сжатия со сдвигом при действии бокового обжатия как проявления горного давления.

Если принять главные напряжения, определяющие боковое обжатие, равными друг другу, то задача становится плоской, и действие единичного алмаза на забой будет зеркальным отражением действия того же алмаза на матрицу с нагрузкой, равной реакции забоя. Это обстоятельство и определяет напряжения в матрице и соответствующие деформации (линейные и угловые), от величин которых зависит работоспособность коронки и ее температурная устойчивость при действии температурного фактора. Задача при этом подобна задаче Фламмана, известной из курса теории упругости, когда сосредоточенная сила (нагрузка на единичный алмаз) воздействует на полуплоскость единичной ширины. Этой полу-

плоскостью является часть массива матрицы влево, вправо и вверх от резца, то есть алмазного зерна. Другой полуплоскостью будет часть забоя тоже единичной ширины, где действует внедрившаяся в породу другая часть алмаза.

Таким образом, создаются два круга напряжений – в породе и в матрице. При этом по контурам этих кругов действуют только главные напряжения, а внутри кругов образуются как нормальные, так и касательные напряжения, которые и могут стать причинами возникновения в матрице трещин сдвига II рода (по радиальным направлениям) и III рода (по концентрическим окружностям на торце матрицы).

Мероприятия по предупреждению трещинообразования в матрице или снижению интенсивности его могут разрабатываться по следующим направлениям:

• снижение величины поступающего в матрицу теплового потока;

• выбор материала связки в матрице с низкими значениями модуля упругости, коэффициента Пуассона и повышенными значениями теплопроводности и удельной работы разрушения.

В основе решения такой задачи должно быть понятие о возможном перераспределении напряжений, наведенных на контуре трещины, образованной от вдавливания в породу бурового резца. Для цилиндрической формы алмаза трещина будет иметь круглое очертание. Тогда породный массив, где действуют естественные напряжения от горного давления по трем взаимно перпендикулярным направлениям (осям декартовых координат), будет ослабляться от действия круглой трещины.

Так как на забой действуют одновременно несколько резцов, то поле напряжений в породе определится как сумма напряжений от каждой из трещин и всех точек контактов резцов с забоем.

Предварительные расчеты показывают высокую концентрацию сжимающих напряжений в породе вблизи фронтальной части резца и растягивающих напряжений сзади тыльной части резца. Действие всех напряжений (естественных и наведенных), а также контактной силы трения способствует развитию оперяющих и секущих трещин относительно первичной круглой трещины, что ведет к значительному ослаблению прочности буримого массива. В данном случае основную роль играет чередование сжатых и растянутых зон на забое скважины при перемещении вдавленных в породу осевой нагрузкой буровых резцов.

Развитие растягивающего главного напряжения вызывает отрывы отдельных частиц породы от массива с образованием в нем поперечно-тангенциальных трещин горизонтально-вертикальной ориентации, то есть трещин II и III видов, облегчающих сдвиговые деформации на забое. При трещинообразовании такого рода в вершинах возникших трещин накапливается тепловая энергия, но при подаче очистного агента эта энергия гасится, за исключением случаев использования очистных агентов с низкой теплоемкостью, например, сжатого воздуха.

Таким образом, при конструировании новых алмазных инструментов особое внимание следует обратить на способность данного инструмента при бурении формировать на забое чередующиеся зоны растяжения и сжатия породы. Конструкция коронки при этом должна в максимально возможной мере способствовать развитию в породе не только сжимающих и сдвиговых, но и растягивающих напряжений, могущих возникать в столбике сжатой породы под резцом после его смещения, за счет высвобождения потенциальной энергии упругой деформации.

Циркуляционная система должна способствовать проникновению очистного агента в каналы, пустоты, поры и трещины в буримой породе как в зоне сжатия(смятия) перед резцами, так и позади них в растянутую зону породы, что может сгладить анизотропию породы и обеспечить возможность реализации эффекта Ребиндера, – то есть эффекта снижения прочности буримой породы под действием энергии поверхностного натяжения промывочной жидкости внутри породы.

Для обеспечения реализации названных выше функций очистных агентов, включая и

эффект Ребиндера, очистные агенты, в первую очередь жидкие, должны заполнять все открытые полости в коронке и не отрываться от нее при движении в призабойной зоне, то есть – следовать теореме Н.Е. Жуковского, согласно которой любая полость в коронке, заполненная жидкостью, при сообщении коронке некоторой скорости, будет вращаться вместе с жидкостью относительно главной оси инерции как одно неизменяемое тело с постоянной (заданной) угловой скоростью. При этом неотрывность потока предполагает и наименьшие гидравлические сопротивления в каналах и высокую скорость омывания поверхности коронки при бурении.

Повышение скорости потока в системе коронки можно достичь двумя путями:

• увеличением расхода очистного агента при сохранении геометрии промывочных каналов, как у серийных коронок, выпускаемых в настоящее время;

• изменением числа, размеров и геометрической формы промывочных каналов при неизменном или даже пониженном расходе очистного агента.

Второй путь представляется более перспективным, так как подача меньшего количества очистного агента обусловливает применение менее металлоемких буровых насосов. Кроме того, при малых расходах очистного агента снижается степень эрозийного воздействия потока, обогащенного шламом, на коронку и керн, а повышенное число мелких каналов будет способствовать более равномерному охлаждению как матрицы, так и буровых алмазов.

Алмазное бурение можно рассматривать как процесс объемного взаимодействия двух дискретных шероховатых поверхностей: режущей части алмазной коронки и забоя скважины. В этой трущейся паре сам процесс трения представляет собой некоторую двойственность: с одной стороны, имеет место диссипация энергии на преодоление молекулярных связей; с другой стороны, наблюдается формоизменение поверхностного слоя породы из-за внедрения в нее алмазов.

При реализации эффективной технологии алмазного бурения необходимо сначала определить предельно допустимое значение забойной мощности, превышение которого ведет к перегреву алмазов и снижению работоспособности коронок в целом.

Другими технологическими параметрами режима алмазного бурения являются рациональный расход очистного агента, осевая нагрузка на коронку, частота вращения бурового снаряда, а также прогнозирование механической скорости бурения как интегральный показатель эффективности бурового процесса.

Главным фактором, обеспечивающим необходимую степень очистки и охлаждения коронки, является скорость движения потока в ее каналах. Требуемое значение скорости потока зависит от соотношения геометрических характеристик циркуляционной системы коронки и расхода очистного агента. При этом увеличение скорости потока в каналах коронки способствует росту механической скорости бурения.

Метод расчета расхода очистного агента при алмазном бурении должен быть основан на обеспечении необходимой гидравлической мощности потока очистного агента, подводимой к работающему на забое алмазному инструменту. Предварительные расчеты показывают, что для обеспечения необходимой степени охлаждения коронки требуется перепад давления, значительно больший, чем для обеспечения очистки забоя и инструмента от шлама. Этот факт и определяет новое направление в конструировании алмазного инструмента, а также выбор технологии бурении этим инструментов.

В общем случае осевая нагрузка должна быть не меньше предела прочности породы на одноосное сжатие и прямо пропорциональна произведению твердости породы по штампу на суммарную площадь контактов алмазных резцов, внедрившихся в породу забоя скважины на определенную величину. При этом площадь контактирования алмазов с забоем, в свою очередь, зависит от числа одновременно контактирующих алмазов и их взаимного влияния на напряженное состояние буримой породы.

Частота вращения является достаточно сложно поддерживаемым параметром режима бурения, так как должна удовлетворять одновременно нескольким противоречащим друг другу требованиям:

• не допускать превышения предельно допустимого уровня забойной мощности, например, по температурному фактору;

• обеспечивать требуемый импульс силы в точках контактов коронки с забоем, определяемый как отношение величины осевой нагрузки к значению частоты вращения для каждого из применяемых типоразмеров коронки;

• не допускать появления резонансов КБТ, что может иметь место при совпадении собственных частот КБТ (продольных и крутильных) с частотами привода; это требование вытекает из волновой природы собственных колебаний КБТ как системы с определенными параметрами: массы, жесткости, силы упругости и т.п.

Прогнозирование механической скорости бурения как одной из потенциальных возможностей алмазного инструмента, обусловленной его конструктивными особенностями, природой очистного агента, буримостью и текстурно-структурными характеристиками породы, технологией бурения, является совершенно необходимым предварительным показателем режима бурения, а также базой для оптимизации процесса алмазного бурения.

Таким образом, реализация приведенных выше принципов конструирования и эксплуатации алмазного инструмента может стать базой для создания алмазного инструмента нового поколения и его эксплуатации на современном уровне требований к качеству и эффективности алмазного бурения.