

СТЕНД И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ЗУБКОВ БУРОВЫХ ДОЛОТ НА УДАРНУЮ СТОЙКОСТЬ

© 2006 Н.С. Нассиф, Р.М. Богомолов, И.Д. Ибатуллин, В.И. Кремлев

ОАО «Волгабурмаш», г. Самара
Самарский государственный технический университет

В докладе представлено решение задачи вывода производственных испытаний зубков буровых долот на новый уровень, позволяющий вплотную приблизиться к проблеме прогнозирования их прочностных свойств, одновременно обеспечив ускоренный и неразрушающий характер испытаний.

Современная нефтегазодобывающая промышленность идет по пути интенсификации силовых и скоростных режимов бурения, что требует постоянного совершенствования породоразрушающих твердосплавных элементов буровых долот и предъявляет более жесткие требования к методам оценки их качества. Последнее усугубляется тем, что большинство существующих методик ресурсных испытаний материалов основаны на устаревших концепциях прочности, не отвечающих современным представлениям физики разрушения твердых тел. В результате получаемые характеристики зачастую не отражают эксплуатационные свойства изделий. Так, многолетние исследования не позволили установить однозначной корреляции эксплуатационной стойкости зубков с данными лабораторных оценок твердости, коэрцитивности, предела прочности на изгиб и др. характеристик твердого сплава.

Повышение адекватности результатов лабораторных испытаний возможно на основе идентификации и моделирования ведущих физических механизмов разрушения материалов возникающих при эксплуатации. Твердосплавные зубки шарошечных долот при бурении подвергаются в основном двум видам разрушающего воздействия – трению в абразивной среде и циклическому ударному воздействию о породу, вызывающих соответственно абразивное изнашивание и усталостное разрушение (хрупкие сколы), лимитирующие долговечность долот.

Поэтому повышение эксплуатационной долговечности зубков связано с задачей повышения износостойкости и трещиностойкости твердого сплава. Эти свойства необходимо контролировать в совокупности, поскольку основной метод повышения износостойкости – повышение твердости, как пра-

вило, уменьшают сопротивление хрупкому разрушению, и, наоборот, с уменьшением твердости (ростом пластичности) увеличивается трещиностойкость, а износостойкость при этом падает. Таким образом, указанные свойства конкурируют в материале и для решения проблемы важно регламентировать значения каждого из параметров.

Другой проблемой является большая продолжительность испытаний на надежность зубков. Так при испытаниях на циклическое сжатие зубков число циклов составляет более 10^6 . Повышение производительности испытаний возможно при форсировании режимов нагружения, при которых, тем не менее, действующие механизмы разрушения материалов идентичны эксплуатационным. Форсирование часто осуществляют путем повышения динамичности нагружения. При ударных испытаниях таким фактором является скачок силы при ударе зубка о стальную плиту. Поскольку ударное взаимодействие протекает достаточно быстро, контроль динамической силы требует специальной аппаратуры, способной регистрировать данные с периодом, намного меньшим длительности удара. Повышение динамичности позволяет существенно ускорить исследования без значительного снижения качества сравнительного анализа с достаточной степенью сопоставимости результатов экспериментов и данных эксплуатации.

Другой, более эффективный способ ускорения испытаний на прочность основан на идентификации и анализе кинетических моделей повреждаемости материалов. Основоположителем такого подхода является В.В. Федоров, впервые показавший, что разрушение материала является заключитель-

ной стадией накопления энергии повреждаемости [1]. В данной статье описаны результаты модернизации стенда и совершенствования методики испытаний зубков буровых долот, а также описан новый способ ускоренных испытаний зубков, основанный на прогнозировании их долговечности при использовании кинетической модели повреждаемости твердых сплавов.

Стенд, установленный в научно-исследовательской лаборатории ОАО «Волгабурмаш», позволяет производить следующие виды испытаний: оценку сравнительной ударной стойкости зубков; оценку сравнительной износостойкости зубков при трении скольжения о стальную плиту и оценку сравнительной стойкости зубков к изнашиванию при ударе. Несмотря на то, что указанные испытания не позволяют в полной мере отразить все условия работы зубка на забое при эксплуатации, они отражают косвенные характеристики прочности твердосплавных материалов зубков буровых долот и позволяют определить степень влияния вносимых технологических или конструктивных изменений, на качество получаемых изделий.

Рабочее место оператора обеспечено дистанционным управлением стенда (запуск, остановка, настройка), мониторинга параметров испытаний в режиме реального времени и сохранения экспериментальных результатов в базе данных. При испытаниях микроконтроллерная система сбора данных, подключенная к компьютеру, с частотой выборок 1кГц отображает действующие значения: температуры гидравлической жидкости в нагружающих гидроцилиндрах, нормальных и касательных сил, действующих на зубок, а также числа циклов нагружения.

Принцип действия стенда заключается в следующем. Перед испытанием исследуемый зубок запрессовывается с натягом в специальную оправку на глубину его крепления в шарошке. Оправка, через датчик силы, устанавливается на штоке гидроцилиндра ударного механизма. Шток, совершая вертикальные возвратно-поступательные перемещения, при опускании долбит вершиной закрепленного на нем зубка металлическую плиту с заданным усилием удара, контролируемым датчиком силы и отображаемым на

экране компьютера в виде развернутой во времени эпюры нагружения зубка.

При каждом ударе плита принудительно перемещается относительно ударного механизма на 1 шаг, регулируемый в диапазоне 1...5мм. После прохождения всей длины плиты (300×300мм) удары повторяются в обратном направлении с боковым смещением на один шаг в сторону гладкой поверхности. Удары по плите и ее перемещение осуществляются в автоматическом режиме. В качестве критерия стойкости зубка к ударным воздействиям принимают количество циклов нагружения до разрушения зубка. Количество ударов фиксируется счетчиком. При появлении трещины или разрушении зубка стенд отключается.

Режимы испытаний на удар имеют следующие общие параметры: частота циклов ударного нагружения - 4...6 Гц; твердость рабочей плиты, HRC₃ - 62...64; шероховатость поверхности рабочей плиты, R_z - 0,16...0,32; твердость материала оправки HRC₃ - 35...45; величина натяга при запрессовке 0,09...0,14 мм.

Для обеспечения сопоставимости результатов при ударных испытаниях зубков различного типоразмера важно, чтобы каждый цикл нагружения был строго тарифован. Последовательные удары, независимо от типоразмера зубков, должны нести в себе определенное и эквивалентное для всех испытываемых образцов одного сплава количество разрушающего воздействия, выражаемого определенным значением некоторого физического параметра. В качестве таких параметров ранее принимались экстенсивные величины, такие как энергия и сила удара. Стабильность этих показателей при испытаниях не могла обеспечить сопоставимость результатов испытаний зубков из одного сплава, при варьировании формы и размеров зубков, изменении материала и твердости плиты, точки приложения силы на плите, эпюры нагружения и др. факторов, не имеющих прямого отношения к прочности испытываемого материала.

Более обоснованным является тарифовка ударного воздействия по интенсивным, удельным характеристикам, таким как, например, удельная энергия разрушения, вязкость разрушения, локальное давление и др.

Последний показатель был выбран для тарирования удара, для чего его величина была пронормирована для каждого типоразмера зубков. Уровень локального давления выбирается ниже предела прочности твердого сплава, вследствие чего разрушение имеет усталостный характер и происходит после определенного числа циклов нагружения. Этим обеспечивается адекватность результатов сравнительных испытаний эксплуатационным показателям надежности.

Анализ картины хрупкого разрушения твердосплавных зубков при ударных испытаниях показывает, что очаг разрушения формируется в верхней части зубка, где поперечное сечение зубка, воспринимающее нагрузку, минимально и, соответственно развиваются максимальные локальные давления. При испытаниях задаются постоянно для каждого типоразмера и материала зубка величиной локального давления действующего в области вершины зубка P_3 , составляющей около 30% от статической прочности твердых сплавов на сжатие (от 2800 до 6000 МПа), и такого давления, при котором число циклов нагружения до разрушения зубка находится в пределах от $10^3 \dots 10^4$. В процессе испытаний давление в гидросистеме и температура рабочей жидкости сохраняются стабильными и постоянно контролируются.

Сила удара зубка о плиту, контролируемая по эпюрам нагружения, в основном зависит от давления в гидросистеме и высоты подъема зубка над плитой и устанавливается в зависимости от площади контакта зубка с плитой. Эта площадь, зависящая от типоразмера зубка, марки материала, его пластических свойств, давления и др. факторов, оценивается экспериментально. Таким образом, стабилизация давления P_3 , возникающего в области вершины зубка в момент удара, обеспечивается стабильностью площади контакта и силы ударного нагружения.

Для определения требуемой величины силы удара для каждого типоразмера зубков строится эпюра «нормальная нагрузка – давление» (рис.1а). Сила ударного нагружения F_y находится по эпюре в точке, соответствующей величине давления P_3 . Для построения эпюры $P=f(F_N)$ экспериментально оценивают площади контакта S_i вершины зубка и

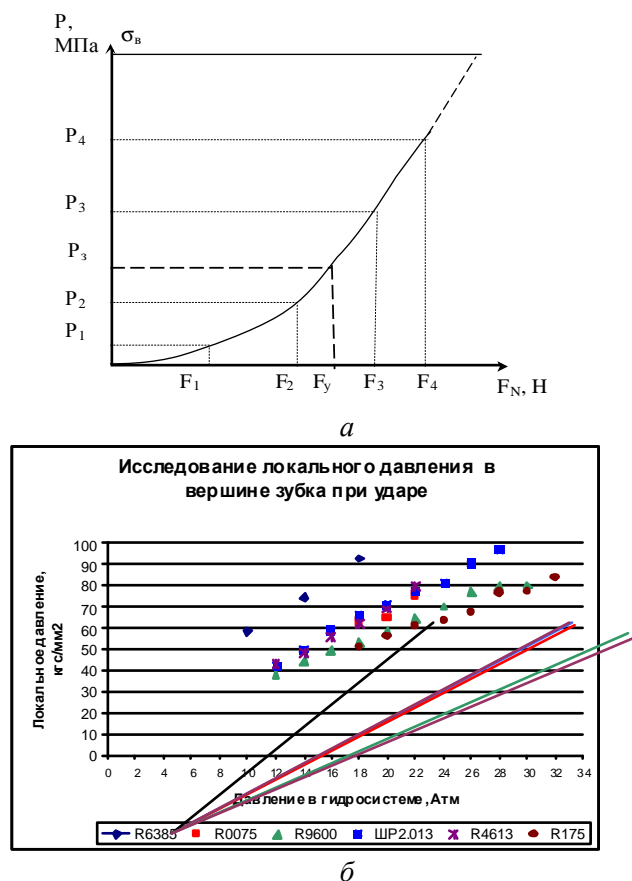


Рис. 1. Зависимость локального давления в вершине зубка от давления в гидросистеме

величину нормальной ударной нагрузки F_{Ni} при 3...4 значениях давления в гидросистеме, затем рассчитывают соответствующие величины давления на вершине зубка $P_i = F_{Ni} / S_i$ и строят эпюру в координатах «давление - нагрузка». Пример исследования зависимости локального давления в вершине зубков при ударных испытаниях от давления в гидросистеме ударного механизма для различных типоразмеров зубков приведен на рис.1б. При локальном давлении в вершине зубка 800 МПа ударная стойкость испытанных зубков составила около 4000 циклов.

После определения величины необходимого усилия ее значение устанавливается при испытаниях путем регулирования давления в гидросистеме и контроля величины F_N до выполнения условия $F_N \cong F_y$. При изменении материала плиты, температуры испытаний, типоразмера зубков и др. условий испытаний процедура оценки F_y повторяется вновь. Результаты каждой оценки F_y и получаемые при этом эпюры нагружения сохраняются для последующей систематизации экспериментальных данных и составления

математической модели для расчетной оценки величины F_y .

Эпюры нагружения, полученные при экспериментах, показали, что ударное воздействие состоит из трех стадий, см. рис. 2: в начальный момент удара формируется импульс динамической составляющей нагрузки, обусловленный инерционной перегрузкой при остановке движущегося штока; затем возникают затухающие колебания с частотой собственных колебаний нагружаемого устройства, порядка 40Гц, переходящие в равномерное квазистатическое нагружение, при котором установившееся значение силы, определяется давлением штока гидроцилиндра.

Первые две фазы обусловлены переходным процессом при ступенчатом нагружении. Коэффициент динамичности при ударе, как показали эксперименты, может достигать величин 3...5. Длительность удара составляет до 1 мс и мало зависит от высоты хода штока при ударе и давления в гидросистеме. Наличие первых двух фаз наблюдалось даже при предварительном касании зубка плиты, когда ход поршня был обусловлен только упругими деформациями плиты. Устранить первые две фазы удалось только после предварительного вдавливания с определенным усилием вершины зубка в плиту. При повышении частоты ударов, длительность импульсов нагружения сокращалась, при этом происходит уменьшение длительности фазы *в* до полного ее исчезновения, после чего начинает сокращаться фаза *б*. Полученные эпюры указывают на то, что момент разрушения может быть связан с фазой *а*, когда действующие на вершину зубка силы наиболее высоки, а длительность прижатия достаточна для роста трещины и образования хрупкого скола.

Исследование влияния различных факторов (частоты нагружения, давления в гидросистеме, высоты подъема зубка над плитой) на эпюру ударного нагружения при испытаниях зубков показало, что наиболее эффективно управление ударной нагрузкой производится путем регулировки давления в гидросистеме ударного механизма (рис.3)

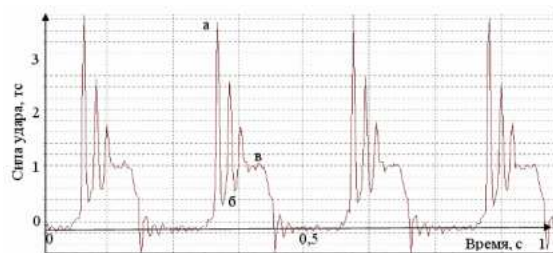


Рис. 2. Характерный вид эпюры нагружения зубков при ударных испытаниях (показано четыре последовательных цикла нагружения).

при частоте ударов 4Гц и высоте подъема зубка над плитой до 15мм. При повышении частоты ударов и увеличении высоты подъема зубка начинает возрастать нелинейность зависимости силы удара от давления в гидросистеме и существенно повышается разброс значений ударной нагрузки.

Исходные данные и результаты испытаний в виде эпюр нагружения, температуры и числа циклов сохраняются в файлах базы данных компьютера.

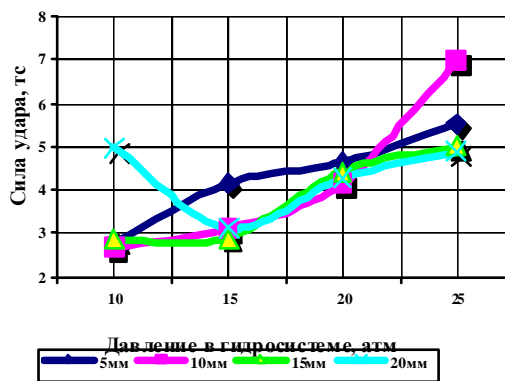


Рис. 3. Исследование влияния давления в гидросистеме на силу удара при варьировании высоты подъема зубка над плитой (частота нагружения 4 Гц)

Установленные на компьютере программы позволяют просматривать записанные эпюры, а также выполнять статистическую обработку результатов испытаний, включая оценку среднего значения числа циклов до разрушения, среднего квадратического отклонения, абсолютной и относительной погрешности экспериментальных результатов. Имеется возможность установить доверительные вероятности для оценки погрешностей на уровне 0,9; 0,95 и 0,99. Статистическая обработка основана на методах математической статистики с использованием распределения Гаусса. Погрешности вычисляются по критерию Стьюдента.

Решение задачи вывода производственных испытаний зубков буровых долот на новый уровень, позволяющий вплотную приблизиться к проблеме прогнозирования их прочностных свойств, одновременно обеспечив ускоренный и неразрушающий характер испытаний, только за счет дальнейшего развития технических средств производственных испытаний твердосплавных зубков невозможно, необходимы экспериментальные и теоретические исследования фундаментальных закономерностей повреждаемости твердых сплавов, на основе которых можно было бы формализовать кинетику их разрушения в виде конкретных расчетных моделей.

В качестве базовой кинетической модели накопления повреждаемости был рассмотрен энергетический критерий разрушения в виде

$$U_0 = RT \ln(t_y N_u / \tau_0) + 10^{-5} V_m \dot{\epsilon}_u \sigma_y N_u + U_n \quad (1)$$

где R - универсальная газовая постоянная, кДж/моль·К; T - абсолютная температура, К; t_y - длительность удара, с; N_u - наработка, циклов; V_m - молярный объем, мм³/моль; $\dot{\epsilon}_u$ - средняя относительная деформация за цикл; σ_y - локальное давление в вершине зубка при ударе, кгс/мм²; U_n - исходное значение энергии повреждаемости, кДж/моль. Величина запасенной при деформации энергии контролировалась по изменению энергии активации пластической деформации материала вершины зубков [2].

Исследования показали, что изменения механических свойств твердосплавных зубков наблюдаются уже после их непродолжительной наработки на стенде. При этом все необходимые экспериментальные данные для создания кинетической модели (1) можно получить уже на начальном этапе изучения повреждаемости зубков на стенде. Такими данными являются – температура испытаний, начальная энергия активации и цикловая деформация зубка. Момент разрушения зубка можно оценить исходя из условия разрушения - равенства запасенной при испытаниях энергии соответствующему критическому значению энергии активации пластической деформации.

В разработанной экспериментально-расчетной методике ускоренных испытаний твердосплавных зубков делается выборка из партии твердосплавных зубков, достаточная для адекватного описания свойств всей партии, производится оценка начального значения энергии активации пластической деформации материала вершины зубков, оценивается исходная высота зубка, производится наработка зубка на стенде в течение 1...2 минут, повторно определяется высота зубка и рассчитывается цикловая деформация, полученные данные подставляются в кинетическую модель (1) и проверяется соответствие расчетного ресурса зубков требуемому значению.

В данной методике не учитывается нелинейность изменения цикловой деформации, что приводит к несколько заниженным расчетным результатам. Кроме того, на погрешность испытаний влияет разброс результатов оценки энергии активации и деформации.

Для оценки эффективности данной методики были проведены испытания нескольких партий твердосплавных зубков. На рис.4, 5 представлены результаты прогнозирования ресурса согласно вышеприведенной методике партий зубков типоразмеров R5458 и R2560 (сплав ВК10).

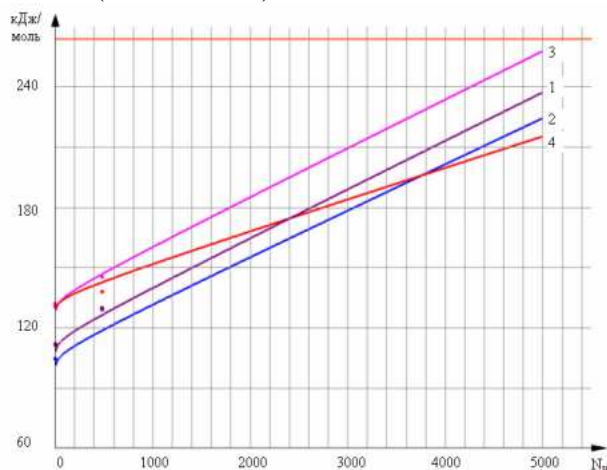


Рис. 4. Результаты прогнозирования долговечности зубков по результатам ускоренных испытаний зубков R2560 (верхняя горизонтальная линия – критический уровень энергии активации)

На тех же рисунках приведены модели повреждаемости для каждого зубка, полученные по результатам предварительной наработки, длительностью в одну минуту.

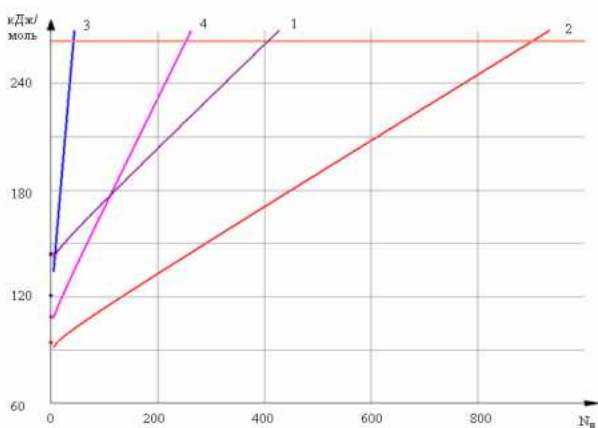


Рис. 5. Результаты прогнозирования долговечности зубков по результатам ускоренных испытаний зубков R5458

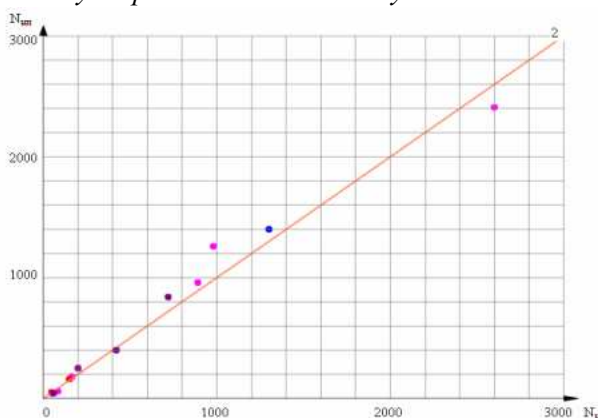


Рис. 6. Корреляция между прогнозируемым $N_{цп}$ и фактическим $N_{ц}$ числом циклов до разрушения зубков различных партий

Первая партия показала достаточно высокий расчетный ресурс. Все зубки, согласно

прогнозу должны были выдержать 4800 циклов наработки без разрушения. Вторая партия показала низкие результаты. Прогнозируемая долговечность не превышала 1000 циклов. Экспериментальная проверка подтвердила эти прогнозы.

Результаты исследования корреляции прогнозируемого и фактического ресурса приведены на рис. 6.

Средний разброс прогнозирования находится в пределах 20%, что является допустимым. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных при испытании зубков из сплавов ВК10 и ВК 14 показало их хорошее соответствие, что подтверждает возможность применения для описания повреждаемости твердых сплавов приведенной кинетической модели.

Список литературы

1. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. -Ташкент: Изд. ФАН, Уз.ССР, 1979.-168с.
2. Патент №2166745 от 2001.05.10, G01N3/56. Способ оценки энергии активации разрушения материала поверхностного слоя, деформированного трением //Д.Г. Громаковский, Е.В. Беленьких, И.Д. Ибатуллин И.Д. и др.

THE STAND AND METHOD OF TESTING THE HARD ARMS OF CHISELS ON SHOCK RESISTANCE

© 2006 N.S. Nassif, R.M. Bogomolov, I.D. Ibatullin, V.I. Kremlev

In the article results of modernization of the stand and perfection of a technique of testing the hard alloy teeth of chisels on resistance to cyclic shock loadings are presented. The technique of the accelerated tests based on kinetic model of damaging of hard alloys is described.