

© Н.С. Нассиф¹, И.Д. Ибатуллин²¹ОАО «Волгабурмаш», г. Самара²Самарский государственный технический университет

В докладе представлены результаты усталостных испытаний твердосплавных зубков. Разработаны кинетические модели повреждаемости зубков из твердых сплавов ВК10, ВК16, основанные на структурно-энергетическом подходе, удовлетворительно описывающие экспериментальные результаты.

Применяемые в заводских лабораториях методы испытаний материалов породоразрушающих зубков направлены в основном на оценку их соответствия стандартным критериям качества, определение разброса механических свойств зубков в пределах одной партии, а также на отбраковку партий зубков, показавших недостаточную стойкость к циклическим ударным нагрузкам. Однако в последние годы стало очевидным, что применяемые методики испытаний и критерии оценки прочности твердых сплавов устарели и не соответствуют современным темпам роста производства и расширению номенклатуры выпускаемых буровых долот. Назрела острая необходимость в разработке новых, наукоемких, неразрушающих и ускоренных методах оценки качества твердосплавных зубков. Приблизиться к проблеме прогнозирования их прочностных свойств можно только на основе тщательного исследования процесса усталостного разрушения твердых сплавов, с целью идентификации кинетического критерия их повреждаемости и разрушения при циклических ударных испытаниях.

В практике производства современных буровых долот ОАО «Волгабурмаш» значительный объем изготавливаемых породоразрушающих зубков представлен двумя марками твердых сплавов – ВК-10 и ВК-16. В данной статье представлены результаты исследования кинетики накопления повреждаемости в зубках при малоцикловой усталости под действием циклических ударных нагрузок и идентификации параметров расчетной модели их разрушения и прогнозирования их долговечности при эксплуатации.

Фрактографический анализ большого числа разрушенных при ударных испытаниях зубков показал, что в подавляющем большинстве случаев очаг разрушения локали-

зован в их вершине, где сосредоточены максимальные напряжения и деформации. Как показали исследования, в пределах усталостного механизма повреждаемости материала, данный характер локализации диссипативной системы инвариантен к маркам сплавов, размерам зубков и форме их вершин. На рис. 1. видна область локализации диссипативной системы в вершине зубка, в которой при ударах сосредотачивается зона пластической деформации и происходит зарождение усталостной трещины. Исследования показали, что разрушение вершин зубков лимитирует долговечность самих зубков и предваряет все другие формы разрушения, что делает этот участок поверхности пригодным для анализа кинетики повреждаемости твердых сплавов.



Рис. 1. Локализация диссипативной системы в вершине приработанного на стенде зубка

Методика экспериментального исследования кинетики повреждаемости заключалась в периодической оценке относительной деформации, микротвердости и энергии активации пластической деформации зубков через равные интервалы их наработки на стенде для циклических ударных испытаний. Периодичность наблюдения была выбрана в 2 минуты, соответствующая приблизительно 500 циклам наработки (ударам). Энергия ак-

тивации оценивалась по методике, разработанной в НТЦ «Надежность» СамГТУ [1].

На рис. 2 представлены результаты исследования кинетики накопления энергии повреждаемости в зубках типоразмера R4704 из твердого сплава ВК-10. Циклические испытания проводили при давлении в гидросистеме 18...20 атм. На рис. 3 представлены результаты аналогичных исследований, выполненных с клиновидными зубками типоразмера R0073 из твердого сплава ВК-16. Циклические испытания проводили при давлении в гидросистеме 23...24 атм.

Исследование кинетики повреждаемости твердосплавных зубков показало, что разрушению зубков предшествует постепенный рост энергии активации пластической деформации. При этом закономерен близкий к линейному рост энергии активации, что позволяет использовать для описания кинетики повреждаемости твердых сплавов известную гипотезу о линейном накоплении повреждаемости. Отклонения экспериментальных данных от линейной зависимости не превышают 20%, что является приемлемым учитывая стохастический характер разрушения и разброс свойств твердых сплавов.

Полученные результаты позволяют выделить два характерных значения энергии активации пластической деформации – исходное и критическое. Исходные значения энергии активации всегда ниже критических, имеют несколько больший разброс и характеризуют только начальное состояние материалов зубков в энергетическом фазовом пространстве. В целом, они не коррелируют с циклической долговечностью зубков, но при равных скоростях усталостной повреждаемости более долговечны материалы с меньшим исходным значением энергии активации.

Экспериментально установлено, что начальные значения энергии активации для сплавов ВК-10 и ВК-16 соответственно составляют 72...102 кДж/моль и 60...90 кДж/моль. Разрушение твердых сплавов происходит при достижении в них критического уровня запасенной энергии – энергии активации разрушения. Для сплава ВК-10 энергия активации разрушения составляет около 250 кДж/моль, а для сплава ВК-16 – приблизительно 230 кДж/моль.



Рис. 2. Зависимость энергии активации пластической деформации от числа циклов наработки на стенде для ударных испытаний зубков R4704 из твердого сплава ВК-10. Точки – экспериментальные данные, линии – соответствующий расчет по теоретическим моделям

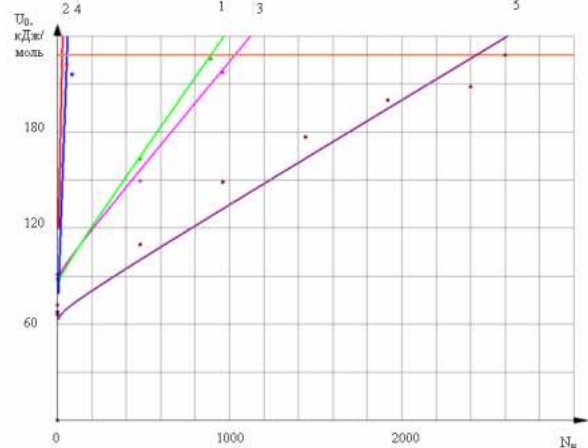


Рис. 3. Зависимость энергии активации пластической деформации от числа циклов наработки на стенде для ударных испытаний зубков R0073 из твердого сплава ВК-16. Точки – экспериментальные данные, линии – соответствующий расчет по теоретическим моделям

Скорость роста энергии активации пластической деформации является индивидуальным показателем каждого зубка, который, в совокупности с начальным и критическим значениями запасенной энергии, определяет их долговечность (число циклов до разрушения). Более высокая скорость накопления запасенной энергии соответствует меньшей долговечности зубков. Это можно объяснить изначальным наличием в них большего количества концентраторов напряжений (микротрещин, пор, сегрегации и т.д.), способных при равных условиях генерировать больше дефектов. Скорость роста энергии активации с доста-

точной степенью точности можно принять стабильной на протяжении всего периода испытаний, что свидетельствует о сохранении величины запасаемой энергии пластической деформации в материалах зубков за один тарированный удар.

Эксперименты показали, что в процессе циклических ударных нагрузок зубков происходит их пластическая деформация, которая выражается уменьшением высоты зубков. Повышенную пластичность твердых сплавов при испытаниях можно объяснить высокими напряжениями сжатия (в т.ч. и гидростатического), локализуемых в вершинах зубков в момент их удара о стальную плиту. На кривой «остаточная деформация – число циклов» можно выделить два характерных участка: первый - начальный, длительностью в 1...2 минуты, на протяжении которого наблюдается быстрая деформация зубков; второй – характеризуется последующим замедленным ростом остаточной деформации. Наличие этих участков можно объяснить сменой ведущего физического механизма накопления повреждаемости. Можно предположить, что первая фаза характеризуется объемной пластической деформацией кобальтового (пластичного) каркаса в материале зубков; вторая фаза протекает в режиме гистерезисного накопления повреждаемости за счет упругопластической деформации металла-связки. Наличие второй фазы свидетельствует об активации в материале аккомодационных процессов, направленных на приспособление зубков к ударным нагрузкам. Скорость деформации зубков, не отвечающих требованиям качества, характеризуется повышенными значениями. Эти зубки, как правило, не переходят во вторую фазу и разрушаются на стадии интенсивного роста деформации, что может быть обусловлено страгиванием в них одновременно большого количества микротрещин, металлургического происхождения. В отдельных случаях при испытаниях качественных зубков наблюдается почти полное прекращение роста остаточной деформации, что свидетельствует о смене упругопластического характера деформации упругой реакцией материала, и переходом от малоциклового усталости к многоциклового. При этом ударная стойкость зубков резко возрастает (в

этих случаях их испытания на стенде прекращают после ~4800 циклов наработки).

Исследование микротвердости показало, что зубки их твердого сплава ВК-10 имеют изначально более высокую твердость ~1500 кгс/мм², и в процессе наработки они менее склонны к наклепу. Зубки из твердого сплава ВК-16 более пластичны, имеют начальную микротвердость менее 1000 кгс/мм² и почти во всех случаях отмечается некоторый рост микротвердости в процессе повреждаемости зубков до 1300...1600 кгс/мм². Относительно низкая начальная твердость зубков из сплава ВК-16 может быть объяснена более высоким содержанием в них пластичной фазы – кобальта. Причиной повышения твердости этих зубков может служить как наклеп кобальта, так и изменение в локальных участках материала их вершин в процессе наработки начального соотношения пластичной и твердой фазы, с образованием зон повышенной и пониженной твердости, о чем свидетельствует разброс экспериментальных данных, полученных на различных участках поверхности зубков. В результате испытаний можно констатировать, что ни начальные, ни конечные значения микротвердости, ни кинетика изменения этого параметра не коррелируют с долговечностью материала зубков. Поэтому микротвердость сама по себе не является адекватной характеристикой поврежденного состояния материала. Более показательна, получаемая на основе оценки микротвердости и энергии активации кинетическая характеристика – структурно-чувствительный коэффициент γ , который в процессе наработки твердосплавных зубков возрастает от 0,06..0,09 до 0,15.

Расчетные методы прогнозирования состояния зубков могут быть построены на базе кинетической модели, приведенной в [1], полученной при использовании структурно-энергетического подхода к анализу процесса повреждаемости и разрушения конструкционных материалов. Обобщенная расчетная модель повышения мольной внутренней энергии металлов и сплавов имеет вид

$$\Delta u = \Delta l + \Delta a = T\Delta s + \Delta e_{\text{упр}} + \Delta e_{\text{нл}}. \quad (1)$$

Условием разрушения является

$$\Delta u = u_0^*. \quad (2)$$

Для возможности ее использования при анализе результатов ударных циклических испытаний зубков необходимо осуществить идентификацию и привязку параметров модели, а именно связанную энергию $\Delta l = T\Delta s$, энергию упругой $\Delta e_{упр}$ и пластической $\Delta e_{пл}$ деформаций к режимам динамических испытаний. При этом удобно пользоваться цикловые приращениями мольных энергий.

Цикловая связанная энергия Δl_u может быть определена с учетом абсолютной температуры T , числа циклов наработки N_u и длительности ударного взаимодействия t_y (с) за цикл по формуле

$$\Delta l_u = RT \ln\left(\frac{t_u N_u}{\tau_0}\right), \text{ кДж/моль} \quad (3)$$

Исследования показали, что существенного разогрева зубков при испытаниях не происходит. Разница в начальных и конечных температурах не превышает нескольких градусов. Это позволяет считать данный процесс изотермическим и не учитывать в уравнениях энергетического баланса изменение внутренней энергии материала за счет теплопередачи. Поэтому в выражении (2.3) будем использовать среднюю температуру при испытаниях, равную комнатной $T \approx 293\text{К}$.

Цикловая энергия упругой деформации зубков $\Delta e_{u\text{упр}}$ (кДж/моль), в теории сопротивления материалов определяемая как потенциальная энергия, не накапливается в материале (т.е. равна нулю между ударами) и поэтому не зависит от N_u . В момент удара, с учетом размерности величин V_m (мм³/моль), σ_y (кгс/мм²), E (МПа) она составляет [2]

$$\Delta e_{u\text{упр}} = \frac{V_m \sigma_y^2}{2E} 10^{-4} = \frac{V_m F_y^2}{2ES_y^2} 10^{-4}, \quad (4)$$

Мольный объем V_m твердых сплавов находится из процентного содержания в них основных компонентов: углерода, вольфрама и кобальта, мольные объемы которых составляют соответственно 3420 мм³/моль, 9530 мм³/моль и 6620 мм³/моль. Для твердых сплавов можно принять $V_m \approx 6,5 \cdot \text{мм}^3/\text{моль}$.

Для оценки напряжения в зубке при ударе σ_y учтем, что при ударных воздейст-

виях на эюре нагружения можно обнаружить кратковременные динамические скачкообразные всплески с амплитудой F_y (рис. 4). Появление этих выбросов обусловлено гашением, в результате ударного взаимодействия поверхностей, инерционных сил, возникающих в телах при резком торможении.

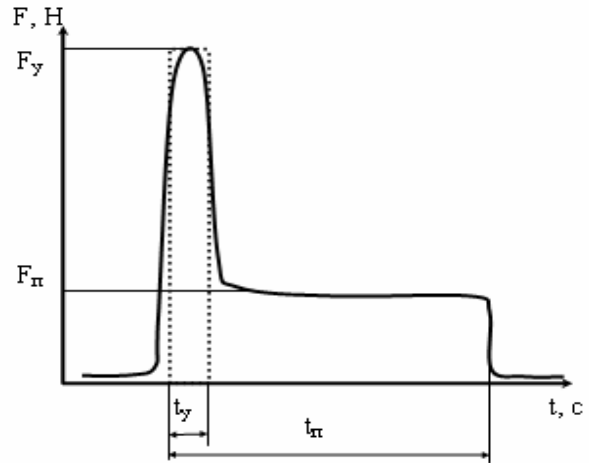


Рис. 4. Эюра нагружения при циклических ударных воздействиях.

Энергия удара, рассеиваемая в течение времени t_y , равна кинетической энергии $E_k = mv^2/2$ (где m и v - соответственно масса и скорость перемещения) подвижной части установки, накопленной к моменту удара. Сближение поверхностей зубка и плиты при испытаниях происходит под действием постоянной силы F_n , создаваемой на штоке гидроцилиндра давлением гидросистемы установки. После удара следует прижатие зубка к плите в течение времени t_n со средней силой F_n .

Давление, действующее на зубки при испытаниях, сильно зависит от их типоразмера и формы вершины. Даже при $F_y = \text{const}$ σ_y для разных зубков может существенно различаться. Для перехода от силы F_y (кгс) к давлению σ_y (кгс/мм²) необходимо определить площадь контакта зубка с плитой в момент удара S_y (мм²). Однако разрушение материалов происходит не под действием критических нагрузок, а под действием пропорциональных им величин напряжений при ударе.

Приращение внутренней энергии за счет мольной работы, затраченной на пла-

стическую деформацию $\Delta e_{nл}$ зубков можно оценить при упругопластических напряжениях выше предела пропорциональности как площадь под кривой «напряжение-деформация», при упругих напряжениях – как площадь петли гистерезиса (рис. 5). В первом случае будет действовать механизм малоциклового усталости, во втором – многоциклового. В практике испытаний зубков в ОАО «Волгабурмаш» средняя база ударных испытаний составляет около 4000...5000 циклов, что соответствует режиму малоциклового испытания. При этом ударная нагрузка F_y заведомо превышает предел пропорциональности, и затраченную работу можно оценить как

$$\Delta e_{nл} = 10^{-5} \varepsilon_{ц} \sigma_y N_{ц} V_m k_3 \quad (5)$$

где $\varepsilon_{ц}$ - средняя цикловая относительная деформация зубка за один удар. Произведение $\varepsilon_{ц} N_{ц}$ составляет суммарную пластическую деформацию зубка.

Работу пластической деформации можно представить как площадь прямоугольника, показанного пунктиром на рис. 5, умноженную на некоторый коэффициент заполнения диаграммы k_3 . С учетом упругопластического характера ударного нагружения примем $k_3 \approx 1$. Надо отметить, что в процессе циклической наработки возможен постепенный переход от упругопластической деформации зубков к чисто упругой, без существенного изменения значения средней цикловой работы пластической деформации. В этом случае после определенного числа циклов возможно резкое снижение скорости пластической деформации, но накопление внутренней энергии продолжит сохранять линейную зависимость от числа циклов наработки. Следует также отметить, что до начала наработки на стенде материал имеет исходную поврежденность, что можно учесть дополнительным слагаемым $\Delta e_{nл}$, которую можно определить как разность между начальным значением энергии активации пластической деформации материала и минимальным начальным значением энергии активации непроработанных образцов данной марки сплава.

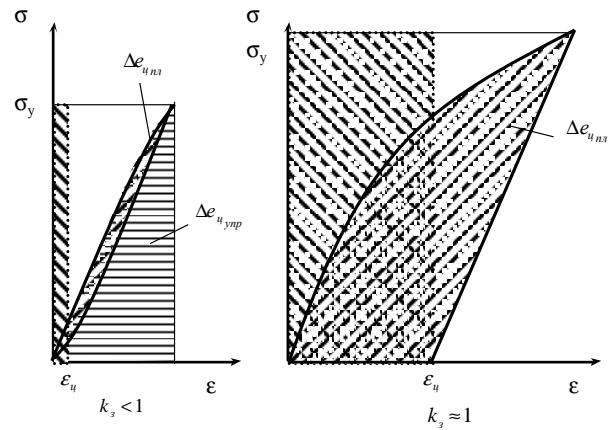


Рис. 5. Иллюстрация к оценке затраченной работы на пластическую деформацию материала.

Энергию активации разрушения u_0^* можно определить как величину энергии активации пластической деформации твердых сплавов, достигших состояния предразрушения. Практически величину u_0^* можно определять на разрушенных образцах вблизи места излома.

На основе проведенной идентификации получим модель накопления повреждаемости в зубках при ударных циклических испытаниях в виде

$$\Delta u = RT \ln \left(\frac{t_{ц} N_{ц}}{\tau_0} \right) + \frac{V_m F_y^2}{2 E S_y^2} 10^{-4} + \quad (6)$$

$$+ 10^{-5} \varepsilon_{ц} \sigma_y N_{ц} V_m + (u_{0н} - u_{0i})$$

Разрушения можно ожидать, когда приращение внутренней энергии достигнет критической величины.

Вклад каждого слагаемого при циклических испытаниях схематично проиллюстрирован на рис. 6. Как видно из рисунка, основной вклад в процесс разрушения вносит третье (деформационное) слагаемое, которое обуславливает постоянное, близкое к линейному, цикловое приращение внутренней энергии материала. За счет первого и третьего слагаемого в (6) можно утверждать, что существует некоторое конечное число $N_{ц}$, при котором условие разрушения (2) будет выполнено.

По результатам проведенных в предыдущем разделе экспериментов можно осуществить идентификацию обобщенной модели повреждаемости и разрушения конструкционных материалов. Необходимые данные

были собраны и систематизированы в таблице 1.

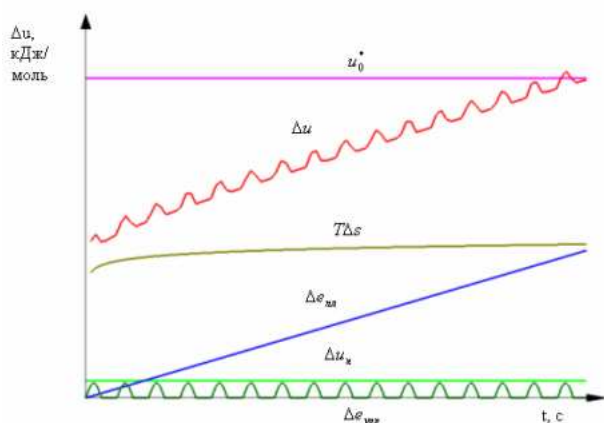


Рис. 6. Схема накопления энергии повреждаемости в материалах

При составлении моделей повреждаемости было учтено, что в выбранной системе размерностей значение универсальной газовой постоянной составляет $R = 0.008314$ кДж/моль·К, температура образцов

в процессе наработки на стенде существенно не изменялась и составляла $T \approx 293\text{K}$ (20°C), значение постоянной времени было принято $\tau = 10^{-12}$ с, начальная запасенная энергия пластической деформации для всех твердых сплавов на основании анализа экспериментальных данных была принята равной $U_{из} = 60$ кДж/моль, среднее локальное давление в зоне вершины зубков при испытаниях составляло $\sigma = 600$ кгс/мм², анализ эпюр нагружения показал, что длительность ударной динамической нагрузки составляет около 0,001 с при длительности одного цикла $t_{ц} \approx 0,25$ с, что соответствует частоте ударов ~ 4 Гц. Расчетный молярный объем для сплава ВК-10 составляет ~ 10500 мм³/моль, для сплава ВК-16 – 10800 мм³/моль.

Таблица 1. Данные усталостных испытаний твердосплавных зубков

| Типоразмер зубка | Марка твердого сплава | № образца | Исходная энергия активации U_n , кДж/моль | Энергия активации разрушения, кДж/моль | Средняя пластическая деформация зубка за цикл испытаний ϵ_4 , % |
|------------------|-----------------------|-----------|---------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| R4704 | ВК-10 | 1 | 108 | 250 | 0,02500 |
| | | 2 | 141 | | 0,00052 |
| | | 3 | 88 | | 0,00310 |
| | | 4 | 138 | | 0,00050 |
| | | 5 | 91 | | 0,11620 |
| R0073 | ВК-16 | 1 | 88 | 230 | 0,00388 |
| | | 2 | 99 | | 0,12540 |
| | | 3 | 91 | | 0,00340 |
| | | 4 | 68 | | 0,07719 |
| | | 5 | 66 | | 0,00170 |

Приведенные в таблице экспериментальные данные подставлялись в кинетическую модель повреждаемости. Полученные частные кинетические модели повреждаемости и построенные по ним расчетные кривые для зубков типоразмеров R4704 (сплав ВК 10) и R0073 (сплав ВК 16) приведены соответственно на рис. 2 и 3. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало их хорошее соответствие, что

подтверждает возможность применения для описания повреждаемости твердых сплавов приведенной кинетической модели.

Список литературы

1. Патент №2166745 от 2001.05.10, G01N3/56. Способ оценки энергии активации разрушения материала поверхностного слоя, деформированного трением // Д.Г. Громаковский, И.Д. Ибатуллин И.Д. и др.

KINETICS OF FATIGUE FAILURE OF HARD ALLOYS

© 2006 N.S. Nassif, I.D. Ibatullin

In the paper results of an experimental researching the kinetics of fatigue failure of hard alloy teeth of chisels are described at cyclic shock influence. It is shown, that kinetics of damaging the teeth may be described by calculation models, received on the basis of structure-energetic theory.