

УДК 622.24.053:531.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕНИЙ В НИППЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ ПРИ ВРАЩАТЕЛЬНО-УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Л.А. Саруев, А.В. Шадрин, А.Л. Саруев

Томский политехнический университет

E-mail: lasaruev@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований динамических процессов в ниппельных соединениях бурильных труб. Установлены закономерности изменения нормальных и касательных напряжений в элементах резьбовых соединений.

Ключевые слова:

Ниппельное соединение, силовой импульс, динамическая нагрузка, экспериментальные исследования, нормальное и касательное напряжения.

Key words:

Nipple joint, power pulse, dynamic load, experimental research, direct and tangential stresses.

Суммарные нагрузки, действующие в соединении при вращательно-ударном нагружении, складываются из нагрузок, вызванных действием усилия подачи бурильной колонны на забой скважины, крутящего момента и нагрузок, возникающих при прохождении продольной волны. Повышение долговечности резьбовых соединений бурильных труб в полной мере может быть реализовано лишь на основе объективной всесторонней оценки этих нагрузок, а также напряжений, которые испытывают отдельные элементы соединений. Такая оценка особенно актуальна в связи с резко возросшими за последние годы силовыми параметрами буровых агрегатов.

В работе проведена экспериментальная оценка напряжений для конструкции нового ниппельного резьбового соединения бурильных труб, полностью скрытого внутри последних [1].

Разработанная ранее методика исследования силовых импульсов в бурильной колонне и математическая обработка экспериментальных данных напряжений в бурильных трубах приведены в монографии [2].

Прохождение силового импульса через соединение вызывает последовательное снятие нагрузки в контактах витков круглой резьбы K_1 , K_2 , K_3 и т. д. (рис. 1).

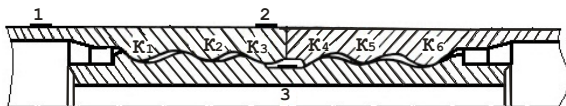


Рис. 1. Схема наклейки датчиков

При этом силовой импульс раскладывается на изменение сил, действующих на трубу и на соединительный элемент (ниппель). Сумма абсолютного изменения этих сил равна силе импульса $F_{уд} = F_1 + F_2$ (рис. 2), причем $F_{уд}$ представляет значение силы импульса в трубе до резьбовой части, F_1 — у торца трубы, F_2 — в средней части ниппеля. Деформация буровой трубы увеличивается на величину $\Delta\epsilon_1$, а деформация ниппеля уменьшается на эту же величину $\Delta\epsilon_2 = \Delta\epsilon_1 = \Delta\epsilon$ относительно первоначальной

деформации от действия крутящего момента. Увеличение деформации резьбовой части буровой трубы и ниппеля в процессе довинчивания и действия сил неупругого сопротивления представлены величинами $\Delta\epsilon_{тр}$ и $\Delta\epsilon_n$ при усилии затяжки соединения Q_3 .

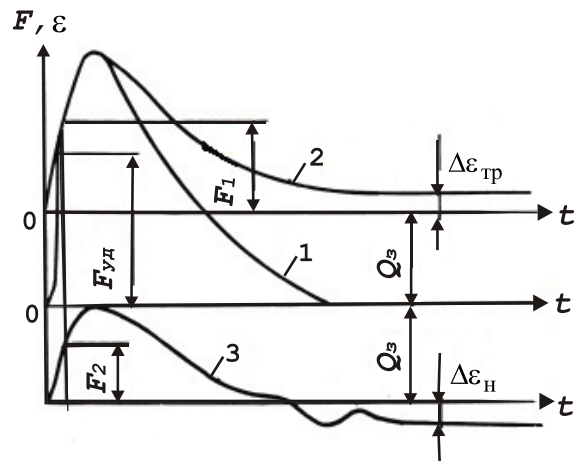


Рис. 2. Осциллограммы силовых импульсов в ниппельном соединении буровых труб

Оценка амплитудных значений волн нормальных напряжений

При разработке конструкций деталей резьбовых соединительных узлов буровых труб необходимо знать, как влияют элементы конструкции соединения на величину и характер изменения напряжений во времени при ударных нагрузках. Одним из таких конструктивных факторов является, в частности, буртик, расположенный в средней части ниппеля. Буртик выполняется с той целью, чтобы зафиксировать соединительный элемент при сборке колонны труб и бурении в определенном положении на резьбовом участке трубы. Но этот буртик, как показали эксперименты, вносит существенное влияние на величину и характер волн напряжений в деталях соединительного узла при прохождении через него силового импульса.

Прежде чем рассмотреть волновые процессы, протекающие в элементах резьбовых соединений, перенесем начало координат (рис. 3) из точки $0'$ в точку 0. Тогда отклонение амплитуды напряжения в ниппеле выше нулевой линии — это напряжение сжатия, а ниже нулевой линии — это напряжение растяжения. Расстояние от точки $0'$ до 0 соответствует максимальному статическому напряжению растяжения σ_1 ниппеля. Амплитуда σ_2 соответствует максимальному напряжению растяжения после прохождения силового импульса сжатия через соединительный узел. На рис. 3, а, амплитуда σ_3 соответствует максимальному напряжению сжатия ниппеля. Расстояние между вершинами над нулевой линией и под нулевой линией назовем размахом колебаний напряжения — σ_4 . Обозначим σ_1' , σ_2' и σ_3' — соответственно максимальные статические напряжения сжатия в сечении резьбы буровой трубы, амплитуду максимальных напряжений сжатия в сечении резьбы трубы при продольном ударе и минимальных напряжений сжатия в сечении резьбы трубы при прохождении силового импульса.

Рассмотрим волновые процессы, протекающие в элементах ниппельного соединения с круглым профилем резьбы.

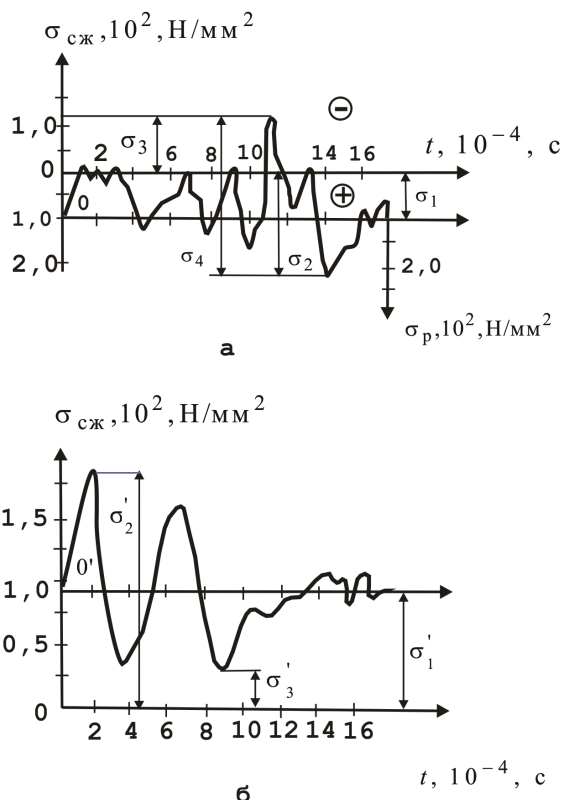


Рис. 3. Осциллограммы волн напряжений в элементах ниппельного соединения: а) ниппель (имеет в средней части буртик); б) буровая труба

Рассматриваемое сечение ниппеля (датчик № 3, рис. 1) разгружается от напряжений растяжения при прохождении силового импульса сжатия примерно через $1 \cdot 10^{-4}$ с. В промежутке от $1 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-4}$ с наблюдаются колебания напряжения в нип-

пеле относительно нулевой линии. Затем ниппель начинает возвращаться в исходное статическое напряженное состояние. При движении силового импульса сжатия по трубе с ниппельными соединениями создается импульсное давление на буртик ниппеля, в результате чего последний перемещается в направлении движения волны деформации со скоростью движения соответствующего сечения трубы. После прохождения волны деформации сжатия через соединительный узел сечения трубы и ниппеля возвращаются в исходное статическое напряженное состояние.

В результате различных по направлению перемещений сечений ниппеля и сечений труб в месте резьбы от внутренних статических сил, а также перемещения стержня ниппеля в направлении движения силового импульса сжатия происходит соударение рабочих сторон витков ниппеля и труб, вследствие чего в резьбовой части труб и ниппеля возникают волны деформаций сжатия. При встречном движении волн сжатия от конца ниппеля последний сжимается, а, следовательно, сжимается резьбовая часть соответствующей трубы. Амплитуда напряжения сжатия в рассматриваемом сечении буровой трубы приближается к величине амплитуды напряжения сжатия первоначального импульса и становится равной $1,6 \cdot 10^2$ Н/мм² (рис. 3, б). На осциллограммах (рис. 3) этот момент соответствует длительности $6,3 \cdot 10^{-4}$ с.

Интерференция продольных волн приводит к резкому изменению амплитуды напряжения в ниппеле. Колебания сечения ниппеля становятся знакопеременными. Через $14,4 \cdot 10^{-4}$ с происходит резкое растяжение ниппеля. В этот момент амплитуда напряжения растяжения в наименьшем сечении резьбы ниппеля достигала $2,15 \cdot 10^2$ Н/мм² (рис. 3, а).

До удара амплитуда максимальных статических напряжений сжатия в резьбе буровой трубы с ниппельными соединениями при крутящем моменте 196 Н·м и усилия подачи $1,13 \cdot 10^4$ Н составляла $0,92 \cdot 10^2$ Н/мм² (рис. 4, а, кривая б), а при продольном ударе средняя амплитуда напряжения сжатия была равна $1,88 \cdot 10^2$ Н/мм² (рис. 4, а, кривая в), т. е. при ударе амплитуда напряжения сжатия в трубе с ниппельными соединениями увеличивалась в 2 раза.

Максимальные статические напряжения растяжения до удара в ниппеле были равны $1,0 \cdot 10^2$ Н/мм², а при продольном ударе составляли $2,15 \cdot 10^2$ Н/мм² (рис. 3, а), то есть напряжения растяжения в ниппеле увеличивались в 2,15 раза. Следует также отметить, что элементы конструкции ниппельного соединения имеют различные циклы нагружения. Так, резьбовая часть трубы работает по знакопостоянному, а ниппель по знакопеременному асимметричному циклу нагружения (рис. 4).

В случае, если в средней части ниппеля вместо буртика выполнена проточка по окружности впадины резьбы, то в элементах ниппельного соединения напряжения растяжения в ниппеле после прохождения силового импульса сжатия увеличива-

лись лишь до $1,15 \cdot 10^2$ Н/мм² (опытный коэффициент был определен по осциллограммам силовых импульсов), т. е. амплитуда напряжения растяжения в сечении резьбы ниппеля увеличивалась в 1,15 раза по сравнению с максимальными статическими напряжениями растяжения (рис. 5, а).

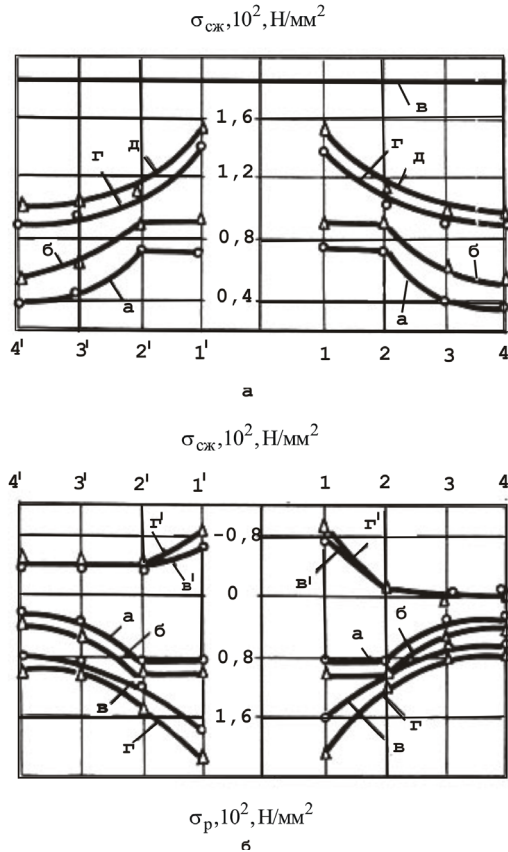


Рис. 4. Зависимости, характеризующие распределение нормальных напряжений по длине элементов ниппельного соединения с круглым профилем резьбы при статических и ударных нагрузках: а) труба (кружки), крутящий момент $T=98,1$ Н·м; б) ниппель (треугольники), $T=196$ Н·м; 1–4 – номера тензодатчиков, расположенных на ниппеле через 10 мм

При сравнении двух конструкций ниппельного соединения по напряжениям можно заметить, что напряжения растяжения в ниппеле второй конструкции меньше примерно в 1,8 раза.

Также было установлено, что амплитуда напряжения растяжения в наименьшем сечении резьбы ниппеля при продольном ударе в 1,6 раза меньше, чем амплитуда напряжения сжатия в сечении резьбы трубы (рис. 5, б).

Напряжения изгиба в элементах ниппельных соединений буровых труб

При несоосном расположении торцевых поверхностей бойка и хвостовика колонны буровых труб во время удара возникают напряжения изгиба. Нецентральный удар происходит из-за технических недостатков, связанных с неточностью изготовления торцов хвостовика и поршня, с износом поршневой пары, хвостовика и зажимного па-

трона, а также рядом других причин, вызывающих кинематические зазоры в сопряжении двух деталей.

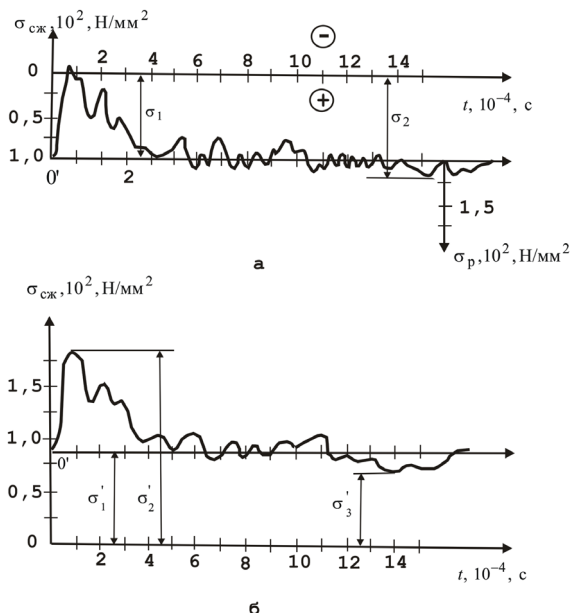


Рис. 5. Осциллограммы волн напряжений в элементах ниппельного соединения: а) ниппель (не имеет в средней части буртика); б) буровая труба

Нецентральный удар вызывает на одной из сторон трубы растягивающие, а на другой – сжимающие нагрузки. При вращении колонны буровых труб максимальные растягивающие напряжения могут возникать в самых разных точках по наружной поверхности труб и соединительных элементов. Эти напряжения изгиба знакопеременного характера снижают долговечность буровых труб и резьбовых соединений, поэтому разрушения усталостного характера чаще всего начинаются с поверхности труб и соединяющих их элементов. Известно, что напряжения изгиба оказываются наиболее опасными в начале колонны буровых труб. Последнее объясняется тем, что импульсы изгиба распространяются медленнее импульсов сжатия, соответственно скорость их распространения в материале буровых труб составляет 3000 и 5100 м/с. Это значит, что импульс изгиба действует одновременно с импульсом сжатия на одни и те же сечения труб и их соединений лишь на первых метрах колонны буровых труб.

Осциллограммы изгибных импульсов (рис. 6) в указанных выше соединительных элементах буровых труб сняты на расстоянии 1700 мм от торца хвостовика бурового инструмента при крутящем моменте 196 Н·м.

На осциллограммах $\sigma_{из.1}$ и $\sigma_{из.2}$ – максимальные значения напряжений изгиба, а $\sigma_{из.3}$ – размах колебаний напряжений изгиба.

К началу прихода очередного силового импульса изгиба в соединительном узле происходит довинчивание буровых труб в процессе нанесения ударов и действия постоянного крутящего момен-

та, в результате чего увеличиваются напряжения сжатия-растяжения в элементах резьбовых соединений. При прохождении по резьбовой части бурильной трубы импульса изгиба в ниппеле также возникают напряжения изгиба вследствие того, что последние частично или полностью разгружаются от растягивающих усилий лишь по одной стороне.

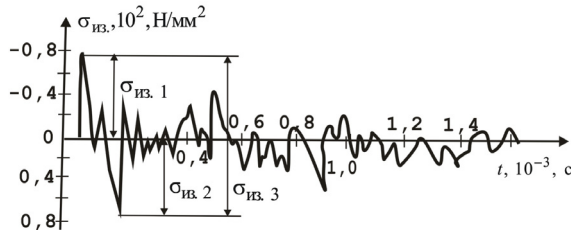


Рис. 6. Осциллограммы волн напряжений изгиба в ниппеле с круглым профилем резьбы

Установлено, что напряжения изгиба в ниппеле и трубах возникают также от продольной волны напряжения сжатия, т. к. виток резьбы ниппеля разгружается силовым импульсом сжатия от осевой растягивающей нагрузки не одновременно по всей длине контакта винтовой линии. Этот вывод подтверждается осциллограммами, снятыми в различных точках по длине колонны труб.

Опытами установлено, что усилие подачи практически не влияет на величину напряжения изгиба в элементах резьбовых соединений труб при нецентральной ударе бойка по хвостовику.

Усилие подачи влияет лишь на величину статических напряжений изгиба, возникающих в результате потери устойчивости колонны в скважине, увеличения числа и сокращения длины полуволн изгиба колонны бурильных труб.

Опытами также установлено, что напряжения изгиба в ниппеле с повышением скорости удара бойка по колонне труб линейно увеличиваются. Экспериментальные значения напряжения изгиба хорошо согласуются с расчетными, полученными по формуле Такаока [3]:

$$\sigma_{изб.} = (0,26...0,42) \frac{eV_{уд}E}{a_{0изб.} \sqrt{\frac{J}{S_{тр.}}}},$$

где e — величина эксцентриситета; J — момент инерции поперечного сечения бурильной трубы; $V_{уд}$ — предударная скорость бойка; $a_{0изб.}$ — скорость распространения изгибной волны в материале труб; $S_{тр.}$ — площадь поперечного сечения труб; E — модуль упругости.

Следует заметить, что при расчете величины напряжений изгиба в ниппелях необходимо принимать предел опытного коэффициента в формуле, предложенной Токаока, от 0,12 до 0,14.

Касательные напряжения в соединительных элементах труб

При расчете на прочность соединений бурильных труб важно знать, как изменяются касательные

напряжения в элементах соединений при одновременном действии крутящего момента, усилия подачи и силовых импульсов.

Опытные данные были получены при значениях крутящих моментов, равных 49; 98,1; 147; 196; 245 Н·м, осевых усилиях подачи $0,613 \cdot 10^4$ и $1,13 \cdot 10^4$ Н, давлении воздуха в подводящей магистрали к ударному механизму бурильной головки, равном 0,49 МПа.

Как видно из рис. 7, максимальные касательные напряжения τ при чистом кручении (зависимость 1), кручении ниппеля в рабочем положении (зависимость 2), кручении ниппеля при одновременном действии крутящего момента и усилия подачи (зависимости 3 и 4), кручении ниппеля при действии крутящего момента, усилия подачи $F_{ос}$ и ударной нагрузки (зависимости 5 и 6), изменялись линейно (зависимости 3 и 5 при $F_{ос}=0,613 \cdot 10^4$ Н, а зависимости 4 и 6 при $F_{ос}=1,13 \cdot 10^4$ Н).

Исследованиями установлено, что с увеличением усилия подачи в ниппеле касательные напряжения уменьшаются. Так, при усилиии подачи $1,13 \cdot 10^4$ Н касательные напряжения в ниппеле уменьшаются на 30 % (рис. 7, зависимость 4) по сравнению с зависимостью 2. Это объясняется тем, что с увеличением усилия подачи происходит перераспределение напряжений в элементах соединительных узлов. В бурильных трубах нормальные напряжения увеличиваются, а в ниппеле уменьшаются, следовательно, и касательные напряжения в ниппеле уменьшаются за счет снижения сил трения в резьбе соединительного узла.

Опытами показано, что при продольном ударе бойка по трубе касательные напряжения в ниппеле также уменьшаются. При усилиии подачи $1,13 \cdot 10^4$ Н касательные напряжения в ниппеле уменьшаются на 65...70 % (рис. 7, зависимости 6 и 2). Следует заметить, что усилие подачи влияет на изменение касательных напряжений в сечении ниппеля как при действии только крутящего момента, так и при действии крутящего момента и ударной нагрузки.

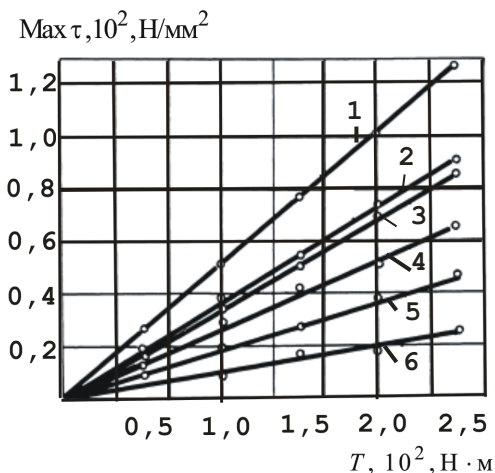


Рис. 7. Зависимости касательных напряжений, полученных в ниппеле от крутящего момента T и нанесения ударов по колонне труб вращательно-ударным механизмом БГА

Уменьшение касательных напряжений в ниппеле при нанесении удара бойка по бурильной трубе объясняется тем, что при прохождении силового импульса сжатия через соединительный узел, витки ниппеля разгружаются от статической осевой силы. В этот момент в сечениях ниппеля касательные напряжения уменьшаются на определенную величину. В рассматриваемый момент времени происходит довинчивание труб, в результате чего увеличиваются статические контактные нагрузки в торцах соединяемых труб и доля передаваемого через них внешнего крутящего момента. Поэтому внешний крутящий момент той же самой величины после прохождения силового импульса сжатия через соединительный узел не может довести статические касательные напряжения в ниппеле до первоначальной величины. В резьбовой части бурильной трубы касательные напряжения увеличиваются за счет увеличения момента трения, возникающего на торцах труб от дополнительной осевой силы, вызванной действием ударной нагрузки и внешнего крутящего момента, то есть довинчиванием соединения.

На рис. 8, а, показаны осциллограммы касательных напряжений в ниппеле, возникающих при одиночных продольных ударах бойка по трубе. Эти осциллограммы записаны при различных скоростях удара и крутящем моменте, равном 196 Н·м. Видно, что сечения ниппеля разгружаются от статических касательных напряжений в момент прохождения силового импульса сжатия через соединительный узел при различных скоростях удара бойка на различную величину.

На рис. 8, б, показаны осциллограммы касательных напряжений в ниппеле, возникающих при нанесении серии единичных ударов бойка по трубе. При нанесении серии ударов бойком по бурильной трубе с постоянной скоростью статические касательные напряжения уменьшаются. Примерно через 5 ударов с тензорезисторов поступает сигнал на экран электронного осциллографа в виде прямой линии (рис. 8, б). Это говорит о том, что ниппель при прохождении нескольких силовых импульсов сжатия через соединительный узел разгрузился от статических касательных напряжений на определенную величину, в данном случае касательные напряжения снизились в 3 раза.

На основе анализа литературных данных и результатов исследований напряжений в элементах резьбовых соединений бурильных труб при одновременном нагружении их силовыми импульсами, крутящим моментом и осевым усилием подачи, была разработана методика расчета, которая позволяет уже на стадии проектирования бурильной колонны определить величину максимальных напряжений в элементах ниппельных соединений труб при вращательно-ударном способе бурения в зависимости от энергетических параметров ударного узла, крутящего момента и усилия подачи на забой, создаваемых бурильной установкой [4].

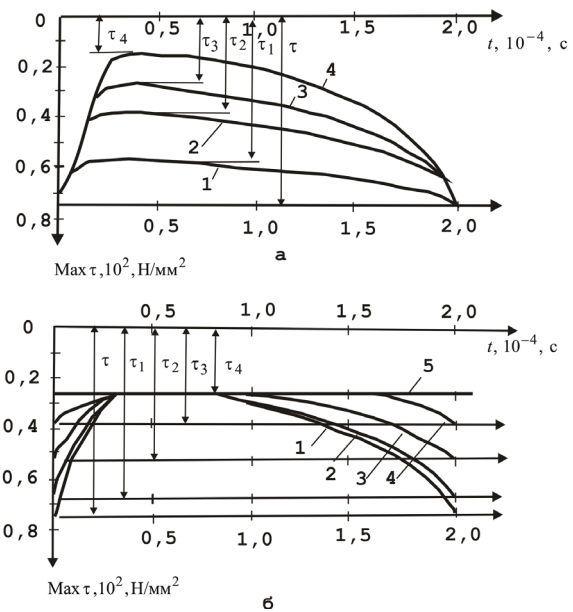


Рис. 8. Осциллограммы касательных напряжений, возникающих в ниппеле при одновременном действии постоянного крутящего момента 196 Н·м и нанесении ударов: а) одиночных: 1, 2, 3 и 4 – при предударной скорости бойка 2,8; 3,8; 5,1 и 5,9 м/с; б) серия единичных ударов при одной предударной скорости бойка 5,1 м/с

Выводы

1. Исследованы изменения нормальных и касательных напряжений в элементах ниппельных соединений при вращательно-ударном нагружении бурильной колонны.
2. Установлено, что при продольном ударе по колонне бурильных труб циклы нагружения элементов резьбовых соединений определяются особенностями их конструкций. Наличие буртика в средней части ниппеля приводит к увеличению напряжений в элементах соединений при продольном ударе.
3. Волны напряжений изгиба в бурильных трубах и ниппелях возникают как за счет нецентрального удара бойка по хвостовику, так и за счет продольной волны сжатия при прохождении ее через резьбовое соединение труб. Напряжения изгиба в ниппеле линейно увеличиваются с повышением скорости удара бойка и практически не зависят от усилия подачи и крутящего момента.
4. При значительном крутящем моменте расчет максимальных напряжений изгиба в соединительных элементах бурильных труб можно вести по формуле Токаока для цельных труб, изменив опытный коэффициент.
5. При одновременном действии крутящего момента, осевого усилия подачи и ударной осевой нагрузки статические касательные напряжения в ниппеле значительно уменьшаются по сравнению с напряжениями, вызванными действием только крутящего момента.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта на проведение научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., конкурсы по мероприятию 1.3.1 «Проведение научных исследований молодыми учеными – кандидатами наук».

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта на проведение научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., конкурсы по мероприятию 1.3.1 «Проведение научных исследований молодыми учеными – кандидатами наук».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шадрин А.В., Саруев Л.А., Саруев А.Л., Колодин А.П. Разработка новой конструкции резьбового соединения буровых труб // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 157–160.
2. Шадрин А.В., Саруев Л.А. Закономерности распространения силовых импульсов по колонне труб к породоразрушающему инструменту. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 115 с.
3. Шадрин А.В., Саруев Л.А., Саруев А.Л. Динамические процессы в колонне труб при вращательно-ударном бурении скважин малого диаметра из подземных горных выработок. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 175 с.
4. Шадрин А.В., Саруев Л.А., Саруев А.Л. Разработка методики расчета максимальных напряжений в элементах резьбовых соединений штанг при вращательно-ударном бурении скважин малого диаметра // Вестник ЗСО РАЕН. – 2010. – № 12. – С. 11–15.

Поступила 04.06.2010 г.

УДК 620.621.669.762.763

ПОРОШКОВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ «МЕТАЛЛ–НЕМЕТАЛЛ» ДЛЯ ВЗРЫВОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ

А.П. Савицкий, Г.А. Прибытков, М.И. Вагнер, О.П. Кутенков*

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

E-mail: arnold_savitskii@mail.ru

Получены первые результаты по разработке новых металлокерамических материалов из диэлектриков и металлической связи при соотношении объемов компонентов в композитах 1:1. Проведены исследования поведения порошковых смесей при прессовании и спекании. Изучены микроструктуры композитов разных составов и зависимости их объемных изменений от температуры спекания.

Ключевые слова:

Металл, диэлектрик, катод, композит, прессование, спекание, усадка, микроструктура.

Key words:

Metal, dielectric, cathode, composite, compaction, sintering, densification, microstructure.

Введение

Наносекундные импульсные генераторы, а также ускорители электронов на основе таких генераторов в значительной степени перспективны для технологических применений. К настоящему времени российскими и зарубежными исследователями накоплен значительный опыт получения мощных импульсных пучков с использованием холодных твердотельных и плазменных катодов [1, 2]. Однако дальнейшее развитие исследований и технологий, основанных на применении таких пучков, требует повышения их технических параметров, в первую очередь, плотности тока и уменьшения длительности импульса.

В связи с этим создание катодов, имеющих длительный ресурс эксплуатации, которые в процессе работы обладают стабильными эмиссионными свойствами и способны обеспечить высокую плотность тока с короткой длительностью импульса пучка, является весьма актуальной задачей.

При разработке новых типов взрывоэмиссионных катодов выбор материала играет ключевую роль. В последнее время для создания эмиттеров с

качественно новыми свойствами используются композиционные материалы, элементы гетерофазной структуры которых обладают различными электрофизическими свойствами [3]. В этой связи характерной особенностью современных работ в области материаловедения катодных эмиттеров, является использование материалов типа «металл–диэлектрик». К этому типу относятся катоды, которые конструктивно представляют собой пластинку диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью, соединенную с металлом («металл–диэлектрик–металл», или МДМ–катоды) [4]. Катоды второго типа изготавливают из композиционных материалов, спекаемых из смесей порошков металла и диэлектрика («металлокерамические», или МК–катоды). Размер и форма фазовых включений, их объемная доля определяют токовые характеристики и ресурс работы катодов. Так, увеличение числа центров взрывной эмиссии при однородном их распределении по поверхности катода снижает скорость разлета плазмы и эрозию материала катода, резко увеличивая мощность пучка электронов.