

## Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.178.3:539.4:621.773.9

### ЭФФЕКТЫ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПОЛЗУЧЕСТИ В РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

© Н. А. Махутов, В. В. Зацаринный<sup>1</sup>

*Статья поступила 6 мая 2014 г.*

Показана специфика условий нагружения ответственных резьбовых соединений энергетического оборудования. Рассмотрены подходы к определению их напряженно-деформированных состояний, обусловленные перераспределением напряжений и деформаций в витках резьбы при статическом и малоцикловом нагружении. Представлена методика экспериментальных исследований пластических деформаций и деформаций ползучести шпилек при нормальной температуре, позволяющая определить уменьшение затяга в шпильках.

**Ключевые слова:** резьбовое соединение; статическое и циклическое нагружение; упругопластическое деформирование; ползучесть; потеря затяга.

Узлы разъемных соединений современных высоконагруженных конструкций (атомных энергоустановок, летательных аппаратов, сосудов давления) отличаются спецификой конструктивных форм, технологий и методов изготовления, условий эксплуатации и применяемых материалов. Для несущих элементов этих разъемных соединений характерны однократные и повторные местные пластические деформации, приводящие к сложному перераспределению напряжений и деформаций в витках резьбы при нагружении и к накоплению малоцикловых повреждений [1].

При работе резьбовые соединения, кроме силы предварительной затяжки, воспринимают как основные растягивающие нагрузки от осевой силы, температурных деформаций деталей машин, так и сдвигающие и изгибающие нагрузки. Изгибающие нагрузки в резьбовом соединении могут быть вызваны перекосом опорных плоскостей затягиваемых деталей, несоосностью деталей сборки, а также их упругими переменными деформациями в процессе работы. Крутящие нагрузки в резьбовом соединении появляются при его затяжке в результате трения соприкасающихся витков гайки и шпильки.

Развитие деформаций и напряжений от этих нагрузок по мере накопления числа циклов, определяющее напряженно-деформированное состояние резьбовых соединений, зависит от уровня эксплуатационных нагрузок, циклических свойств материалов, максимальной температуры и длительности нагружений в цикле. В тех случаях, когда резьбовые соединения работают при повышенных и высоких температурах,

достаточных для возникновения деформации ползучести, при определении напряженно-деформированных состояний и расчетах прочности необходимо дополнительно учитывать температурно-временные зависимости нагружения [1, 2].

Различные подходы к традиционным методам определения напряженно-деформированных состояний резьбовых и фланцевых соединений и расчетам на статическую и циклическую прочность при постоянных и переменных нагрузках в условиях нормальных, пониженных и повышенных температур изложены, например, в работах [1 – 5].

Обычно используемые в предварительном анализе приближенные методы расчетов по распределению нагрузки между витками резьбы основаны [3 – 5] на построении стержневой модели соединения, в основе которой лежит раздельное рассмотрение деформаций деталей и связей (в данном случае витков резьбы).

Уточненный расчет распределения локальных напряжений в точках шпильки (болта) может быть выполнен численными методами (например, МКЭ) или экспериментальными методами (метод фотоупругости). При этом должны быть учтены растягивающие, изгибные и касательные напряжения в зонах концентрации (в первую очередь в основании первых нагруженных витков резьбы шпильки).

В качестве примера на рис. 1 [2] приведены результаты расчета с применением МКЭ распределения контактных напряжений на рабочих гранях витков и напряжений во впадинах витков. При расчете распределения напряжений в теле шпильки (болта), выполненном после решения контактной задачи, принимали, что резьба изготовлена идеально точно.

<sup>1</sup> Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия; e-mail: v.zatsar@mail.ru



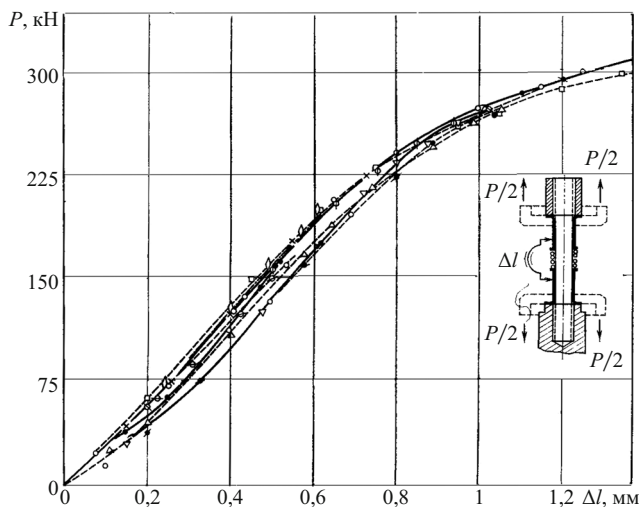


Рис. 3. Начальные участки кривых растяжения моделей шпилек

Результаты экспериментальной оценки деформаций и ползучести  $\epsilon_{\text{полз}}$  шпилек, имеющих место во время выдержек  $\tau$  на различных уровнях максимальных номинальных напряжений  $\sigma_{\text{max}}$  при статическом и циклическом нагружениях и определяющих уменьшение затяга в шпильках, представлены на рис. 4 и 5. Проведенные измерения (при 20 °С) деформаций шпилек во время выдержек при первоначальном затя-

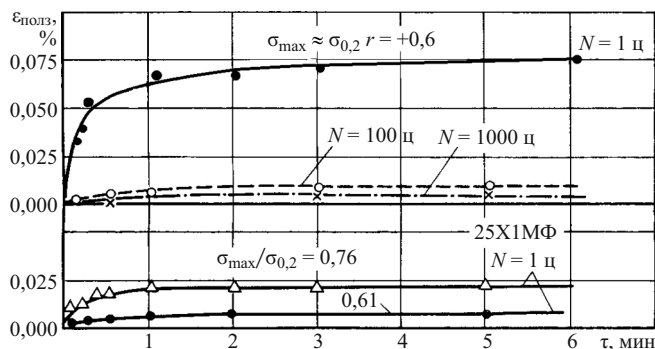


Рис. 4. Изменение деформаций ползучести в моделях шпилек при исходном статическом ( $N = 1$  цикл) и циклическом нагружениях

ге ( $N = 1$ ) показали наличие ползучести, начиная с уровней напряжений примерно  $0,6 \sigma_{0,2}$ . С увеличением номинальных напряжений до примерно  $\sigma_{0,2}$  деформации ползучести возросли за время выдержки 6 мин в 7 – 8 раз, а за время выдержки 100 мин — в 12 раз и составили соответственно 0,075 – 0,08 и 0,12 %.

На рис. 5, а показаны статическая диаграмма шпильки — сила — удлинение — кривая кратковременного статического деформирования ( $\tau_{\text{выд}} = 0$ ) и серия изохронных кривых статической ползучести для различных времен выдержек  $\tau$ , равных 1, 10, 100 мин,

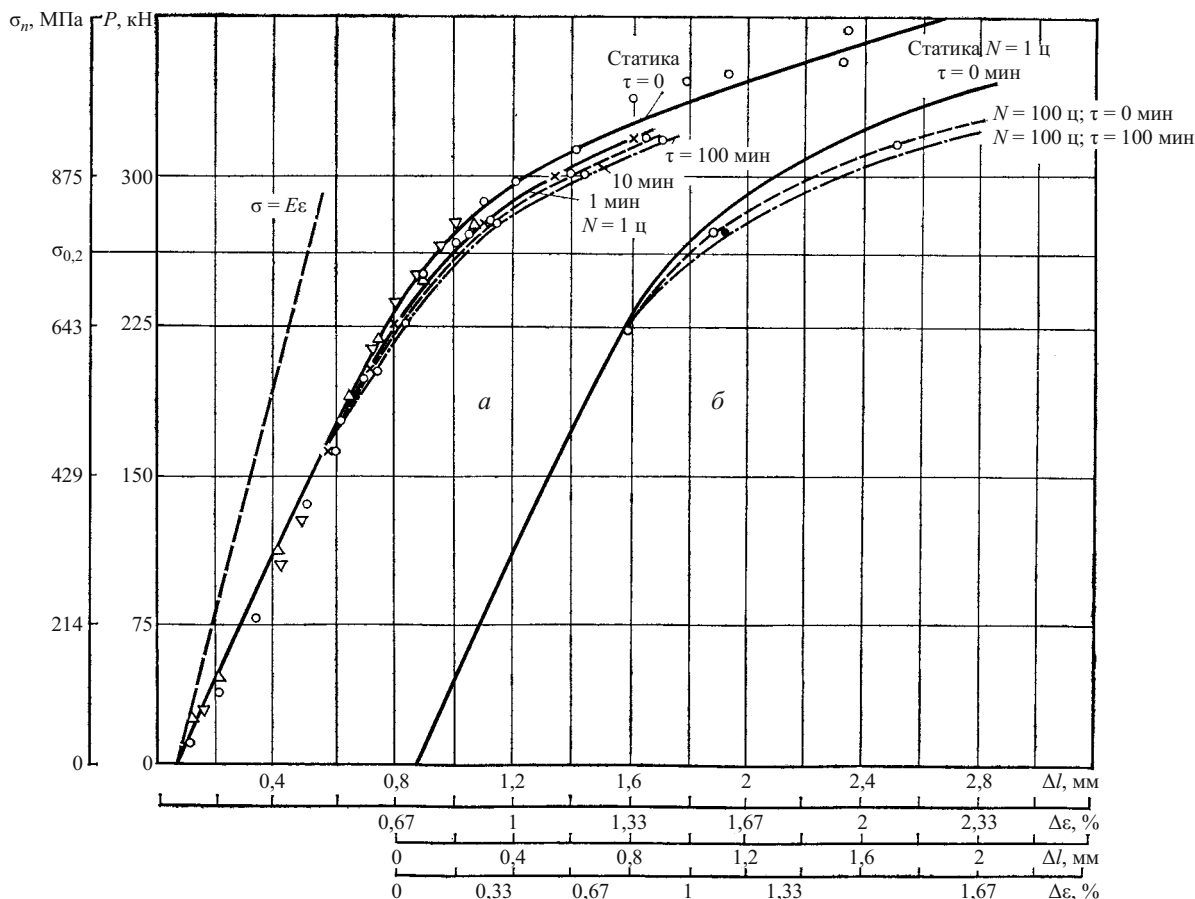


Рис. 5. Изохронные кривые деформирования моделей шпилек при статическом (а) и циклическом (б) нагружениях

при  $N = 1$  цикл. На уровне предела текучести  $\sigma_{0,2}$  релаксация напряжений за время 100 мин составляет примерно 6 % от напряжений первоначального затяга. Следует указать на существенное различие экспериментальных диаграмм растяжения моделей шпилек и диаграмм, полученных расчетом из предположения упругого деформирования шпильки ( $\sigma = E\epsilon$ ). Это различие обусловлено деформацией витков резьбы и зон контакта элементов резьбового соединения.

При циклическом нагружении процессы ползучести и релаксации резко замедляются (см. рис. 4 и 5, б). На рис. 4 показана накопленная во время выдержек деформация ползучести после 100 и 1000 циклов нагружения на уровне максимальных напряжений  $\sigma_{\max} \approx \sigma_{0,2}$ .

После указанных циклов нагружения на данном уровне напряжения деформация ползучести уменьшилась соответственно в 8 и 15 раз по сравнению с первым циклом за одно и то же время нагружения (6 мин).

На рис. 5, б для  $N = 100$  циклов приведены изоциклическая и изохронная кривые циклического деформирования при наличии ползучести во время выдержки 100 мин. Переход к циклическому и временному деформированию дает дополнительную релаксацию напряжений на уровне  $\sigma_{0,2}$  за счет как одностороннего циклического накопления перемещений, так и ползучести (~2 %).

С целью оценки деформационных свойств исследуемых шпилек основного и фланцевого разъемов при циклическом нагружении, а также выявления кинетики этих свойств во время испытаний фиксировали диаграмму деформирования шпильки, при обработке которой, кроме рассмотренной выше деформации ползучести, необходимой для оценки ползучести и релаксации напряжений в шпильке, получили ширину петли  $\delta^{(k)}$ , размах деформации в полуцикле  $\epsilon^{(k)}$ , суммарную накопленную деформацию  $\Sigma \epsilon^{(k)}$  и модуль разгрузки  $g^{(k)}$  (рис. 6).

Результаты обработки петель циклического деформирования шпилек показали, что в течение нескольких десятков полуциклов происходит обмятие всех микронеровностей сопрягаемых деталей и самих витков резьбы. В течение последующего периода деформирования ширина петли  $\delta^{(k)}$  для обоих видов шпилек и двух асимметрий цикла нагружения ( $r = 0$

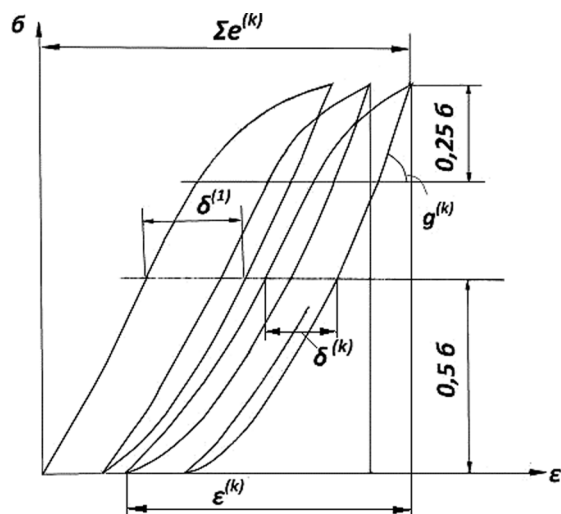


Рис. 6. Схема кинетики деформационных свойств шпилек во время испытаний

и  $r = +0,3$ ), характеризующая необратимую пластическую деформацию в полуцикле остается практически постоянной вплоть до разрушения; перед самым разрушением ширина петли начинает резко возрастать, что связано с развитием трещин. Аналогичный характер изменения с числом полуциклов имеют размахи деформаций  $\epsilon^{(k)}$ .

Из представленных на рис. 3 – 6 данных следует, что основные эффекты нелинейности перемещений в шпильках проявляются при исходном нагружении (выборке зазоров, обмятии микронеровностей, возникновении пластических деформаций во впадинах) при номинальных напряжениях до 0,5 – 0,6 от предела текучести. Это указывает на обоснованность многократной последовательной затяжки шпилек при монтаже. Возникновение нелинейных деформаций при дальнейшем увеличении номинальных напряжений (более 0,8 – 0,9  $\sigma_{0,2}$ ) связано в основном с пластическими деформациями во впадинах резьбы, при этом деформации в последующих циклах нагружения оказываются меньше, чем у гладкого лабораторного образца, что объясняется неоднородностью распределения пластической деформации в шпильке.

Дальнейшее циклическое упругопластическое деформирование шпилек при номинальных напряжениях до предела текучести  $\sigma_{0,2}$  оказывается сравнитель-

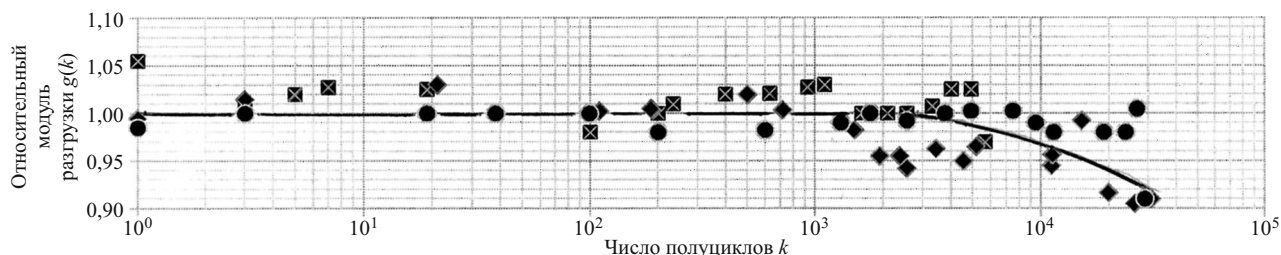


Рис. 7. Изменение относительного модуля разгрузки  $\bar{g}(k)$  при деформировании шпильки из стали 25Х1МФ от числа полуциклов нагружения: ■ —  $r = 0$ ; ● —  $r = +0,3$

но устойчивым в смысле модуля разгрузки  $g^{(k)}$ . На рис. 7 в качестве примера показано сопротивление упругим перемещениям, характеризующее относительным модулем разгрузки  $\bar{g}(k) = g(k_i)/g(k_{20})$  (отношенным к количеству полуциклов  $k = 20$ ); по мере накопления числа циклов оно сохраняется примерно постоянным для моделей из стали 25Х1МФ или несколько снижается (на 5 – 10 %) на стадии образования трещин.

При этом сопротивление упругим и упругопластическим перемещениям до момента образования трещин получается выше, чем при исходном нагружении. Это говорит о сохранении усилий затяжки с учетом этих характеристик деформирования.

Несколько иной характер изменения имеет величина суммарной накопленной пластической деформации  $\Sigma e^{(k)}$ , когда в зависимости от уровня номинальных напряжений происходит одностороннее накопление перемещений. Для шпилек основного разъема при исходных уровнях нагружения, ниже или приближающихся к пределу текучести  $\sigma_{0,2}$ , величина этой деформации практически остается стабильной (и определяется вытяжкой при первых циклах нагружения) или имеет тенденцию к незначительному увеличению. При напряжениях, превышающих предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , величина накопленной деформации шпилек реактора может непрерывно увеличиваться в среднем до 20 %.

Для шпилек фланцевого разъема в этом случае характерно сильное накопление деформаций в течение первых циклов деформирования и непосредственно перед разрушением (после образования трещины); в течение основного процесса деформирования пластические деформации накапливались незначительно. Одностороннее накопление деформаций при нагружении с заданными амплитудами нагрузок при наличии выдержек означает возможность циклического уменьшения усилий затяга в резьбовых соединениях. Ослабление усилий затяга в процессе эксплуатации конструкции может привести к разгерметизации конструкции и раскрытию стыка, а также к увеличению доли переменной составляющей нагрузки, возникновению ударного нагружения шпильки при раскрытии стыка и ее разрушению.

Потеря усилий затяга в шпильках резко усиливается при развитии макротрещин по наиболее нагруженным виткам резьбы. На стадиях статического и циклического нагружения, не связанных с образованием макротрещин, сохраняется достаточная разборность резьбовых соединений.

Основные закономерности распределения усилий по виткам резьбы при однократном нагружении в упругой области рассмотрены в работах [2]. Появление пластических деформации в наиболее нагруженных витках резьбы существенно влияет на перераспределение в них нагрузки. Измерение дефор-

маций, выполненное малогабаритными тензорезисторами, в специальных неглубоких пазах на нарезанной части шпилек, показало, что с переходом от упругой стадии деформирования витков к упругопластической происходит относительная разгрузка (до 20 – 30 %) в зоне первых наиболее напряженных витков. На характер перераспределения усилий по виткам резьбы, находящимся в сопряжении, также влияют протекающие процессы разрушения.

В связи с рассмотренными выше особенностями деформирования и разрушения резьбовых соединений, работающих обычно в широком диапазоне температур, важное значение может иметь также температурный фактор, способствующий возникновению дополнительных деформаций ползучести, снижению усилий предварительного затяга и накоплению длительных статических и циклических повреждений.

Таким образом, вопросы поцикловой и временной кинетики напряженных состояний резьбовых соединений остаются одними из наиболее сложных и требуют дальнейшего исследования. Это связано с выраженными эффектами концентрации напряжений, перераспределения усилий, напряжений и деформаций в наиболее нагруженных зонах резьбы за счет пластичности и ползучести, а также ранним образованием трещин усталости и большим их влиянием на условия нагружения повреждаемых витков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н. А., Воробьев А. З., Гаденин М. М., Зацаринный В. В. и др. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении / Под ред. Н. А. Махутова, А. Н. Романова. — М.: Наука, 1983. — 271 с.
2. Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые и фланцевые соединения. — М.: Машиностроение, 1990. — 368 с.
3. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86. Правила и нормы в атомной энергетике). — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.
4. Прочность и ресурс водо-водяных энергетических реакторов / Под ред. А. Н. Романова. — М.: Наука, 1988. — 311 с.
5. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и технологическая безопасность. В двух частях. — Новосибирск: Наука, 2005. Ч. 1. Критерии прочности и ресурса. — 494 с. Ч. 2. Обоснование ресурса и безопасности. — 610 с.

## REFERENCES

1. Makhutov N. A., Vorob'ev A. Z., Gadenin M. M., Zatsarinnyi V. V. et al. Prochnost' konstruksii pri malotsiklovom nagru-zhenii [The strength of structures under low-cycle loading] / N. A. Makhutov, A. N. Romanov (eds.). — Moscow: Nauka, 1983. — 271 p. [in Russian].
2. Birger I. A., Iosilevich G. B. Rez'bovye i flantsevye soedineniya [Threaded and flanged connections]. — Moscow: Mashinostroe-nie, 1990. — 368 p. [in Russian].
3. Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh énergeticheskikh ustanovok (PNAÉ G-7-002-86. Pravila i normy v atomnoi énergetike) [The norms for calculating the strength of the equipment and pipelines of nuclear power

- plants (PNAE G-7-002–86. Rules and regulations in the nuclear industry)]. — Moscow: Énergoatomizdat, 1989. — 525 p. [in Russian].
4. Prochnost' i resurs vodo-vodyanykh énergeticheskikh reaktorov [Strength and resource of VVER] / A. N. Romanov (ed.). — Moscow: Nauka, 1988. — 311 p. [in Russian].
5. **Makhutov N. A.** Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost' [Structural strength, resources and technogenic safety]. In 2 paats — Novosibirsk: Nauka, 2005. Part 1: Kriterii prochnosti i resursa [Criteria for strength and resource]. — 494 p. Part 2: Obosnovanie resursa i bezopasnosti [Sastification of resource and safety]. — 610 p. [in Russian].

УДК 620.169.1:620.17:621.773.9

## СТАТИЧЕСКАЯ, ДИНАМИЧЕСКАЯ И ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛА ШПИЛЕК КРУПНЫХ ГИДРОАГРЕГАТОВ<sup>1</sup>

© **В. М. Матюнин<sup>2</sup>, Б. М. Орахелашвили<sup>2</sup>, А. Ю. Марченков<sup>2</sup>,  
А. Г. Казанцев<sup>3</sup>, М. Ж. Кахадзе<sup>3</sup>, К. А. Соин<sup>3</sup>**

*Статья поступила 16 декабря 2014 г.*

Исследованы микроструктура и механические свойства металла шпилек (сталь 40Х) М90×4 для крепления крышек крупных гидроагрегатов. Механические свойства определены при статических, динамических и циклических испытаниях образцов, вырезанных из шпильки в продольном и поперечном направлениях и на разном удалении от поверхности. Выявлен характер изменения микроструктуры и механических свойств по поперечному сечению шпильки. Проведены статические и циклические испытания модельных и натурных шпилек вместе с гайками. Определены значения нагрузки и напряжения, при которых происходит цепной срез витков резьбового соединения. Установлено сильное влияние масштабного фактора на долговечность шпилек при циклических испытаниях.

**Ключевые слова:** механические свойства; микроструктура; прочность; динамическая трещиностойкость; долговечность; масштабный эффект.

Крепеж, например, в виде шпилек, болтов, гаек, предназначенный для крепления деталей различных конструкций и машин, занимает важное место в обеспечении их надежной и долговечной эксплуатации. Особую актуальность эта проблема приобрела после случившейся в 2009 г. аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, где при разрушении шпилек была сорвана крышка гидроагрегата № 2. Согласно экспертизе, выполненной ОАО «ЦНИИТМАШ», было установлено, что разрушенные шпильки М80 были изготовлены из углеродистой стали 35, а их излом имел характер усталостного разрушения.

При изготовлении новых 10 гидроагрегатов для Саяно-Шушенской ГЭС для шпилек была выбрана легированная сталь 40Х, а их диаметр увеличен с 80 до 90 мм. Конструктивное отличие новых шпилек состояло не только в больших размерах, но и в наличии сквозного осевого отверстия диаметром 20 мм, предназначенного для контроля их затяга.

В данной работе приведены результаты механических испытаний металла шпилек М90 из стали 40Х при статическом, динамическом и циклическом нагружении. Основное внимание уделено выявлению характера распределения микроструктуры и механических свойств по поперечному сечению шпильки, стендовым испытаниям натурных шпилек на статическую и циклическую прочность, масштабному фактору, влияющему на долговечность и сопротивление шпилек разрушению.

На рис. 1 представлена схема новой шпильки М90×4.

Спектральный анализ показал, что материал шпильки — сталь 40Х, а гайки — сталь 35. Из одной шпильки вырезали заготовки в продольном и поперечном направлениях, а также на разном удалении от ее поверхности. Из заготовок изготавливали образцы для испытаний на растяжение, ударную вязкость и усталость, а также микрошлифы для проведения металлографического анализа. Цилиндрические пятикратные образцы диаметром 5 мм для испытаний на растяжение соответствовали ГОСТ 1497–84 (тип III). Образцы для испытаний на ударную вязкость с острым надрезом вида V соответствовали ГОСТ 9454–78,

<sup>1</sup> Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 15-19-00166.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия;  
e-mail: MatiuninVM@mpei.ru

<sup>3</sup> ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», Москва, Россия.