

УДК 620.172.242

В.Н. Сызранцев, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности», e-mail: v_syzrantsev@mail.ru; **В.Н. Ильиных**, аспирант, ассистент кафедры «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности»; **Г.П. Зозуля**, д.т.н., профессор кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин»; **А.А. Земляной**, аспирант, ассистент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», Тюменский государственный нефтегазовый университет; **В.Н. Мисник**, генеральный директор, ООО «ЯмалСервисЦентр»; **В.В. Дмитрук**, к.т.н., генеральный директор, ООО «Газпром подземремонт Уренгой»; **Н.В. Рахимов**, к.т.н., главный инженер, ООО «Газпром подземремонт Уренгой»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СТАЛИ ГИБКИХ ТРУБ

В статье приведены результаты статических испытаний образцов, изготовленных из гибких труб: новых, имеющих 50 и 100% выработанного ресурса. Также приведены данные разрушения образцов из новой гибкой трубы при ее циклическом деформировании в области малоциклового усталости.

Для оценки прочностных свойств гибких труб, подбора их геометрических размеров используется [1, 2] ряд параметров материала труб, характеризующих его механические свойства: предел пропорциональности ($\sigma_{пч}$), предел текучести (σ_T), предел прочности (σ_B). Для учета изменения напряжений, допускаемых материалом трубы без потери прочности при циклическом изменении нагрузки, необходимо иметь кривую усталости, построенную для малоциклового зоны деформирования [3]. В работе [1] отмечается, что развитие методик прочностного расчета гибких труб сдерживается отсутствием данных об усталостных свойствах используемого для изготовления гибких труб материала. В настоящей статье представлены результаты исследования прочностных свойств одного из материалов гибкой трубы – стали HS 80. Для выполнения экспериментальных работ из гибких труб (1,5"): новой, имеющей 50 и 100% выработанного ресурса (T_V), изготовлены образцы прямоугольной формы длиной 300 мм и шириной 10 мм. На первом этапе работ в испытательно-диагностической лаборатории ООО «ЯмалСервисЦентр» на разрывной машине РМ-50 осуществлено растяжение 15 образцов до разрушения. На рисунке 1 в плоскости параметров $\sigma - \psi$ показаны кривые растяжения для образцов из новой трубы, отработавшей 50 и 100% ресурса. Подобные кривые имели все испытанные образцы. Отметим, что на кривых площадка текучести отсутствует. В результате обработки эксперименталь-

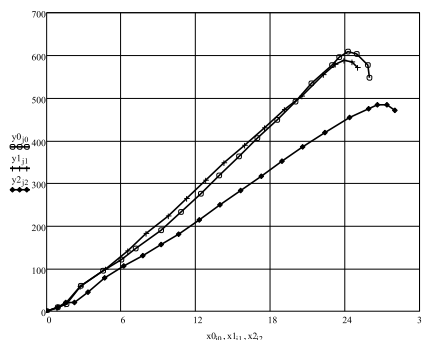


Рис. 1. Растяжение прямоугольных образцов из трубной стали: кружки – новая сталь $T_V = 0\%$, крестики и квадратики – $T_V = 50\%$ и $T_V = 100\%$

ных данных зафиксированных величин предела прочности статистическими методами для σ_3 получены предельные значения для 90, 95 и 99% доверительных интервалов, представленные в таблице. На втором этапе аналогичные исследования были выполнены на образцах гибких труб, ослабленных (для возмож-



Рис. 2. Образцы гибкой трубы после испытаний

ности доведения их до разрушения на разрывной машине РМ-50) сквозными отверстиями (рис. 2).

На рисунке 3 показаны кривые растяжения этих образцов. Сравнивая кривые рисунка 3 с кривыми рисунка 1, нетрудно

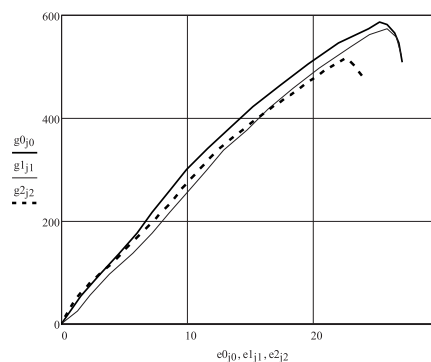


Рис. 3. Кривые растяжения образцов с отверстиями: сплошная толстая линия $T_V = 0\%$; тонкая линия $T_V = 50\%$ и пунктирная линия $T_V = 100\%$

увидеть, что по форме они практически совпадают. То есть исследуемая сталь по своим свойствам существенно отличается от традиционных сталей, имеющих ярко выраженную площадку текучести металла.

На третьем этапе экспериментальных исследований выполнен комплекс испытаний образцов (прямоугольной формы), вырезанных из новой гибкой трубы, на долговечность. Здесь использовался специальный стенд, обеспечивающий циклическое де-

формирование образцов в условиях консольного изгиба при жестком режиме нагружения (при постоянной величине деформации). Всего было испытано до разрушения 50 образцов при различной величине амплитуды деформаций. Установленная в результате испытаний совокупность экспериментальных значений действующих в месте разрушения образцов напряжений (σ) и чисел циклов (N_i) до поломки образцов ($i=1,50$) показана на рисунке 4 в системе координат $\sigma - \lg N$ треугольниками.

Математическое описание полученных данных (определение кривой малоциклового усталости) выполнено на основе методов, разработанных в рамках кинетической теории механической усталости [4]. В соответствии с этой теорией, регрессионная зависимость (соответствующая 50% вероятности разрушения образцов), описывающая кривую малоциклового усталости, определяется выражением:

$$\sigma = \bar{\sigma}_B + \vartheta \cdot \lg\left(\frac{N}{H}\right) + 1 \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}_B$ – математическое ожидание (среднее значение) предела прочности; ϑ – угол наклона кривой усталости в системе координат $\lg N - \sigma$; \bar{H} – математическое ожидание (среднее значение) числа циклов деформирования до верхней точки перегиба кривой малоциклового усталости. В процессе обработки экспериментальных данных получено:

$$\bar{H} = 221,474;$$

$$H_{\min}^{0,90} = 181,926; H_{\max}^{0,90} = 269,727;$$

$$H_{\min}^{0,95} = 168,479; H_{\max}^{0,95} = 291,365;$$

$$H_{\min}^{0,99} = 137,237; H_{\max}^{0,99} = 358,268.$$

В результате, учитывая значения σ_B из таблицы, на основе формулы (1) регрессионная зависимость описывается выражением:

$$\sigma = 602,1 - 121,811 \cdot \lg\left(\frac{N}{221,474} + 1\right) \quad (2)$$

Расчеты по уравнению [2] показаны на рисунке 4 в виде прерывистой линии. Однако для практических расчетов долговечности гибких труб значительно более важной является не зависимость (2), а нижние границы ее доверительно-го интервала. Для расчета этих границ, например при допустимой вероятности 90%, зависимость (1) принимает вид:

$$\sigma_{\min}^{0,90} = \sigma_{B \min}^{0,90} + \vartheta \cdot \lg\left(\frac{N}{H_{\max}^{0,90}} + 1\right),$$

$$\sigma_{\max}^{0,90} = \sigma_{B \max}^{0,90} + \vartheta \cdot \lg\left(\frac{N}{H_{\min}^{0,90}} + 1\right) \quad (3)$$

Границы при другой вероятности рассчитываются аналогично. Результаты расчета границ 90, 95 и 99% доверительных интервалов показаны на рисунке 4 непрерывными линиями.

Выводы

1. Результаты статических испытаний (на разрыв) образцов, изготовленных из гибких труб (материал сталь HS 80), но-

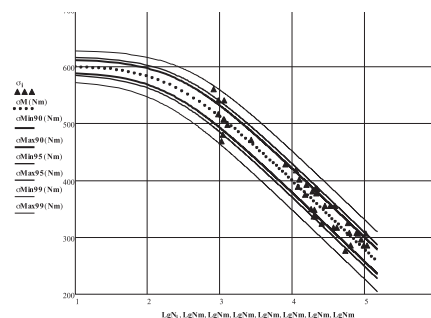


Рис. 4. Кривая малоциклового усталости стали HS 80

вых, имеющих 50 и 100% выработанного ресурса, свидетельствуют об отсутствии площадки текучести на диаграмме растяжения. Для предела прочности стали HS 80 определены статистические характеристики. Установлено, что по мере выработки ресурса упругие свойства стали (угол наклона кривых растяжения) изменяются незначительно, при этом примерно на 20% снижается предел прочности (по средней величине).

2. Получены данные разрушения образцов из новой гибкой трубы при ее циклическом деформировании в области малоциклового усталости. Определена регрессионная зависимость, описывающая результаты усталостных испытаний при 50% вероятности разрушения образцов. Построены 90, 95 и 99% доверительные интервалы числа циклов до разрушения образцов из стали HS 80 для диапазона изменения напряжений от σ_B до 250 МПа, необходимые как для реализации методик расчета долговечности гибких труб из стали HS 80, так и определения их прочностной надежности.

Таблица. Результаты статистической обработки

Серия опытов	$T_v, \%$	Износ, $\mu, \text{мм}$	$\bar{\sigma}_B, \text{МПа}$	$\sigma_{B \min}^{0,90}, \text{МПа}$	$\sigma_{B \max}^{0,90}, \text{МПа}$	$\sigma_{B \min}^{0,95}, \text{МПа}$	$\sigma_{B \max}^{0,95}, \text{МПа}$	$\sigma_{B \min}^{0,99}, \text{МПа}$	$\sigma_{B \max}^{0,99}, \text{МПа}$
1.	0	0,0	602,1	591,1	613,1	586,8	617,4	575,3	628,9
2.	50	0,2	597,1	585,4	608,7	580,9	613,3	568,6	625,5
3.	100	2,2	481,1	454,6	507,6	444,3	517,9	416,4	545,8

Литература:

1. Вайншток С.М., Молчанов А.Г., Некрасов В.И., Чернобровкин В.И. Подземный ремонт и бурение скважин с применением гибких труб. – М.: Издательство Академии горных наук, 1999. – 224 с.
2. Булатов А.И. Колтюбинговые технологии при бурении, заканчивании и ремонте нефтяных и газовых скважин. – Краснодар: Просвещение-Юг, 2008. – 310 с.
3. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1988. – 282 с.
4. Почтенный Е.К. Кинетическая теория механической усталости и ее приложения. – Минск: Наука и техника, 1973. – 213 с.

Ключевые слова: гибкая труба, циклическое изменение нагрузки, предел прочности, предел текучести, циклическое деформирование, малоцикловая усталость.