

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ СКВАЖИН

Рассмотрено экспериментальное и теоретическое определение величины остаточных напряжений в толстостенных элементах оборудования скважин Оренбургского газоконденсатного месторождения

Оборудование скважин является одним из самых ответственных среди нефтегазового оборудования. Например, на Астраханском ГКМ начальное пластовое давление составляло  $624 \text{ кгс/см}^2$ , при пластовой температуре  $100^\circ\text{C}$ . Аварии при таких условиях трудно устранить, что приводит к значительному экологическому и экономическому ущербу. Поэтому определение напряженного состояния и нагрузочной способности фонтанной арматуры (ФА), колонных головок (КГ) и внутрискважинного оборудования является одним из самых актуальных.

На ОГКМ зафиксированы разрушения адаптеров (спецфланцев) ФА из стали «Uranus-50», имеющих значительный запас прочности. Одной из основных причин разрушения адаптеров являются остаточные технологические напряжения, возникшие в результате несоблюдения технологии изготовления деталей отливкой. В лаборатории «Надежность» проведены исследования напряженного состояния элементов ФА и КГ методом тензометрирования. По результатам этих исследований нами разработан способ определения остаточных напряжений в толстостенных цилиндрических конструкциях для оценки их работоспособности в сероводородсодержащих средах. Перед проведением тензометрирования фланцы адаптера отрезали с двух сторон для уменьшения глубины резания (рис.1). Затем наклеивали тензорезисторы и разрезали цилиндрическую часть адаптера вдоль образующей. По изменению напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессе разрезки адаптера определяли величину остаточных напряжений, фиксируя деформацию тензорезисторов, установленных на внутренней и наружной поверхностях цилиндрической части адаптера в точках вдоль линии разрезки и

диаметрально противоположной области.

Для измерения деформаций применяли тензорезисторы базой 10 и 20 мм и номинальным сопротивлением 200 Ом, коэффициент тензочувствительности 2,18. При этом использовали полумостовую схему подключения тензодатчиков с участием одного активного и одного пассивного компенсационного датчиков, последние устанавливали отдельно на пластине из металла. Для определения деформаций и напряжений на адаптер наклеивали 24 тензодатчика в осевом и окружном направлениях по действию главных напряжений (рис. 1).

Тщательный подбор тензорезисторов по номинальному сопротивлению позволил уменьшить количество применяемых компенсационных датчиков и разброс значений начального отсчета. Для регистрации изменения сопротивления тензодатчиков использовали цифровой автоматический тензоизмеритель (ЦАТ), состоящий из автоматического 100 позиционного прецизионного переключателя АП-3 и цифрового тензоизмерителя (ЦТИ).

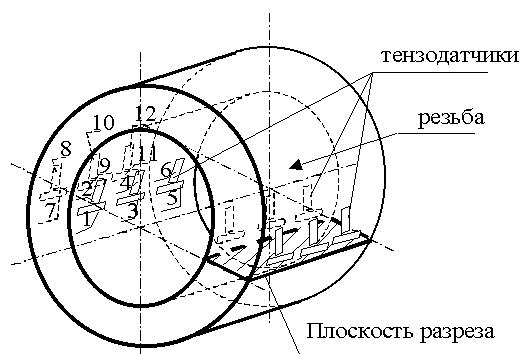


Рис. 1. Схема наклейки тензодатчиков на

Разрезку адаптера проводили от наружной поверхности вдоль образующей. В процессе разрезки происходило зажатие дисковой фрезы. По мере увеличения глубины реза силы зацемяления увеличивались и при глубине реза 5 мм вызывали разрушение фрезы, что свидетельствовало о сжимающих остаточных напряжениях в наружных слоях стенки адаптера. Дальнейшую разрезку адаптера проводили фрезой ступенчато – “в разбег”, что увеличило в два раза объем и время работы. При увеличении глубины реза, расстояние между кромками по ширине реза уменьшалось и это фиксировали с точностью до 0,01 мм. После разрезки с одной стороны адаптера по толщине произошло смещение плоскостей реза, расстояние между кромками в средней части уменьшилось на 1,81 мм.

Результаты измерений тензодатчиками деформаций и расчет остаточных напряжений в адаптере №1, отработавшего более 20 лет, представлены в табл.1. Толщина стенки адаптера изменяется по длине, соответственно изменяется величина действительных остаточных напряжений, что подтверждается теоретическим расчетом (таблица 1). Отличие величин опытных и расчетных остаточных напряжений объясняется большой длиной исследуемой части адаптера (возможно влияние остаточных осевых напряжений) и длительностью проведения измерений (точность уменьшается), а также температурными изменениями (при нагреве уменьшается величина деформаций сжатия и увеличивается величина деформаций растяжения). Средние напряжения сжатия во внутренних слоях стенки адаптера составили 86 МПа, напряжения сжатия в наружных слоях стенки - 122 МПа. При схождении кромок разреза величина напряжений во внутренних слоях стенки адаптера должна быть в 1,42 раза больше чем в наружных, следовательно, значение напряжений растяжения от температурных деформаций составляет 40 МПа. Тогда действительные средние значения напряжений сжатия во внутренних слоях стенки адаптера составляют 126 МПа, а напряжения растяжения в наружных слоях - 82 МПа. Следовательно, во внутренних слоях стенки адаптера были остаточные напряжения растяжения, а в наружных - остаточные напряжения сжатия.

Таблица 1- Экспериментальные и теоретические значения остаточных напряжений в металле адаптеров

Тензоре-зистор NN	Относительная деформация $\epsilon \cdot 10^{-6}$	Окружное напряжение $\sigma_1$ , МПа		Осевое напряжение $\sigma_2$ , МПа		Расчетное $\sigma_1$ , МПа
		В точке	Среднее	В точке	среднее	
1	130			-4,4		200...156
2	-300	-121	-86		-0,2	
3	68			-2		
4	-240	-96				
5	16			6		
6	-100	-42				
7	-130					-3
8	408	161	122			
9	-95			0,8		
10	323	129				
11	-52			2		
12	190	76				

В адаптере №2 остаточные напряжения определяли с помощью разрезки кольца, которое вырезали из середины цилиндрической части адаптера. Ширина “b” кольца составила 0,5 от толщины “t” стенки адаптера. Применение данного способа позволило снизить время проведения эксперимента и применить для разрезки угловую шлифовальную машинку. Схождение кромок разреза произошло на 2,0 мм. Средние напряжения сжатия по данным тензодатчиков, наклеенных на внутреннюю поверхность адаптера, составило -223 МПа, напряжения растяжения на наружной поверхности - 162 МПа, что хорошо согласуется с расчетными значениями -222 МПа и 157 МПа соответственно.

Также из адаптера №2 со стороны малого фланца было вырезано еще кольцо шириной 0,82 от толщины стенки адаптера. При разрезке кольца схождение кромок разреза произошло на 1,8 мм. Средние напряжения сжатия на внутренней поверхности в адаптере составили 169 МПа, напряжения растяжения на наружной поверхности - наружной поверхности - 131 МПа, что согласуются с расчетными значениями -200 МПа и 141 МПа соответственно. Отличие на 15% величин напряжений по тензодатчикам от величины напряжений, установленных расчетом, не превышает погрешности измерений, обусловленных данными методами измерений. Также на это расхождение могла повлиять ширина кольца, не позволившая полностью снять остаточные напряжения. Таким образом, значение кольцевых остаточных напряжений в адаптере (толстостенных конструкциях) можно определять по величине схождения кромок разреза на кольцах шириной 0.5 от толщины стенки адаптера.

Во внутренних слоях стенки адаптера имеются остаточные напряжения растяжения, а в наружных слоях - напряжения сжатия. Такое распределение напряжений в толстостенных цилиндрических изделиях моделировали приложением к криволинейному брусу сосредоточенного момента, который вызывает пе-

ремещение торца бруса. Данное предположение подтверждается схождением кромок при разрезке адаптера вдоль образующей. Значение остаточных напряжений определяли по величине возникающих перемещений при разрезке. При отношении  $r \ll t < 5$  ( $96/48 < 5$ ), где  $r$  - радиус кривизны оси сечения адаптера,  $t$  - толщина стенки адаптера, в расчетах напряжений следует учитывать влияние кривизны (рис. 2).

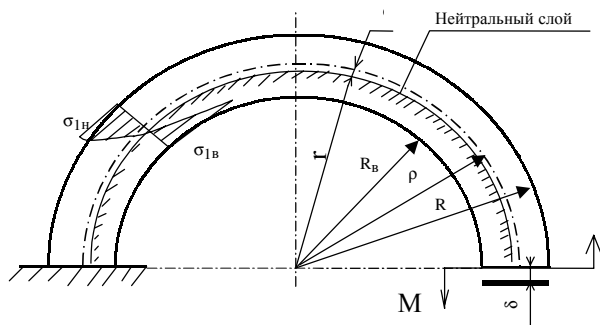


Рис. 2. Схема расчета перемещений в криволинейном бруске

Сосредоточенный момент  $M$  приводит к перемещению  $d$  свободного конца бруса противоположному перемещению после разрезки и созданию напряжений эквивалентных остаточным напряжениям до разрезки адаптера.

Наибольшие напряжения растяжения от перемещения кромок разреза адаптера (рис.2) возникают на внутренней поверхности:

$$\sigma = \frac{\delta \cdot \rho \cdot y}{\pi \cdot r^2 \cdot (r + y)} = \frac{\delta \cdot \rho \cdot (R - r)}{\pi \cdot r^2 \cdot (r + (R - r))} = \frac{0,9 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,096 \cdot (0,072 - 0,094)}{\pi \cdot 0,094^2 \cdot 0,072} =$$

$$= 200 \text{ МПа}$$

Напряжения сжатия на наружной повер-

хности адаптера составят:

$$\sigma = \frac{\delta \cdot \rho \cdot y}{\pi \cdot r^2 \cdot (r + y)} = \frac{\delta \cdot \rho \cdot (R - r)}{\pi \cdot r^2 \cdot (r + (R - r))} = \frac{0,9 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,096 \cdot (0,120 - 0,094)}{\pi \cdot 0,094^2 \cdot 0,120} =$$

$$= 141 \text{ МПа}$$

Способ определения остаточных напряжений в толстостенных конструкциях (адаптере) по величине перемещений кромок разреза кольца позволяет оперативно без применения тензорезисторов определять величину остаточных напряжений. Наименьшая погрешность результатов оценки остаточных напряжений будет при ширине кольца равной 0,5 от толщины кольца и составляет 5...10%.

Остаточные напряжения растяжения на внутренней поверхности в исследуемых адаптерах составили до 0,35 от предела текучести материала. В процессе эксплуатации интенсивность напряжений растяжения в резьбовой части адаптера ФМС достигает 0,32 от нормативного предела текучести. Следовательно, интенсивность напряжений на внутренней поверхности адаптеров от эксплуатационных нагрузок и остаточных напряжений составляет 0,67 от нормативного предела текучести материала.

При неблагоприятных условиях изготовления толстостенных литых конструкций, типа адаптеров, быстрое охлаждение изделия и отсутствие последующей термической обработки для уменьшения остаточных напряжений, может при эксплуатации приводить к увеличению интенсивности напряжений на внутренней поверхности адаптера до предела текучести, что является одной из главных причин их разрушения под действием сероводородсодержащих сред. Остаточные технологические напряжения тем больше, чем меньше коэффициент  $k$  (равный отношению внутреннего диаметра  $k$  к наружному).