

УДК 621.791.011

Перемитько В. В., Рейдерман Ю. И., Чередник Е. А.

УЧЕТ ОСЕВОЙ СИЛЫ ПРИ РАСЧЕТЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Среди сварных конструкций важное место занимают тонкостенные цилиндрические оболочки из высокопрочных сталей. Такие оболочки предназначены для работы под высоким давлением. При больших диаметрах оболочек в некоторых местах конструкции возникают высокие напряжения, являющиеся следствием осевых усилий, которыми обычно при расчетах пренебрегают. В рассматриваемом же случае их учитывать необходимо [1].

Авторы разработали метод расчета цилиндрических оболочек с учетом осевой силы [2]. Данный метод более точен по сравнению с классическими. Возникла задача верификации предложенного метода. Как это было выполнено и будет рассказано ниже.

Верификация разработанной методики осуществлялась путем сравнения результатов расчета напряженно-деформированного состояния моделей с фактически возникающим, измеренным с помощью тензодатчиков. Предложенный метод позволяет конструктору предусмотреть размещение сварных швов вне зоны пиков напряжений, являющихся следствием краевого эффекта.

При изготовлении сварных оболочек характерным является возникновение в зоне сварного шва местных пиков остаточных напряжений, для выравнивания которых используется высокотемпературный индукционный отпуск. Насколько эффективен отпуск, позволяет определить разработанный авторами метод неразрушающего контроля – определения остаточных напряжений путем измерения твердости материала околошовной зоны.

С помощью сварных образцов получены зависимости прочностных характеристик (предела прочности и текучести) от значений твердости высокопрочной стали. Метод этот верифицирован сравнением измерений твердости с данными рентгенографии.

Целью работы анализ применения предложенной методики в практике конструирования и изготовления сварных оболочек из высокопрочных сталей. Представленные примеры должны служить подтверждением целесообразности внедрения методики.

Рассмотрены случаи:

- а) определения места приложения распорного усилия на обечайке при стыковке ее со шпангоутом для сварки;
- б) определения напряжений в обечайке около распорного шпангоута;
- в) определения напряженного состояния по данным фактического деформированного состояния;

На рис. 1 приведены результаты измерения твердости в сварном соединении из стали СП-28 после сварки и местного индукционного отпуска. Показано распределение твердости по сечению сварного шва для образцов, не подвергавшихся отпуску после сварки (кривая 1). Из рисунка видно, что на расстоянии 7...8 мм в обе стороны от оси шва твердость имеет максимальное значение и составляет 51...52 HRC. На расстоянии 7...12 мм имеет место провал до 40,5 HRC, а на более удаленных участках твердость снова возрастает и на расстоянии 25 мм от центра сварного шва достигает уровня твердости основного металла. Индукционный отпуск при температуре 300 °С в течение одного часа вносит лишь небольшие изменения в картину распределения твердости (кривая 2), а существенное выравнивание твердости обеспечивает высокотемпературный индукционный отпуск при температуре 650 °С в течение 18...20 минут (кривая 3). Измерение рентгеновским методом остаточных напряжений показало, что распределение напряжений (рис. 1, б) по характеру близко к распределению твердости (рис. 1, а).

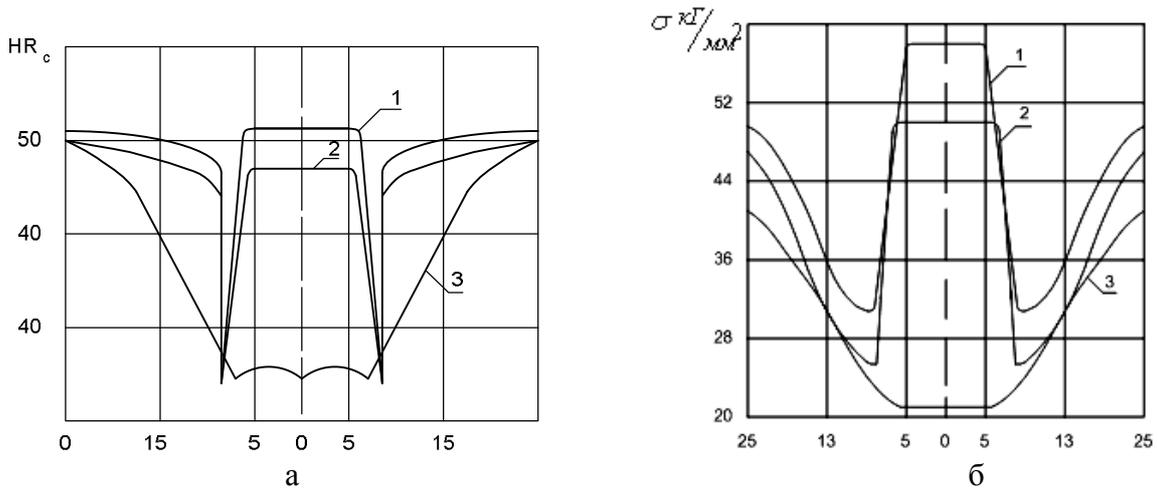


Рис. 1. Распределение твердости и остаточных напряжений в околошовной зоне кольцевого сварного соединения

На рис. 2 показана картина радиального перемещения длинной цилиндрической оболочки, защемленной по торцу при нагружении ее внутренним давлением ($R = 800$ мм, $h = 4,5$ мм, первая кривая получена без учета осевой силы, вторая кривая – в результате тензотрирования, третья – с учетом влияния осевой силы на жесткость оболочки).

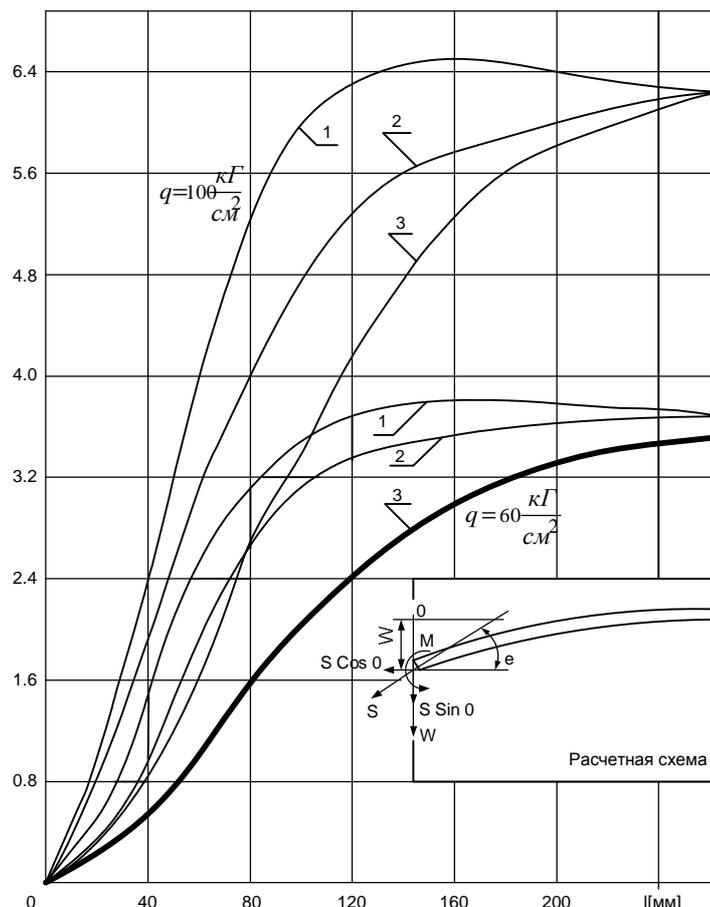


Рис. 2. Радиальные перемещения длинной цилиндрической оболочки

Из расчетной схемы на рис. 2 следует, что осевая составляющая меридионального усилия не учитывается, в то время как радиальная составляющая создает добавочный прогиб

оболочки. Рис. 2 позволяет судить об эффективности учета осевой силы при решении краевых задач для сварных емкостей. Для оболочки с толщиной обечайки $h = 4,5$ мм и радиусом кривизны $R = 800$ мм определено напряженно-деформированное состояние сварного соединения обечайки с жестким фланцем при нагружении внутренним давлением.

Достоверность перемещений, вычисленных по предложенной методике, подтверждается известным в теории упругости принципом минимума потенциальной энергии для нагруженного тела, в соответствии с которым деформация оболочки по кривой 3 обуславливает меньший запас потенциальной энергии, чем деформация по кривым 1, 2.

На рис. 3 представлены расчетные и экспериментальные данные о распределении меридиональных и кольцевых напряжений в обечайке около распорного шпангоута днища. Эти данные показывают, что результаты расчетов, полученные по предлагаемым в работе расчетным зависимостям, лучше согласуются с результатами экспериментов (расхождение не превышает 5...10 %), чем результаты расчетов по известным зависимостям (расхождение доходит до 80 %).

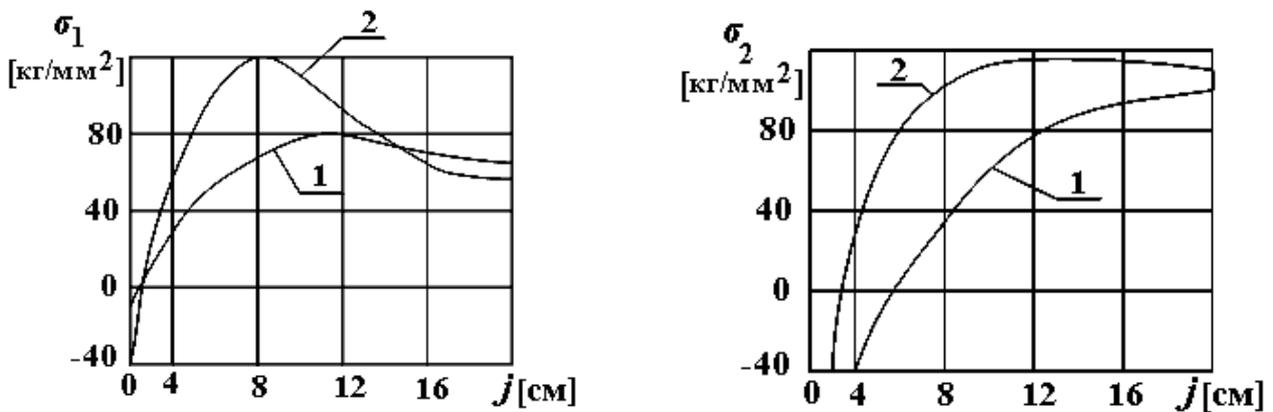


Рис. 3. Распределение напряжений в обечайке около распорного шпангоута

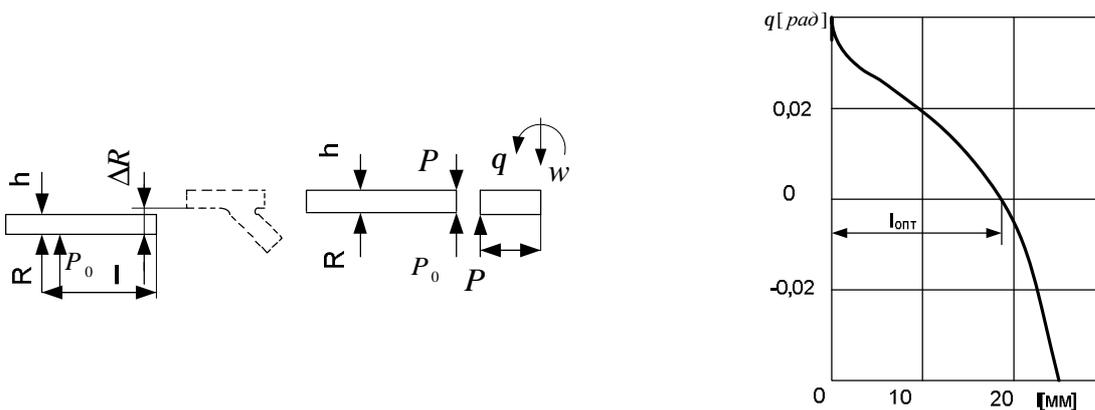


Рис. 4. Определение места приложения распорного усилия на обечайке при стыковке ее по шпангоуту для сварки

Практическое применение методики показано на примере сборки под сварку обечайки из высокопрочной стали с распорным шпангоутом днища при $R = 380$ мм, $h = 2,2$ мм. В этом случае разница периметров составляет 5,4 мм. По графику на рис. 4 можно определить оптимальное расстояние до торца обечайки, на котором необходимо приложить распорное усилие. Применение результатов этого решения позволило в производственных условиях снизить величину смещения кромок в кольцевых швах на 30 % и повысить качество и точность изготовления емкостей.

На рис. 5 продемонстровано, як користуватися для визначення величини залишкових напружень, що виникають при укороченні кільцевого шва, розробленим способом, що заключається в тому, що після закінчення процесу зварювання та термообробки вимірюють прогиби оболочку і будують епюри прогибів.

Чисельним диференціюванням або візуально, по епюрі, визначають точки перегибу, в яких згинаючий момент дорівнює нулю. Далі схематично розчленовують оболочку на складові частини через знайдені точки перегибу. По одержаній математичній моделі як приклад проведено розрахунок величини та характеру розподілу залишкових зварних напружень для оболочку діаметром 1450 мм і товщини стінки 1,5 мм.

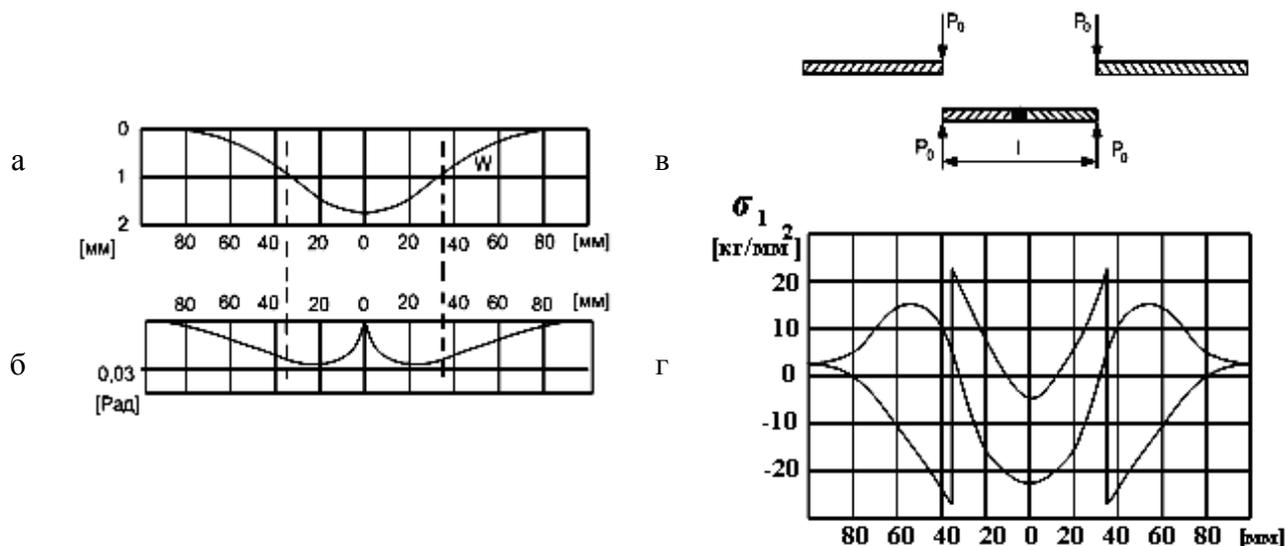


Рис. 5. Последовательность определения напряжений от укорочения кольцевого шва

Зависимости, представленные на рис. 5, подтверждают, что полученная закономерность удовлетворительно отражает фактическое распределение остаточных напряжений, так как экспериментальные и расчетные значения прогибов практически совпадают. Результаты обобщения методики расчета допустимой величины смещения кромок позволили расширить допуск на смещение до половины толщины стінки свариваемых обечаек. Последующие гидравлические испытания подтвердили высокую несущую способность емкостей с указанным смещением кромок. Разрушения происходили вне зоны кольцевых швов, выполненных со смещением кромок.

ВЫВОДЫ

Экспериментальные исследования подтвердили, что на основе предложенного расчетного способа, учитывающего осевое усилие, могут быть решены практические задачи по оптимальному расположению замыкающего кольцевого шва на емкости с учетом напряженно-деформированного состояния оболочки и механических свойств металла шва.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошенко С. П. *Пластинки и оболочки* / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – Госиздат., 1963. – 450 с.
2. Рейдерман Ю. И. *Расчет напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек* / Ю. И. Рейдерман. – Машиз, М., 1980. – 250 с.
3. Лобанов Л. М. *Оперативное определение остаточных напряжений с использованием электронной спекл-интерферометрии* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. В. Савицкий // *В мире неразрушающего контроля*. – 2005. – № 1. – С. 10–13.