

На поверхности образцов из БрХО8 после испытания при 600°C появляются фазы окислов меди, располагающиеся по границам зерен. На нетравленных шлифах включения окислов имеют серо-голубой, а в поляризованном свете красный цвет. С повышением температуры до 1000°C на границе между подложкой и покрытием образуется переходный слой, состоящий из сложных соединений, возможно, типа  $NiCr_2O_4$  и  $SiO \cdot NiO$ . Следует отметить, что слой окислов, образующийся между подложкой и покрытием, благодаря сложному составу обладает лучшими защитными свойствами и более прочно связан с подложкой, чем слой окислов, образующийся на незащищенном образце.

Эффективность защитных свойств покрытия НА67 при окислении подтверждается результатами сравнительных испытаний термостойкости покрытия из  $ZrO_2$  с подслоем из нихрома и НА67 на сплаве БрХО8 (табл. 2). При нагреве ацетиленокислородным пламенем покрытие с подслоем из нихрома отделяется от подложки после 9—10 теплосмен в результате окисления последней. После аналогичных испытаний прочность сцепления с подложкой системы НА67+ $ZrO_2$  не снижается по сравнению с исходной, после 30 теплосмен система НА67+ $ZrO_2$  прочно связана с подложкой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по авиационным материалам. М., Изд. оборонной промышленности, 1958.
2. Черепанов А. М., Тресвятский С. Г. Высокоогнеупорные материалы и изделия из окислов. М., «Металлургия», 1964.
3. Игнатов Д. В., Шамгунова Р. Д. О механизме окисления сплавов на основе никеля и хрома. М., Изд. АН СССР, 1960.
4. Андреева А. Г., Терехова В. В., Фоменко Г. Д. Жаростойкие покрытия на никелевых сплавах. Сб. «Высокотемпературные покрытия». М., «Наука», 1967.
5. Синельникова В. С., Подергив В. А., Речкин В. И. Алюминиды. Киев, «Наукова думка», 1965.

Г. Л. Зубриенко, В. М. Петрованов, Л. М. Петрованова,  
Ф. З. Тэненбаум

### РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

Работоспособность сварных соединений из нержавеющей стали в контакте с агрессивными средами в условиях вибрационных нагрузок, а также при отрицательных температурах во многом определяется напряженным состоянием сварных швов. Поэтому изучение остаточных напряжений представляет значительный практический интерес.

В настоящей работе с помощью рентгенографического анализа изучены поперечные напряжения, действующие в сварных соединениях из нержавеющей стали X18H10T.

Рассматривались кольцевые швы стыковых соединений трубопроводов, выполненных аргодуговой электросваркой вольфрамовым электродом (рис. 1).

Для более полной оценки эффективности рентгенографической экспериментальной методики изучение остаточных напряжений проведено для двух контрастных условий — при свободной и задержанной усадке. В образцах со свободной усадкой подкладное кольцо после сборки соединения имело торцевой зазор  $a = 0,8 - 1,0$  мм. В этом случае в процессе сварки возникновение напряжений обусловлено только неравномерностью нагрева и деформацией самого сварного шва. В образцах с задержанной усадкой за

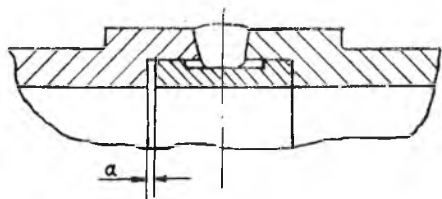


Рис. 1. Сварные образцы труб из стали X18H10T. Свободная усадка — зазор  $a = 0,8 - 1,0$  мм. Задержанная усадка —  $a = 0$

счет соответствующего выбора длины подкладного кольца торцевой зазор отсутствовал. Подкладное кольцо, упираясь в цилиндрическую расточку соединяемых трубопроводов, препятствовало свободной поперечной усадке сварного шва. Повышенная жесткость соединения должна вызвать появление в сварном шве дополнительных растягивающих напряжений значительной величины [1]. Приближенный расчет, выполненный авторами по методике В. А. Винокурова [2], показал, что величина этих напряжений находится на уровне  $40 - 50$  кг/мм<sup>2</sup>. Таким образом, различная жесткость сварных соединений предопределяет и различные значения остаточных напряжений.

Поскольку рентгенографическое определение напряжений связано с измерением упругих деформаций кристаллической решетки изучаемого объекта, то прежде всего было проведено всестороннее изучение структурно-фазового состава сварных соединений и характеристик кристаллической решетки основной фазы.

Воздействие термического цикла сварки обуславливает значительную структурную неоднородность различных зон сварного соединения (рис. 2). Если структура основного металла чисто аустенитная, то шов имеет двухфазное аустенитно-ферритное строение. Замерами микротвердости установлена значительная механическая неоднородность, которая возрастает с повышением жесткости конструкции.

На основе анализа хода термического цикла сварки и вызванного его воздействием изменений фазового состава было высказано предположение о существовании еще одного вида неоднород-

Зона анализа	Содержание элементов, %			
	Cr	Ni	Mn	Si
Исходный металл	17,3	10,2	1,35	0,48
Шов	γ	16,9	10,4	0,39
	δ	22,0	8,3	1,16

ности, связанной с влиянием этих изменений на параметры кристаллической решетки основной фазы — аустенита. В работах Гинье [3] и последних работах, выполненных Ратнером и др. исследователями [4], считалось, что изменение параметров кристаллической решетки при сварке обусловлено исключительно воздействием остаточных напряжений. Однако микрорентгеноспектральный анализ основного металла и сварного шва показал существование значительных отклонений в содержании легирующих элементов (табл. 1). По сравнению с основным металлом аустенит шва обогащается аустенито-образующими, феррит-феррито-образующими. Следовательно, согласно закону Вегарда для твердых растворов замещения отклонения концентрации легирующих элементов в аустените должны явиться причиной соответствующих изменений параметров кристаллической решетки в различных зонах сварного соединения.

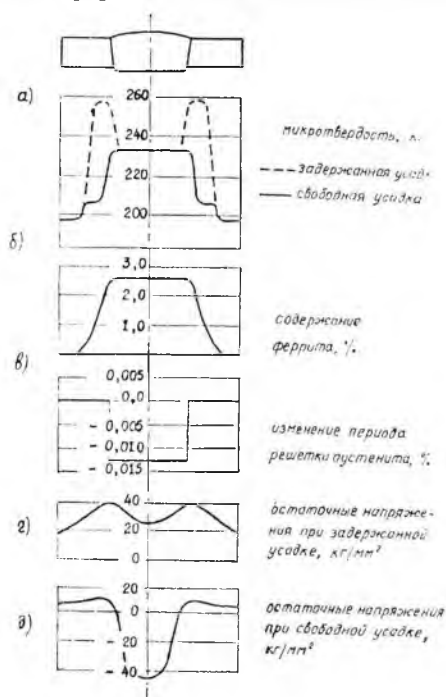


Рис. 2. Результаты исследований:

а — микротвердость, б — распределение феррита, в — изменение параметров кристаллической решетки, г — распределение напряжений при задержанной усадке, д — распределение напряжений при свободной усадке

Существование предполагаемых изменений подтвердили прецизионные измерения параметров кристаллической решетки аустенита рентгеноструктурным методом. С переходом от основного металла через линию сплавления межплоскостное рас-

Глобные кристаллической решетки уменьшается на 0,013% (рис. 2в). Расчеты показали, что при определении остаточных напряжений без учета этого фактора в результаты измерений inevitably вносится значительная погрешность. Для стали X18H10T эта погрешность может достигать 10  $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ , а для стали X21Г7АН5 — примерно 20  $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ .

Материалы изучения структурно-фазовых характеристик сварных соединений легли в основу анализа существующих способов рентгенографического определения напряжений 1 рода. В результате этого анализа стала очевидна целесообразность использования наклонной съемки, при которой первичный пучок рентгеновских лучей направляется под углом  $45^\circ$  к поверхности изучаемого объекта. Выбор этого метода [3] обусловлен тем, что он не требует нарушения целостности изделия (сверления отверстий, прорезания канавок и др.). Напряжения, действующие в выбранном направлении, определяются при помощи только одного снимка, выполненного с одной точки образца. При этом исключаются погрешности, связанные с непостоянством параметров кристаллической решетки аустенита в различных зонах сварного соединения.

Рентгенографирование образцов выполнено фотометодом на установке УРС-55 с камерой КРОС-1 без вращения пленки. Поскольку ведущей фазой в различных зонах сварного шва является  $\gamma$  — железо, то напряжения рассчитывались по величинам диаметрально противоположных смещений интерференционных максимумов отражения от плоскости (222)  $\gamma$  — железа. Излучение FeK $\alpha$ . Напряжение на трубке 55 кв, ток — 10 ма, длительность экспозиции 6 часов. Первичный пучок был задиафрагмирован коллиматором диаметром 0,4 мм.

Расстояние от образца в месте падения первичного пучка до плоскости рентгеновской пленки, а также центр рентгенограммы находились с помощью дифракционной линии (400) эталонного образца из чистого алюминия. Напряжения рассчитывались по известной формуле [5]:

$$\sigma_x = \frac{d_2 - d_1}{d_2} \cdot \frac{E}{(\mu + 1) \sin 2v},$$

В результате изучения эпюр остаточных напряжений, полученных по этой методике, установлено, что для рассматриваемой конструкции сварного соединения характерен высокий градиент распределения остаточных напряжений, величина которых может превышать предел текучести основного металла. В зависимости от конструкционной жесткости соединения, напряжения могут быть как положительными, так и отрицательными (рис. 2 г, д). В частности, для условий задержанной усадки растягивающие напряжения достигают величины 40  $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ , что вполне согласуется с величинами остаточных напряжений, полученных ранее расчетным путем. Установлено, что такие соединения обладают по-

ниженной коррозионной стойкостью. Развитие интенсивной коррозии во влажной среде наблюдалось уже через 100 часов. С другой стороны, для условий свободной усадки наличие преимущественно сжимающих напряжений обусловило высокую коррозионную стойкость таких соединений. При выдержке во влажной среде в течение 4000 часов коррозии не наблюдалось.

## ВЫВОДЫ

1. Установлена возможность рентгенографического изучения остаточных напряжений кольцевых сварных соединений из стали Х18Н10Т методом одной наклонной съемки. Полученные данные хорошо согласуются с расчетными и результатами коррозионных испытаний.

2. Установлено, что вследствие воздействия термического цикла сварки наблюдается непостоянство параметров кристаллической решетки аустенита в различных зонах сварного шва, которое необходимо учитывать при рентгенографическом определении остаточных напряжений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Медовар Б. И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. М., «Машиностроение», 1966.
2. Винокуров В. А. Сварочные деформации и напряжения. М., «Машиностроение», 1968.
3. Гипльс А. Рентгенография кристаллов. М., Физматгиз, 1961.
4. Ратнер А. В., Березина Т. Г. Остаточные напряжения в сварных стыках аустенитных паропроводов. «Теплоэнергетика», № 7, 1964.
5. Уманский Я. С. Рентгенография металлов и полупроводников. М., «Металлургия», 1970.

А. Н. Рогинко, М. И. Разумихин

## ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СМЕЩЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ В ПОЛЕ ЗАЗОРОВ ПРИ УВЯЗКЕ ОСНАСТКИ ПО БАЗОВЫМ ОТВЕРСТИЯМ

При расчете точности процесса увязки оснастки по базовым отверстиям на основе технологического натурального станда \* необходимо суммировать линейные и векторные погрешности с проекциями зазоров в сопряжениях по базовым отверстиям (БО) на заданные направления. В процессе изготовления оснастки в последовательности: базовый шаблон технологического натурального станда (ТНС) — эталон — приспособление — деталь и кронштейн ТНС — вилка монтажного эталона — переходная втулка — фиксатор стапеля происходит накопление смещений элементов оснастки

\* Авторское свидетельство № 264920.