



ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ДВУХСЛОЙНЫХ СТАЛЕЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

В. В. ЧИГАРЕВ¹, И. В. КОВАЛЕНКО²

¹ Призов. гос. техн. ун-т. 87500, г. Мариуполь, пер. Университетский, 7. E-mail: chigarew@pstu.edu

² ПАО «Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича.
87504, г. Мариуполь, ул. Левченко, 20. ЦМК-2. E-mail: oksikov19@mail.ru

Основной целью настоящих исследований является определение влияния остаточных напряжений в околошовной зоне плакирующего слоя двухслойной стали ВСт3+10Х13 на ее эксплуатационные свойства. Задача, стоящая перед авторами, — сравнить теоретические и экспериментальные значения остаточных напряжений в сварных образцах двухслойных сталей ВСт3+08Х13, ВСт3+10Х13, ВСт3+10Х17Н13М2Т и определить материал, наиболее подходящий для дальнейшей эксплуатации. Для выявления уровня остаточных напряжений плакирующего слоя использованы малоцикловое одноосное нагружение образцов, математические расчеты. Результаты измерений остаточных напряжений, которые проводили с помощью тензодатчиков, и сравнение их значений с теоретическими позволяют утверждать, что установленное значение остаточных напряжений в околошовной зоне соединения ВСт3+10Х13, равное 100 МПа, свидетельствует о наличии запаса эксплуатационной надежности соединений. По этой причине биметаллические стали, описанные в данной работе, пригодны для изготовления крупных металлургических агрегатов. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: дуговая сварка биметаллов, остаточные напряжения, плакирующий слой, околошовная зона, модуль упругости, тензодатчик, деформация слоя, эксплуатационные свойства

Постоянный рост требований к качеству изготовления металлургических агрегатов, выполнению их ремонта с применением технологии сварки двухслойной стали обуславливают появление новых методов расчета и определения эксплуатационных свойств. Особую роль играет прогноз относительно длительности эксплуатации металлоконструкций. В связи с этим разработки в указанном направлении достаточно актуальны.

Двухслойные стали ВСт3+10Х13 широко применяются как коррозионно- и термостойкие материалы при изготовлении деталей, работающих в воде, разбавленных растворах солей, агрессивных термических средах, в нефтехимической промышленности [1]. Так, значения скорости общей коррозии со стороны плакирующего слоя составляют 0,1...0,3 мм/год.

Проведение исследований, направленных на определение работоспособности сварных соединений двухслойных сталей, имеет важное значение, поскольку данные материалы применяют как при изготовлении, так и при ремонте промышленных агрегатов.

Согласно данным работы [2] из-за увеличения уровня остаточных напряжений и образования неоднородностей в структуре соединений при сварке двухслойных сталей значения ударной вязкости

снижаются на 20...25 % по сравнению с исходным состоянием. Кроме того, вблизи сварных соединений могут возникать дефекты, вызванные пластической деформацией укорочения [3]. Склонность сварных соединений к образованию таких дефектов тем больше, чем меньше деформационная способность.

Цель настоящей работы — определение остаточных напряжений околошовной зоны двухслойной стали ВСт3сп+10Х13, изучение и анализ закономерностей распределения напряжений в сварном соединении.

Для проведения исследований были использованы пластины размером 20×100×600 мм из двухслойной стали марки ВСт3сп+10Х13, поставляемой по ТУ 14-1-1670-86.

Сварку пластин, предназначенных для испытаний, производили по технологии, разработанной фирмой подрядчиком ООО «Промтехмонтаж» сварочным автоматом АДФ-1002 типа 2ТС-17С. Сварку выполняли в два прохода: первый проход основной слой (сталь ВСт3сп) на режиме: $I_{св} = 520...570$ А; $U_{д} = 38...40$ В; $v_{св} = 22$ м/ч, флюс АН-348А, проволока Св-08А. Разделка кромок пластин как для основного слоя, так и для вспомогательного V-образная.

Сварку разделительного (переходного) слоя выполняли за один проход, после сварки основ-

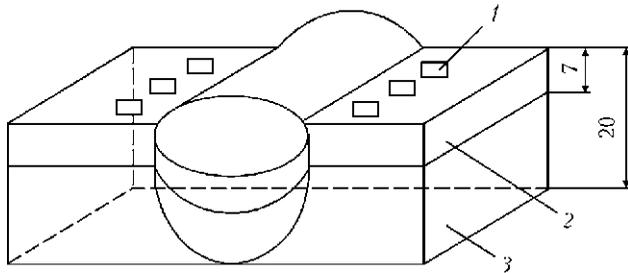


Рис. 1. Сечение сварного образца двухслойной стали для проведения исследований: 1 — тензодатчик; 2 — плакирующий слой; 3 — основной металл

ного слоя на режиме: $I_{св} = 280...300$ А; $U_{д} = 23...25$ В; $v_{св} = 18...20$ м/ч, флюс АН-45, проволока Св-10Х16Н25М6.

Для сварки плакирующего слоя 10Х13 применяли следующие режимы: $I_{св} = 330...350$ А; $U_{д} = 24...28$ В; $v_{св} = 18...20$ м/ч, флюс АН-18, проволока Св-10Х16Н25М6.

Измерения остаточных напряжений производили на сварных образцах после одного цикла нагружения $20 \cdot 10^3$ колебаний [3]. Исследовали сварные соединения следующих композиций: ВСт3сп+08Х13, ВСт3сп+10Х13, ВСт3сп+10Х17Н13М2Т. Рабочее давление при нагружении образца составляло 1210 МПа, значение деформации на поверхности образца $\epsilon_{ср} = 0,0031$. Основная цель проведения данных испытаний — измерение фактических остаточных напряжений сварных образцов (рис. 1).

В качестве одного из критериев оценки эксплуатационной надежности сварного соединения из двухслойной стали был определен уровень остаточных напряжений. Состояние образцов и усреднение значения пределов текучести основного и плакирующего слоев приведены в таблице.

Напряжение σ_a в образце на расстоянии Q от поверхности определяли по следующей формуле:

$$\sigma_a = \frac{1}{2} E (h - a) \frac{d\epsilon}{d\delta} (a) - 3E(h - a) \int_0^a \frac{\epsilon(\delta)}{(h - a)^2} d\delta, \quad (1)$$

где a — толщина всех снятых слоев; h — общая толщина образца; E — модуль упругости; δ — толщина снимаемого слоя; $\epsilon(a)$, $\epsilon(\delta)$ — деформация на нижней поверхности образца при удалении соответственно слоя толщиной a и δ .

В проводимых исследованиях учтена толщина снимаемого слоя Δ_i (мм), общая толщина всех снятых слоев α_i (мм), деформация, замеренная

Усредненные показатели свойств исследуемых сталей

Номер образца	Состав композиции	$\sigma_{0,2}^{OM}$, МПа	$\sigma_{0,2}^{ПС}$, МПа
12-9	ВСт3сп+08Х13	260	450
16-9	ВСт3сп+10Х17Н13М2Т	260	490
2С-3	ВСт3сп+10Х13	260	460

тензодатчиком сопротивления, $\epsilon(\alpha_i) = \epsilon_i$. Для вычисления производных использовали параболическую аппроксимацию:

$$\begin{aligned} \frac{d\epsilon}{d\alpha}(0) &= \epsilon_1 \left(\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{\Delta_1 \Delta_2} \right) + \epsilon_2 \left[\frac{-\Delta_1}{\Delta_2(\Delta_1 + \Delta_2)} \right] = \epsilon_1 K_0^{(2)} + \epsilon_2 K_0^{(3)}, \\ \frac{d\epsilon}{d\alpha}(\alpha_1) &= \epsilon_{i-1} \left[\frac{-\Delta_{i+1}}{\Delta_1(\Delta_i + \Delta_{i+1})} \right] + \epsilon_i \left(\frac{\Delta_{i+1} - \Delta_i}{\Delta_i \Delta_{i+1}} \right) + \\ &+ \epsilon_{i+1} \left[\frac{\Delta_i}{\Delta_{i+1}(\Delta_i + \Delta_{i+1})} \right] = \epsilon_{i-1} K_i^{(1)} + \epsilon_i K_i^{(2)} + \epsilon_{i+1} K_i^{(3)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Значения коэффициентов $K^{(1)}$, $K^{(2)}$, $K^{(3)}$ приведены в табл. 3.7 работы [4]. Там же в подынтегральном выражении указываются полусуммы и значения интеграла. Значение остаточного напряжения $\sigma(\alpha_i)$ (сумма значений в последних трех столбцах) приведено также в работе [4]. По результатам расчета построены эпюры распределения остаточных напряжений по сечению плакирующего слоя (рис. 2).

В представленном материале делается акцент на то, что остаточные напряжения, возникающие на различных стадиях технологического процесса изготовления конструкционных металлургических узлов и элементов, часто оказывают значительное влияние на статическую и усталостную прочность конструкций. Поэтому точный учет и анализ фактического распределения остаточных напряжений может открыть новые возможности безопасной эксплуатации металлургических узлов и агрегатов.

Как видим из рис. 2, у эпюр распределение остаточных напряжений для образцов, не подверженных нагружению, во всех исследуемых композициях в плакирующем слое имеются остаточные напряжения растяжения. Характер распределения напряжений по сечению плакирующего слоя примерно одинаков [2] для всех образцов: постепенное увеличение от линии сплавления слоев до максимального значения на глубине 0,2...0,8 мм от свободной поверхности плакирующего слоя. По мере приближения к поверхности плакирующего слоя значение напряжений уменьшается.

Максимальные значения остаточных напряжений для композиции ВСт3сп+12Х13 составляют около 200 МПа, а для композиции ВСт3сп+10Х13 — около 140 МПа. Следует обратить внимание на то, что наличие остаточных напряжений растяжения в плакирующем слое может повлиять на длительность эксплуатации образца и будущей металлоконструкции в целом, особенно, когда оба слоя композиции подвержены нагружению в пределах упругой области. Эти доводы являются решающими при выборе материала плакирующего слоя (рис. 3).

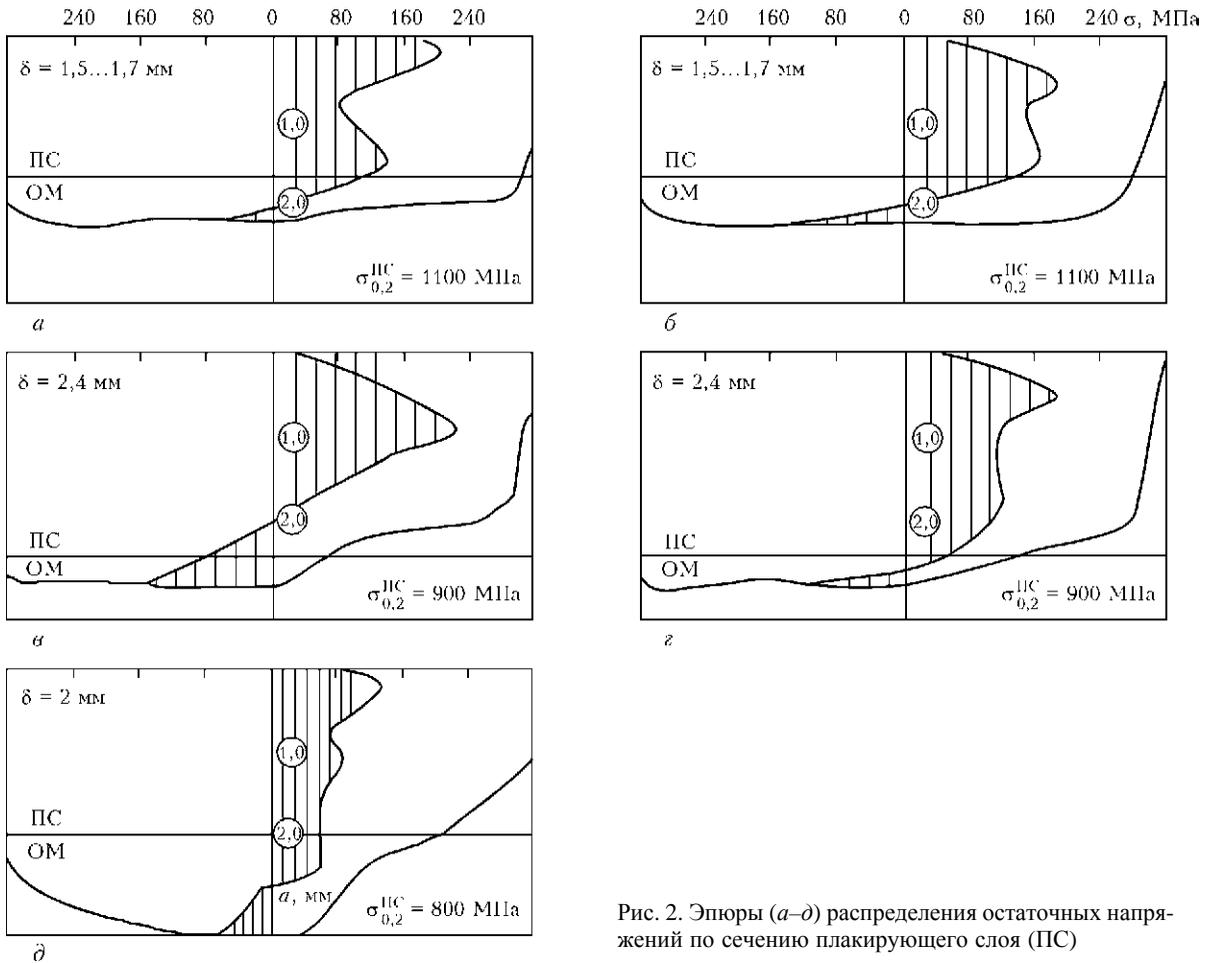


Рис. 2. Эпюры (а–д) распределения остаточных напряжений по сечению плакирующего слоя (ПС)

Экспериментальные и расчетные данные остаточных напряжений в плакирующем слое после нагружения образца, когда $\varepsilon_{0,2}^{ПС} < \varepsilon_{ср} < 2\varepsilon_0^{ОМ}$ свидетельствуют о наличии остаточных напряжений сжатия, причем их максимальное значение различное и зависит от уровня нагрузки и предела текучести материала плакирующего слоя. Так, в образце 14-10 (ВСтЗсп+08Х13), предварительно нагруженном до $\sigma_{ср} = 900$ МПа, максимальное значение остаточных напряжений сжатия составляет 100 МПа, а в образце 12-19 (ВСтЗсп+08Х13), нагруженном $\sigma_{ср} = 1050$, — 200 МПа. Представляет интерес рассмотрение эпюры образца 13-1 (ВСтЗсп+10Х17Н13М2Т), у которого предел текучести материала плакирующего слоя составляет

270 МПа. Как видно, напряжения распределяются с равномерным уменьшением от максимума на поверхности до линии сплавления, после пересечения которой меняется их знак. Следует обратить внимание на тот факт, что в этом образце максимальное значение остаточных напряжений наибольшее по сравнению с аналогичными значениями для других образцов и соответствует напряжениям предела текучести материала плакирующего слоя [5]. Это, видимо, связано с тем, что рабочие деформации образца значительно превосходят деформации предела текучести материала

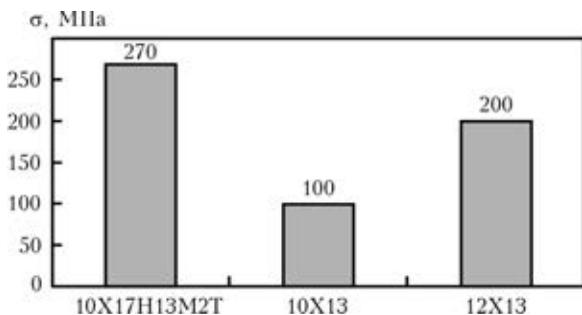


Рис. 3. Зависимость остаточных напряжений в околошовной зоне от материала плакирующего слоя

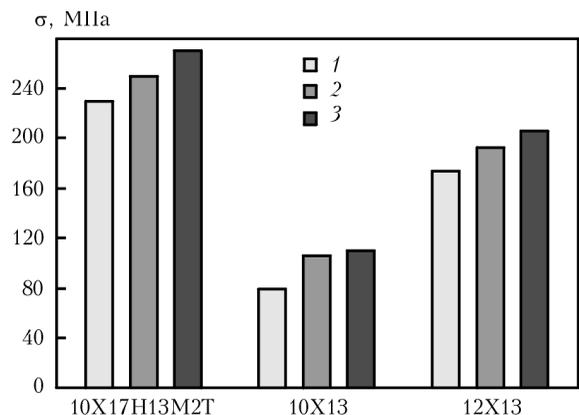


Рис. 4. Влияние толщины плакирующего слоя на остаточные напряжения в околошовной зоне: 1 — $\delta = 5$ мм; 2 — 7; 3 — 10

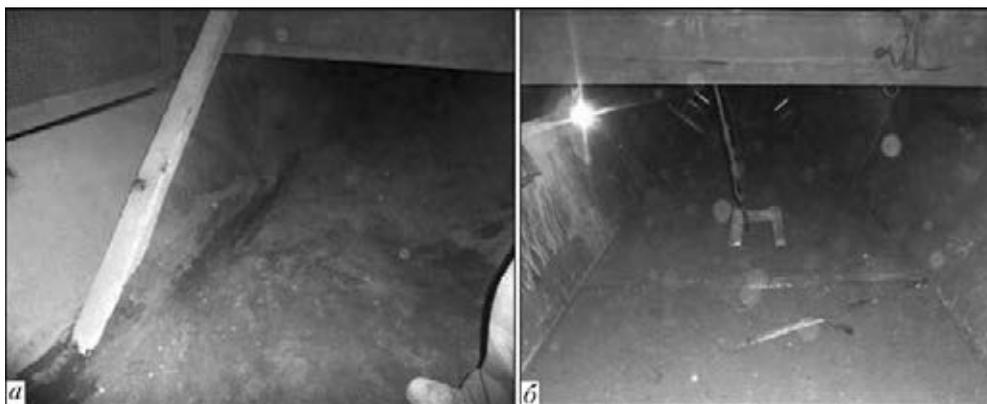


Рис. 5. Желоб скреперного механизма до ремонта (а) и после восстановления (б)

плакирующего слоя, т. е. соблюдается условие, когда $\varepsilon_{\text{ср}} > \varepsilon_{0,2}^{\text{ПС}}$. В этом случае остаточные напряжения сжатия могут быть равны напряжениям предела текучести материала плакирующего слоя, поскольку последний подвержен упругопластическому деформированию как при нагружении, так и при сбросе рабочей нагрузки.

В ходе проводимых исследований учитывалось значение продольных остаточных напряжений, как правило, растягивающих, которые являются следствием выбора толщины плакирующего слоя (рис. 4). Следует также отметить, что на зависимость, приведенную на рис. 4, оказывают влияние различные степени пластической деформации при сварке, нагрев и охлаждение [6]. На основе анализа эпюр остаточных напряжений $\sigma_{\text{ср}}$ в образцах при сварке автоматом АДФ-1002 типа 2ТС-17С можно выделить следующие особенности: зона сжимающих напряжений предопределяет поведение и свойства металла так, что толщина плакирующего слоя прямо пропорциональна значению остаточных напряжений в плакирующем слое всех исследуемых образцов.

В результате внедрения разработанной технологии сварки желоба скреперного механизма агломашины, разработанной подрядной организацией, получена конструкция металлургического агрегата, способного выдерживать высокие заданные нагрузки и длительный период эксплуатации, а также подтверждена целесообразность применения биметалла ВСтЗсп+10Х13 в качестве основного материала.

Таким образом, результаты проведенных работ свидетельствуют о том, что для обеспечения гарантированного качественного соединения рас-

смотренных биметаллов возможно применение описанной выше технологии. В этом случае срок эксплуатации можно увеличить до 80 %.

Выводы

1. Установленное значение остаточных напряжений в околошовной зоне соединения ВСтЗсп+08Х13, равное 100 МПа, является наилучшим показателем среди исследуемых сталей с наличием остаточных напряжений сжатия, причем их максимальное значение различное и зависит от уровня нагрузки и предела текучести материала плакирующего слоя.

2. В результате применения биметалла ВСтЗсп+08Х13 в качестве основного материала при изготовлении желоба скреперного механизма взамен металла ВСтЗсп, гарантировано увеличение периода эксплуатации до 80 %.

1. Медовар Б. И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей. — М.: Машгиз, 1958. — 258 с.
2. Гликман Л. А., Бабаев А. Н., Костров Е. Н. Усталостная прочность и напряженность сварных образцов с наплавленным слоем 10Х13 // Свойства материалов, применяемых в турбостроении и методы их испытаний. — М.-Л.: Машгиз, 1962. — С. 138–151.
3. Недосека А. Я. Основы расчета сварных конструкций. — Киев: Вища шк., 1988. — 263 с.
4. Коваленко И. В. Усовершенствование технологии дуговой сварки двуслойных сталей при изготовлении промышленных металлоконструкций: Дис. ... канд. техн. наук. — Мариуполь, 2013. — 146 с.
5. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. — М.: Высш. шк., 1982. — 270 с.
6. Стафаков Ю. П., Побаль И. Л., Князева А. Г. Рост трещин вблизи границы раздела разнородных материалов в условиях сжатия // Физ. мезомеханика. — 2002. — № 1. — С. 81–88.

Поступила в редакцию 25.01.2013