



ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ 10X13Г18Д+09Г2С

А. И. ГЕДРОВИЧ, д-р техн. наук, С. А. ТКАЧЕНКО, инж. (Восточноукр. гос. ун-т им. В. Даля),
И. А. ГАЛЬЦОВ, канд. техн. наук (Луган. нац. аграр. ун-т)

Рассмотрены особенности определения остаточных сварочных напряжений на натуральных образцах из разнородных сталей 10X13Г18Д+09Г2С. Установлена зависимость размера зоны пластических деформаций и продольных остаточных сварочных напряжений от используемых технологий сварки в защитных газах, режимов, погонных энергий. Подтверждено положительное влияние технологии холодного переноса металла (СМТ) на величину остаточных напряжений и размеры зон пластической деформации в соединениях разнородных сталей.

Ключевые слова: остаточные напряжения, режимы сварки, погонная энергия, сварные швы, околошовная зона, зона пластической деформации, магнитные свойства

Эксплуатируемые в настоящее время в Украине и странах СНГ вагоны дизель- и электропоездов имеют двухдверное исполнение, длину вагонов до 21,5 м, максимальную вместимость до 240 чел. Кузова вагонов выполнены из низкоуглеродистых и низколегированных сталей в виде листового, сортового, фасонного проката (в том числе холодногнутых профилей) и стальных отливок, отдельные элементы которых, как показывает статистика, из-за большой коррозии требуют ремонта или замены уже через 5-6 лет эксплуатации [1].

Важнейшим направлением развития конструкции электро- и дизельпоездов данного типа является максимальное снижение массы конструкции при сохранении или увеличении количества посадочных мест с одновременным обеспечением необходимых технических требований [2]. Детали и узлы вагонов при эксплуатации, наряду с многочисленными механическими и знакопеременными динамическими нагрузками, подвержены коррозии, абразивному износу, температурным колебаниям.

На основании опыта эксплуатации и экспериментально-теоретических исследований ВНИИЖТ и ВНИИВ рекомендуют стали для вагоностроения, имеющие следующие механические характеристики: $\sigma_{\text{в}} = 500 \dots 550$ МПа, $\sigma_{\text{т}} = 400$ МПа, $\delta = 21$ %. Применяемые в настоящее время низкоуглеродистые и низколегированные стали не соответствуют указанным выше требованиям.

В мировой практике имеется опыт применения в транспортной промышленности нержавеющей хромоникелевых сталей аустенитного класса для обшивки вагонов с целью достижения более продолжительного ресурса их эксплуатации.

Для обеспечения необходимых требований и экономии дорогостоящего никеля ЦНИИЧерметом им. И. П. Бардина (г. Москва, Россия) разработана и рекомендована для производства вагонов нержавеющая безникелевая сталь марки 10X13Г18Д [3] вместо сталей 12X18Н10Т, 08X18Н10. Эта сталь отличается высокой пластичностью при штамповке и кавитационной стойкостью, поэтому ее целесообразно применять для обшивки кузова, а более дешевые низколегированные стали 09Г2С повышенной прочности — для каркасных элементов кузовных конструкций вагонов. Применение стали 09Г2С для каркасных элементов кузова позволяет уменьшить толщину деталей с 3,0...8,0 до 2,5...7,0 мм, а использование нержавеющей стали 10X13Г18Д в холоднодеформированном состоянии — толщину обшивки с 2,5 до 1,5 мм. В результате ожидается, что при значительном увеличении габаритов вагона масса останетс я неизменной, а его срок службы увеличится.

Известно, что работоспособность сварных конструкций в значительной мере зависит от термомеханических процессов, происходящих в области сварного шва, значений пластической деформации и уровня продольных σ_x остаточных напряжений [4, 5], которые в сварных соединениях могут достигать предела текучести $\sigma_{\text{т}}$ свариваемого металла и более, а поперечные напряжения $\sigma_{\text{н}}$ при плоском напряженном состоянии могут не превышать $0,75\sigma_{\text{т}}$ [4]. Поэтому целью настоящей работы является исследование закономерностей формирования зоны пластических деформаций и продольных остаточных напряжений при сварке разнородных сталей 10X13Г18Д+09Г2С.

Работу выполняли экспериментально. Многочисленными исследованиями [3–8] показано, что в результате воздействия сварочного термомеханического цикла в сварных соединениях и узлах образуются остаточные сварочные напряжения, ко-



Рис. 1. Лабораторная установка для сварки образцов разнородных сталей 10X13Г18Д+09Г2С

торые при сварке низкоуглеродистых конструкционных сталей могут превосходить предел текучести материала, а при сварке хромомарганцевых коррозионностойких сталей достигать предела текучести [6]. Продольные остаточные напряжения, как правило, растягивающие, и являются следствием различной степени пластической деформации при сварочном нагреве и охлаждении [5]. При сварке конструкционных сталей (Ст3, 14Г2 и др.) закономерности их распределения в активной зоне достаточно хорошо изучены, а пластическая деформация в ней достигает 1...2% [4, 5].

Различия в формировании продольных σ_x остаточных напряжений при сварке перлитной стали 09Г2С и аустенитной стали 10X13Г18Д обусловлены тем, что нержавеющие аустенитные стали имеют низкий коэффициент теплопроводности, высокий коэффициент линейного расширения и склонны к упрочнению. Наличие пластической деформации и полей высоких остаточных растягивающих напряжений 1 рода согласно работе [6], в области шва и околошовной зоне приводит к распаду аустенита, т. е. фазовому превращению и появлению α -фазы. По содержанию α -фазы в сварном соединении можно качественно судить о распределении остаточных сварочных напряжений [6, 7] в этой зоне. В данной работе зону пластических деформаций на участке сварного соединения со стороны перлитной стали определяли по полосам текучести [4], а остаточные продольные напряжения — по изменению магнитных свойств стали (магнитной проницаемости) [5]. Для исследований использовали пластины разме-

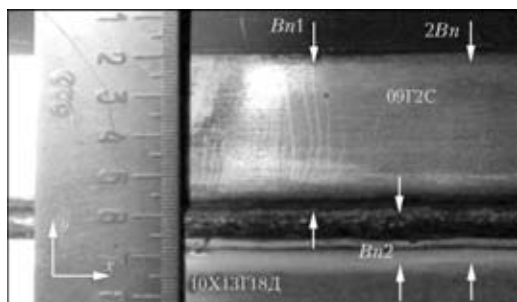


Рис. 2. Размеры зон пластической деформации $Bn1$, $Bn2$, $2Bn$ образца нахлесточного сварного соединения сталей 10X13Г18Д ($\delta = 1,5$ мм) + 09Г2С (2,5 мм), полученного при сварке полуавтоматом А-547У

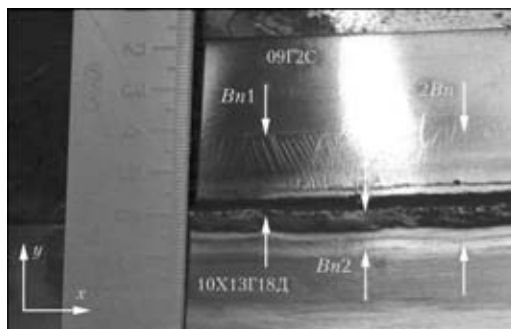


Рис. 3. Размеры зон пластической деформации $Bn1$, $Bn2$ образца нахлесточного сварного соединения сталей 10X13Г18Д ($\delta = 1,5$ мм) + 09Г2С (2,5 мм), полученного при сварке полуавтоматом TRS-3200 СМТ

ром 125×300×1,5 мм (сталь 10X13Г18Д). Толщина соответствовала толщине металла обшивки вагона и пластины размером 125×300×2,5 мм (7 мм) из стали 09Г2С. Большая толщина соответствовала соединению обшивки с каркасом кузова вагона. Образцы предварительно шлифовали и полировали. Полированные образцы собирали внахлестку и их сварку проводили полуавтоматами А-547У и TRS-3200 СМТ (рис. 1). При этом использовали сварочную проволоку марки Св-08Х20Н9Г7Т диаметром 1,2 мм в среде защитных газов ($Ar + CO_2$) в сборочном приспособлении «кондуктор», а также СМТ-технологию.

При сварке полуавтоматом А-547У применяли следующий режим: $I = 110...120$ А; $U_d = 20...21$ В; $v_{CB} = 17...22$ м/ч; $q_{CB} = 3350$ Дж/см; полуавтоматом TRS-3200 СМТ: $I = 106$ А; $U = 15,9$ В; $v_{CB} = 38,2$ м/ч; $q_{CB} = 1105$ Дж/см.

Зону пластических деформаций $Bn2$ (рис. 2, 3) на аустенитной стали 10X13Г18Д вытраивали после сварки реактивом Фрая, после проявления границ зоны реактив смывали спиртом, образец сушили, затем проводили травление реактивом Амберга–Каллинга. После четкого проявления границ пластической деформации образец протирали спиртом и сушили [6].

Зону пластических деформаций $Bn1$ (рис. 2, 3) на участке сварного соединения со стороны перлитной стали 09Г2С определяли по полосам текучести — линиям Чернова–Людерса. Продольные остаточные напряжения σ_x в стали 10X13Г18Д оценивали согласно методикам работы [5]. Общую ширину зоны пластических деформаций разнородного соединения 10X13Г18Д+09Г2С — $2Bn$ после травления определяли в центральной части сварного соединения переносным бинокулярным микроскопом МПБ-3. Погрешность измерений составила 0,025 мм. Для расчета среднего значения проводили пять измерений. Для исключения влияния краевого эффекта концевые участки длиной по 60 мм не рассматривали. Эксперимент повторяли трижды. Поэтому среднее значение зоны $2Bn$ определяли по данным, полученным из 15 наблюдений.



Ф отосъемку проводили цифровым фотоаппаратом.

После полного остывания сварного соединения определяли распределение остаточных продольных напряжений σ_x вдоль оси OY . В аустенитной стали 10X13Г18Д возникают растягивающие напряжения, так как она имеет значительно большее уменьшение объема по сравнению с ферритно-перлитной сталью 09Г2С, а на участке ферритно-перлитной стали — уравнивающие их напряжения сжатия (рис. 4). Поля остаточных напряжений в одно- и разнородных соединениях близки между собой и отличаются лишь некоторым смещением эпюры в сторону стали с меньшей теплопроводностью (в данном случае в сторону аустенитной стали) (рис. 5). Эти напряжения в большинстве случаев не могут быть сняты термообработкой и создают опасность как эксплуатационных разрушений, так и изменения размеров конструкции во времени. Сравнив эпюры остаточных напряжений σ_x и размеры зоны пластических деформаций в сварных соединениях, полученных при сварке образцов полуавтоматами А-547 и TRS-3200 СМТ, можно сделать следующие выводы: на образцах из сталей 10X13Г18Д ($\delta = 1,5$ мм) + 09Г2С (2,5 мм) при сварке полуавтоматом TRS-3200 СМТ наблюдается уменьшение уровня растягивающих напряжений σ_x на 5,3 %, а размер зоны пластической деформации $2Bn$ — на 45,5 %; на образцах из сталей 10X13Г18Д ($\delta = 1,5$ мм)+09Г2С (7 мм) при сварке полуавтоматом TRS-3200 СМТ имеет место уменьшение уровня растягивающих напряжений σ_x на 5,3 %, а размер зоны пластической деформации $2Bn$ — на 21,3 %.

На основе анализа зон пластической деформации $2Bn$ сварного соединения 10X13Г18Д ($\delta = 1,5$ мм) и 09Г2С (2,5 мм) и эпюр остаточных напряжений σ_x в образцах при сварке полуавтоматом А-547У (рис. 4), можно выделить следующие напряженные зоны:

1 — зона сжимающих напряжений σ_x (около 16 мм) находится в основном металле ЗТВ (со стороны аустенитной стали), не претерпевает при сварке пластической деформации. Уровень максимальных сжимающих напряжений -45 МПа, среднее значение -27 МПа; 2 — зона максимальных сжимающих напряжений σ_x (около 6 мм). Металл находится также в ЗТВ и претерпевает в процессе сварочного цикла пластическую деформацию. Уровень максимальных сжимающих напряжений -50 МПа, среднее значение -40 МПа; 3 — зона максимальных растягивающих напряжений σ_x . Шов и околошовная зона (около 9 мм) со стороны аустенитной стали находятся в области пластических деформаций. Уровень максимальных растягивающих напряжений 475 МПа, среднее значение

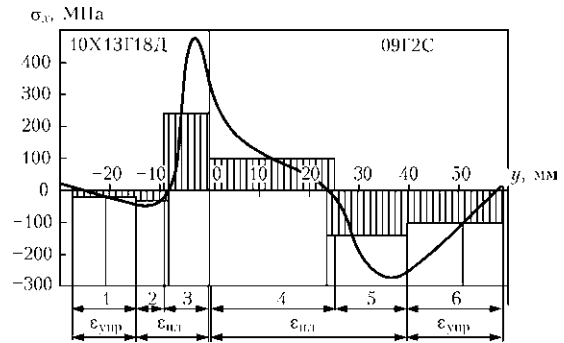


Рис. 4. Характерные напряженные зоны сварного соединения сталей 10X13Г18Д ($\delta = 1,5$ мм) + 09Г2С (2,5 мм), полученного при сварке полуавтоматом А-547У (1–6 — номер зоны)

250 МПа; 4 — зона максимальных растягивающих напряжений σ_x . Шов и околошовная зона (ширина около 23 мм) со стороны ферритно-перлитной стали находятся в области пластических деформаций. Уровень максимальных растягивающих напряжений 350 МПа, среднее значение 100 МПа; 5 — зона максимальных сжимающих напряжений σ_x (около 17 мм) находится в основном металле, который подвергается в процессе сварки пластической деформации. Уровень максимальных сжимающих напряжений -270 МПа, среднее значение -140 МПа; 6 — зона сжимающих напряжений (около 19 мм) находится в основном металле, который не подвергается при сварке пластической деформации.

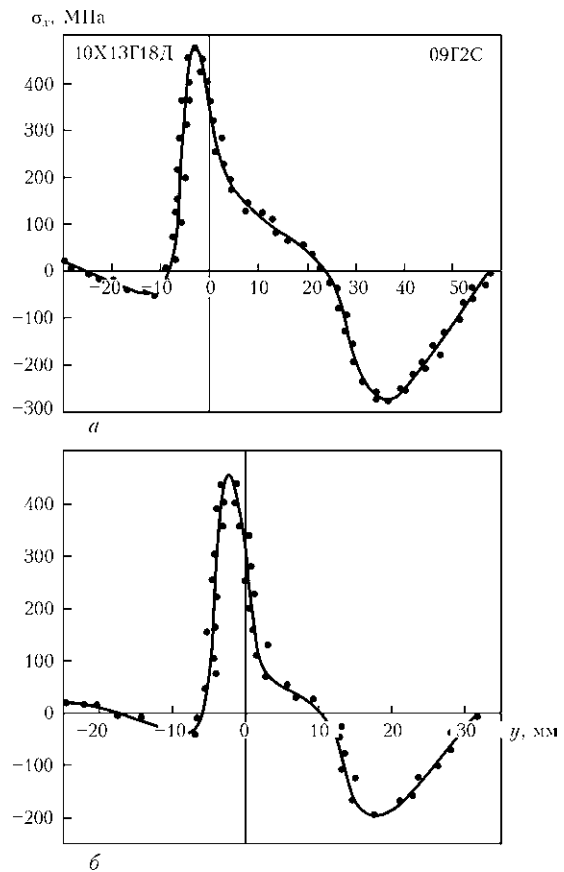


Рис. 5. Эпюры остаточных напряжений σ_x в сварных соединениях сталей 10X13Г18Д ($\delta = 1,5$ мм) + 09Г2С (2,5 мм), полученных полуавтоматом А-547У (а) и TRS-3200 СМТ (б)

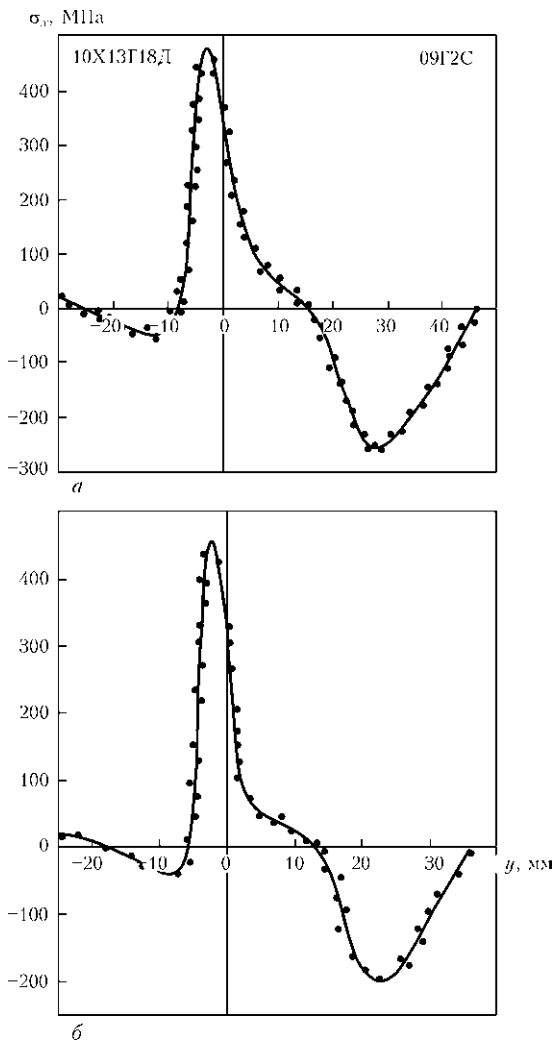


Рис. 6. Эпюры остаточных напряжений σ_x в сварном соединении сталей 10X13Г18Д ($\delta = 1,5$ мм) + 09Г2С (7 мм), полученном полуавтоматом А-547У (а) и TRS-3200 СМТ (б)

тической деформации. Уровень максимальных сжимающих напряжений -230 МПа, среднее значение -100 МПа.

Из анализа полученных экспериментальных данных следует, что в зоне 3 и 4 наблюдаются максимальные растягивающие остаточные напряжения, превышающие предел текучести материала ($\sigma_T = 450$ МПа) на 6,6 %. Зоны пластической деформации при сварке образцов с использованием полуавтомата TRS-3200 СМТ идентичны описанным выше и отличаются только размерами зон пластической деформации и значениями напряжений.

Для подтверждения достоверности данных, полученных в результате проведенных экспериментов по определению размера зон пластических де-

формаций $2Bn$, которые возникают в сварных соединениях из разнородных сталей (10X13Г18Д+09Г2С), проведен их теоретический расчет по методу, описанному в работе [4]. За базу для расчета и сравнительного анализа были взяты данные, полученные при сварке образцов полуавтоматом А-547У и TRS-3200 СМТ.

Сопоставление данных о размерах зон пластических деформаций показало, что расхождение между экспериментом и теоретическим расчетом не превышает 5 %.

Выводы

1. Экспериментально определен размер зоны пластической деформации $2Bn$ при сварке разнородных сталей, которая состоит из зоны пластической деформации $Bn1$ (ЗТВ со стороны ферритоперлитной стали) и $Bn2$ (ЗТВ со стороны аустенитной стали), причем $Bn1 > Bn2$.

2. Установлено наличие значительных растягивающих продольных напряжений σ_x в металле ЗТВ со стороны аустенитной стали и сжимающих напряжений в металле ЗТВ со стороны феррито-перлитной стали.

3. Экспериментально подтверждено преимущество применения технологии СМТ для достижения минимальной зоны пластических деформаций в сварных соединениях разнородных сталей.

1. Басов Г. Г., Голубенко А. Л., Мищенко К. П. Концепция создания типажа современного мотор-вагонного подвижного состава для украинских дорог // Сб. науч. тр. по проблемам внедрения и освоения производства в Украине мотор-вагонного подвижного состава на базе унифицированного прицепного вагона. — Луганск: Машиностроение, 2003. — С. 17–21.
2. Березницкий В. А., Сергиенко Н. И., Щербаков В. П. Использование нержавеющей и низколегированных сталей для вагонов дизель- и электропоездов максимальной вместимости // Там же. — Луганск: Машиностроение, 2003. — С. 85–87.
3. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. Специальные стали. — М.: Металлургия, 1985. — 408 с.
4. Гедрович А. И. Пластическая деформация при сварке. — Луганск: Изд-во Восточноукр. гос. ун-та, 1998. — 237 с.
5. Касаткин Б. С., Прохоренко В. М., Чертов И. М. Напряжения и деформации при сварке. — Киев: Вища шк., 1987. — 246 с.
6. Особенности формирования структуры и свойств зоны сплавления стали 10X13Г18Д / А. И. Гедрович, А. Н. Ткаченко, Ткаченко С. М. и др. // Автомат. сварка. — 2007. — № 4. — С. 23–28.
7. Сагалевиц В. М., Савельев В. Ф. Стабильность сварных соединений и конструкций. — М.: Машиностроение, 1986. — 264 с.
8. Курдюмов Г. В., Утевский Л. М., Энтин Р. И. Превращения в железе и стали. — М.: Наука, 1977. — 236 с.

A method is proposed, and features of determination of residual welding stresses on full-scale samples from 10Kh13G18D+09G2S dissimilar steels are considered. A dependence is established between the size of the zone of plastic deformations and longitudinal residual welding stresses on the applied technologies of gas-shielded welding, modes, and heat inputs. Positive influence of the technology of cold metal transfer on residual stresses and dimensions of plastic deformation zones in dissimilar steel joints is confirmed.

Поступила в редакцию 04.02.2010