



ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ РЕЛЬСОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Академик НАН Украины **С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**, **Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО**, канд. физ.-мат. наук, **Г. Ф. РОЗЫНКА**, **Ю. В. ШВЕЦ**, **А. В. ДИДКОВСКИЙ**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Использован расчетно-экспериментальный метод определения остаточных напряжений в зоне сварных стыков. Основные данные получены путем математического моделирования процесса формирования упругопластических деформаций по мере остывания сваренных деталей, вплоть до остаточного состояния.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, пульсирующее оплавление, сварное соединение, остаточные напряжения, микроструктура, математическая модель

При изготовлении бесстыкового железнодорожного пути для скоростных магистралей широко применяется сварка, перед которой в настоящее время ставятся новые задачи, поскольку длина сварных плетей возрастает с 400... 800 м до длины цельно-сварной плети, достигающей несколько километров [1]. Использование плетей такой длины повышает вероятность возникновения в них дополнительных продольных сил, что вызвано внешними силовыми воздействиями, например, подвижной нагрузкой при изменении режима движения поезда. Это в свою очередь ужесточает требования к эксплуатационной стойкости сварных стыков.

В бесстыковых путях широко используют высокопрочные рельсы, в частности из электростали, имеющей повышенное содержание марганца, ванадия, азота (табл. 1). По сравнению с рельсами производства прошлых лет они имеют более высокую износостойкость и прочность (табл. 2). Чаще всего рельсы при изготовлении подвергаются объемной закалке, а затем при сварке участки зоны термического влияния (ЗТВ) разупрочняются. В связи с этим требуется дополнительная термическая обработка, которая во многих случаях трудно осуществима и к тому же не обеспечивает восстановления необходимых свойств металла.

Разработка способов снижения тепловложения при сварке в целях сокращения протяженности участков, подвергшихся высокотемпературному нагреву, является перспективным направлением в совершенствовании технологии сварки рельсов из высокопрочных сталей. Однако при этом необходимо учитывать, что рассматриваемые рельсовые стали весьма чувствительны к закалке и приме-

нение высококонцентрированного нагрева может привести к образованию в металле ЗТВ опасных закалочных структур и возникновению значительных остаточных напряжений в сварном шве.

Эксплуатационная стойкость сварных стыков зависит от уровня остаточных напряжений. В условиях циклического нагружения остаточные напряжения изменяют значения среднего напряжения цикла внешней нагрузки, что может способствовать зарождению усталостной трещины или, наоборот, предотвращению ее возникновения. С учетом того, что большинство повреждений сварных стыков в пути носит усталостный характер, исследования остаточного напряженного состояния сварных рельсов представляют не только теоретический, но и практический интерес [3].

Наиболее широко во всем мире для сварки рельсов используется контактная стыковая сварка оплавлением. В ИЭС им. Е. О. Патона в последние годы разработан новый технологический процесс — пульсирующее оплавление, — который значительно расширит технологические возможности этого способа сварки за счет сокращения припуска на сварку и возможности получать при нагреве тепловые поля с различным градиентом температуры. Это позволяет сваривать рельсы различных типов как поверхностно-закаленные, так и объемно-закаленные [4].

В ходе ранее проведенных исследований установлено, что при сварке таких рельсов следует стремиться к ограничению энергозложения во избежание разупрочнения в зоне сварки. Однако применение режимов сварки с большим градиентом температурного поля увеличивает вероятность появления дефектов в плоскости соединения. Кроме того, при использовании высококонцентрированного нагрева можно ожидать повышения уровня

Таблица 1. Химический состав рельсовой стали, мас. % [2]

Марка стали	C	Mn	Si	P	S	Al	V	N
М76	0,76	0,99	0,30	0,011	0,0175	0,013	—	—
Э76	0,82	1,11	0,49	0,01	0,006	0,011	0,11	0,014

Таблица 2. Механические свойства рельсовой стали [2]

Марка стали	Временное сопротивление σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость KCU , МДж/м ²
М76	1281	965	10	32,5	0,42
Э76	1350	1010	13	44,0	0,44

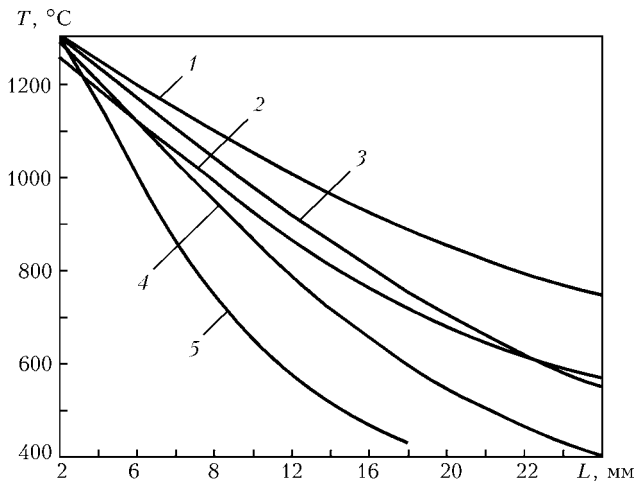


Рис. 1. Распределение температуры в ЗТВ сварного соединения перед осадкой при сварке на различных режимах: 1 — предварительный подогрев ($t_{св} = 200...250$ с); 2 — непрерывное оплавление с программным понижением напряжения ($t_{св} = 180...220$ с); 3–5 — пульсирующее оплавление (соответственно $t_{св} = 110...120$; $70...80$; $30...40$ с)

остаточных напряжений в сварных соединениях и соответственно снижения их усталостной прочности.

Цель настоящей работы — оценить влияние различных тепловых режимов при сварке оплавлением на остаточные напряжения и возможные структурные изменения в ЗТВ сварных соединений рельсовой стали М76.

В работе использован расчетно-экспериментальный метод определения остаточных напряжений в зоне сварных стыков, при котором основные данные получены путем математического моделирования процесса формирования упругопластических деформаций по мере остывания сварных соединений вплоть до комнатной температуры.

В основу расчета приняты экспериментальные данные о распределении температуры в ЗТВ сварного соединения при контактной сварке оплавлением.

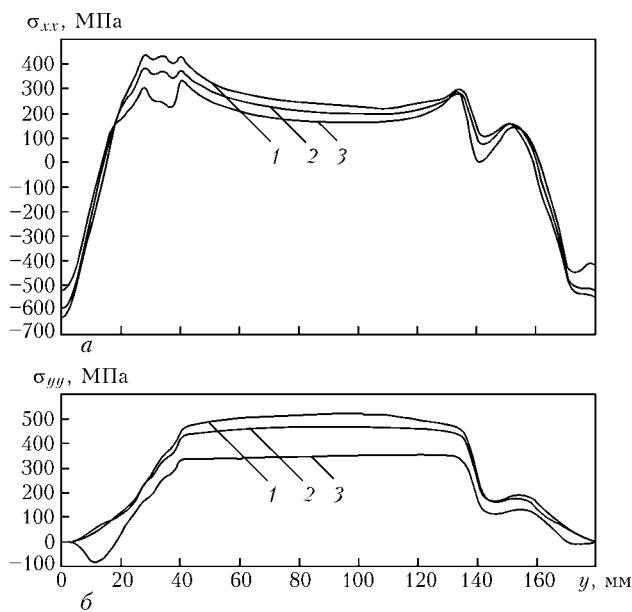


Рис. 2. Расчетные зависимости продольных σ_{xx} (а) и поперечных σ_{yy} (б) остаточных напряжений, полученные для вариантов нагрева 2 (кривая 1), 4 (кривая 2) и 5 (кривая 3)

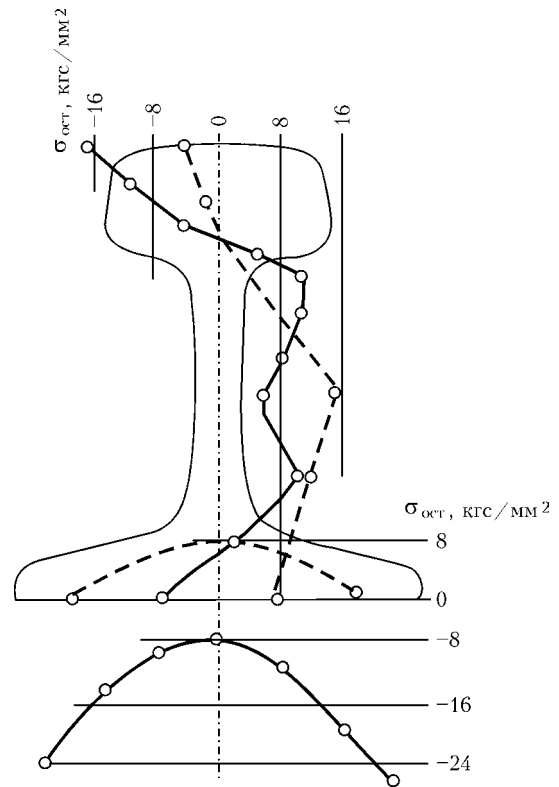


Рис. 3. Результаты замеров продольных (сплошные линии) и поперечных (штриховые линии) остаточных напряжений в сварном стыке рельсов из стали Р65 (вариант 2) [3]

Кривые распределения температуры на рис. 1 соответствуют различным вариантам режимов сварки рельсов непрерывным и пульсирующим оплавлением, при которых обеспечивается качественное формирование соединений.

При всех приведенных режимах сварки получены соединения без дефектов. При этом ширина зоны структурных превращений (температура выше 700°C) в сварных соединениях, полученных на «мягком» режиме сварки (табл. 3, вариант 2) в 2 раза больше, чем на «жестких» (варианты 4 и 5). Соответственно отличались структура металла ЗТВ и прочностные свойства.

Расчет проводили для трех вариантов (2, 4 и 5) режимов с различными температурными полями (соответственно кривые 2, 4, 5 на рис. 1), которые принимали за начальное распределение температуры. С помощью апробированных средств теории теплопроводности прослеживали процесс охлаждения. Указанную идею использовали уже неоднократно в ряде работ [5 и др.]. Она позволяет существенно упростить решение управления теплопроводности за счет исключения из расчета процесса нагрева деталей при контактной сварке оплавлением.

Для расчета температуры использовали алгоритм численного решения трехмерного уравнения теплопроводности при начальных и граничных условиях, соответствующих условиям охлаждения образцов. Расчет проводили с помощью компьютерной программы 3D, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона.

Для расчета напряженного состояния использовали алгоритм численного решения задачи не-

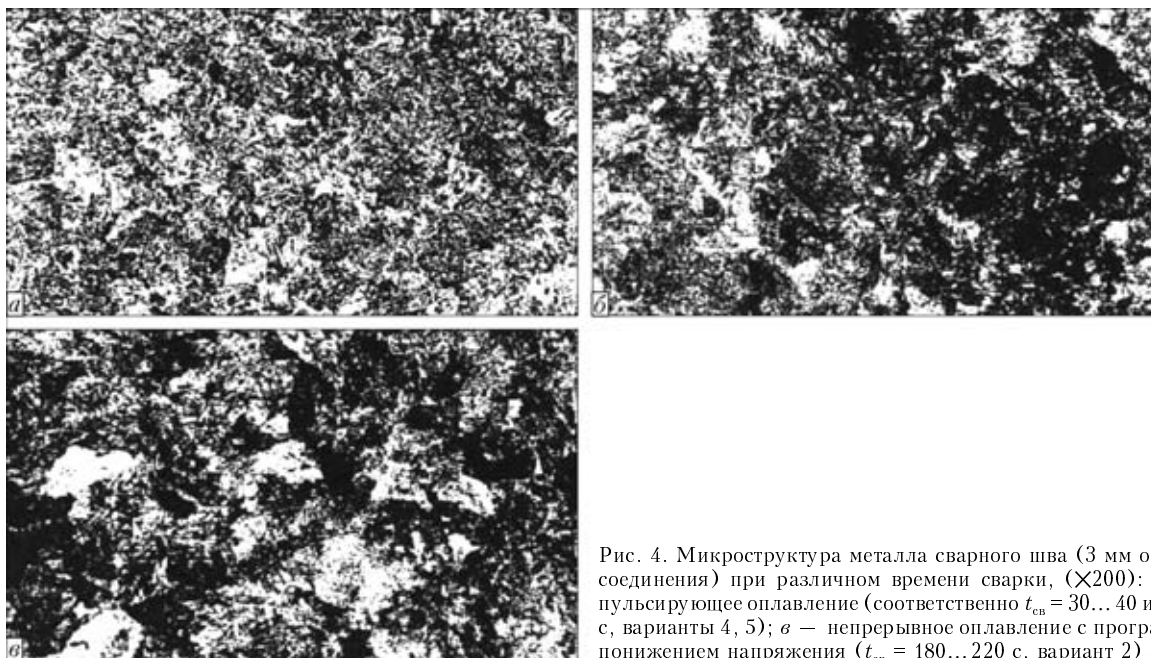


Рис. 4. Микроструктура металла сварного шва (3 мм от линии соединения) при различном времени сварки, (X200): а, б — пульсирующее оплавление (соответственно $t_{св} = 30...40$ и $70...80$ с, варианты 4, 5); в — непрерывное оплавление с программным понижением напряжения ($t_{св} = 180...220$ с, вариант 2)

изотермического пластического течения с условием текучести Мизеса [6], а для описания кинетики микроструктурных изменений в ЗТВ сварных соединений стали М76 — характеристики диаграммы анизотропического расчѐта аустенита для стали с 0,77 % С [7]. Результаты расчѐта продольных и поперечных остаточных напряжений представлены на рис. 2.

Достоверность полученных данных оценена по результатам экспериментального измерения продольных и поперечных остаточных напряжений в сварных стыках рельсов из стали Р65, выполненных на режиме, соответствующем варианту 4 (рис. 2, кривая 2). На рис. 3 представлены результаты экспериментальных замеров продольных и поперечных остаточных напряжений, которые проводили способом вырезки темплетов по методике, описанной в работе [8].

Сравнив полученные расчѐтные данные (см. рис. 2) с результатами замеров остаточных напряжений (рис. 3), можно сделать вывод, что при-

нятая модель дает достоверные результаты. Различия в данных расчѐтных и замеров объясняются тем, что при проведении экспериментальных замеров имеет место усреднение значений напряжений из-за существенной протяженности базы замера.

Как видно из сравнения кривых на рис. 2, изменение нагрева стыков рельсов при сварке в достаточно широких пределах практически не влияет на значения остаточных напряжений, а также на их распределение в металле ЗТВ. Отсюда следует, что применение высококонцентрированного нагрева не должно оказывать отрицательного влияния на механические свойства сварных соединений.

Более сложно проявляется влияние нагрева на структуру металла в ЗТВ. Увеличение интенсивного нагрева приводит к сужению ЗТВ и сопровождается уменьшением размеров зерна в структуре металла приконтактной области. Преобладающей структурой при использовании режима сварки варианта 2 является перлит, в случае варианта 4 — сорбит, варианта 5 — сорбит с верхним бейнитом (рис. 4).

При этом уменьшение размеров зерна при испытаниях на статический изгиб приводит к по-

Таблица 3. Результаты испытаний на статический изгиб

Марка стали	Вариант режима сварки	Разрушающая нагрузка, кН	Стрела прогиба, мм
М76	2	$\frac{1900...2200}{2100}$	$\frac{38...55}{45}$
	4	$\frac{2000...2300}{2130}$	$\frac{43...60}{53}$
	5	$\frac{2250...2350}{2300}$	$\frac{41...63}{46}$
Э76	2	$\frac{1800...2300}{2040}$	$\frac{17...30}{20}$
	4	$\frac{2120...2500}{2180}$	$\frac{31...45}{35}$
	5	$\frac{2050...2500}{2350}$	$\frac{28...36}{32}$

Примечания. 1. Вариант 2 — непрерывное оплавление; варианты 4 и 5 — пульсирующие. 2. В числителе приведены минимальные и максимальные значения, в знаменателе — средние.

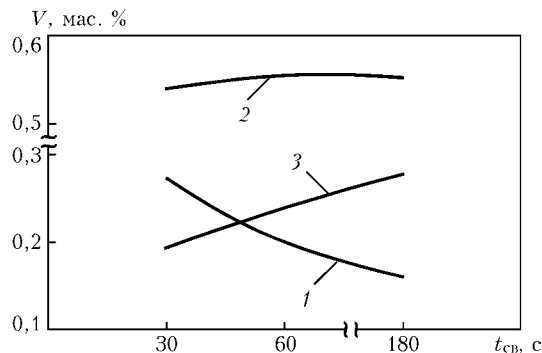


Рис. 5. Изменения массовой доли V мартенсита (1), бейнита (2) и ферритно-перлитной смеси (3) в микроструктуре металла ЗТВ стали М76 при различном времени сварки



вышению прочностных свойств (возрастает разрушающая нагрузка). Пластические свойства (стрела прогиба) при увеличении интенсивности нагрева сначала возрастают (вариант 4, табл. 3), а затем снижаются (вариант 5).

На рис. 5 приведены расчетные данные о микроструктурных изменениях в металле ЗТВ сварных соединений стали М76 при различных параметрах режима сварки.

Многолетний опыт эксплуатации сварных стыков, выполненных с использованием непрерывного оплавления с программным понижением напряжения (вариант 2), показал, что имеющийся уровень остаточных напряжений не оказывает существенного влияния на их прочностные свойства. При этом очаги мартенситных включений или вовсе не обнаруживаются, или имеют малую протяженность и от них не зависит несущая способность сварного стыка.

Как показали исследования, при сварке с использованием режимов пульсирующего оплавления, близких по тепловложению к варианту 4, не происходит повышение остаточных напряжений. Образовавшиеся в металле ЗТВ мартенситные структуры не приводят к снижению эксплуатационной стойкости сварных стыков.

Применение более интенсивных режимов пульсирующего оплавления, аналогичных варианту 5, может способствовать снижению пластических свойств сварного соединения из-за более высокого содержания мартенситной фазы, что устраняется последующей термической обработкой.

Выводы

1. Разработанная математическая модель позволяет получать достоверные результаты при расчете остаточных напряжений в сварных соединениях, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением.

2. Математическая модель микроструктурных изменений в металле ЗТВ дает возможность про-

водить сравнительную оценку влияния режимов сварки на структуру металла сварного шва.

3. При изменениях нагрева в интервалах температур, которые можно обеспечить при сварке непрерывным и пульсирующим оплавлением, распределение внутренних напряжений в зоне сварки, а также их значения изменяются несущественно. Поэтому применение «жестких» режимов сварки не приводит к повышению уровня остаточных напряжений.

4. При уменьшении нагрева массовая доля основной структуры шва — бейнита — не изменяется, а массовая доля мартенсита увеличивается. Поэтому при выборе режимов сварки необходимо учитывать совокупность влияния этих двух факторов на получение наиболее высоких показателей пластических свойств сварных соединений.

1. *Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України* / Е. І. Даніленко, М. І. Карпов, М. Д. Костюк та ін. — К.: Транспорт України, 2002. — 106 с.
2. *Производство рельсов из дисперсно-упрочненной стали* / В. И. Ворожничев, В. В. Павлов, Ю. Д. Девяткин и др. // Изв. вузов. Черн. металлургия. — 2004. — № 2. — С. 47–51.
3. *Синадский Н. А., Шлятин В. Б.* Влияние холодной правки на качество сварных закаленных рельсов // Тр. ЦНИИ МПС. Вып. 556: Вестн. Всесоюз. НИИ ж.-д. трансп. «Сварка железнодорожных рельсов». — М., 1977. — С. 116–135.
4. *Контактная стыковая сварка рельсов. Опыт применения и перспективы совершенствования* / С. И. Кучук-Яценко, В. Г. Кривенко, А. В. Бондарук, А. В. Дидковский // Автомат. сварка. — 1999. — № 12. — С. 32–37.
5. *Напряжения при контактной сварке труб* / В. И. Махненко, С. И. Кучук-Яценко, В. М. Шекера и др. // Там же. — 1974. — № 4. — С. 33–50.
6. *Исследование влияния фазовых превращений на остаточные напряжения при сварке кольцевых труб* / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, О. В. Махненко и др. // Там же. — 2000. — № 5. — С. 3–8.
7. *Atlas of time-temperature diagrams for irons and steels* // Ed. G. Vander Voort. — S. 1.: ASM publ., 1991. — 570 p.
8. *Синадский Н. А., Шлятин В. Б.* Остаточное напряженное состояние сварных объемно-закаленных рельсов // Вестн. Всесоюз. НИИ ж.-д. трансп. — 1970. — № 8. — С. 38–41.

Calculation-experimental method of determination of residual stresses in the zone of welded joints was used. The basic data were obtained by mathematical modeling the process of formation of elastic-plastic deformations during cooling welded parts up to plastic condition.

Поступила в редакцию 17.05.2004