

ВЛИЯНИЕ ПОСЛЕСВАРОЧНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ 20 И 30ХГСА

Типичной формой предельного состояния сосудов, работающих под давлением, является разрушение или повреждение как результат развития трещины. Обычным местом нахождения трещин являются сварные швы или их окрестности. Для изготовления сварных днищ сосудов, работающих под давлением, широко применяется автоматическая сварка под слоем флюса. Ручная дуговая сварка применяется главным образом в штуцерах, имеющих короткие и прерывистые швы, швы сложной конфигурации. Следствием структурных изменений является снижение механических и эксплуатационных свойств сварных соединений. Сварочные напряжения также способствуют ускорению коррозионных процессов. Используемые методы термической обработки сварных соединений являются длительными и энергоемкими, не обеспечивают равнопрочности шва и основного металла. Перспективным для достижения структурной однородности и обеспечения сочетания высокой прочности и пластичности представляется использование горячей пластической деформации сварных швов в температурно-скоростных режимах проявления эффекта сверхпластичности металлов.

В статье решается задача снижения структурных несовершенств сварных соединений сталей 20 и 30ХГСА. Методом рентгеноструктурного анализа исследованы образцы сварных соединений после различных видов обработки. Установлено, что для сварных соединений из стали 20 все виды послесварочной обработки приводят к снижению микронапряжений, для сварных соединений из стали 30ХГСА после отжига и термоциклической обработки уменьшение микронапряжений не наблюдается, а прокатка нагретыми валками в режиме сверхпластичности (СП) позволяет снизить микронапряжения. Новизной является использование послесварочной деформационной обработки сварного соединения нагретыми валками (изотермическая прокатка) в режиме сверхпластической деформации ($\varepsilon=20\%$).

Ключевые слова: сверхпластическая деформация, остаточные напряжения, сварные соединения, нефтегазовое оборудование.

Современный уровень технического прогресса позволяет создавать сосуды и аппараты, которые обладают высокой надежностью. Основой для этого служит комплекс мер, применяемых на стадии проектирования, монтажа и эксплуатации. В процессе проектирования проводится детальный анализ основных режимов работы конструкций, и принимаются меры по обеспечению их прочности во всех рассматриваемых случаях. Однако такой анализ не всегда может являться достаточной гарантией работоспособности изделий. Основной причиной большинства случаев нарушения работоспособности является недостаточность имеющихся представлений о возможных неблагоприятных ситуациях при эксплуатации сосудов, возникающих в связи с особенностями используемых для их изготовления конструкционных материалов, технологий изготовления и отклонений параметров режимов работы от проектных.

Типичной формой предельного состояния сосудов, работающих под давлением, является разрушение или повреждение как результат развития трещины. Обычным местом нахождения

трещин являются сварные швы или их окрестности. Возникновение аварийных ситуаций, как крайней формы проявления отказов, должно быть исключено для оборудования нефтегазовой отрасли, особенно для больших сосудов со сварными днищами, работающих под давлением. Это связано с тем, что восстановление таких сосудов после аварий требует привлечения огромных трудовых и материальных ресурсов, которые во много раз превышают плановые затраты на капитальный ремонт, а сами аварии и их последствия становятся потенциально опасными как для человека, так и для природы.

Создание крупногабаритных объектов нефтегазовой отрасли требует в большинстве случаев индивидуального подхода. При этом в каждом конкретном случае решается многоплановая задача по привязке объекта к процессу, другим объектам, технологическим системам, условиям эксплуатации, климатическим условиям и т. д. Кроме этого, необходимо выполнение ряда требований по обеспечению безопасности, снижению материалоемкости и повышению экономической эффективности.

Материалам элементов нефтегазового оборудования присущи структурные, фазовые и химические неоднородности, характерные для состояния поставки и проявляющиеся чаще всего при механическом и термическом воздействии на металл. В создании неравновесных структур особенно велика роль сварочных процессов. В процессе сварки проявляются практически все виды гетерогенности: геометрическая, структурная, химическая и др. Образование дефектов (поры, шлаковые включения, горячие и усадочные трещины и т. д.) происходят в процессе кристаллизации металла, в межоперационные периоды и при хранении сварных конструкций. Причем геометрическая и физическая неоднородности являются побуждающей причиной неравномерного распределения дефектов, что, в значительной степени, затрудняет их выявление с помощью технологического контроля.

Использование сварки для тех или иных целей всегда должно сопровождаться ясным представлением о комплексе свойств сварного соединения, которые должны быть получены в результате сварки [1].

Выбор того или иного метода сварки зависит от конкретных условий производства, наличия оборудования, экономических соображений, доступности мест сварки, возможности обеспечить те или иные свойства сварных соединений.

В настоящее время около 70% всех сварочных работ выполняется методами плавления. Для плавления применяют следующие источники теплоты: дуговые, плазменно-дуговые, электронно- и ионнолучевые, световые, индукционные, электрошлаковые и т. д.

Для изготовления сварных днищ сосудов, работающих под давлением, широко применяется автоматическая сварка под слоем флюса. Ручная дуговая сварка применяется главным образом в штуцерах, имеющих короткие и прерывистые швы, швы сложной конфигурации. Положительной стороной ручной сварки является возможность производить сварку в любом пространственном положении, что особенно важно для сварки в монтажных условиях. При этом определяющим фактором актуальности проведения исследования сварных соединений, выполненных электродуговой ручной сваркой, является большая зависимость качества сварки от индивидуальных особенностей сварщика.

Сварные соединения, выполненные сваркой плавлением, можно разделить на несколько зон, отличающихся макро- и микроструктурой, химическим составом, механическими свойствами и другими признаками: зону наплавленного металла или сварного шва, зону термического влияния и зону основного металла. Характерные признаки зон связаны с фазовыми и структурными превращениями, которые металл претерпевает при сварке в каждой зоне.

Наиболее существенные изменения структуры металла, его химического состава, а также вероятность возникновения различного рода дефектов наблюдаются в зоне сплавления. Участок перегрева характеризуется существенным увеличением зерна, наличием полных структурных и фазовых превращений. На участке полной перекристаллизации температура нагрева выше температуры фазовых превращений, однако, интенсивность превращений меньше, чем на участке перегрева, также как и меньше время пребывания металла при этих температурах, поэтому существенного увеличения зерна здесь не происходит. Аналогичные явления могут наблюдаться в зоне высокотемпературного отпуска. Зона низкотемпературного отпуска характеризуется менее существенными изменениями в металле.

Зона основного металла располагается за пределами зоны термического влияния и не претерпевает изменений при сварке, однако может влиять на превращения в зоне термического влияния в зависимости от его макро- и микроструктуры, определяемых способом первичной обработки металла и последующей термообработкой [2].

Следствием структурных изменений является снижение механических и эксплуатационных свойств сварных соединений. Сварочные напряжения также способствуют ускорению коррозионных процессов. Остаточные макронапряжения в конструкции возникают под действием различных технологических факторов при ее изготовлении. Остаточные сварочные напряжения – следствие пластических деформаций при неравномерном нагреве металла. Наложение остаточных напряжений на рабочие приводит к увеличению действующих в материале конструкции напряжений, а повышение уровня макронапряжений вызывает уменьше-

ние стойкости материалов в сероводородсодержащей среде [3].

Вопросы обработки сварных швов из конструкционных сталей освещены в большом количестве научных исследований, а их результаты нашли применение на практике. Однако используемые методы их термической обработки являются длительными и энергоемкими, не обеспечивают равнопрочности шва и основного металла. Перспективным для достижения структурной однородности и обеспечения сочетания высокой прочности и пластичности представляется использование горячей пластической деформации сварных швов в температурно-скоростных режимах проявления эффекта сверхпластичности металлов. Обработка материалов в режиме сверхпластической деформации (СПД) обеспечивает малые нагрузки на инструмент и низкие энергозатраты [4].

Изотермическая прокатка нагретыми валками образцов сварных соединений была проведена со степенями деформации 10, 20 и 40% при температуре $730 \pm 5^\circ\text{C}$ – оптимальной температуре СПД для конструкционных сталей с постоянной скоростью деформации $0,003 \text{ c}^{-1}$. Прокатка производилась на лабораторном шестивалковом стане ЛИС-6/200 Института проблем сверхпластичности материалов РАН [5], [6], изотермические условия деформирования обеспечивали за счет нагрева рабочих валков и регулирования их температуры.

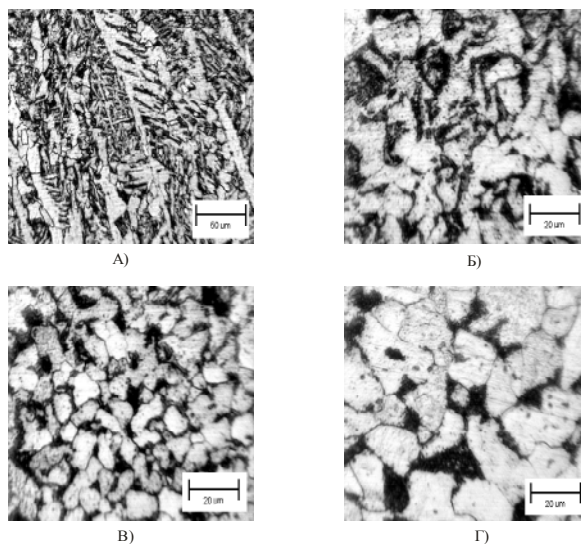
В качестве примера можно привести результаты исследования микроструктуры сварного соединения стали 20 [7]. Металл сварного шва стали 20 в исходном состоянии (без послесварочной обработки) состоит из феррита и перлита, для его микроструктуры характерна дендритная структура зерен, ориентированных вдоль направления отвода тепла из сварочной ванны при охлаждении.

На рисунке 1 видно, что средний размер зерна в металле сварного шва в исходном состоянии составляет 12 мкм, в зоне термического влияния средний размер зерна колеблется от 6 мкм для участка мелкого зерна до 9 мкм на участке перегрева. При этом на участке перегрева было отмечено возникновение крупных зерен размером до 48 мкм.

На рисунке 2 видно, что после прокатки нагретыми валками в режиме СПД происходит

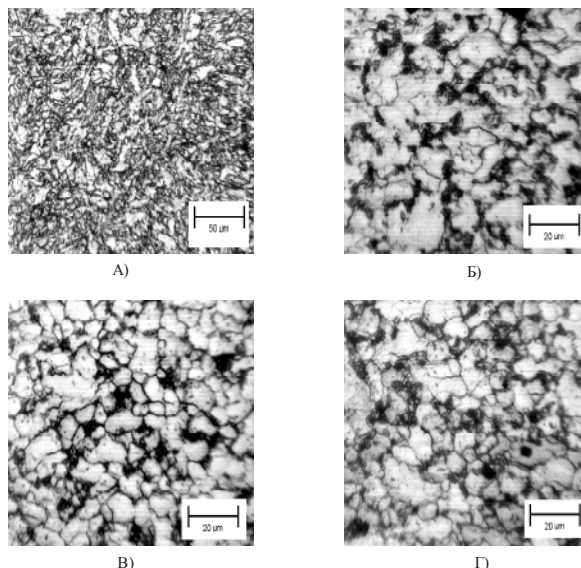
уменьшение среднего размера зерна в основном металле и в зоне термического влияния. В результате этого средний размер зерен стали 20 в сварном соединении после прокатки нагретыми валками в режиме СПД составляет от 7 мкм до 8 мкм.

Структурные несовершенства материала вызывают разные по характеру нарушения кристаллической решетки и, как следствие, разного типа изменения дифракционной картины: изменение



А) сварной шов; Б) участок крупного зерна ЗТВ; В) участок мелкого зерна ЗТВ; Г) основной металл

Рисунок 1. Микроструктура сварного соединения стали 20 в исходном состоянии



А) сварной шов; Б) участок крупного зерна ЗТВ; В) участок мелкого зерна ЗТВ; Г) основной металл

Рисунок 2. Микроструктура сварного соединения стали 20 после прокатки роликами в режиме СПД

межатомных и межплоскостных расстояний вызывает смещение дифракционных максимумов, микронапряжения и дисперсность субструктуры приводят к уширению дифракционных максимумов, микроискажения решетки – к изменению интенсивности этих максимумов, наличие дислокаций вызывает аномальные явления при прохождении рентгеновских лучей и, следовательно, локальные неоднородности контраста на рентгеновских топограммах.

Вследствие этого рентгеноструктурный анализ является одним из наиболее информативных методов изучения структурных несовершенств, их типа и концентрации, характера распределения.

Параметрами, которые анализируются по рентгенограмме при определении микроискажений структуры, являются ширина или профиль рентгенограммы [8].

Рентгеноструктурный анализ проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М в Cu-K α излучении ($\lambda=1,54418 \text{ \AA}$). Съемку дифракционного пика (112) осуществляли методом пошагового сканирования с вращением образца и использованием графитового монохроматора на дифрагированном пучке.

Интегральную ширину пика определяли с использованием пакета прикладных компьютерных программ OUTSET.

В результате рентгеноструктурных исследований были получены рентгенограммы (рисунки 3 и 4), по которым была проведена идентификация имеющихся в зоне термического влияния образцов сварных соединений напряжений.

В таблице 1 приведены результаты рентгеноструктурного анализа образцов сварных соединений сталей 20 и 30 ХГСА в исходном

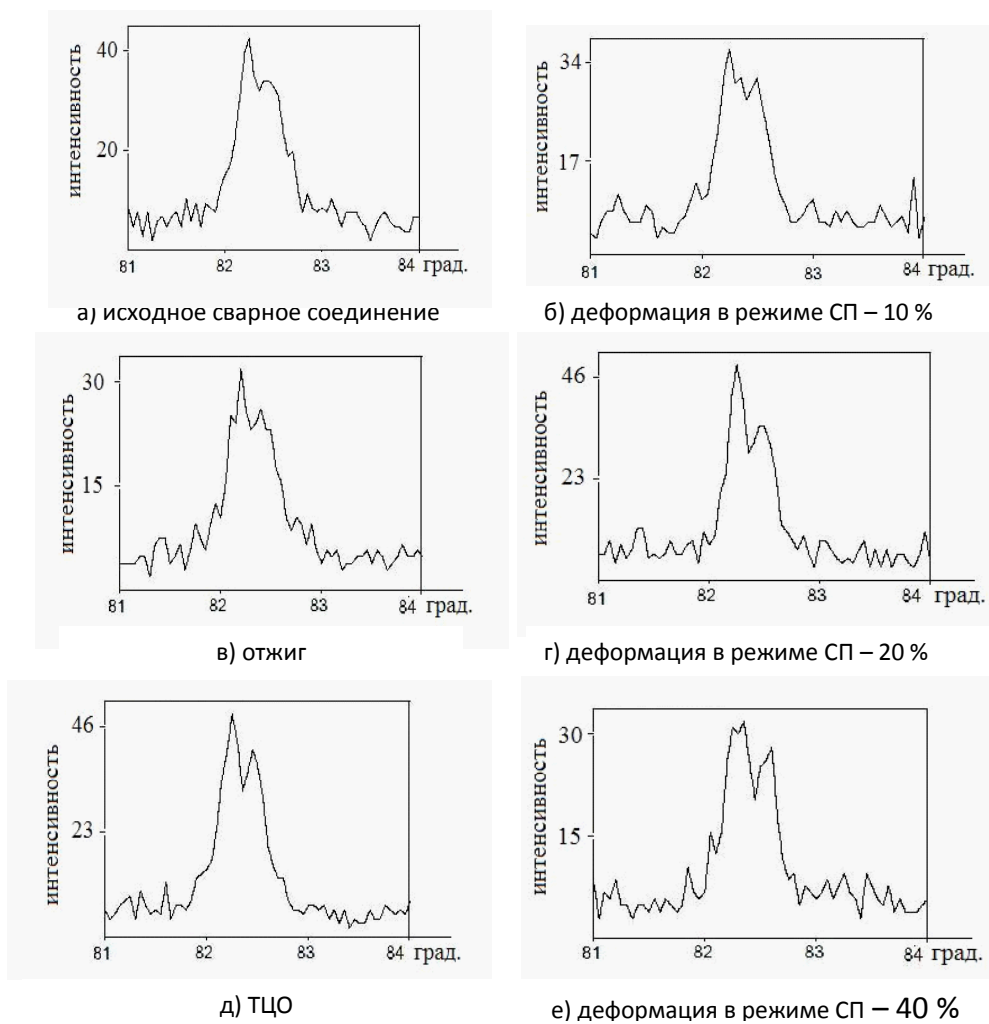


Рисунок 3. Рентгенограммы ЗТВ образцов сварных соединений стали 20 после различных видов обработки

состоянии и после различных видов послесварочной обработки.

Для каждого образца приведена интегральная ширина дифракционного максимума от атомной плоскости (112). Дифракционный

максимум в идеальном кристалле имеет минимальную интегральную ширину. При внесении дефектов интегральная ширина увеличивается. Дальнейшие воздействия меняют дефектность структуры и, соответственно, изменяют

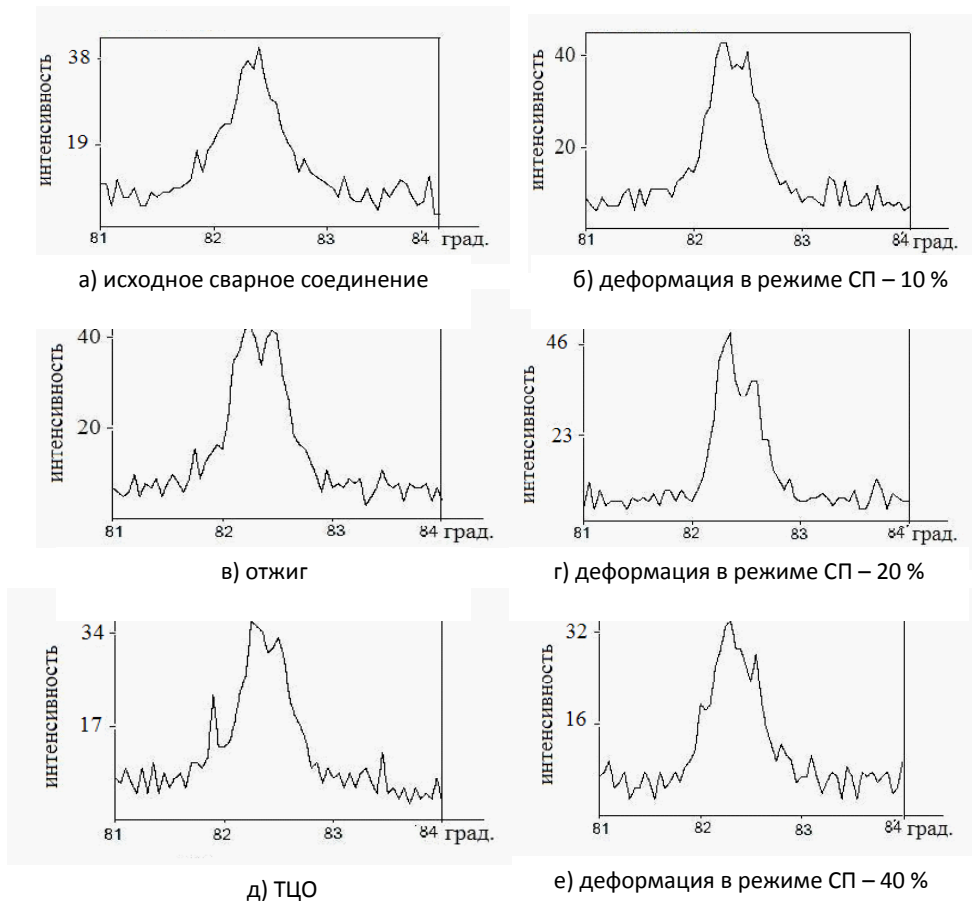


Рисунок 4. Рентгенограммы ЗТВ образцов сварных соединений стали 30ХГСА после различных видов обработки

Таблица 1. Результаты рентгеноструктурных исследований

Марка материала	Способ обработки		Интегральная ширина дифракционного максимума, град.
Сталь 20	Исходное состояние (без обработки)		0,6106±0,11
	Деформационная обработка в режиме сверхпластичности	Степень деформации 10%	0,5310±0,11
		Степень деформации 20%	0,4203±0,07
		Степень деформации 40%	0,5729±0,13
	Термоциклическая обработка		0,4599±0,08
Отжиг		0,5252±0,12	
Сталь 30ХГСА	Исходное состояние (без обработки)		0,6682±0,13
	Деформационная обработка в режиме сверхпластичности	Степень деформации 10%	0,6334±0,12
		Степень деформации 20%	0,4757±0,08
		Степень деформации 40%	0,5463±0,12
	Термоциклическая обработка		0,6962±0,14
Отжиг		0,6843±0,13	

интегральную ширину дифракционного максимума.

Рентгеноструктурные исследования позволили провести оценку микронапряжений кристаллической решетки металла в ЗТВ сварных соединений. Установлено, что для сварных соединений из стали 20 все виды послесварочной обработки приводят к снижению микронапряжений, причем их минимальные значения наблюдаются после изотермической прокатки нагретыми валками в режиме СПД ($\epsilon=20\%$). Для

сварных соединений из стали 30ХГСА после отжига и ТЦО уменьшение микронапряжений не наблюдается, а прокатка роликами в режиме СПД ($\epsilon=20\%$) позволяет существенно снизить микронапряжения.

Научно обоснованные энергосберегающие режимы обработки сварных соединений позволяют снизить неоднородность механических свойств и повысить надежность сварных соединений эллиптических днищ и штуцеров сосудов, работающих под давлением.

17.02.2015

Список литературы:

1. Горбачев, С.В. Влияние деформации в режиме сверхпластичности на механические свойства сварных соединений сталей 20 и 30ХГСА / С.В. Горбачев, А.М. Щипачев, Р.Я. Лутфуллин // Нефтегазовое дело. – 2014. – № 1. – С. 289-301.
2. Захаров, Н.М. Обеспечение ресурса оболочковых конструкций / Н.М. Захаров, Г.И. Евдокимов [и др.]; Под общ. Редакцией И.Р. Кузеева. – Уфа: Издательство УГНТУ, 2002. – 158 с.
3. Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
4. Щипачев, А.М. Самоорганизация структуры зоны термического влияния сварного соединения конструкционных сталей 20 и 30ХГСА в температурно-скоростных режимах сверхпластической деформации: сб. науч. трудов «Прикладная синергетика-II» / А.М. Щипачев, Р.Я. Лутфуллин, С.В. Горбачев. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. – Т.2. – С.52-57.
5. Астанин, В.В. Получение металло-матричных композитов с применением эффекта сверхпластичности // Вестник УГАТУ. – 2002. – Вып. 2. – С. 34-43.
6. Лутфуллин, Р.Я. Перспектива изготовления наноструктурного листа из титанового сплава ВТ6 изотермической прокаткой / Р.Я. Лутфуллин, М.Х. Мухаметрахимов, П.А. Классман, В.В. Астанин // Перспективные материалы. – 2013. – Специальный выпуск (15). – С. 66-69.
7. Горбачев, С.В. Исследование разнородности при деформационно-термической обработке сварных соединений из стали 20 / С.В. Горбачев, А.М. Щипачев, Р.Я. Лутфуллин // Нефтегазовое дело. – 2014. – № 1. – С. 302-316.
8. Горелик, С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С.С. Горелик, Ю.А. Скоков. – М.: МИСИС, 1984. – 328 с.

Сведения об авторах:

Горбачев Сергей Викторович, доцент кафедры автомобильного транспорта транспортного факультета Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент

Фот Андрей Петрович, главный ученый секретарь Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор

460000, г. Оренбург, пр-т Победы, 149, тел. (3532) 912228

Щипачев Андрей Михайлович, профессор кафедры технологические машины и оборудование Уфимского государственного нефтяного технического университета, доктор технических наук, профессор

450000, Респ. Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1, тел. (347)2431775

Лутфуллин Рамиль Яватович, заведующий лабораторией сверхпластической обработки перспективных материалов Института проблем сверхпластичности металлов РАН (г. Уфа), доктор технических наук

450001, г. Уфа, ул. Ст. Халтурина 39, тел. (347) 2833854, e-mail: lutram@anrb.ru