

РЕЛАКСАЦИЯ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ГЛУБОКОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

С.Б. Сапожников, С.С. Загребельный, А.А. Шакиров

В работе рассмотрен способ снижения уровня остаточных напряжений в сварных конструкциях путем обработки области сварного шва с помощью глубокой пластической деформации. Описаны результаты эксперимента, а также расчета при помощи конечно-элементного пакета ANSYS Workbench, показывающие возможность применения метода для снижения уровня остаточных сварочных напряжений.

Ключевые слова: остаточные напряжения, сварка, пластическая деформация, МКЭ моделирование.

Введение

При охлаждении зоны расплава сварного шва остаточные напряжения могут достигать 80 % от предела текучести материала (σ_T) детали (стального листа толщиной 5 мм) [1–5]. Это отрицательно сказывается на усталостной прочности, а, следовательно, и долговечности стального листа [2, 4, 6–9].

Расчеты [8–10] показывают, что для углеродистых сталей снижение остаточных растягивающих напряжений с $0,8 \sigma_T$ до нуля, согласно диаграмме выносливости Веллера, приводит к увеличению срока работы изделия в 2–5 раз. В связи с этим широкое распространение для снятия (снижения) остаточных напряжений получили методы термической обработки (отжига), ультразвуковой и дробеструйной поверхностной обработки [10–16]. Каждый из них не является универсальным для всех типов сварных швов и конструкций [11–13]. Кроме того, эффективность снижения остаточных напряжений тоже различна [17–21]. Следует отметить, что отжиг неприемлем для изделий из высокопрочных нагартованных прокаткой материалов, а ультразвуковая и дробеструйная обработки затрагивают лишь тонкие поверхностные слои материал. Обкатка сварного шва валками может быть применена к ограниченному числу конструкций, полученных лишь точением.

В литературе также предлагается значительное число методов оценки остаточных напряжений – от сверления глухого отверстия малого диаметра или выполнения канавки и тензометрии, до местного индентирования и голографической или спекл-интерферометрии [22–25]. Однако большая база измерения деформаций при тензометрии или необходимость использования специального высокоточного оборудования в случае применения интерференционных методов затрудняют получение корректной информации по всему полю свариваемых деталей.

Отсюда следует, что разработка эффективных методов снятия неблагоприятных остаточных напряжений после сварки остается актуальной проблемой и требует сочетания с неразрушающими методами контроля остаточных напряжений по большой площади. В данной работе для снижения остаточных сварочных напряжений и деформаций коробления предложен метод повторного локального глубокого пластического деформирования притупленным индентором, основанный на закономерностях возникновения благоприятных остаточных напряжений при контактном воздействии [11, 14, 19, 26, 27], а для контроля коробления использован метод цифровой корреляции изображений, известный в литературе по аббревиатуре DIC [28–31].

Принцип действия метода

Так как сварной шов охлаждается, в нем имеют место отрицательные дилатационные деформации, которые можно скомпенсировать положительными дилатационными деформациями, например, от упругопластического контактного воздействия. Другими словами, принцип действия

рассматриваемого метода имеет сходство со всеми методами поверхностного пластического деформирования и отличается лишь глубиной – необходимо нагрузить *всю область сварного шва*, сформировав остаточные деформации обратного к сварочным знака. Это названо местным глубоким пластическим деформированием (МГПД), рис. 1. Сварной шов после охлаждения подвергается ударам индентора (бойка) с определенной энергией, вызывающей возникновение пластических деформаций сжатия по всей глубине шва. Удары повторяют по всей длине шва.

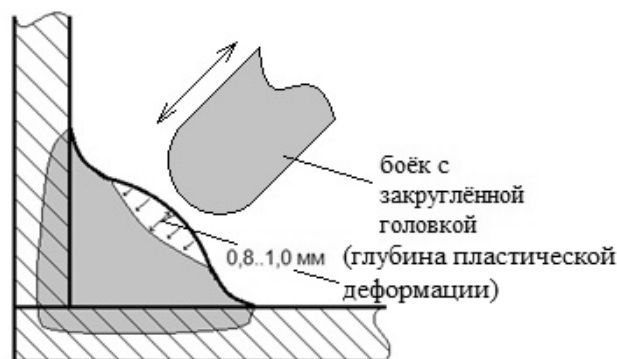


Рис. 1. Иллюстрация метода местной глубокой пластической деформации (штриховыми линиями показана деформируемая область)

Результаты испытаний

Для экспериментальной проверки возможности снижения остаточных напряжений методом МГПД были проведены модельные испытания. В качестве образцов для испытаний были подготовлены пластины из стали 40ХН2МА габаритными размерами 125×125×5 мм. По равноудаленной от краев полосе (толщиной 8...10 мм) на каждой из пластин была нанесена модель сварного шва путем проплава поверхности сварочным аппаратом, рис. 2. Данная модель адекватна реальной сварной конструкции ввиду того, что в реальной конструкции область сварного шва заполняется расплавленным металлом, который и смоделирован в рассматриваемой модели. В этой области и планируется снижение остаточных сварочных напряжений.

Уменьшение уровня остаточных напряжений в сварных швах проводилось путем многократного индентирования по всей длине шва шариком диаметром 12,4 мм на глубину до 1,0 мм.

Начальное состояние поверхностей пластин до проплава и местной обработки было зафиксировано оптическим способом [28–31] при помощи комплекса VIC 3D (рис. 3, а). После нанесения сварного шва пластины оказались изогнуты. Стрела прогиба каждой пластины была зафиксирована при помощи комплекса VIC 3D.

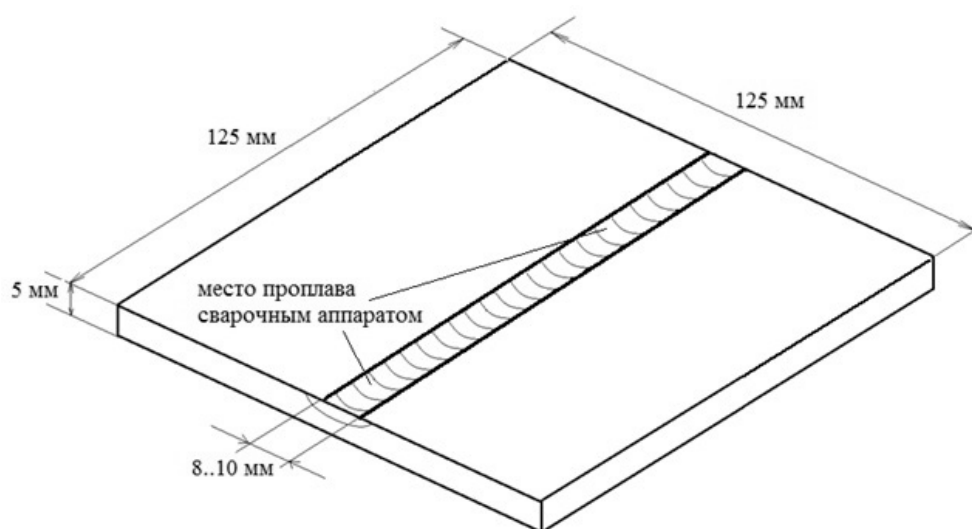


Рис. 2. Пластина с местным проплавом сварочным аппаратом

Для иллюстрации полученных результатов приведем фотографии одной из пластин, полученных при помощи комплекса VIC 3D, в начальном состоянии (рис. 3, а), после нанесения проплава (рис. 3, б) и после обработки МГПД (рис. 3, в). Сечения рельефа поверхности пластины в начальном состоянии, после нанесения проплава и после обработки МГПД показаны на рис. 3, г, д, е.

В результате местной пластической обработки линии проплава у пластины уменьшился средний (по трем сечениям) угол изгиба. Это изменение было зафиксировано при помощи комплекса VIC 3D. Имея первоначальное состояние каждой из пластин, определили изменения средних стрел прогибов.

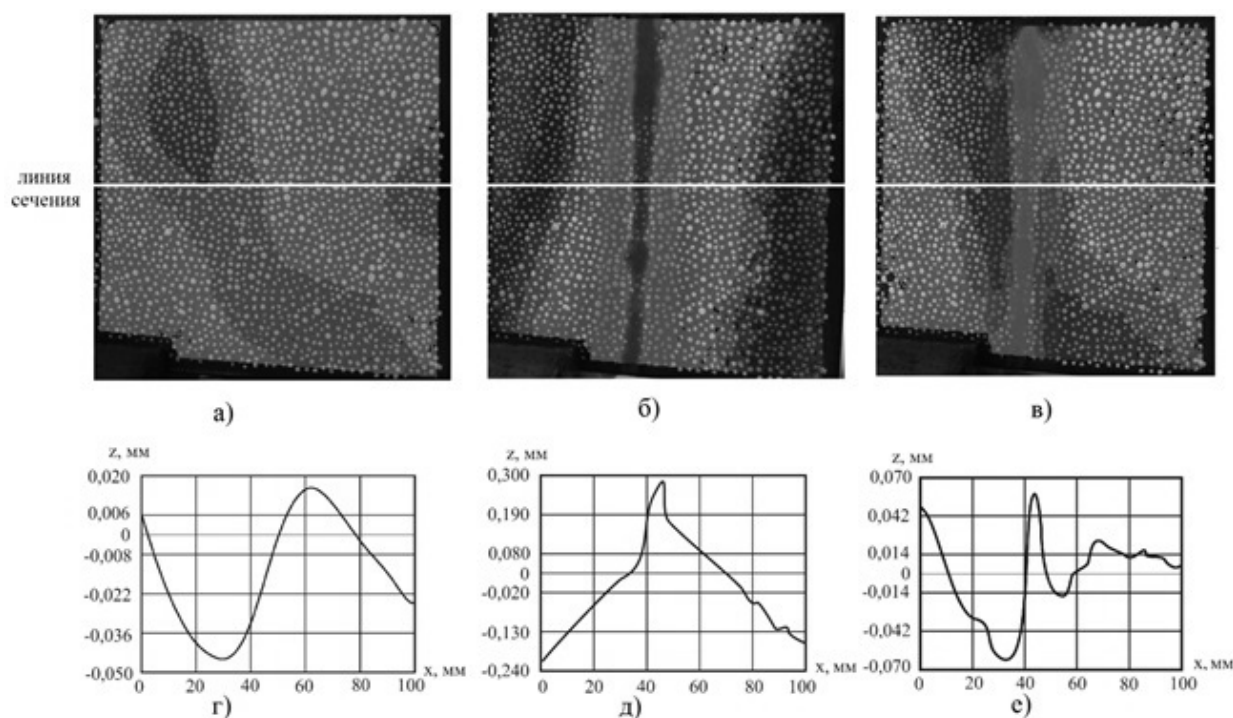


Рис. 3. Результаты испытаний: а – рельеф пластины до испытаний; б – рельеф пластины после нанесения проплава; в – рельеф пластины после обработки пластичкой места проплава; г – сечение рельефа пластины до испытаний; д – сечение рельефа пластины после нанесения проплава; е – сечение рельефа пластины после обработки места проплава МГПД

Как можно увидеть на рис. 3, местная пластическая обработка привела к тому, что пластины изогнулись в противоположную термическому изгибу сторону (относительное изменение стрелы прогибов в результате обработки равно -137%), что говорит о высокой эффективности применяемого метода. Кроме того, на рис. 3, е виден центральный пик, появившийся в результате местных деформаций в зоне индентирования.

Расчетная схема модельного эксперимента

Для расчетов, подтверждающих работоспособность методики, были решены термическая и механическая задачи в пакете ANSYS Workbench 14.5.1, реализующем метод конечных элементов.

Для этой цели была создана конечно-элементная модель половины пластины, сварного шва и индентора (стальной шарик диаметром 12,4 мм), разделенных по плоскости симметрии. В связи с этим, на плоскости симметрии пластины и шарика приложена опора «Frictionless support». Кроме этого, по узкой полосе, примыкающей к плоскости симметрии, была приложена опора «Compression only».

Нагружение пластины производилось в 2 этапа:

- 1) температурное нагружение, упрощенно моделирующее охлаждение расплавленного материала;
- 2) обработка полученной области местной глубокой пластической деформацией (индентирование шариком).

Моделирование проплава материала производилось путем задания стационарного температурного перепада ($-400\text{ }^{\circ}\text{C}$) между областью расплава и остальной области пластины. Таким образом, модель сварного шва, имеющая меньшую температуру, сжималась и формировала поле остаточных напряжений и определенную стрелу прогиба.

На втором этапе пластина была обработана местной пластической деформацией путем индентирования шарика по всей длине проплава. Для этого шарик диаметром 12,4 мм вдавливался в полосу проплава на 1 мм последовательно 40 раз с шагом 3 мм. Механические свойства материала приняты упруго-идеально-пластическими с пределом текучести 1000 МПа.

Результаты расчетов

В результате проделанных расчетов были вычислены поля напряжений и перемещений (рис. 4, а) в пластине от воздействия местного расплава, а также поля напряжений и перемещений (рис. 4, б), возникающих после обработки местной пластической деформацией.

Как можно видеть на рис. 4 и 5, максимальное эквивалентное напряжение в объеме сварного шва в результате расчетов снизилось на 43 % (с 953 до 535 МПа), а стрела прогиба – на 57 % (с 0,28 до 0,12 мм).

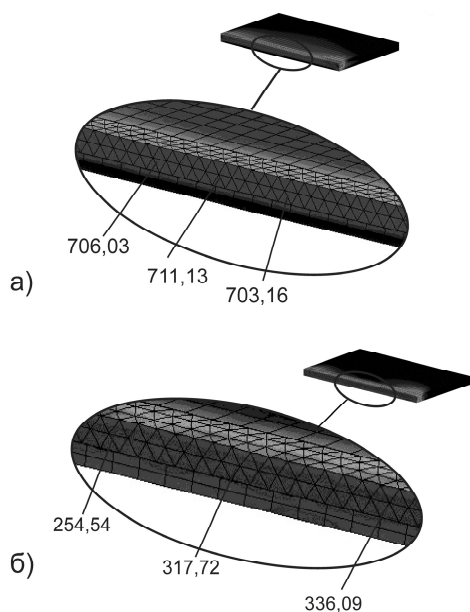


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений в сварном шве от воздействия местного проплава (а) и после обработки шва (б), МПа

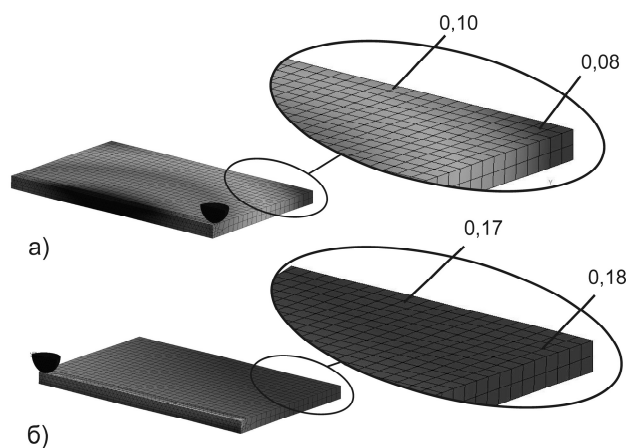


Рис. 5. Деформации пластины после нанесения местного проплава (а) и после обработки области проплава (б), мм

Выводы

Данные, полученные в результате эксперимента, подтверждают практическую возможность снижения уровня остаточных напряжений в сварном шве за счет проведения местной глубокой пластической деформации. В проведенном эксперименте удалось получить изменение направления изгиба пластины на противоположное. Это позволяет судить о смене неблагоприятных растягивающих напряжений в области сварного шва на благоприятные сжимающие.

Расчет соответствующей модели в ANSYS Workbench 14.5.1 также показал возможность снижения остаточных напряжений в сварном шве. Однако величина уменьшения стрелы прогиба оказалась в 2 раза меньше, чем в эксперименте. Это можно объяснить неточным определением свойств материала (при помощи величины твердости по Бринеллю [27]), а также упрощенным моделированием сварочных остаточных напряжений.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда энергосберегающих низкопольных трамвайных вагонов модульной конструкции» по договору № 02.G36.31.0002 от 12.02.2013 г.

Литература

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. акад. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
2. Кудрявцев, П.И. Остаточные напряжения и прочность соединений / П.И. Кудрявцев. – М.: Машиностроение, 1964. – 95 с.

3. Винокуров, В.А. Сварочные деформации и напряжения / В.А. Винокуров. – М.: Машиностроение, 1968. – 236 с.
4. Алексеев, П.Г. Устойчивость остаточных напряжений и их влияние на износостойкость деталей, упрочненных наклепом / П.Г. Алексеев // Повышение эксплуатационных свойств деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: МДНТП, 1971. – С. 76–79.
5. Бакиш, О.А. Напряжения и коробление при сварке / О.А. Бакиш. – М.; Свердловск: Машигиз, 1961. – 72 с.
6. Безопасность трубопроводов при длительной эксплуатации: моногр. / К.М. Гумеров, И.Ф. Гладких, А.Г. Игнатъев и др. – Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2003. – 327 с.
7. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: Машигиз, 1963. – 178 с.
8. Игнатъев, А.Г. Остаточные напряжения при сварке труб из стали 45 / А.Г. Игнатъев, Г.П. Пызин // Вопросы сварочного производства: сб. науч. трудов. – Челябинск: ЧГТУ, 1994. – С. 31–35.
9. Sinha, F. Influence of residual stresses on fracture behavior, an experimental study / F. Sinha, A. Mishka, T. Prasad // Eng. Fract. Mech. – 1985. – Vol. 21. – № 6. – P. 1113–1118.
10. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л.А. Хворостухин, С.В. Шишкин, А.П. Ковалев, Р.А. Ишмаков. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.
11. Махалов, М.С. Совершенствование технологии упрочняющей обработки деталей машин размерным совмещенным обкатыванием: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.С. Махалов. – Барнаул, 2007. – 21 с.
12. Кимстач, А.В. Методы контроля и диагностика остаточных напряжений в сварных соединениях при ультразвуковой обработке: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Кимстач. – СПб., 2004. – 150 с.
13. Мордвинкин, В.А. Исследование поля напряжений поверхностного слоя при выглаживании / В.А. Мордвинкин, Б.С. Хомяк, В.В. Тrepачев // Механика деформируемых тел: межвуз. сб. науч. тр. / РИСХМ. – Ростов н/Д., 1990. – С. 108–111.
14. Шабанов, В.М. Критерии упрочнения и деформации материалов при упругопластическом вдавливании сферического индентора / В.М. Шабанов // Перспективные наукоемкие технологии: научная сессия МИФИ-2007. – М., 2007. – Т. 9. – С. 70–71.
15. Дрозд, М.С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
16. Просвиркина, Е.А. Исследование полей остаточных напряжений и пластических деформаций при поверхностном упрочнении цилиндрического образца с учетом организации процесса ППД / Е.А. Просвиркина, М.Н. Саушкин // Вестник СамГТУ. Серия «Физико-математические науки». – 2004. – № 26. – С. 194–195.
17. Николаев, Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – М.: Высш. шк., 1982. – 272 с.
18. Никольская, С.И. Способ определения напряжений в сварном шве / С.И. Никольская, А.В. Чавдаров, В.С. Деденев // Энергомашиностроение. – 1986. – № 7. – С. 19–20.
19. Сагалевич, В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В.М. Сагалевич. – М.: Машиностроение, 1974. – 248 с.
20. Соколов, И.А. Остаточные напряжения и качество металлопродукции / И.А. Соколов, В.И. Уральский. – М.: Металлургия, 1981. – 96 с.
21. Сюкасов, Г.М. Механизм возникновения сварочных деформаций и напряжений / Г.М. Сюкасов, И.П. Никонов. – Свердловск: УПИ, 1969. – 43 с.
22. Бородин, Ю.П. Голографический комплекс для экспресс-анализа остаточных напряжений / Ю.П. Бородин // Оптико-геометрические методы исследования деформаций и напряжений: тез. докл. 4 Всесоюз. семинара. – Челябинск, 1986. – С. 70–71.
23. Игнатъев, А.Г. Голографические измерения остаточных сварочных напряжений / А.Г. Игнатъев, М.В. Шахматов, В.И. Михайлов // Автоматическая сварка. – 1990. – № 1. – С. 17–21.
24. Лобанов, Л.М. Оптические методы исследования напряженного состояния сварных соединений / Л.М. Лобанов // Надежность и долговечность машин и сооружений. – Киев, 1983. – № 3. – С. 68–75.
25. Maas, A.A.M. Strain measurement by digital speckle interferometry / A.A.M. Maas, H.A. Vroo-

man // *Non-Destr. Test.: Proc. 12th World Conf. Amsterdam, Apr. 23–28, 1989. – Amsterdam, 1989. – Vol. 1. – P. 594–600.*

26. Марковец, М.П. *Определение механических свойств металлов по твердости / М.П. Марковец. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.*

27. Джонсон, К. *Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.*

28. Шапиро, Л. *Компьютерное зрение: пер. с англ. / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.*

29. Антюфеев, В.И. *Сравнительный анализ алгоритмов совмещения изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов / В.И. Антюфеев, В.Н. Быков // *Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 1 (48). – С. 70–74.**

30. Pan, B. *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review / B. Pan, K. Qian, H. Xie // *Meas. Sci. Technol. – 2009. – Vol. 20. – P. 1–17.**

31. *Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation / P. Bing, X. Hui-min, P. Bo-qin, D. Fu-long // *Meas. Sci. Technol. – 2006. – Vol. 17. – P. 1615–1621.**

Сапожников Сергей Борисович. Доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин» физического факультета, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), ssb@susu.ac.ru.

Загребельный Сергей Станиславович. Аспирант кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин» физического факультета, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск).

Шакиров Александр Александрович. Аспирант кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин» физического факультета, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск).

***Bulletin of the South Ural State University
Series “Mechanical Engineering Industry”
2013, vol. 13, no. 2, pp. 81–86***

RELAXATION OF WELDING STRESSES BY DEEP PLASTIC DEFORMATION

S.B. Sapozhnikov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, ssb@susu.ac.ru,

S.S. Zagrebelniy, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

A.A. Shakirov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

A method for reducing the level of residual stress of welded structures by treatment of the weld with deep local plastic deformation is offered. The results of the experiment and calculation using finite element program complex ANSYS Workbench show the feasibility of applying the method to reduce the level of residual welding stresses.

Keywords: residual stresses, welding, plastic deformation, FEA modeling.

Поступила в редакцию 17 июля 2013 г.