

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОЛЬЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБ ПОСЛЕСВАРОЧНОЙ ОБРАБОТКОЙ ВЗРЫВОМ

А. Г. БРЫЗГАЛИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев–150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Установлено, что при использовании разработанной ранее методики расчета режимов обработки взрывом кольцевых швов труб величина снижения остаточных напряжений зависит от их исходного уровня. В частности, при обработке взрывом труб без кольцевого шва наводимые напряжения сжатия существенно меньше сварочных, в то время как последние практически полностью снимаются при обработке швов аналогичных труб по тем же режимам. Разброс наводимых напряжений сжатия в трубах различного типоразмера не превышал ошибку измерения. Определена зависимость эффективности обработки взрывом от значения исходных сварочных напряжений, которая имеет линейный характер. Наличие такой зависимости позволяет прогнозировать результаты обработки и корректировать режимы в зависимости от предъявляемых к результатам обработки требований. Показано принципиальное отличие механизмов снижения остаточных напряжений при термообработке и обработке взрывом. Библиогр. 9, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: эффективность, обработка взрывом, термообработка, остаточные напряжения, деформации, кольцевой шов, трубопроводы

Оптимальным результатом снижения остаточных напряжений (ОН) послесварочной обработкой можно считать достижение нулевого уровня напряжений в сварном шве, который является, как правило, наиболее слабым местом конструкции. Как показано в работе [1], применение расчетного способа определения режимов обработки взрывом (ОВз) позволяет достаточно эффективно снижать ОН в трубах различного типоразмера. Представляет интерес, насколько близки к оптимальным являются расчетные режимы и оценить возможность их корректировки при решении различных практических задач. С этой целью дополнительная проверка способа расчета была проведена на цельных трубах без сварных швов с такими характеристиками: 115×4 (сталь 20), 115×10 (сталь 17Г1С), 160×6 (сталь 17Г1С), 216×7 мм (сталь 20). Это позволило исключить погрешность эксперимента, привносимую выполнением сварного шва.

На образцах труб устанавливали заряды ВВ симметрично относительно некоторой диаметральной плоскости сечения, имитируя геометрическое подобие ОВз труб с готовыми кольцевыми швами. Расчет экспериментальных режимов проводился также, как ранее для труб со сварным швом, центр которого условно находился в указанной плоскости сечения. В этой же плоскости на наружной поверхности трубы измеряли кольцевые напряжения после ОВз.

Результаты измерений приведены в табл. 1. Начальные значения ОН равны нулю: $\sigma_{и} = 0$, а конечные после ОВз равны значениям $\sigma_{к}$ в соответствующем

столбце табл. 1. Эффективность ОВз $\Delta\sigma = \sigma_{и} - \sigma_{к} = -\sigma_{к}$.

Разброс величины $\Delta\sigma$ находится на уровне погрешности измерения ОН. В табл. 2 для сравнения приведены результаты измерения ОН в кольцевых швах труб, опубликованные в работе [1].

Эффективность ОВз кольцевых швов труб зависит от множества факторов, наиболее существенные из которых: геометрические параметры трубы (радиус R , толщина стенки h), прочность материала трубы σ_r , исходные ОН $\sigma_{и}$, внутреннее давление в трубе P , температура материала трубы в момент обработки T .

Следует отметить, что результаты измерений напряжений, которые представлены в табл. 1, 2 получены при проведении ОВз на трубах без внутреннего давления и при небольших колебаниях температуры окружающей среды 25 ± 10 °С, следовательно, эти факторы не влияли на эффективность ОВз.

Таблица 1. ОН при ОВз труб без сварного шва

Типоразмер труб ($2R \times h$), мм	σ_r , МПа	Остаточные напряжения $\sigma_{к}$, МПа	$\Delta\sigma$, МПа
115×4	240	-50	50
115×10	350	-70	70
160×6	350	-70	70
216×7	240	-60	60

Примечание. R – радиус трубы, h – толщина стенки трубы.



Таблица 2. Кольцевые ОН в сварных швах труб, МПа

Типоразмеры труб (2R×h), мм	$\sigma_{и}$, МПа	$\sigma_{к}$, МПа	$\Delta\sigma$, МПа
115×4	150	-30	180
160×5	200	-50	250
115×8	200	-20	220
150×8	250	0	250
530×7	300	50	250
530×9	300	50	250
168×14	250	0	250

Примечание. Все приведенные значения напряжений относятся к наружной поверхности труб.

Из всех значимых параметров не рассмотренным остался параметр $\sigma_{и}$, который не был учтен при разработке методики определения режимов. Существенно меньшая величина $\Delta\sigma$ в трубах без сварных швов по сравнению с $\Delta\sigma$ в трубах с кольцевыми швами свидетельствует о наличии зависимости между исходными ОН и величиной их снижения в случае выбора режимов ОВз в соответствии с разработанной методикой. Проанализируем полученные экспериментальные результаты.

Значение исходных ОН для разных труб (табл. 2) варьируется от 150 до 300 МПа. После ОВз значения конечных ОН оказались в диапазоне ± 50 МПа, т. е. несмотря на разный уровень исходных ОН был достигнут достаточно стабильный результат для $\sigma_{к}$, при том, что для разных труб обеих групп (с кольцевыми швами и без них) толщина различалась в 4,3 раза, диаметр — в 6 раз, отношение диаметра к толщине — в 6,6 раза.

Для оценки влияния исходных ОН на эффективность обработки представим данные всех экспериментов по ОВз графически в форме семей-

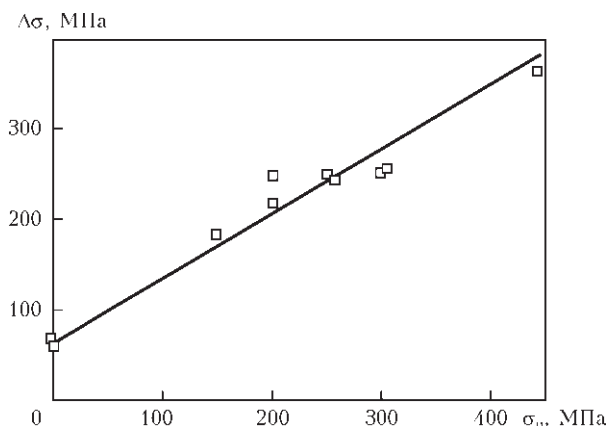


Рис. 1. Зависимость величины снижения ОН от их исходного значения

ства точек на координатной плоскости ($\sigma_{и}$, $\Delta\sigma$) (рис. 1).

Линейный коэффициент корреляции между значениями $\sigma_{и}$ и $\Delta\sigma$ составляет 0,97, что свидетельствует о наличии функциональной связи между этими параметрами, близкой к линейной. Представим эту зависимость в виде прямой линии, проходящей через точку (0, 63), которая соответствует среднему значению изменения напряжений при ОВз труб без сварных швов. Выбор этой точки в качестве базовой для проведения прямой опирается на тот факт, что для труб без шва исключены погрешности измерения ОН от сварки, что определяет ее существенную значимость. Уравнение прямой, отражающей зависимость между $\sigma_{и}$ и $\Delta\sigma$ для данной серии экспериментов, примет вид

$$\Delta\sigma = 0,72\sigma_{и} + 63 \text{ [МПа]}.$$

Наличие такой зависимости дает основание для прогнозирования уровня ОН после ОВз, корректировки режимов в случае необходимости и последующего уточнения метода расчета параметров взрывного воздействия с целью управления величиной ОН в сварных швах. В целом же можно считать, что ОВз является эффективным способом регулирования ОН в кольцевых швах труб.

Широко известны другие способы снижения сварочных напряжений [2–4]. Все они основаны на протекании пластических деформаций, компенсирующих усадочные сварочные. ОН создают в сварном соединении запас внутренней упругой энергии, благодаря чему такое соединение находится в состоянии неустойчивого энергетического равновесия. Для реализации процесса перехода упругих деформаций в пластические необходим энергетический «толчок» от внешнего источника. Таким источником может быть нагрев (термообработка), взрыв (ОВз), вибрационная, электроимпульсная обработки и пр. Однако для снятия ОН в кольцевых швах труб применяют местную термическую обработку как наиболее эффективную из перечисленных. Температуру отпуска для углеродистых и низколегированных сталей обычно назначают 680...720 °С с временем выдержки 60...120 мин в зависимости от толщины стенки трубы. Этот режим применяется как в отечественной промышленности [5], так и за рубежом (британский стандарт В 3351–1961, стандарт США USA I В 37.1.0).

Однако термообработка сопряжена с высокими трудовыми и энергетическими затратами. Известно, что длительность термообработки кольцевых швов труб в полевых условиях в 3...4 раза превышает время сварки [6]. Кроме того, эффективность термообработки существенно снижается с увеличением толщины стенок труб, так как при

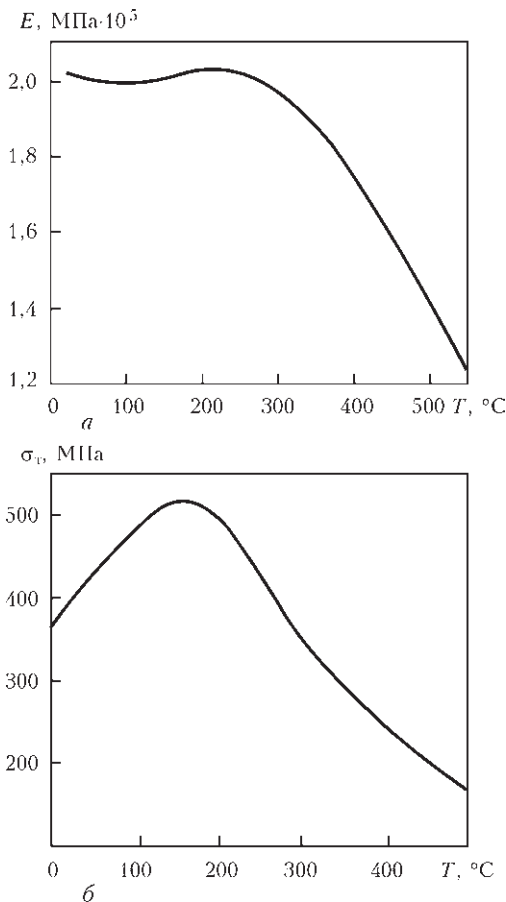


Рис. 2. Зависимость модуля упругости (а) и предела текучести (б) углеродистой стали от температуры

этом возрастает градиент температуры по толщине стенки. И, наконец, в связи с применением труб из сталей повышенной прочности (например, контролируемой прокатки) повышается опасность их разупрочнения в результате перегрева.

Известно, что ОВз по эффективности не уступает термообработке [7]. В то же время очевидно, что эти два способа имеют совершенно разные механизмы воздействия на сварное соединение, принципы которых (без учета разнообразных факторов, влияющих на эффективность, но не меняющих сути процессов) представляется целесообразным рассмотреть.

Термообработка. При равномерном нагреве термические деформации однородны по всему объему металла и сами по себе не могут привести к снижению ОН. Эффект термообработки достигается от использования свойства стали менять с изменением температуры предел текучести и модуль упругости. На рис. 2, а приведены зависимости модуля упругости, а на рис. 2, б — предела текучести углеродистой стали от температуры [8].

При нагреве сварного соединения от температуры T_0 до температуры T_1 (рис. 3) модуль упругости и предел текучести уменьшатся. Упругие деформации ϵ_1 , соответствующие пределу текучести стали при температуре T_1 , отражены на рис. 3 от-

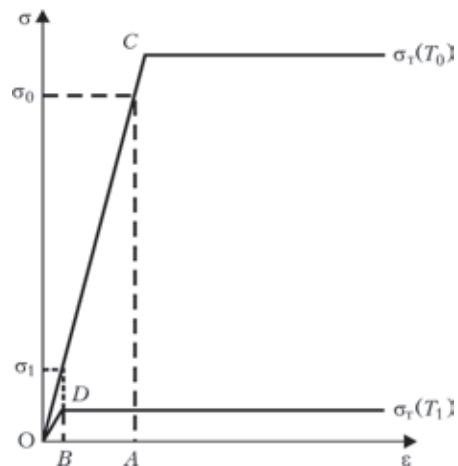


Рис. 3. Идеальная упругопластическая σ - ϵ диаграмма стали при разной температуре

резком ОВ. Остальная деформация, которая была упругой при температуре T_0 , перейдет в пластическую (отрезок ВА).

После остывания сварного соединения до температуры T_0 модуль упругости увеличится до первоначального значения, а упругие деформации останутся такими же, как при температуре T_1 . Тогда напряжения после термообработки будут равны

$$\sigma_1 = \epsilon_1 E_0.$$

Как видим, после общей термообработки ОН не зависят от величины их исходного значения. Надо заметить, что в процессе выдержки при температуре термообработки происходит дополнительное снижение ОН за счет их релаксации по

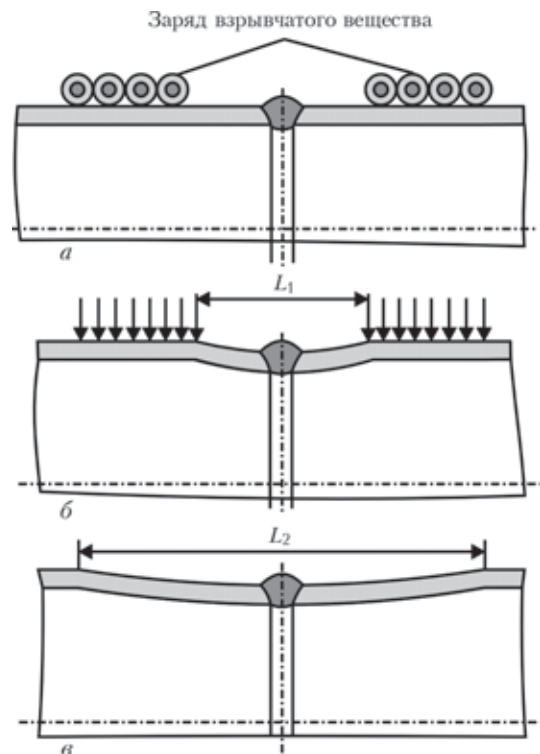


Рис. 4. Схема процесса ОВз: а — размещение заряда; б — приложение нагрузки; в — деформации стенки трубы после ОВз



диффузионному механизму. При местной термообработке принцип снижения ОН будет таким же, однако будут образовываться дополнительные незначительные по величине ОН в результате неравномерного термомеханического цикла.

Обработка взрывом. В результате сложного термомеханического процесса при сварке кольцевой шов и некоторая зона прилегающего к нему основного металла имеют меньший радиус, чем остальное тело трубы [9]. Механизм снижения ОН при ОВз кольцевых швов труб наружными зарядами заключается в создании пластических деформаций, уменьшающих радиус трубы на участке, непосредственно прилегающем к зоне пластических деформаций укорочения от сварки. В этом случае ОН перераспределяются по более широкому участку трубы, что приводит к существенному снижению или полному снятию пиковых растягивающих напряжений в шве (рис. 4).

При достаточно интенсивном взрывном нагружении можно создать такие деформации стенки трубы, что ее радиус под зарядом будет меньше радиуса кольцевого шва. В этом случае в шве образуются ОН сжатия. В отличие от термообработки проведение ОВз не влияет на структуру металла шва (ни в положительную, ни в отрицательную сторону). Многочисленные исследования и опыт применения ОВз показывают, что создаваемые динамические нагрузки не приводят к развитию имеющихся в сварном соединении и основном металле дефектов в виде непроваров, пор, подрезов, инородных включений и т. п.

Проведенный анализ показывает, что расширение технологических возможностей ОВз может быть осуществлено путем прогнозирования и регулирования ее результатов.

1. *Брызгалин А. Г.* Расчет параметров обработки взрывом для снижения остаточных напряжений в кольцевых швах трубопроводов // Автомат. сварка. – 2013. – № 8. – С. 32–37.
2. *Исследование влияния деформационной обработки на остаточные напряжения в кольцевых сварных швах / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, А. В. Амеляничик и др. // Там же. – 2003. – № 1. – С. 3 – 10.*
3. *Касаткин Б. С., Прохоренко В. М., Чертов И. М.* Напряжения и деформации при сварке. – Киев: Вища шк., 1987. – 246 с.
4. *Лобанов Л. М., Павловский В. И., Лысак В. В.* Применение предварительного упругого деформирования для регулирования напряженно-деформированного состояния при сварке тонколистовых конструкций из алюминиевых сплавов // Сварка цветных металлов. – Киев: Наук. думка, 1989. – С. 52–56.
5. *СНУП Ш-42–80.* Правила производства и приемки работ. Магистральные газопроводы. – М.: Стройиздат, 1981. – 62 с.
6. *Перунов Б. В., Кушнарченко В. М.* Профилактика коррозии – гарантия эффективности. – Челябинск: Южно-Уральское книж. изд-во, 1983. – 63 с.
7. *Добрушин Л. Д., Эффендиев Э. Э., Брызгалин А. Г.* Исследование сравнительной эффективности снижения остаточных напряжений в кольцевых швах труб из стали контролируемой прокатки обработкой взрывом // Применение энергии взрыва в сварочной технике. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. – С. 90–94.
8. *Работнов Ю. Н.* Сопротивление материалов. – М.: Физматгиз, 1963. – 456 с.
9. *Махненко В. И.* Напряженное состояние в районах кольцевых стыков труб при обработке взрывом // Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Киев: Наук. думка, 1976. – С. 291–296.

Поступила в редакцию 27.01.2014

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ХАОС В НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ. В. Н. Сидорец, И. В. Пенгегев. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. — 272 с. Твердый переплет, 165x235 мм.

Монография посвящена изложению результатов исследования фундаментальных свойств электрической дуги как нелинейного элемента электрических цепей. Описаны выявленные закономерности и механизмы возникновения детерминированного хаоса в этих цепях и сценарии его развития.

Особое внимание уделено оригинальным математическим методам исследования нелинейных динамических систем. Все полученные результаты проиллюстрированы.

Монография рассчитана на широкий круг специалистов в областях теоретической электротехники и нелинейных динамических систем. Она может быть полезна ученым, аспирантам и студентам.

