

УДК 621.982: 669.295

Огородников В. А.
Архипова Т. Ф.**ОСТАТОЧНЫЕ СВАРОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ КОМПЕНСАЦИЯ
ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

Одним из недостатков способа соединений материалов сваркой является возникновение сварочных напряжений и деформаций. Сварочные напряжения могут снизить прочность и коррозионную стойкость сварных конструкций, в некоторых случаях – они при релаксации приводят к недопустимым деформациям. Сварочные деформации снижают точность деталей, затрудняют сборку отдельных узлов, вынуждают увеличивать припуски на механическую обработку, снижают жесткость и устойчивость деталей и конструкций. Кроме того, являясь концентраторами напряжений, сварочные швы отрицательно сказываются на показателях вязкости и пластичности. Среди способов, способствующих повышению механических свойств сварного шва, горячая прокатка является одним из эффективных процессов. Теоретические и экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность этого способа [1–2].

Несмотря на успехи, достигнутые в технологии сварки [3], отмеченные факторы не удается устранить полностью. Инженерные методы расчета сварочных напряжений при разных способах соединения разработаны Г. А. Николаевым, Н. О. Окербломом и др. [4–5].

Целью работы является исследование остаточных напряжений при сварке встык и при многослойной сварке встык с целью определения механизма их снятия.

Сварка двух листов встык.

Рассмотрим соединение двух листов встык (рис. 1).

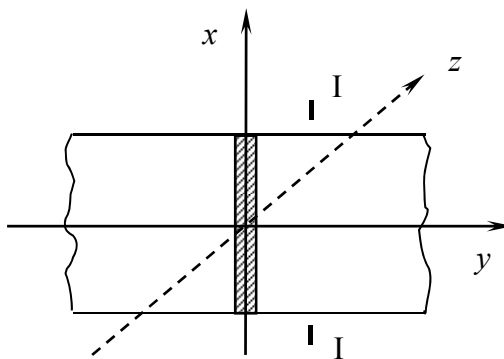


Рис. 1. Сварка двух листов встык

В дальнейшем исходим из предположений:

1. В областях, достаточно удаленных от концов шва, остаточные напряжения не зависят от координаты x , отсчитываемой вдоль оси шва.
2. Напряжения и температура не изменяются по толщине листа.
3. Коэффициент линейного расширения не зависит от температуры.
4. Материал идеально пластичный. Предел текучести материала зависит от температуры.
5. Процесс остывания кратковременный и поэтому пренебрегаем эффектом ползучести.

В силу предположения 2 все производные по координате Z , отсчитываемой по толщине свариваемых листов, равны нулю, поэтому дифференциальные уравнения равновесия в виде:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xe}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Поскольку согласно предположению (1) на удалении от концов шва:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} = 0. \quad (2)$$

Из уравнений (1) следует

$$\tau_{xy} = const, \quad \sigma_y = const, \quad \sigma_x = \sigma_x(y). \quad (3)$$

Остаточные напряжения самоуравновешены, поэтому, если пренебречь областями, примыкающими к концам шва, что допустимо при достаточной его длине, то из вывода о постоянстве напряжений σ_y , τ_{xy} получаем, что они близки к нулю. Действительно, рассмотрим сечение I–I (см. рис. 1). Из условия равновесия, скажем, левой части листа сразу же при $\sigma_y = const$, $\tau_{xy} = const$ следует, что $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$, поскольку на эту часть листа не действуют внешние силы.

Таким образом, можно заключить, что напряженное состояние в рассматриваемом случае является линейным. Продольные напряжения σ_x являются главными и зависят в рассматриваемой области лишь от координаты y , т. е. изменяются в поперечном к шву направлении.

В зоне, удаленной от шва области остаются холодными и стесняют продольную деформацию вдоль оси x в околосшовной зоне. Поэтому, можно принять, что в этой зоне $\varepsilon_x = 0$. Деформация ε_x складывается из температурной ε^t , упругой ε^e и пластической ε^p деформаций. Следовательно, после сварки в нагретом состоянии:

$$\varepsilon^t + \varepsilon^e + \varepsilon^p = 0. \quad (4)$$

В упругой области, т. е. в области, удаленной от шва:

$$\varepsilon^t + \varepsilon^e = 0. \quad (5)$$

Поскольку

$$\varepsilon^t = \alpha \Delta T(y), \quad \varepsilon^e = \sigma/E$$

в этой зоне

$$\sigma = -E\alpha\Delta T(y). \quad (6)$$

Функцию $\Delta T(y)$, зависящую от технологических параметров сварки и свариваемого материала, будем считать известной (сведения о температурных полях при сварке приводятся в справочной литературе [6, 7]).

Координата y_i , определяющая положение упруго-пластической границы, находится из условия:

$$|\sigma| = E\alpha\Delta T(y_i) = \sigma_T(y_i). \quad (7)$$

Функция $\sigma_T(y)$ определяется по температурной зависимости предела текучести и функции $\Delta T(y)$. При $|y| \leq |y_i|$ справедливо равенство (4), из которого находим:

$$\varepsilon^p = -\alpha\Delta T(y) + \sigma_T(y)/E. \quad (8)$$

Здесь учтено, что в пластической области $\varepsilon^e = \sigma_T/E$.

Равенства (4) и (5) справедливы и при охлаждении сваренных листов. Вследствие обратимости температурного и упругого деформирования в упругой области при $|y| \geq |y_i|$ упругие деформации ε^e , а, следовательно, и напряжения оказываются после охлаждения равными нулю. В пластической области вследствие необратимости пластических деформаций

имеем остаточные упругие деформации. Причем, если $|\varepsilon^p| \leq \frac{\sigma_T'}{E}$, где σ_T' – предел текучести холодного металла, то охлаждение не сопровождается пластическим деформированием. Поскольку в охлажденном состоянии должно удовлетворяться равенство:

$$\varepsilon^t + \varepsilon^{eo} = 0, \quad (9)$$

где ε^{eo} – остаточная упругая деформация, получаем в этой области $\varepsilon^{eo} = -\varepsilon^p$. Следовательно, остаточные напряжения:

$$\sigma_x^o = E\varepsilon^{eo} = -E\varepsilon^p. \quad (10)$$

Если в данной точке $|\varepsilon^p| > \frac{\sigma_T'}{E}$, то охлаждение сопровождается пластическим деформированием обратного знака, т. е. пластическим растяжением. При этом:

$$\varepsilon^{eo} = \frac{\sigma_T'}{E}, \quad \sigma_x^o = \sigma_T'. \quad (11)$$

Изложенное иллюстрируется на рис. 2, на этом рисунке кривой 1 представлен график изменения в поперечном направлении максимальной температуры при сварке. Кривые 2, 3 показывают распределение температурной и предельной упругой деформации. На рис. 2, б штриховыми линиями выделена зона упругих деформаций. На рис. 2, в и 2, г показано распределение пластической деформации и остаточных напряжений соответственно.

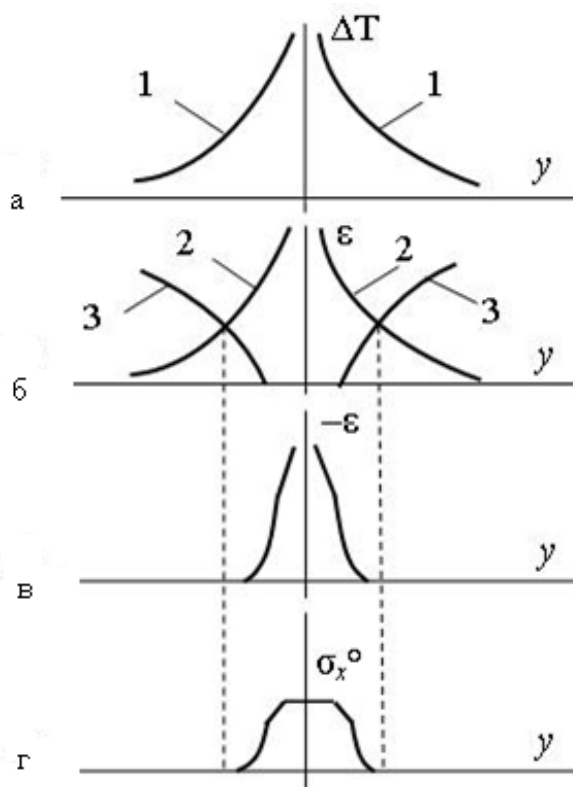


Рис. 2. Графики изменения при сварке:

а – температуры; б – температуры и продольной упругой деформации; в – пластической деформации; г – остаточных напряжений

Результаты расчета изложенным методом, а именно с помощью равенства $\sigma_x^o \approx \sigma_T$ в области шва, оказываются в удовлетворительном соответствии с экспериментальными данными для сварки листов из малоуглеродистых сталей. Для титановых и алюминиевых

сплавов, остаточные напряжения не достигают значений предела текучести. Скорее всего, это связано с тем, что для этих материалов не учитываются зависимости предела текучести, модуля упругости и коэффициента линейного расширения от температуры в процессе охлаждения.

Многослойная сварка листов встык.

При сварке встык незакрепленных и достаточно тонких листов поперечные напряжения незначительны. При многослойной сварке встык с ними следует считаться. Для такой технологической операции определим приближенное распределение поперечных напряжений по толщине δ , следуя методу В. А. Винокурова [7].

Выясним распределение поперечных напряжений σ_y^0 по толщине шва в предположении, что к моменту укладки очередного слоя предыдущие слои успевают остыть.

При остывании слоя, отстоящего на расстоянии Z_0 от основания шва (рис. 3), его температурная деформация компенсируется деформацией под действием растягивающего напряжения σ_n .

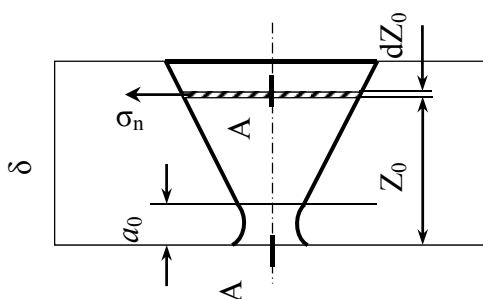


Рис. 3. Температурная деформация по толщине сварного шва

Растянутый слой передает на нижележащие слои сжимающее усилие, величина которого, приходящаяся на единицу длины шва, составляет:

$$dp = \sigma_n dz. \tag{12}$$

Под действием этой силы возникает внецентренное сжатие уложенных ранее слоев. На рис. 4 показана схема действия сил на сечение высотой Z_0 и шириной l .

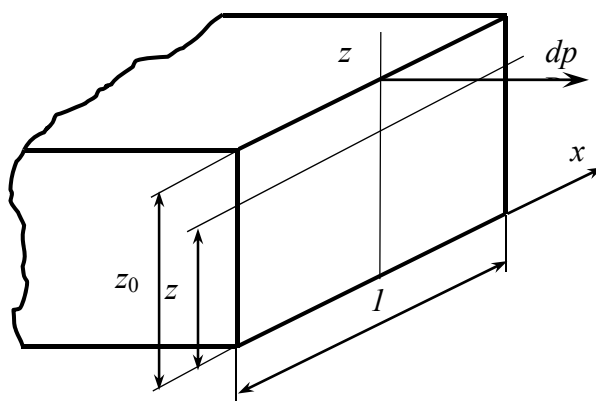


Рис. 4. Схема внецентренного сжатия в сечении сварного шва

Сила dp приложена в точке с координатами $(0, Z_0)$. В точке, определенной координатой z , возникает напряжение от синтеза сжатия и изгиба:

$$d\sigma = -\frac{dp}{lz_0} - \frac{dp \cdot Z_0 \cdot 12}{2 \cdot l \cdot Z_0^3} \left(z - \frac{Z_0}{2} \right). \tag{13}$$

В формуле (13) изгибающий момент равен $dp \cdot Z_0 / 2$. Момент инерции I поперечного сечения стержня относительно главной центральной оси инерции составляет $\frac{l \cdot Z_0^3}{12}$.

Рассматриваемая точка удалена от указанной оси на расстоянии Z_0 .

Таким образом, в точке многослойного шва, удаленной от его основания на расстояние z при укладке очередного слоя, удаленного от того же основания на расстоянии Z_0 , возникает дополнительное напряжение:

$$d\sigma_y = -\sigma_n \left(\frac{6z}{Z_0^2} - \frac{2}{Z_0} \right) dZ_0. \quad (14)$$

Для определения напряжений, возникающих в этом слое после заваривания всего шва, необходимо проинтегрировать выражение (14) в пределах от z до δ , где δ – толщина свариваемых швов и прибавить напряжения σ_n , возникающие при укладке рассматриваемого слоя:

$$\sigma_y = \sigma_n - \sigma_n \int_0^\delta \left(\frac{6z}{Z_0^2} - \frac{2}{Z_0} \right) dZ_0 = \sigma_n \left(2 \ln \frac{\delta}{z} + \frac{6z}{\delta} - 5 \right). \quad (15)$$

График, соответствующий равенству (15), приведен на рис. 5.

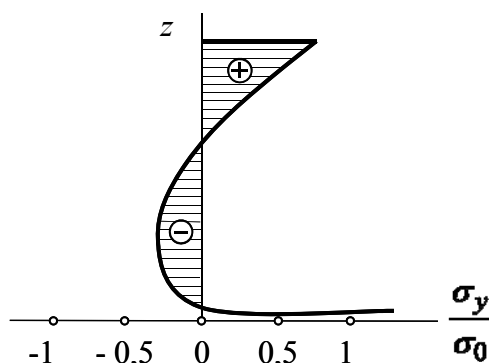


Рис. 5. Зависимость относительных напряжений сварного шва по толщине

При $z = 0$, $\sigma_y = \infty$. Таким образом, полученное решение не описывает напряженное состояние в основании шва, что объясняется следующим. При укладке первых слоёв происходит практически свободная усадка (как и при сварке тонких листов, когда $\sigma_y = 0$). Заметное сопротивление усадке возникает при некоторой толщине a_0 (см. рис. 3). Поэтому напряжения в корне шва при $0 \leq z \leq a_0$ следует определять, интегрируя выражение (15) в пределах от a_0 до δ без прибавления к результату начального напряжения σ_n . В результате получаем:

$$\sigma_y = \sigma_n \left[2 \ln \frac{\delta}{a_0} + 6z \left(\frac{1}{\delta} - \frac{1}{a_0} \right) \right]. \quad (16)$$

В приведенных зависимостях остается неизвестной величина σ_n . Если использовать электрод из малоуглеродистой стали, то продольная температурная деформация при охлаждении значительно превышает предел упругих деформаций, в силу этого рассматриваемый слой оказывается в пластическом состоянии. Если принять, что его поперечная деформация при охлаждении стеснена, т. е., что $\varepsilon_y^p = 0$, поскольку $\sigma_z = 0$, получаем $\sigma_x = \sigma_T$, $\sigma_y = \sigma_n = 0,5\sigma_T$. Экспериментальные исследования показали [7], что действительно при сварке листов толщиной 80–120 мм $\sigma_n = (0,4–0,6) \sigma_T$.

Существуют различные технологические способы устранения сварочных напряжений: предварительный нагрев при сварке, нагружение сварного соединения в процессе сварки, высокий отпуск сварных конструкций. Нас интересует снятие сварочных напряжений пластическим деформированием. Поясним это на примере.

Пусть в некотором круглом стержне действуют остаточные напряжения, распределение которых вдоль диаметра показано на рис. 6, а.

Определим остаточные напряжения после растяжения стержня до продольной деформации ε .

На рис. 6, б кривой 1 изображена эпюра напряжений при этой деформации. При последующей разгрузке снимаются равномерно распределенные по сечению разгрузочные напряжения ε^n . На рис. 6, в приведена эпюра напряжений после этой разгрузки. Как видим, остаточные напряжения существенно уменьшились.

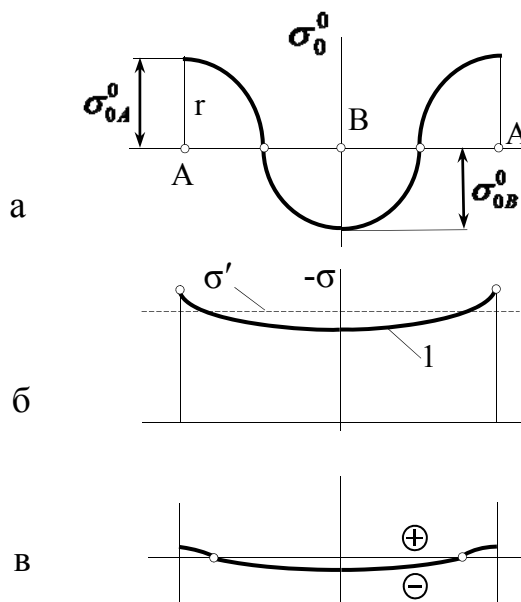


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений по диаметру стержня:
а – исходные напряжения; б – после растяжения; в – напряжения после разгрузки

Диаграмма растяжения $\sigma = f(\varepsilon)$ материала стержня соответствует кривой, приведенной на рис. 7. На рис. 7 на примере двух точек диаметра А и В показано, как можно определить напряжения при деформации стержня ε .

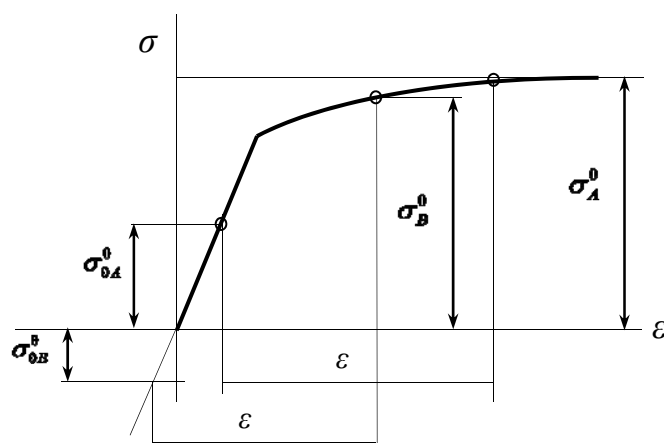


Рис. 7. Диаграмма растяжения

На практике с целью снижения сварочных напряжений применяют проковку и прокатку зоны сварного соединения. На основе эпюр остаточных напряжений (см. рис. 2) можно предложить способ снятия остаточных напряжений путём внедрения вращающегося дискового ролика в материал сварочного шва.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета сварочных напряжений при сварке двух листов встык. Показано, что остаточные сварочные напряжения вдоль оси шва достигают предела текучести материала шва.
2. Получены уравнения, с помощью которых рассчитывают сварочные напряжения при многослойной сварке листов.
3. Показан механизм снятия сварочных напряжений с помощью пластического деформирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плясунов В. А. Локальная термомеханическая обработка сварных соединений газонефтепроводных труб большого диаметра / В. А. Плясунов, И. А. Романцов, А. А. Федоринов // *Сталь*. – 2001. – № 6. – С. 81–83.
2. Технология, оборудование и методы расчета процесса локальной термомеханической обработки электросварных труб большого диаметра с использованием горячей прокатки / В. Ф. Потапкин, А. В. Сатонин, Ю. К. Доброносков [и др.] // *Металлург*. – 2004 (Спецвыпуск). – С. 27–30.
3. Остаточные напряжения и прочность сварных соединений и конструкций / Сборник трудов кафедр «Сварочное производство» высших учебных заведений Москвы. Труды (Том 133) МВТУ им. Н. Э. Баумана. – М. : Машиностроение, 1969. – 240 с.
4. Николаев Г. А. Расчет сварных соединений и прочность сварных конструкций / Г. А. Николаев – М. : Машиностроение, 1965. – 245 с.
5. Окерблом Н. О. Сварочные напряжения в металлоконструкциях / Н. О. Окерблом. – М. – Л. : Машигиз, 1950. – 252 с.
6. Электронно-лучевая и лазерная сварка. Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Узлов, А. Н. Кокора. – М. : Металлургия, 1985. – 556 с.
7. Винокуров В. А. Сварочные деформации и напряжения. Методы их устранения. / В. А. Винокуров. – М. : Машиностроение, 1968. – 236 с.

REFERENCES

1. Pļasunov V. A. Lokāl'naja termomehanicheskaĵa obrabotka svarnyh soedinenij gazonefteprovodnyh trub bol'shogo diametra / V. A. Pļasunov, I. A. Romancov, A. A. Fedorinov // *Stal'*. – 2001. – № 6. – S. 81–83.
2. Tehnologija, oborudovanie i metody rascheta processa lokal'noj termomehanicheskoj obrabotki jelektrosvarnyh trub bol'shogo diametra s ispol'zovaniem gorjachej prokatki / V. F. Potapkin, A. V. Satonin, Ju. K. Dobronosov [i dr.] // *Metallurg*. – 2004 (Specvypusk). – S. 27–30.
3. Ostatochnye naprjazhenija i prochnost' svarnyh soedinenij i konstrukcij / Sbornik trudov kafedr «Svarochnoe proizvodstvo» vysshih uchebnyh zavedenij Moskvy. Trudy (Tom 133) MVTU im. N. Je. Baumana. – M. : Mashinostroenie, 1969. – 240 s.
4. Nikolaev G. A. Raschet svarnyh soedinenij i prochnost' svarnyh konstrukcij / G. A. Nikolaev – M. : Mashinostroenie, 1965. – 245 s.
5. Okerblom N. O. Svarochnye naprjazhenija v metallokonstrukcijah / N. O. Okerblom. – M. – L. : Mashgiz, 1950. – 252 s.
6. Jelektronno-luchevaja i lazernaja svarka. Spravochnik / N. N. Rykalin, A. A. Uzlov, A. N. Kokora. – M. : Metallurgija, 1985. – 556 s.
7. Vinokurov V. A. Svarochnye deformacii i naprjazhenija. Metody ih ustranenija. / V. A. Vinokurov. – M. : Mashinostroenie, 1968. – 236 s.

Огородников В. А. – д-р техн. наук, проф. ВНТУ

Архипова Т. Ф. – канд. техн. наук, доц. ВНТУ

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница.

E-mail tfarhipova@gmail.com