

РАСЧЕТ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЕ И СВАРНЫХ ШВАХ РЕЗЕРВУАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ВЫБОРОМ СХЕМЫ РАЗРЕЗКИ ШВА

А.И.Айнабеков, Т.Р. Аманбаев, Ш.Т.Ешимбетов
ЮКГУ им. М. Ауезова, г. Шымкент

Остаточные напряжения, возникающие в конструкциях в результате сварки, неблагоприятно влияют на их прочность при нагрузках и многократных нагружениях, увеличивают вероятность внезапных разрушений и скорость накопления усталостных повреждений [1]. Однако возможности расчетной оценки сварочных напряжений ограничиваются сложностью явления. Для совершенствования расчетных методов необходимо располагать достаточно полными данными о сварочных напряжениях в конструкциях.

Простейшей моделью элемента сварной конструкции может служить полоса с наплавленным валиком, имитирующим сварное соединение.

Остаточные напряжения определяются при последовательном снятии с кромок полосы металла. Наибольший интерес представляет распределение остаточных напряжений в области сварного шва и околошовной зоны. При разрезе полосы со стороны шва на противоположной кромке получаются малые приращения деформации $\Delta\varepsilon$ при снятии слоя толщиной Δa , так как усилие, удаляемое вместе со слоем Δa , воспринимается всем сечением полосы и это существенно снижает точность определения деформационной кривой. Необходимо выбрать схему разрезки, которая приводила бы к получению максимальных возможных деформаций при удалении слоя толщиной Δa .

Следует заметить, что наибольшие деформации при данной схеме разрезки получаются на противоположной кромке.

Будем условно называть прямой разрезку полосы, при которой слои металла снимаются со стороны свободной кромки, а измерение приращений деформации производится на поверхности сварного шва или вблизи его. При обратной разрезке слои металла удаляются со стороны сварного шва, а приращения деформации измеряются на кромке полосы, оставшейся после окончания прямой разрезки.

При прямой разрезке напряжения определяются по следующим зависимостям [2-5]

$$\sigma(a) = \sigma''(a) + \sigma'(a) + \sigma_1(a), \quad (1)$$

где
$$\sigma''(a) = \frac{1}{2} E(h-a) \cdot \frac{d\varepsilon}{da}; \quad (2)$$

$$\sigma'(a) = 2E\varepsilon(a) - 3E(h-a) \cdot \int_0^a \frac{\varepsilon(\xi)}{(h-\xi)^2} d\xi; \quad (3)$$

$$\sigma_1(a) = P + Q_a, \quad (4)$$

в формуле (4)

$$P = E \cdot \left[-\frac{2h+a_1}{h-a_1} \varepsilon(a_1) + 3h \cdot \int_0^{a_1} \frac{\varepsilon(\xi)}{(h-\xi)^2} d\xi \right];$$

$$Q_a = 3E \cdot \left[\frac{\varepsilon(a_1)}{h-a_1} - \int_0^a \frac{\varepsilon(\xi)}{(h-\xi)^2} d\xi \right],$$

В формулах (1)-(4) a – расстояние от слоя до исходного положения кромки полосы со стороны разрезки; $\varepsilon(a)$ – деформационная кривая прямой разрезки; $\sigma(a)$ – полное остаточное напряжение в слое на расстоянии a ; $\sigma'(a)$ – часть остаточного напряжения $\sigma(a)$, снимаемая в слое на расстоянии a в результате удаления всех вышележащих слоев металла; $\sigma''(a)$ – часть остаточного напряжения $\sigma(a)$, снимаемого вместе с самим слоем Δa ; $\sigma_1(a)$ – остаточное напряжение, снятое в оставшейся части полосы после ее прямой разрезки; h – высота полосы в исходном состоянии; a_1 – глубина прямой разрезки.

При обратной разрезке остаточные напряжения определяются по формулам:

$$\sigma(a) = \sigma''(a) + \sigma'(a) + \sigma_1(a), \quad (5)$$

$$\sigma''(a) = \frac{1}{2} E(h' - a) \cdot \frac{d\varepsilon}{da}, \quad (6)$$

$$\sigma'(a) = 2E\varepsilon'(a) - 3E(h' - a) \cdot \int_0^a \frac{\varepsilon'(\xi)}{(h' - \xi)^2} d\xi, \quad (7)$$

где $\varepsilon'(a)$ – деформационная кривая обратной разрезки; h' – высота полосы после окончания прямой разрезки.

На пластину из стали Вм Ст.3 шириной $h = 123$ мм и длиной $\ell = 450$ мм была произведена автоматическая наплавка валика на кромку сварочной проволокой марки Св – 04Х494Н1МЗ, после чего пластина подвергалась высокому отпуску при температуре 650°C в течение 2 часов. Остывание происходило вместе с печью.

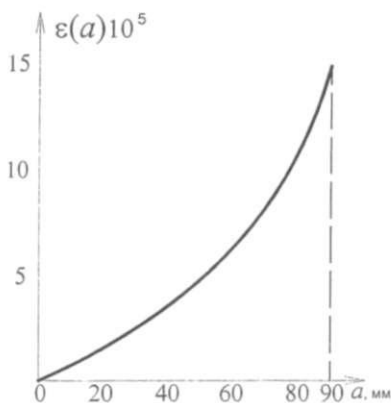


Рисунок 1 - Деформационная кривая прямой разрезки

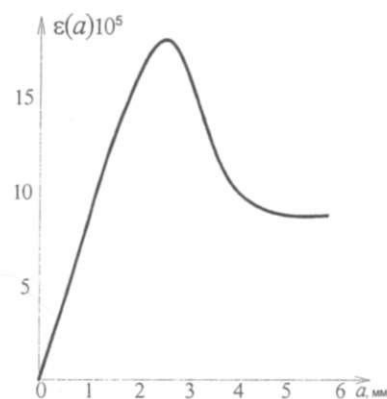


Рисунок 2 - Деформационная кривая обратной разрезки

Определение остаточных напряжений производилось комбинированным методом. Для этого на первом этапе была произведена прямая разрезка глубиной 90 мм с последовательным снятием слоев толщиной 10 мм. Деформационная кривая $\varepsilon(a)$ прямой разрезки представлена на рисунке 1.

Затем длина образца для удобства проведения последующей обратной разрезки была уменьшена до 150 мм. Обратная разрезка производилась последовательным снятием слоев толщиной – 0,5 мм. Деформационная кривая $\varepsilon'(a)$ обратной разрезки представлена на рисунке 2.

Остаточные напряжения определялись по формулам (1)-(7). На рисунках 3,4 представлены эпюры $\sigma(a)$ при прямой и обратной разрезке.

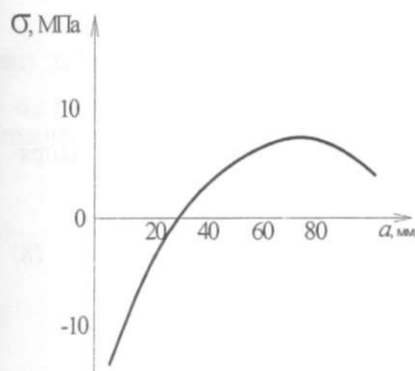


Рисунок 3 - Эпюра остаточных напряжений при прямой разрезке

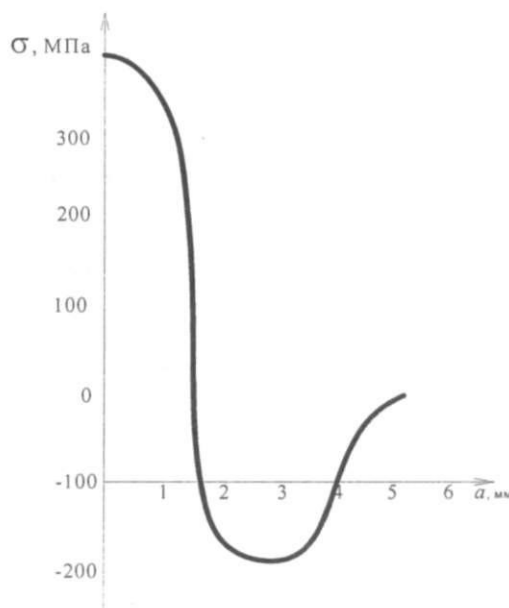


Рисунок 4 - Эпюра остаточных напряжений при обратной разрезке

Точность вычисления остаточных напряжений $\sigma(a)$ определяется точностью построения экспериментальных деформационных кривых $\varepsilon(a)$ и $\varepsilon'(a)$. Точность же экспериментального определения деформационных кривых $\varepsilon(a)$ и $\varepsilon'(a)$ зависит от соответствия толщины снимаемого слоя градиенту напряжений, глубины прямой разрезки, чувствительности прибора, фиксирующего приращения деформаций при снятии слоев. При данной чувствительности измерительного устройства толщина снимаемого слоя, количество слоев, точность определения деформационной кривой зависят от градиента этой кривой. При прочих равных условиях большей градиент этой кривой дает большие приращения деформации $\Delta\varepsilon$ при снятии слоя Δa .

Наибольшие по величине остаточные напряжения могут иметь место в сварном шве, околосварной зоне и в зоне термического влияния. В волокнах полосы ниже зоны термического влияния остаточные напряжения могут иметь малую величину при линейном законе их распределения. Поэтому прямая послойная разрезка может не дать значительных приращений деформации $\Delta\varepsilon$ на противоположной кромке, и деформационная кривая $\varepsilon(a)$ будет получена с большими погрешностями. Учитывая, что при приближении к свободной кромке распределение остаточных напряжений имеет линейный характер, можно отрезать часть полосы и по деформациям на ее свободных краях определить остаточные напряжения $\sigma(a)$ и, при необходимости, вычислить ординаты деформационной кривой $\varepsilon(a)$.

Пусть при прямой разрезке пластины отрезается полоса шириной a_1' (рисунок 5), а в точке 1-4 нам известны деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, и ε_4 . Тогда по значениям этих деформаций

можно определить остаточные напряжения $\sigma(a)$ в отрезанной полосе шириной a'_1 и в оставшейся части пластины.

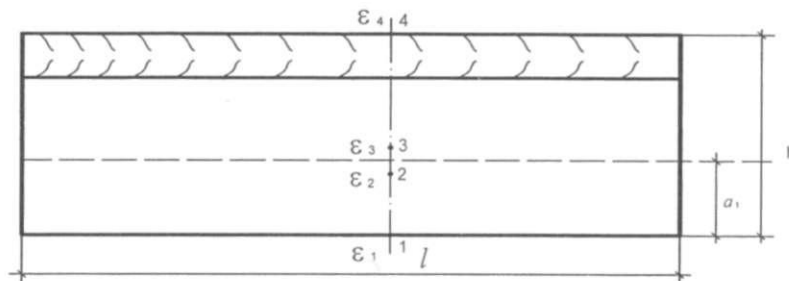


Рисунок 5 - Схема отрезанной полосы шириной a'_1

Рассмотрим отрезанную полосу шириной a'_1 . После отрезки она деформируется и деформации на свободных краях, соответственно, равны ε_1 и ε_2 . Значения остаточных напряжений $\sigma(a)$ учитывая ε_1 и ε_2 , можно определить по следующей формуле:

$$\sigma(a) = E \left[\varepsilon_1 + \frac{a}{a_1} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \right] \quad (8)$$

Построенная в результате расчета эпюра представлена на рисунке 6.

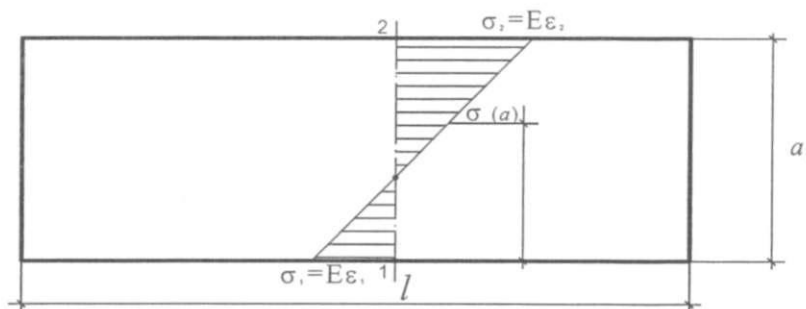


Рисунок 6 - Эпюра остаточных напряжений в полосе шириной a'_1

Аналогично определим остаточные напряжения $\sigma(a)$ в оставшейся части пластины при отрезке полосы шириной a'_1 :

$$\sigma(a) = E \cdot \left[\varepsilon_3 + \frac{a}{h - a'_1} (\varepsilon_4 - \varepsilon_3) \right] \quad (9)$$

Эпюра остаточных напряжений в полосе шириной $\frac{1}{2} \alpha$: вычисления по (9) представлены на рис. 7.

Таким образом, на участке $O - a'_1$ (рисунок 5) эпюра остаточных напряжений $\sigma(a)$ нам известна. Следует заметить, что ширину одновременно отрезаемой полоски необходимо выбрать в пределах линейного участка эпюры $\sigma(a)$, поскольку представленные схемы исходят из линейного распределения остаточных напряжений.

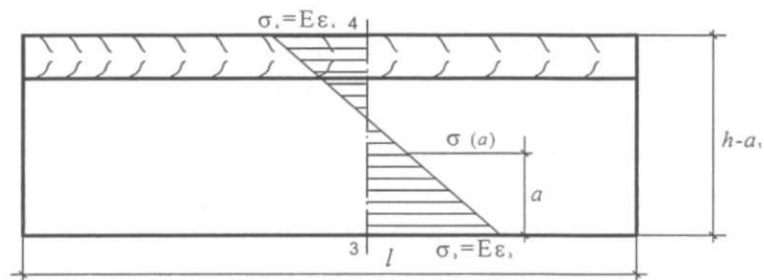


Рисунок 7 - Эпюра остаточных напряжений в полосе шириной $h - a_1$

Глубину прямой разрезки необходимо выбрать так, чтобы при обратной разрезке получить деформационную кривую $\varepsilon'(a)$ со значительным градиентом.

Произведем исследование влияния глубины прямой разрезки на величину и характер изменения деформационной кривой $\varepsilon'(a)$ при обратной разрезке.

Рассматривая выражения (1)-(3), можно записать:

$$\sigma(a) = -\frac{1}{2} E (h - a) \frac{d\varepsilon}{da} + 2 E \varepsilon(a) - 3 E (h - a) \int_0^a \frac{\varepsilon'(\xi)}{(h - \xi)^2} d\xi \quad (10)$$

Пусть распределение остаточных напряжений $\sigma(a)$ нам известно. Определим из уравнения (10) деформационную кривую $\varepsilon(a)$.

Интегродифференциальное уравнение (10) можно привести к обобщенному уравнению Эйлера. Применяя метод вариации произвольной постоянной, получаем искомое решение:

$$\varepsilon(a) = \frac{6}{E(h - a)^2} \int_0^a \sigma(\xi) (h - \xi) d\xi + \frac{4}{E(h - a)_0} \int_0^a \sigma(\xi) d\xi \quad (11)$$

Исследование влияния глубины прямой разрезки a_1 на деформационную кривую $\varepsilon'(a)$ обратной разрезки произведем на примере рассмотренной пластины с наплавленным валиком.

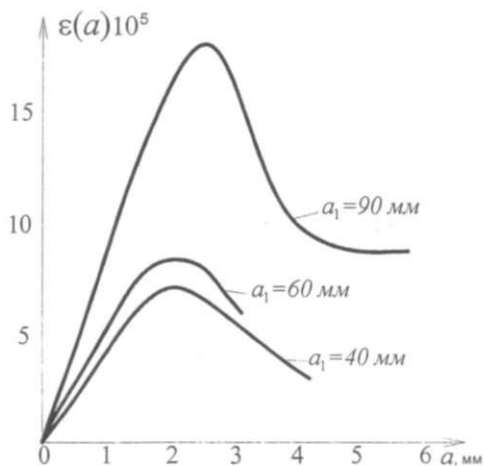


Рисунок 8 - Деформационные кривые обратной разрезки при различных вариантах прямой разрезки

По деформационной кривой $\varepsilon(a)$ прямой разрезки (рисунок 1) можно определить, какие остаточные напряжения $\sigma(a)$ снимаются в результате прямой разрезки глубиной $a_1 = 0-90$ мм. Затем, используя эпюру остаточных напряжений (рисунок 4), определяют остаточные напряжения, оставшиеся в пластине после прямой разрезки, а по формуле (11) – деформационную кривую обратной разрезки. На рисунке 8 представлены деформационные кривые обратной разрезки для вариантов прямой разрезки при $a_1 = 40$ мм, 60 мм и 90 мм.

Анализ данного примера позволяет сделать заключение, что при уменьшении ширины оставшейся части полосы увеличиваются приращенные деформации при снятии слоев в случае обратной разрезки, а это дает возможность уменьшить толщину снимаемых слоев при данной чувствительности схемы измерений, увеличить число точек, по которым строится деформационная кривая обратной разрезки, и повысить точность экспериментального определения деформационной кривой $\varepsilon'(a)$ обратной разрезки.

В заключение отметим, что глубина прямой разрезки существенно влияет на вид деформационной кривой, и для выбора оптимального варианта схемы разрезки необходимо проведение пробного эксперимента и выполнение соответствующих расчетов.

Литература

- 1 Труфяков В.И. Усталость сварных соединений. – Киев: Наукова думка, 1973.
- 2 Гликман Л.А., Греков Д.И. Остаточные напряжения в сварных таврах. – М.: Госстройиздат, 1934.
- 3 Розенталь Д. Измерение остаточных напряжений. Остаточные напряжения / под ред. В.Г.Осгуда. – М.: ИЛ, 1957.
- 4 Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963.
- 5 Саверин М.М. Определение остаточных напряжений, возникающих при дробеструйном наклепе //Труды ЦНИИТМАШ, кн. 40. – М.: Машгиз, 1951.

Қорытынды

Жұмыста тәжірибелік және теориялық негізде дәнекерленген тігістегі қалдық кернеулердің зерттеу нәтижелері келтірілген. Дәнекерлеуден пайда болатын қалдық кернеулердің шамалары тігісті кию сызбасына тікелей байланысты екені дәлелденді.

Summary

In job the results of an experimental and theoretical estimation of residual pressure in a welded seam are given. Is specified, that settlement meanings of residual welding pressure in many respects depends on the circuit of a cut of a seam.