

УДК 621.791.763.2

**В. В. Десятник, канд. техн. наук, доц., В. А. Попковский, канд. техн. наук, доц.,
А. А. Катькало, канд. техн. наук, доц.**

О ДЕФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С УГЛОВЫМИ ШВАМИ

В статье изложена методика определения деформационной способности сварного соединения с угловыми швами на базе аппарата теорий упругости и пластичности. Она является удобным и доступным механизмом для определения деформационной способности сварного соединения при данных механических характеристиках металла шва и основного металла. Приведенная методика может быть в дальнейшем использована при расчёте на усталостную прочность и при решении задач снижения металлоёмкости сварных конструкций без ущерба для несущей способности. Адекватность разработанной методики подтверждается хорошей сходимостью расчётных и экспериментальных данных.

Одним из путей снижения массы наплавленного металла при сварке угловых швов является применение сложнелегированных проволок, позволяющих получить наплавленный металл с более высокими прочностными характеристиками, чем основной металл. Данный подход позволяет увеличить поверхность разрушения, и, следовательно, разрушающее усилие. Возникает возможность снижения катета шва, и, как следствие, массы наплавленного металла, что приводит к снижению расхода сварочных материалов (электродной проволоки) и трудоёмкости выполняемых операций.

Деформационная способность сварных соединений с угловыми швами является одной из важнейших характеристик, во многом предопределяющих их несущую способность, особенно в условиях знакопеременного нагружения.

Однако, как правило, более прочные материалы обладают и более высокой чувствительностью к концентрации напряжений, что сказывается на таких характеристиках, как длительная прочность при знакопеременных нагрузках и хладостойкость сварных соединений. В этих условиях деформационная способность металла шва приобретает ключевое значение. При выборе сварочной проволоки, предполагающей снижение массы наплавленного металла, важно, чтобы деформационная способность металла шва была близка к де-

формационной способности основного металла в условиях эксплуатации.

Соединения с угловыми швами, как правило, работают в условиях нагружения несколькими силовыми факторами, преобладающими из которых являются срезающие (касательные) напряжения и вызванные изгибающим моментом нормальные напряжения.

Одним из направлений прогнозирования несущей способности сварных соединений в условиях переменного нагружения являются теории, основывающиеся на деформационной способности металла шва.

Известны способы определения деформационной способности соединений с угловыми швами, основанные на измерении угла загиба одной из пластин нахлесточного соединения, сваренного односторонним швом, для сварных соединений, выполненных различными сварочными проволоками. Для этих способов были установлены эмпирические зависимости угла загиба одной из пластин нахлесточного сварного соединения от свойств наплавленного металла и катета шва [1]. В данных публикациях эмпирическим путём были установлены зависимости угла загиба одной из пластин нахлесточного сварного соединения от свойств наплавленного металла. Однако эмпирический характер зависимостей, полученных в данных

работах, не позволяет распространить их результаты на более широкий круг сварочных материалов. Хотя получение зависимостей такого рода могло бы дать удобный инструмент для выбора сварочных материалов, позволяющих снижать массу наплавленного металла в сварных соединениях с угловыми швами, широкому кругу инженеров, занимающихся расчетами сварных конструкций.

В данной статье предпринята попытка разработки методики определения деформационной способности сварных соединений с угловыми швами на основе использования аппарата теории упругости, а также свойств материалов.

Использование данной методики может предоставить возможность производить обоснованный выбор присадочных

материалов, позволяющих снижать массу наплавленного металла при обеспечении его деформационной способности.

При разработке предлагаемой методики авторы руководствовались результатами, приведенными в [1], в которых установлено, что при испытании нахлесточных сварных соединений с односторонним швом одна из пластин изгибается до угла, предопределённого деформационной способностью металла углового шва.

Изгиб одной из пластин обусловлен изгибающим моментом, зависящим от соотношения катета шва и толщины свариваемых пластин, а также деформационной способностью металла шва (рис. 1).

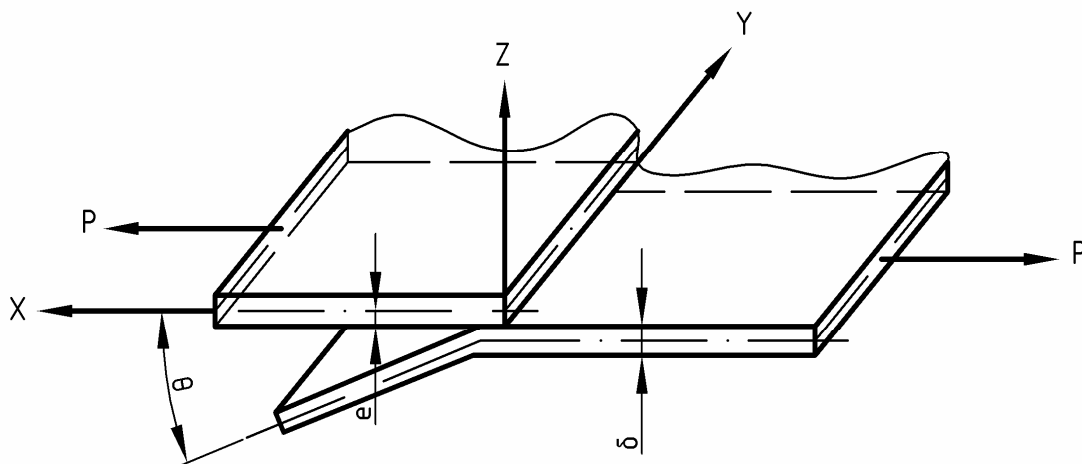


Рис. 1. Схема испытаний нахлесточных сварных соединений

Авторами [1] предпринималась попытка установить зависимость угла остаточной деформации пластины при разрушении одностороннего нахлесточного соединения от свойств металла шва.

Связь напряжений и деформаций лучше представить в виде функции $\varepsilon = f(\sigma)$, при этом характерные участки аппроксимируются прямыми (рис. 2).

В таком случае справедливо следующее:

– для упругой области $\varepsilon = k \cdot \sigma$, где $k = 1/E$;

– для площадки текучести роль коэффициента k играет модуль текучести;

– для площадки упрочнения роль коэффициента k выполняет модуль упрочнения;

– для участка разгрузки коэффициент k определяется аналогично упругой

области, отрезок $\varepsilon_{\max} - \varepsilon_p$ представляет собой пластическую деформацию.

Следовательно, диаграмма деформирования может быть описана уравнениями:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \sigma \cdot \frac{1}{E}; \\ \varepsilon_2 = K_1 \cdot \sigma + B_1; \\ \varepsilon_3 = K_2 \cdot \sigma + B_2. \end{cases} \quad (1)$$

При данной схеме нагружения (см. рис. 2) ввиду наличия изгибающего момента напряжения в верхнем и нижнем слоях пластины будут отличаться. Следовательно, характер распределения деформаций также будет неоднородным. По разности деформаций слоёв можно судить об остаточной деформации изгиба одной из пластин сварного соединения.

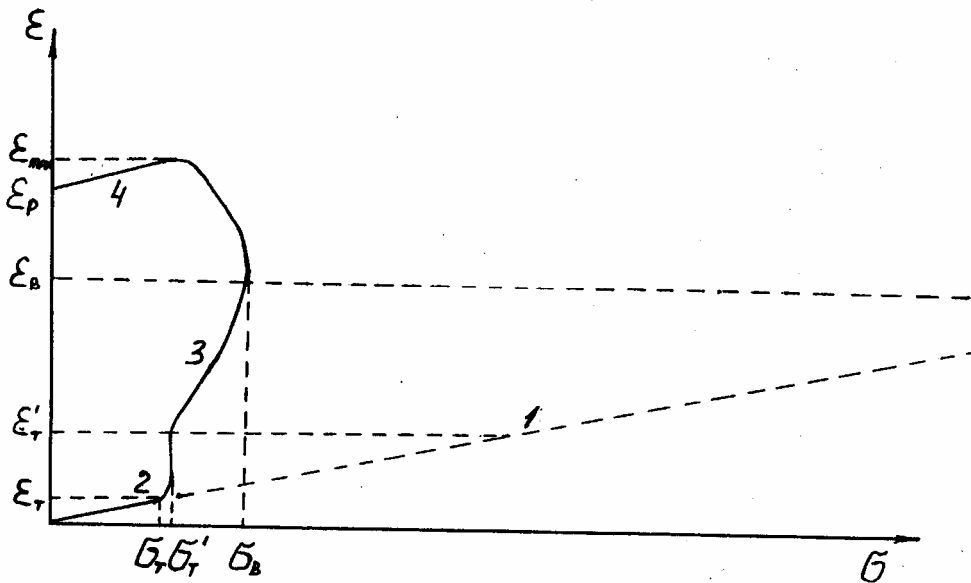


Рис. 2. Схематизированная зависимость $\varepsilon = f(\delta)$

Для определения этих деформаций разобьем всю пластину на элементарные объемы: $dV = dx \cdot dy \cdot dz$, из которых выберем объемы, лежащие на двух прямых вдоль оси OY в плоскости XOZ на верхнем и нижнем слоях пластины. Ширина прямой dx , высота dy , исходная длина Y для обеих пластин. Определим напряжения в элементарных объёмах. Напряжения достигнут максимального значения в околшово́й зоне в верхней пластине, поскольку угловой шов является концентратором напряжений. Согласно диаграмме напряжений Мора,

$$\sigma_{\max} = 0,7\tau_B - 2\tau_B = -1,3\tau_B. \quad (2)$$

В данном случае τ_B – временное сопротивление металла шва при срезе.

Распределение нормальных напряжений по сечениям пластины приведено на рис. 3.

Рассматривая каждое сечение с точки зрения закона сохранения энергии, используем постоянство потенциальной механической энергии в них. Таким образом, в сечении γ_i механическая энергия может быть определена через площадь эпюры напряжений в нем:

$$\omega = S = \delta \cdot \sigma. \quad (3)$$

Согласно теории размерностей, площадь эпюры S является показателем

концентрации механической энергии на единице площади в данном сечении пластины. Поскольку все сечения пластины одинаковы по площади и обладают одинаковой потенциальной энергией, то площадь

эпюр будет постоянна во всех поперечных сечениях пластины. Следовательно, будет изменяться характер распределения нормальных напряжений.

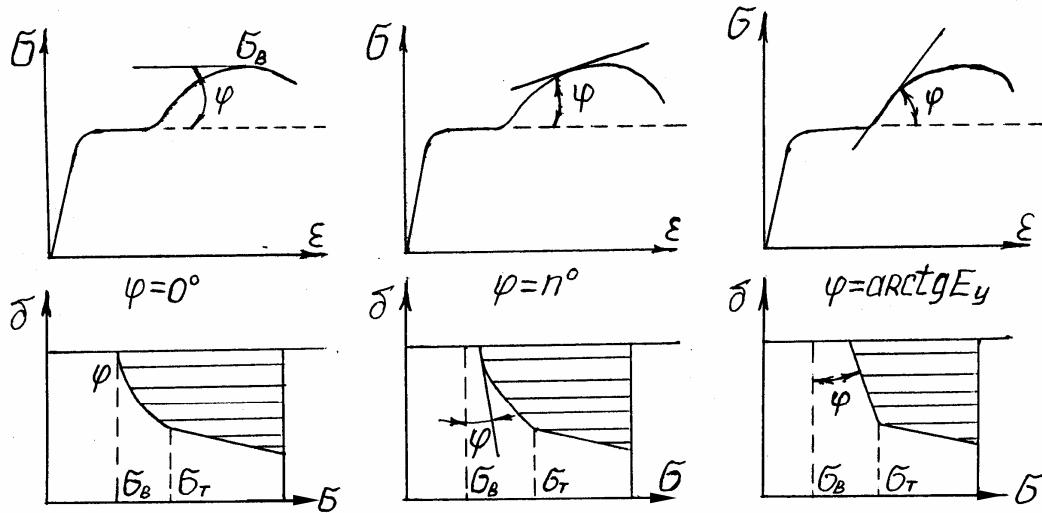


Рис. 3. Распределение нормальных напряжений

Исходя из характера распределения нормальных напряжений следует, что при удалении от сечения γ и по мере приближения к сечению α угол между эпюрой и базой растёт по мере увеличения катета шва. В области упругих деформаций эпюра прямолинейна. При достижении напряжениями предела текучести и выхода за ее предел участки упругости и упрочнения на эпюре образуют тупой угол. Кроме этого, в упругой области угол между эпюрой и базой меняется от нуля в сечении γ до значения $\arctg(E_\gamma)$, где E_γ – модуль упрочнения (рис. 4).

По мере роста E_γ возрастает значение угла φ . Эпюру распределения напряжений в верхнем слое пластины, судя по её характеру, можно аппроксимировать либо гиперболической, либо тригонометрической функцией.

Изменение напряжений можно представить в виде зависимости напряжений от величины угла между линией эпюры и базой: $\sigma = f(\varphi)$. Максимальному значению

напряжения σ_{\max} соответствует максимальное значение угла φ .

Далее, разбиваем угол на некоторое количество равных частей. На такое же количество частей разбивается ордината эпюры нормальных напряжений от σ_p до σ_{\max} . Из рис. 4 следует, что

$$\sigma = \delta \cdot \operatorname{tg}(\alpha), \quad (4)$$

где δ – толщина пластины.

Равенство (4) справедливо, если $\sigma_p = 0$. В противном случае необходимо в каждом сечении к величине $\delta \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$ добавить величину σ_p . Помимо этого, все величины условно считались безразмерными, что неверно. Для численного выражения напряжения необходимо преобразовать (4) к виду

$$\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\operatorname{tg}(\varphi)} \cdot \operatorname{tg}(\varphi(n-1)), \quad (5)$$

где n – число участков разбиения угла

между линией эпюры и линией базы.

Подобная функция даёт возможность определить с достаточной точностью значение σ в любой точке поверхности пластины. Полученную функцию следует отредактировать, т. к. при уменьшении α σ на эпюре уменьшится на величину σ_p .

Следовательно, в каждой точке пластины σ_{\max} следует уменьшить на σ_p в данной точке. Тогда функция $\sigma = f(\alpha)$ примет вид:

$$\sigma = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_p}{\operatorname{tg}(\varphi)} \cdot \operatorname{tg}(\varphi(n-1)) + \sigma_p. \quad (6)$$

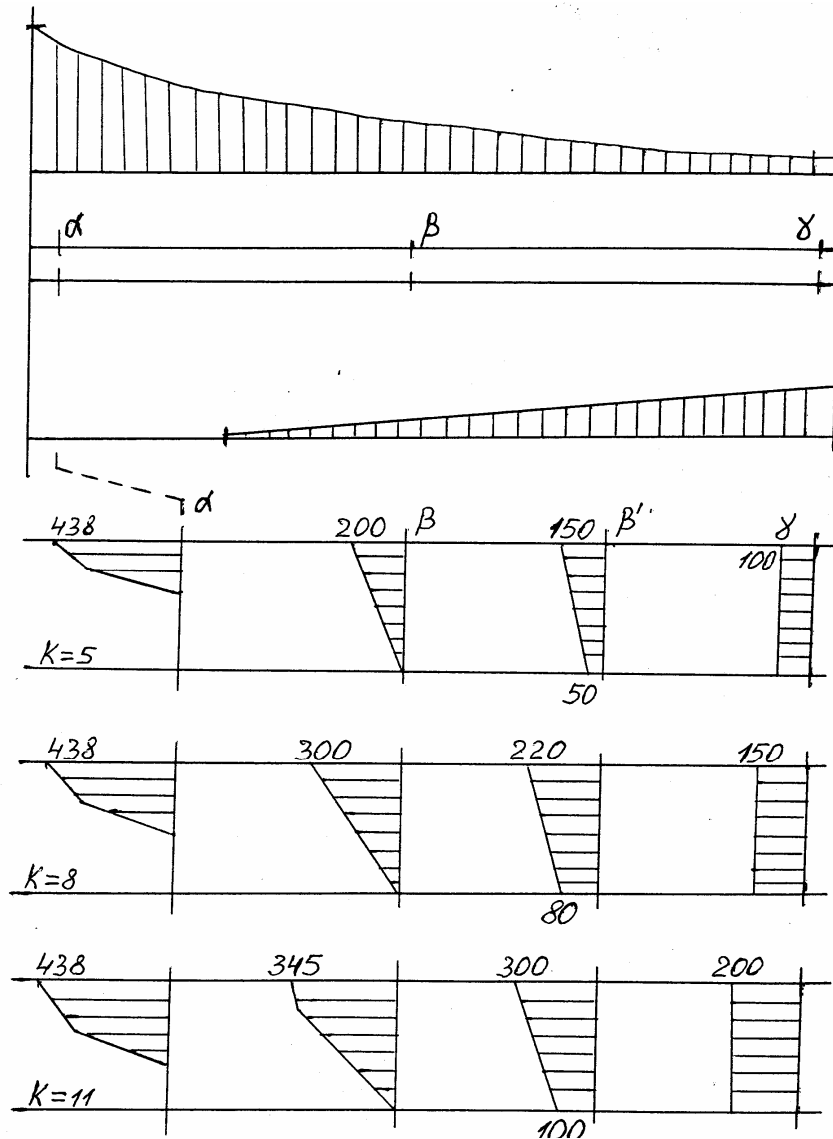


Рис. 4. Зависимость напряжения от угла между линией базы и эпюрой

σ_p в качестве слагаемого необходимо, чтобы сместить минимальное значение $\sigma = f(\alpha)$ на величину σ_p в сечении, в котором рассчитывается σ . Очевидно, что величина σ_p непостоянна и зависит от удаления от левого края пластины. Так как за-

висимость $\sigma_p = f(\alpha)$ линейна, σ_p можно рассчитывать по формуле

$$\sigma_p = (\sigma_{p_{\max}} / n_{\max})n, \quad (7)$$

где n_{\max} – число равных частей, на кото-

рые разбиваются угол, ордината эпюры σ и прямая поверхность пластины с сечением $dy dz$; n – количество частей, взятое от левого края пластины.

Таким образом, функции (8) и (9) рассчитываются в системе

$$\sigma = (\sigma_{\max} - \sigma_p) / \operatorname{tg}(\varphi(n-1)) + \sigma_p; \quad (8)$$

$$\sigma_p = (\sigma_{\max} / n_{\max})n, \quad (9)$$

при условии, что формула (9) рассчитывается первой и полученное значение в конкретном сечении подставляется в формулу (8).

При наличии данной системы можно вести речь о расчете остаточной деформации пластины в зависимости от свойств металла шва.

Остаточная деформация рассчитывается как сумма деформаций элементарных объёмов $dx dy dz$ отдельно для верхнего и нижнего слоев:

$$\varepsilon_{\text{верхн}} = \sum \varepsilon_B dy; \quad \varepsilon_{\text{нижн}} = \sum \varepsilon_H dy. \quad (10)$$

Расчёт деформаций в элементарных

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_E \in [0; \sigma_m] \Rightarrow \varepsilon = 0; \\ \sigma \in [\sigma_m; \sigma'_m] \Rightarrow \varepsilon = (\varepsilon'_\tau - \varepsilon'_\sigma) \frac{(\sigma - \sigma_m)}{(\sigma'_m - \sigma_m)} + (\varepsilon'_\tau - 0,0015); \\ \sigma \in [\sigma'_m; \sigma'_\sigma] \Rightarrow \varepsilon = (\varepsilon'_\tau - \varepsilon'_\sigma) \frac{(\sigma - \sigma'_m)}{(\sigma'_\sigma - \sigma'_m)} + (\varepsilon'_\tau - 0,0015), \end{array} \right. \quad (15)$$

где 0,0015 – удельная доля упругой составляющей в общей деформации.

Эта составляющая определяется как

$$\varepsilon_{\text{упр}} = \frac{\sigma_\sigma + \sigma_m}{2E}. \quad (16)$$

В зависимости от принадлежности напряжений к какому-либо из интервалов производится расчёт деформации по каждому элементарному объёму. Результаты расчёта деформаций суммируются по верхнему и нижнему слоям.

объёмах ведется следующим образом:

– рассчитывается максимальное напряжение в верхнем слое

$$\sigma_{\max} = 1,3\tau_\sigma; \quad (11)$$

– определяется номинальное напряжение (напряжение в сечении γ)

$$\sigma_p^{\max} = \frac{0,7 \cdot \tau \cdot K}{\delta}; \quad (12)$$

– рассчитываются значения напряжений во всех элементарных объёмах

$$\sigma = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_p}{\operatorname{tg}(\varphi)} \operatorname{tg}(\varphi(n-1)) + \sigma_p; \quad (13)$$

$$\sigma_p = (\sigma_{\max} / n_{\max})n. \quad (14)$$

Расчёт носит циклический характер. Сначала рассчитывается значение σ_p , затем, по мере удаления от шва, рассчитывается σ исходя из значения σ_p . Затем полученные результаты сравниваются с условием

После получения конкретных значений ε_B и ε_H рассчитывается угол остаточной деформации:

$$\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{(\varepsilon_\sigma - \varepsilon_n)l}{\delta}\right), \quad (17)$$

где l – протяжённость пластины вдоль оси OY.

Зависимость угловой деформации от катета шва для различных составов металлов шва приведена на рис. 5.

Полученные расчётные значения

близки к экспериментальным. Расхождение составляет не более 3,1 %.

Приведенная выше методика определения деформационной способности угловых сварных соединений даёт возможность широкому кругу конструкторов и техноло-

гов сварочного производства произвести выбор сварочной проволоки, предполагающей снижение массы наплавленного металла без проведения дорогостоящих механических испытаний.

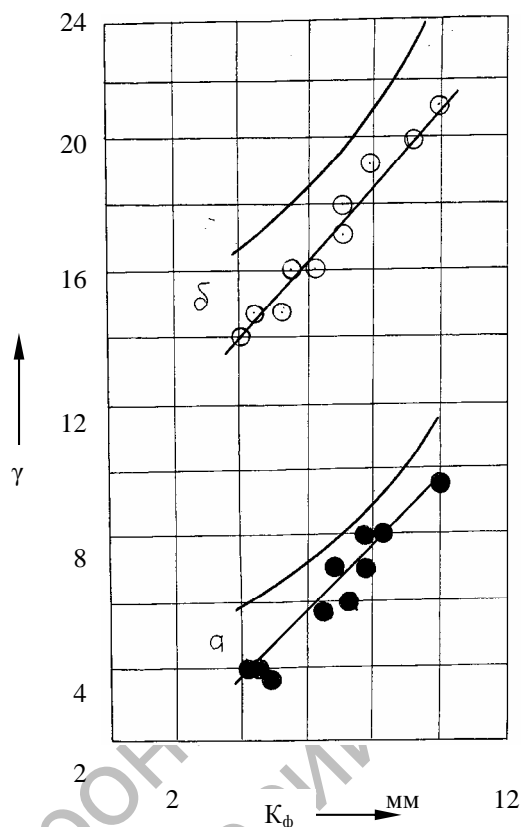


Рис. 5. Зависимость угловой деформации пластины от катета шва

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Роговин, Д. А.** Снижение массы наплавленного металла путём применения угловых швов

повышенной прочности / Д. А. Роговин, В. В. Десятник // Сварочное производство. – 1990. – № 3.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 10.02.2008

V. V. Desjatnik, V. A. Popkovsky, A. A. Katkalo
Deformation capacity of welded joints with fillet welds

Methods of detection of deformation capacity of a welded joint with fillet welds based on the theory of elasticity and the theory of ductility are given in the article. Methods are a convenient and available mechanism for detection of deformation capacity of a welded joint at given mechanical characteristics of the metal of the weld and the basic metal. The given methods can be further used at calculation on fatigue strength and at solving problems of specific quantity of metal of welded constructions decreasing, without damaging their bearing capacity. Adequacy of the methods is proved by convergence of calculated and experimental data.