
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 621.791.5

Ю. А. ЦУМАРЕВ, канд. техн. наук, **В. П. КУЛИКОВ**, инж, **В. Н. КЛОЧКОВ**, инж.
(Белорусско-Российский университет, Могилев),
В. К. ШЕЛЕГ, д-р техн. наук
(Белорусский национальный технический университет, Минск)
E-mail: bru@bru.mogilev.by

Оптимизация формы кромок для сварных соединений с угловыми швами

Предложены конструкции неразъемных соединений с угловыми швами, которые характеризуются скосом кромок с глубиной, уменьшающейся по мере удаления от края шва к его середине. Установлено, что при выполнении неразъемных соединений, имеющих скос кромки переменной глубины, достигается уменьшение объема наплавленного металла на 35 % и соответствующее сокращение ресурсоемкости процесса без снижения несущей способности соединения.

Permanent fillet-welded joint constructions are offered. They are characterized by bevels' depth which decreases as it moves from the seam edge to its centre. It is established that when carrying out permanent joints with bevel of variable depth, added metal shrinkage is 35 % and corresponding reduction of the process resource intensity without decreasing load-carrying ability of the joining.

Ключевые слова: неразъемные соединения, угловые швы, кромка, наплавленный металл
Key words: permanent joints, fillet welds, edge, added metal

В настоящее время сварка является одним из ведущих технологических процессов и ее развитие в значительной степени определяет прогресс в других областях техники. Одним из важнейших направлений развития сварки является значительное сокращение объемов наплавленного металла, которое уменьшает расход всех других ресурсов —

трудовых, энергетических, а также обеспечивает снижение уровня загрязнения окружающей среды сварочными аэрозолями. При этом наиболее важное направление — совершенствование конструкций сварных соединений с угловыми швами, которые составляют не менее 70 % в общем объеме сварочных работ [1]. В последнее время для созда-

ния неразъемных соединений оцинкованных заготовок широко применяют дуговую пайку [2, 3], преимущества которой связаны с возможностью понижения температуры процесса не менее, чем на 500 °С за счет уменьшения температуры плавления присадочного материала (припоя). Последнее позволяет лучше сохранить легкоплавкое защитное покрытие и обеспечить высокую коррозионную стойкость соединения. В этом случае также могут применяться соединения с угловыми швами, для которых уменьшение объема швов особенно актуально ввиду высокой стоимости применяемых припоев на медной основе.

Наиболее существенную экономию наплавленного металла в неразъемных соединениях с угловыми швами можно получить за счет подготовки соединяемых кромок в виде скоса одной из них [4]. Экономия наплавленного металла в зависимости от угла скоса кромки может превышать 50 %. При соединении оцинкованного металла большое значение имеет и достигаемое одновременно уменьшение погонной энергии процесса, пропорциональной сечению шва. Снижение погонной энергии проявляется в уменьшении максимальных температур нагрева и продолжительности пребывания точек соединения в опасном с точки зрения сохранности покрытия интервале температур [5, 6]. Поэтому защитное цинковое покрытие меньше повреждается, что благоприятно сказывается на коррозионной стойкости соединения. Одновременно снижается и уровень сварочных напряжений и деформаций изделия [7].

Основой для дальнейшего развития техники конструирования и выполнения неразъемных соединений с угловыми швами, которое обеспечило бы снижение объемов наплавленного металла, может явиться прием¹, заключающийся в том, что угловые швы выполняют с переменным по длине сечением, уменьшающимся по мере удаления от краев шва к его середине в соответствии с эпюрой распределения рабочих напряжений [7, 8]. Этот подход может быть особенно эффективным при больших катетах швов, когда концентрация напряжений у краев шва резко возрастает [8], что позволило бы значительно уменьшить поперечное сечение средней части шва и получить соответствующий экономический эффект. Однако до настоящего времени этот способ не получил широкого распространения, что обусловлено, по мнению авторов, двумя основными причинами:

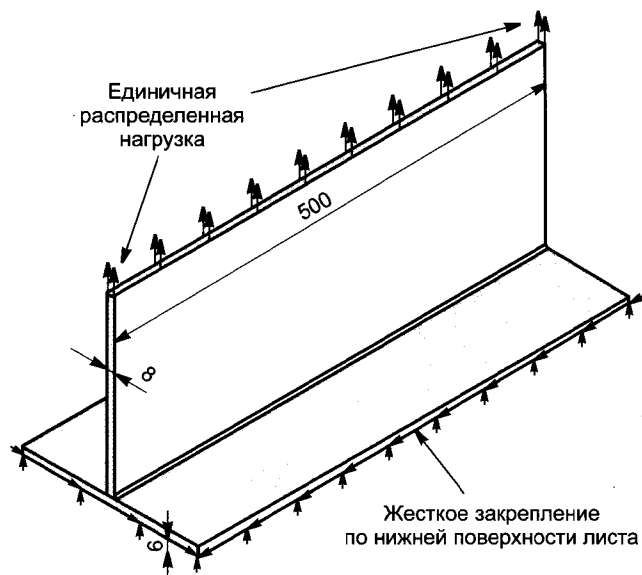


Рис. 1. Расчетная схема таврового неразъемного соединения

— недостатком данных о распределении рабочих напряжений по длине угловых сварных швов, особенно при наличии разделки и переменном их сечении;

— сложной техникой выполнения таких швов [8], в частности обусловленной отсутствием ориентиров для оператора при ручном ведении процесса.

Цель данной работы — устранение имеющихся пробелов и создание дополнительных предпосылок для более широкого и успешного применения перспективного технического решения¹. Для этого рассчитывали напряженное состояние симметричных тавровых соединений с угловыми швами при различных вариантах подготовки свариваемых кромок. Расчеты проводили методом конечных элементов с помощью программного комплекса "COSMOS", функциональные возможности которого позволяют решать проблемы, связанные со сходимостью вычислительного процесса. Размеры соединений и схема их нагружения приведены на рис. 1.

На первом этапе был выполнен расчет соединения без подготовки кромок и без учета проплавления. Результаты расчета для единичной распределенной нагрузки показали, что такое соединение характеризуется значительной неравномерностью распределения рабочих напряжений как в поперечном его сечении, так и вдоль шва. Анализ графиков, характеризующих распределение нормальных, касательных напряжений и их интенсивности, показал, что рабочие напряжения в средней части шва имеют постоянное значение (рис. 2). В крайних областях на участках длиной примерно по 10 % от об-

¹ А. с. 1574413 (СССР).

щей длины шва они быстро возрастают по мере приближения к краям шва. Полученные результаты распределения рабочих напряжений использовали для разработки расчетной схемы сварного соединения с переменным катетом. Исходя из этих результатов, был проведен расчет аналогичного сварного соединения без скоса кромок, но с катетом, значение которого у каждого из краев шва уменьшалось по линейному закону на участках длиной 100 мм. В средней части шва длиной 300 мм катет был постоянным и составлял 4 мм. Результаты расчета (рис. 3) показали, что при таком выполнении углового сварного шва происходит выравнивание полей рабочих напряжений и они распределяются более равномерно по длине шва. Сравнение этих результатов с данными рис. 2 показывает, что в сварном соединении с постоянным катетом уровень напряжений в средней части шва составлял 330 Па, а в соединении с переменным катетом — 375—390 Па. Таким образом, загруженность средней части за счет уменьшения ее катета увеличилась на 15—20 %. Характерно, что при таком выравнивании

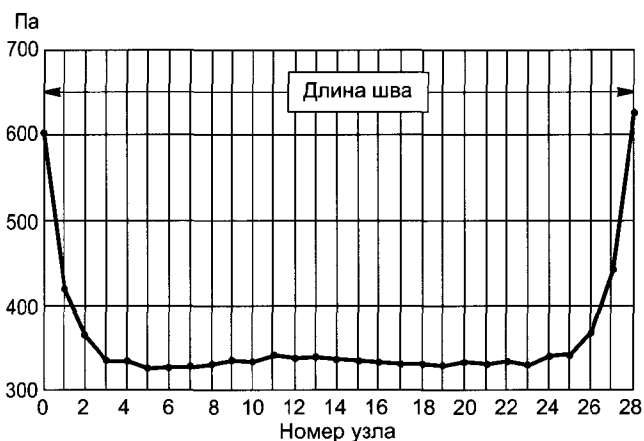


Рис. 2. Распределение интенсивности рабочих напряжений вдоль сварного шва с постоянным катетом, выполненного без подготовки кромок

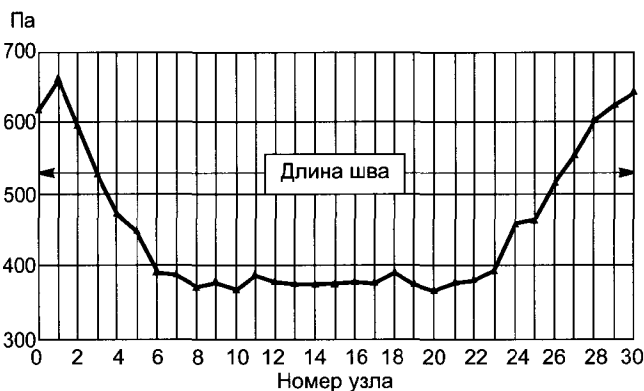


Рис. 3. Распределение интенсивности рабочих напряжений по длине углового сварного шва с переменным катетом, выполненного без разделки кромок

максимальные значения напряжений остались практически неизменными на уровне 650 Па (см. рис. 2, 3).

Уменьшение катета в средней части шва позволило уменьшить объем наплавленного металла не менее, чем на 35 % без снижения несущей способности соединения.

Аналогичные расчеты были проведены и для сварного соединения, выполненного со скосом кромки под углом 45° при глубине скоса, определяемой по формуле,

$$0,707K = \frac{b \cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \alpha}, \quad (1)$$

где K — катет углового шва в соединении, не имеющем скоса; b — глубина скоса; α — угол скоса.

При этом установили, что характер распределения рабочих напряжений по длине шва аналогичен тому, которое имело место в соединении с постоянным катетом и выполненном без скоса кромки, т. е. аналогичен приведенному на рис. 2. Снижение уровня максимальных напряжений составило 10—15 % при уменьшении объема наплавленного металла в 1,9 раза.

Таким образом, наибольшую равномерность распределения рабочих напряжений вдоль сварного шва обеспечивает способ, основанный на уменьшении сечения в средней части шва. Однако техника выполнения таких швов сложна и характеризуется низкой стабильностью геометрических размеров. Поэтому было сделано предположение, что аналогичный эффект выравнивания уровня рабочих напряжений может быть получен в соединениях со скосом кромки, глубина которого в средней части меньше, чем у краев свариваемой пластины. Предложены два варианта выполнения скосов переменной глубины, при разработке которых исходили из требования максимального упрощения технологии подготовки кромок.

Дальнейшие расчеты проводили при распределенной нагрузке, соответствующей уровню растягивающих напряжений 100 МПа. Для получения сравнительных данных расчеты распределения напряжений проводили в соединениях с тремя различными формами подготовки кромок. Первая из них представляла скос кромки вертикального листа постоянной глубины, равной 3,5 мм. Вторая схематично показана на рис. 4, а. Она представляет скос кромки под углом 45° с переменной глубиной, которая в крайних зонах шва изменялась по линейному закону с 3,5 до 2,5 мм, а в средней части была постоянной и составляла 2,5 мм. По характеру рас-

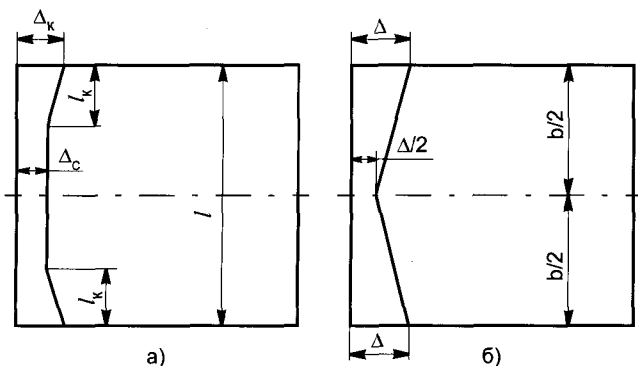


Рис. 4. Схемы выполнения скосов с постоянной глубиной в средней части пластин и переменной глубиной у ее краев (а) и с глубиной, линейно возрастающей от середины к краям листа (б) ($\Delta_k = 3,5$ мм, $l_k = 100$ мм, $l = 500$ мм, $\Delta_c = 2,5$ мм, $\Delta = 3,5$ мм)

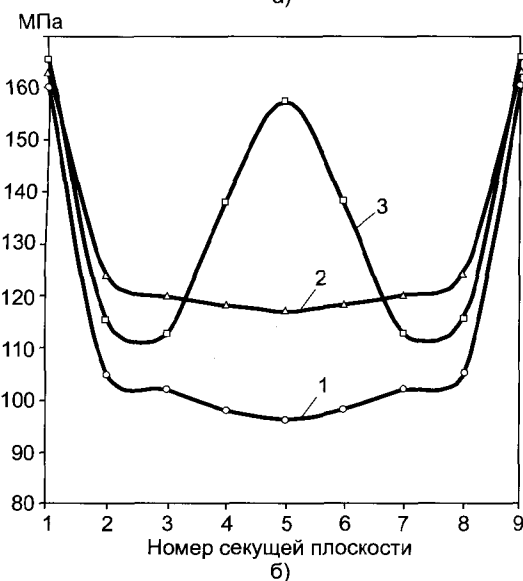
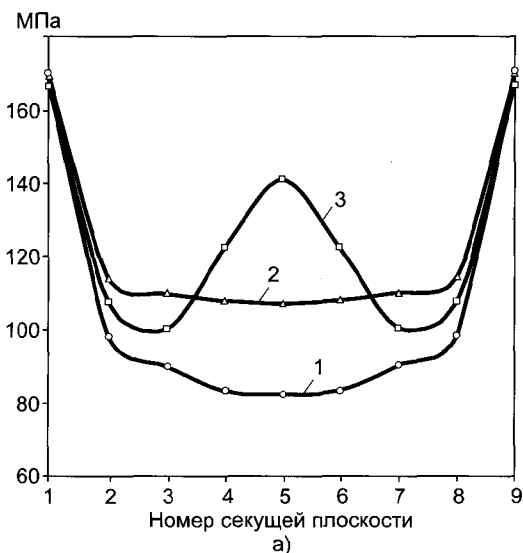


Рис. 5. Распределение интенсивности рабочих напряжений в сварных соединениях с различной подготовкой кромок: 1 — постоянная глубина скоса; 2 — то же, в средней части шва и переменная в ее крайних частях (см. рис. 4, а); 3 — глубина скоса линейно возрастает по мере удаления от середины шва к его краям (см. рис. 4, б).

пределения наплавленного металла вдоль шва она аналогична схеме сварного соединения с переменным катетом.

Последний вариант представлял скос кромки, у которого глубина линейно увеличивалась по мере удаления от середины пластины к ее краям (рис. 4, б) от 1,75 до 3,5 мм.

Точки с максимальными значениями напряжений в различных поперечных сечениях сварных соединений с переменной глубиной скоса кромки не лежат на одной прямой. Поэтому определенные затруднения возникали с правильным отображением получаемых результатов. Чтобы их устранить, в каждом из рассматриваемых вариантов подготовки кромок анализировали распределение напряжений в нескольких поперечных сечениях соединения. Определяли максимальное значение соответствующего напряжения, и именно оно отображалось при их построении. Таким образом, по номеру секущей плоскости можно судить о том, в какой области сварного шва находится соответствующая точка. Результаты расчетов приведены на рис. 5, которые отражают распределение интенсивности напряжений (см. рис. 5, а) и нормальных напряжений (см. рис. 5, б) по длине шва. Значения напряжений брали в вершине шва через промежуток длиной 50 мм. В целом они подтвердили, что предложенные схемы подготовки кромок для получения соединений с переменным сечением угловых швов не снижают несущей способности. Как и в соединениях с постоянным сечением швов, максимальные напряжения имеют место у краев при незначительных изменениях их уровня в средней части шва. Оба способа подготовки кромок обеспечивают примерно одинаковые значения максимального напряжения и примерно одинаковый уровень снижения объема наплавленного металла (порядка 35 %).

ВЫВОДЫ

1. Предложены конструкции неразъемных соединений с угловыми швами, которые характеризуются скосом кромок с глубиной, уменьшающейся по мере удаления от края шва к его середине.

2. Установлено, что при выполнении неразъемных соединений, имеющих скос кромки переменной глубины, достигается уменьшение объема наплавленного металла на 35 % и соответствующее сокращение ресурсоемкости процесса без снижения несущей способности соединения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Махненко В. И., Починок В. Е.* Проектирование сварных соединений с угловыми швами с минимальным количеством наплавленного металла // Экономия материальных, энергетических и трудовых ресурсов в сварочном производстве. Челябинск, 1986.
 2. *Миддельдорф К., Д. фон Хоффе.* Тенденции развития технологий соединения материалов // Автоматическая сварка. 2008. № 11. С. 39—47.
 3. *Дуговая пайка тонколистовой низкоуглеродистой стали / В. Ф. Хорунов и др. // Сварка и родственные технологии — в третье тысячелетие.* Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2008. 112 с.
 4. *Иващенко Г. А., Снежков Н. С.* Уменьшение массы наплавленного металла угловых швов тавровых соединений с разделкой кромок // Сварочное производство. 1991. № 8. С. 14—15.
 5. *Теория сварочных процессов / Под ред. В. В. Фролова.* М.: Высшая школа, 1988. 559 с.
 6. *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона.* М.: Машиностроение, 1974. 66 с.
 7. *Аснис А. Е., Иващенко Г. А.* Повышение прочности сварных конструкций. Киев: Наукова думка, 1978. 193 с.
 8. *Махненко В. И., Рябчук Т. Г.* Обеспеченность расчета и размеры угловых швов в различных сварных соединениях // Автоматическая сварка. 1993. № 1. С. 3—6.
-