

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СВАРКЕ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

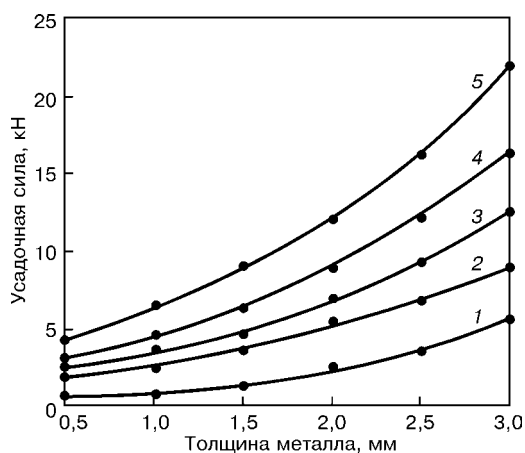
А. И. ГЕДРОВИЧ, д-р техн. наук, А. Б. ЖИДКОВ, канд. техн. наук (Восточнукр. нац. ун-т, г. Луганск)

Изложен подход для определения размеров активной зоны и остаточных деформаций, а также их максимально возможного снижения при сварке с охлаждением различных типов сварных соединений.

Ключевые слова: сварные соединения, сварка с принудительным охлаждением, деформация, остаточные напряжения, предел текучести, зона пластических деформаций

Получение на современном уровне сварочного производства сварных конструкций с деформациями формоизменения в пределах допуска сопряжено с определенными сложностями. Послесварочная правка зачастую не позволяет полностью устранить остаточные деформации, а для сложных пространственных конструкций она практически не применима. Другие известные способы устранения остаточных деформаций также предполагают значительные расходы или же могут применяться только для ограниченных классов конструкций. Поэтому наиболее перспективным является использование бездеформационной сварки и ее разновидности — сварки с принудительным охлаждением как процессов, позволяющих получить минимальные остаточные деформации в пределах допуска без послесварочной обработки [1].

Изучением процесса сварки с принудительным охлаждением занимались многие зарубежные и отечественные исследователи, в том числе сотрудники ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, НТУУ «Киевский политехнический институт» и др. [2, 3]. Однако широкого распространения в промышленности этот способ сварки не получил, поскольку многие его аспекты остались неизученными.



Номограмма для определения усадочной силы в случае сварки с охлаждением встык и нулевым зазором при различной степени сжатия размеров активной зоны: 1 — минимальная; 2 — 30; 3 — 50; 4 — 70 %; 5 — максимальная

Известно [4–6], что уровень остаточных напряжений и деформаций в сварных конструкциях зависит от размеров зоны пластических деформаций (активной зоны). Одним из способов их регулирования является принудительное охлаждение в процессе сварки. Существует множество различных способов охлаждения в процессе сварки, приводящих к снижению указанных размеров и имеющих по опубликованным данным различную технологичность и эффективность. Применение того или иного способа охлаждения диктуется способом сварки (автоматическая, ручная, под слоем флюса и пр.), свойствами свариваемого материала, стоимостью изделия, серийностью и условиями производства и т. д. В работе [7] сообщается о снижении размеров активной зоны до 70 %. При этом исследования велись для низкоуглеродистых сталей толщиной 1...3 мм, поскольку тонкие листы наиболее склонны к деформации. Для стыковых соединений из металла толщиной до 3 мм остаточные напряжения и деформации для основных способов охлаждения вычисляются по известным зависимостям [5] через усадочную силу, определяемую по номограмме (рисунок) при разной степени сжатия размеров активной зоны. Однако до настоящего времени предельные размеры активной зоны относительно конкретных типов сварных соединений при сварке с охлаждением не определялись. Данная статья восполняет этот пробел.

В общем случае можно считать, что остаточные напряжения внутри активной зоны равны пределу текучести, тогда усадочную силу можно определить

Таблица 1. Площади поперечного сечения сварных швов

Тип соединения							
стыковое		угловое		тавровое		нахлесточное	
Обозначение	Площадь, мм ²	Обозначение	Площадь, мм ²	Обозначение	Площадь, мм ²	Обозначение	Площадь, мм ²
C1	13,3	У1	8,3	T1	7,8	H1	7,8
C2	11,4	У2	14,0	T3	2×7,8	H2	2×7,8
C4	20,5	У4	12,1	T6	7,5		
C5	13,6	У5	6,0+4,0	T7	7,5+4,0		
C7	2×9,0	У6	8,8				
C8	8,3	У9	8,6				
C9	12,2	У10	8,4+4,0				
C10	8,8						
C12	8,8+4,0						

Таблица 2. Максимальная и минимальная площадь поперечного сечения активной зоны для различных типов соединений

Тип соединения	F_{\max} , мм ²	F_{\min} , мм ²	$K_{\text{сн. max}}$, %	Тип соединения	F_{\max} , мм ²	F_{\min} , мм ²	$K_{\text{сн. max}}$, %
<i>Стыковые соединения</i>				<i>Угловые соединения</i>			
C1	51,1	13,3	74	У1	48,9	8,3	83
C2	53,1	11,4	79	У2	40,8	14,0	66
C4	57,7	20,5	64	У4	53,5	12,1	77
C5	51,5	13,6	74	У5	52,4	10,0	81
C7	64,3	18,0	72	У6	51,8	8,8	83
C8	51,6	8,3	84	У9	51,7	8,6	83
C9	53,5	12,2	77	У10	53,6	12,4	77
C10	49,2	8,8	82	<i>Тавровые соединения</i>			
C12	53,8	12,8	76	T1	62,7	7,8	88
C19	49,6	9,6	80	T3	76,7	15,6	80
C28	46,7	15,0	68	T6	62,4	7,5	88
<i>Нахлесточные соединения</i>				T7	66,4	11,5	83
H1	62,7	7,8	88				
H2	76,7	15,6	80				

по площади поперечного сечения образца, находящейся внутри активной зоны. Данная площадь состоит из двух частей: занимаемая сварным швом и ЗТВ, в которой напряжения равны пределу текучести. Первую можно считать постоянной, так как геометрические размеры сварного шва определяются ДСТУ, а площадь околшовной зоны, в которой напряжения равны пределу текучести, зависит от распространения тепла в основной металл и условий закрепления. Интересно выяснить, на какое максимальное значение можно снизить размеры активной зоны независимо от способа охлаждения. Для низкоуглеродистых сталей при наплавке валика на кромку ширина активной зоны определяется шириной изотермы, соответствующей 300 °С, а для наплавки на лист — 200 °С.

При использовании сварки с охлаждением ширина активной зоны уменьшается. Рассмотрим предельные случаи, когда ширина активной зоны максимальна (сварка без охлаждения) и минимальна (теплоотвод полностью блокирует распространение тепла в основной металл, и активная зона существует только в сварном шве). Остальные случаи являются промежуточными.

В качестве основного способа сварки для получения сварных соединений из тонких листов низкоуглеродистой и низколегированной стали можно выбрать дуговую сварку плавящимся электродом в СО₂. Для сравнения проанализируем предельные размеры активной зоны сварных соединений из стали Ст3 толщиной 3 мм (при этом можно проанализировать наибольший диапазон типовых сварных соединений).

Определим максимальную полуширину изотермы, соответствующей 300 и 200 °С, для случая полного проплавления исследуемых соединений, применяя математическую модель для определения температурного поля [8]. Затем вычислим площадь поперечного сечения сварного шва, используя в качестве исходных данных его средние геометрические параметры для каждого типа сварного соединения (табл. 1). Сварные соединения типа С7, С12, У5, У10, Т3, Т7, Н2 имеют два шва. Для соединений типа Т3 и Н2 совместное влияние этих двух швов рассматриваем как влияние одного шва с коэффициентом 1,15, а для С7 расчет ведем по

одному шву [9]. Для швов с подварочным валиком площадь основного шва больше, чем у подварочного, приблизительно в два раза. Погонная энергия для основного шва (выполняется вторым) тоже намного больше погонной энергии для подварочного шва. Следовательно, будет превалировать активная зона основного шва [9], поэтому расчет для соединений типа С12, У5, У10 и Т7 ведем по нему.

Для большинства стыковых и угловых соединений, выполненных наплавкой на кромки, получаем максимальную и минимальную площадь поперечного сечения активной зоны $F_{\max} = (L_{\text{изот}} - b_{\text{ш}})\delta + F_{\text{ш}}$, $F_{\min} = F_{\text{ш}}$, где $L_{\text{изот}}$ — максимальная ширина изотермы, соответствующей 300 °С, мм; $b_{\text{ш}}$ — ширина шва, мм; δ — толщина свариваемого металла, мм; $F_{\text{ш}}$ — площадь сварного шва, мм. Для тавровых и нахлесточных соединений нижнего листа используется наплавка на лист, а верхнего — на кромку. Мощность источника нагрева при соединении кромок равной толщины распределена равномерно: в вертикальный лист (верхний для нахлесточного соединения) поступает 1/3, а в нижний — 2/3 его мощности. При температуре 200 °С максимальная полуширина изотермы составляет 15,3 мм, а при 300 °С — 12,5 мм.

Для соединений типа С5, С10, С19 и С28, выполняемых на подкладке или имеющих сложную геометрию, расчет площади поперечного сечения зоны, нагретой свыше 300 °С, сложнее, так как тепло вводится в подкладку или неравномерно в одну из кромок. Максимальная полуширина изотермы зависит от типа соединения.

Максимальную степень снижения площади поперечного сечения активной зоны определяли коэффициентом $K_{\text{сн. max}} = 100 - 100F_{\min}/F_{\max}$, %. Результаты выполненных расчетов представлены в табл. 2.

Проведенные эксперименты подтвердили тот факт, что при сварке с охлаждением размеры активной зоны могут быть уменьшены на 70 % и более. Таким образом, можно утверждать, что значения $K_{\text{сн. max}}$ будут различны для разных типов сварных соединений. При этом усадочная сила и уровень остаточных напряжений прямо пропорциональны размерам площади поперечного сечения активной зоны.

Прямая зависимость от размеров активной зоны остаточных деформаций, зависящих от остаточных напряжений, сохраняется только при значениях сжимающих напряжений, меньших некоторого критического значения, при котором наступает потеря устойчивости, и зависящих от конструкции сварного узла [5]. При потере устойчивости деформации многократно возрастают.

Выводы

1. Площадь поперечного сечения активной зоны для стандартных швов, выполненных на оптимальных режимах, может изменяться от максимального до минимального значения.

2. Степень снижения площади поперечного сечения активной зоны зависит от типа сварного соединения: она максимальна (88 %) для соединений типа Т1, Т6, Н1 и минимальна (64 %) для стыкового соединения С4.

3. Снижение остаточных деформаций при остаточных сжимающих напряжениях ниже критических значений прямо пропорционально снижению

площади поперечного сечения активной зоны при сварке.

1. *Лобанов Л. М.* Технологические средства уменьшения деформаций и напряжений. — Киев: О-во «Знание», 1983. — 14 с.
2. *Регулирование* термдеформационных циклов при сварке листовых конструкций с применением теплопоглотителей // *Л. М. Лобанов, В. И. Павловский, В. П. Логинов, Н. А. Пащин* // Автомат. сварка. — 1990. — № 9. — С. 30–42.
3. *Wells M. E., Lulens W. E.* Effect of forced gas cooling on GTA weld pools // *Welding J.* — 1986. — **65**, № 12. — P. 314–321.
4. *Гедрович А. И.* Пластическая деформация при сварке. — Луганск: Изд-во Восточноукр. гос. ун-та, 1998. — 237 с.
5. *Гедрович А. И., Жидков А. Б.* Особенности деформирования тонколистовых конструкций при сварке с охлаждением. — Луганск: Изд-во Восточноукр. гос. ун-та, 2000. — 16 с.
6. *Касаткин Б. С., Прохоренко В. М., Чертов И. М.* Напряжения и деформации при сварке. — Киев: Выща шк., 1987. — 246 с.
7. *Гедрович А. И., Жидков А. Б.* Влияние различных способов теплоотвода на активную зону при сварке // Автомат. сварка. — 2000. — № 3. — С. 38–41.
8. *Жидков А. Б.* Математическое моделирование температурного поля при сварке с принудительным охлаждением // *Вісн. Східноукр. держ. ун-ту.* — 1999. — № 1. — С. 69–75.
9. *Николаев Г. А., Прохоров Н. Н.* Напряжения в процессе сварки. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1978. — 88 с.

Approach is described for determination of sizes of active zone and residual deformations and also their maximum possible reduction in welding with cooling of different types of welded joints.

Поступила в редакцию 17.05.2001