

## ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ СТАЛЕЙ К ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ

В.П. Петров, И.В. Петров, О.В. Карнаухов, Д.А. Нагорный

Сварка, как и большинство технологических процессов, может сопровождаться образованием дефектов в сварных соединениях. Наиболее опасными дефектами сварных соединений являются трещины, наличие которых чаще всего является недопустимым. Статистика говорит о том, что от общего числа дефектов в сварных соединениях на долю трещин приходится более 50 %. Среди различного рода трещин особое место занимают холодные трещины, образующиеся в большинстве случаев при сварке закаливаемых легированных сталей.

Проблема холодных трещин в полной мере не решена до сих пор. Напротив, в связи с расширяющимся применением для изготовления сварных конструкций сталей повышенной и высокой прочности, различных композиционных материалов, она в некоторых случаях даже обостряется. Далеко не всегда понятно, как будут вести себя та или иная сталь, сплав в условиях сварочного термомеханического цикла. В этой связи предварительная оценка поведения их, сводящаяся часто к оценке вероятности образования холодных трещин при сварке, имеет практическую, производственную значимость.

Применяемые в настоящее время методы оценки склонности материалов к образованию холодных трещин при сварке по характеру показателей можно разделить на количественные и качественные, по характеру оценки – на прямые и косвенные.

Критерии качественной оценки не имеют численного значения и лишь позволяют сделать вывод о склонности или несклонности металла к образованию трещин. Количественные критерии имеют численное значение, оценивающее влияние одного их факторов, определяющих образование холодных трещин.

Прямые методы оценки предусматривают сварку технологических проб, специализированные испытания сварных соединений или материалов в условиях, имитирующих реальные. Косвенные методы сводятся либо к использованию параметрических уравнений, либо к анализу процессов, обуславливающих образование трещин.

Методы, использующие параметрические уравнения, чаще всего сводятся к определению так называемого углеродного эквивалента. Известно, что основным элементом,

повышающим закаливаемость и прокаливаемость сталей, является углерод. Ориентировочно влияние других элементов, в частности, легирующих, снижающих критическую скорость охлаждения сталей и способствующих тем самым повышению закаливаемости их, может быть оценено пересчетом процентного содержания их в стали в количество как бы эквивалентно действующего заменяющего их углерода.

В связи с постоянно расширяющимся применением для изготовления сварных конструкций высокопрочных сталей для исследований была взята группа сталей, близких по содержанию в них углерода, но отличающихся величиной углеродного эквивалента, и наоборот – имеющих близкие значения углеродного эквивалента, но содержащих разное количество углерода (таблица 1).

Величину углеродного эквивалента подсчитывали по наиболее распространенной на практике формуле:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2}, \%$$

Выбранные марки сталей позволяют проследить влияние содержания углерода в стали и величины углеродного эквивалента на структуру и свойства их, оценить роль каждого из этих факторов в структурообразовании и формировании свойств.

Для более объективной оценки роли их для исследований параллельно была взята группа углеродистых сталей, отличающихся в основном содержанием в них углерода (см. таблицу 1).

Для рекомендуемых в справочной литературе режимов ручной дуговой, автоматической под флюсом сварки и сварки в среде углекислого газа была рассчитана скорость охлаждения металла околошовной зоны при температуре наименьшей устойчивости аустенита, которую приняли равной 550 °С. Ориентируясь на расчетные скорости охлаждения, на установке ИМАШ-9-66 на плоских образцах типа ИМЕТ с шейкой сечением 2×1 мм (для локализации зоны нагрева и разрушения) имитировали термические циклы, характерные для околошовной зоны. Широкий диапазон скоростей охлаждения обеспечивали путем обдува шейки образца гелием (большие скорости) и подогрева образца малым током (малые скорости охлаждения).

# ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ СТАЛЕЙ К ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ

Таблица 1

Марка стали	Содержание углерода, %	Величина $C_{экв}$ , %
10ГН2МФА	0,10	0,64
15Х2НМФА	0,16	0,80
18Х2Н4ВА	0,17	0,83
2Х13	0,19	2,89
30ХГС	0,33	0,69
36ХН1МФ	0,38	0,92
38ХН3МФА	0,36	1,03
40ХСМФ	0,45	1,26
40Х	0,39	0,71
5ХНВ	0,51	0,87
M16C	0,17	0,26
Ст35	0,33	0,45
Ст45	0,51	0,62
65Г	0,65	0,88
У8	0,80	0,85

После термического цикла образцы испытывали на растяжение на этой же установке, определяя предел прочности и относительное удлинение. Сопоставление результатов испытаний для разных сталей имело смысл и выполнялось по образцам, охлажденным со скоростью, превышающей критическую для данной стали, т.е. в условиях сквозной прокаливаемости.

Анализ зависимостей механических свойств закаленных сталей от содержания углерода и величины углеродного эквивалента показывает, что от содержания углерода зависимость носит закономерный характер: до определенного уровня содержания углерода (примерно 0,37 %) прочность растет, а при дальнейшем увеличении снижается. Пластичность (относительное удлинение) при этом непрерывно снижается. Величина же углеродного эквивалента закономерного влияния на изменение механических свойств не показала. Стали, незначительно (примерно на 0,03 %) отличающиеся величиной углеродного эквивалента, но имеющие в своем составе различное количество углерода, существенно отличаются между собой по механическим свойствам. Более того, стали с меньшей величиной углеродного эквивалента могут обладать более высокой прочностью и меньшей пластичностью.

Следует отметить, что описанное положение относится к легированным сталям. Простые же углеродистые стали, величина углеродного эквивалента которых определяется в основном содержанием в них углерода, имеют принципиально одинаковый характер изменения механических свойств в зави-

симости и от содержания в них углерода, и от величины углеродного эквивалента.

Лишь наличие в стали 65Г несколько повышенного количества марганца, меняющее эту сталь в ряду эквивалентов со сталью У8, дает незначительное отклонение в характере кривых изменения механических свойств в зависимости от углеродного эквивалента в сравнении с одноименными кривыми в зависимости от содержания углерода в стали. Результаты проведенных исследований говорят о том, что даже предварительная оценка склонности низко- и среднелегированных сталей к образованию холодных трещин, одной из причин образования которых является низкая пластичность металла, по величине углеродного эквивалента является весьма условной и должна иметь серьезное обоснование. Основным же, определяющим такую склонность этих сталей фактором, является содержание углерода в стали, приводящее к образованию различных по морфологии и механическим свойствам типов закалочных структур.

Выводы:

1. Зависимость механических свойств закаленных низко- и среднелегированных сталей в условиях сквозной прокаливаемости независимо от степени легирования определяется содержанием в них углерода.

2. Оценка склонности низко- и среднелегированных сталей к образованию холодных трещин при сварке по величине углеродного эквивалента не дает однозначных результатов и требует тщательного подбора формулы для расчета его.