

УДК 620.178

Д.Д.Тонков (5 курс, каф. СиЛТ), Б.С.Ермаков, д.т.н., проф.

## РАЗВИТИЕ ЗЕРНОГРАНИЧНЫХ СЕГРЕГАЦИЙ ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В сварных швах различают следующие виды химической неоднородности: внутрикристаллитную, межкристаллитную, неоднородность в зоне сплавления, зернограничную и внутризеренную. Зернограничная химическая неоднородность типична для деформированного и рекристаллизованного металла, главным образом металла околшовной зоны. Рекристаллизационные процессы, происходящие при сварке в околшовной зоне, как правило, сопровождаются перераспределением примесей, что иногда приводит к развитию химической неоднородности, особенно на границе с жидким металлом, в зоне полуплавленных зерен. Процессы, связанные с перераспределением примесей в твердом состоянии называют сегрегационными, а образующиеся места скопления примесей - сегрегациями.

Концентрация примесных элементов по границам зерен всегда выше, чем в самом зерне. Объясняется это тем, что границы представляют собой области с сильно искаженной кристаллической решеткой, и атомы примеси, располагающиеся по ним, вносят в систему существенно меньшие искажения, чем это было бы при растворении их в кристаллической решетке. Это в равной степени относится к примесям как внедрения (углерод, бор, азот), так и замещения (фосфор, сера, кремний).

Элементы, находящиеся в твердом растворе в виде примесей внедрения, имеют меньшую энергию активации и поэтому диффундируют более активно. Кроме того, интенсивность процесса будет зависеть от толщины прослоек, а следовательно, больше поверхность диффузии. Одновременно с процессом рассасывания обогащенных примесями границ зерен начинается и их объединение, т.е. процесс слияния зерен в более крупные.

Максимальная температура нагрева у зоны сплавления достигает температуры плавления. В околшовной зоне, удаленной от зоны сплавления настолько, что оплавление не происходит, продолжается диффузия примесей от границы в тело зерна вплоть до достижения равновесного соотношения.

В случае если температура нагрева до достижения равновесной концентрации будет ниже, чем температура закалки исходного сплава, концентрация примесей на границах зерен будет повышаться. При дальнейшем нагреве, вплоть до температуры начала роста зерна, ( $\dot{O}_{i,\delta}$ ) происходит рассасывание примеси. При достижении  $\dot{O}_{i,\delta}$  и дальнейшем ее повышении, одновременно с процессом диффузии примеси в глубь зерна, происходит интенсивный рост самих зерен вследствие перемещения (миграции) старых границ и образования новых.

В процессе роста зерна, мигрирующие границы захватывают примесные атомы, увеличивая их концентрацию на периферии зерен (сегрегация примесей). Степень сегрегации зависит от граничной концентрации, температуры, физической природы примеси и других факторов. В случае если концентрация примесей на границе зерна превышает пределы растворимости, возможно образования в пограничной зоне легкоплавких эвтектических фаз или даже химических соединений.

Примером разрушения сварных соединений по границам зерен обогащенных сегрегациями примесных элементов являются трещины повторных нагревов. Такие трещины, развивающиеся по зонам перегрева (ЗТВ), характерны для оборудования,

изготовленного из легированных жаропрочных сталей, эксплуатируемых при температурах 500 – 700°C. Возникновение этих трещин связывают с локальными пластическими деформациями ползучести, протекающими при релаксации сварочных напряжений. Предполагается, что эффект трещинообразования усиливается при образовании сегрегаций примесных элементов в границах аустенитных зерен, в зоне перегрева (ЗТВ) сварного соединения.

Для проверки этой гипотезы были изготовлены заготовки из стали 38ХЗНЗМ2ФА, на которых были имитированы тепловые и деформационные процессы, протекающие в зоне перегрева (ЗТВ). С этой целью заготовки подвергались нагреву до 1000°C с последующим охлаждением на металлической плите, что имитировало зону перегрева и характерные для нее структуры. Затем одна группа заготовок отпускалась при 600°C в печи, а вторая, в разрывной машине, позволяющей деформировать заготовку со скоростью 1% в час при 600°C. Таким образом, в заготовке была задана деформация в 10%. Затем, из термически обработанных заготовок были вырезаны образцы, испытанных для определения влияния режима обработки на величину ударной вязкости. Изломы образцов после испытаний были изучены методами Оже – спектроскопии. Глубина анализируемого слоя 10 Å. Результаты испытаний приведены в табл. 1. Там же приведены данные результатов испытаний образцов стали 38ХЗНЗМ2ФА после стандартного режима ее термической обработки.

Таблица 1.

Режим	Вид излома	KCV, $\lambda \text{ Åe} /$	Химический состав поверхности разрушения							
			C	Si	Cr	N <sub>i</sub>	M <sub>o</sub>	V	P	S
Стандартный	В - В	2,7	0,39	0,41	3,92	2,62	0,93	0,32	0,06	0,04
Нагрев до 1000°C + отпуск 600°C	В – X-V	1,4	0,46	0,62	4,03	1,97	2,12	0,19	0,19	0,07
Нагрев до 1000°C + деф. 10%	М – X	0,15	3,17	2,14	6,17	2,11	6,16	2,11	2,12	0,23

Примечание: В – В – внутризеренный вязкий; В – X-V – внутризеренный хрупко-вязкий; М – X – межзеренный хрупкий.

Таким образом, установлено, что при релаксации сварочных напряжений, приводящих к пластической деформации ЗТВ, изменяется механизм разрушения стали. Это связано с интенсификацией карбидообразования в границах зерен (резкое повышение концентрации карбидообразующих элементов в границах зерен). Такой процесс приводит к обезлигированию и разупрочнению границ зерен, когезия которых уже снижена сегрегацией примесных элементов. Так, концентрация фосфора в слое толщиной 10Å границы зерна выросла с 0,022% (среднее содержание фосфора в стали) до 2,12%. Обогащение фосфором разупрочненных и обезлигированных границ приводит к частичной замене сильных металлических связей на ковалентные – вместо связей Me=Me возникают связи Me=P, P=P, при этом энергия взаимодействия атомов в границах зерен снижается примерно на два порядка.