



УДК 621.791.75

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ $\sigma$ -ФАЗЫ В ЗТВ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДУПЛЕКСНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **С. С. КОЗЛИТИНА**, **Л. И. ДЗЮБАК**, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен численный алгоритм расчета содержания  $\sigma$ -фазы в металле зоны термического влияния многопроходных стыковых соединений дуплексной стали DSS 2205. Используются экспериментальные температурно-временные диаграммы образования  $\sigma$ -фазы в изотермических условиях при разной температуре в сочетании с термическими циклами точек ЗТВ соединений.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, дуплексные стали, стыковые соединения, зона термического влияния,  $\sigma$ -фаза, температурно-временная диаграмма

В последние десятилетия хромоникелевые дуплексные стали находят все более широкое применение в технике благодаря своим свойствам, обусловленным исходной структурой (50 мас. % феррита и 50 мас. % аустенита). В связи с высокой стойкостью к межкристаллитной питтинговой коррозии в агрессивной среде в сочетании с хорошей свариваемостью и сравнительно высоким сопротивлением разрушению, а также умеренной стоимостью этот класс нержавеющей сталей широко используют для создания ответственных конструкций различного назначения.

Однако наряду с приобретением указанных достоинств эти стали частично наследовали и недостатки нержавеющей сталей как аустенитного, так и ферритного классов. Наиболее существенным недостатком при исходном содержании феррита в структуре 50 мас. % является их чувствительность к температурному воздействию, когда происходит распад феррита с образованием  $\sigma$ -фазы, которая резко снижает механические свойства стали. Эта проблема достаточно хорошо изучена с позиций эксплуатационного нагружения конструкций из таких сталей. Построены соответствующие температурно-временные диаграммы (ТВД), позволяющие в изотермических условиях эксплуатации оценить вероятность появления интерметаллидных образований типа  $\sigma$ -фазы. Применительно к сварочному нагреву имеется ряд работ ([1] и др.), где этот вопрос исследуют экспериментально на образцах, вырезанных из металла зоны термического влияния (ЗТВ), что позволило сформулировать определенные ограничения на тепловложения при сварке [2]. Тем не менее в настоящее время отсутствует расчетная методика прогнози-

рования (с определенной достоверностью) степени влияния конкретных режимов и условий сварки на содержание  $\sigma$ -фазы в ЗТВ, что ограничивает эффективность прогнозных оценок при выборе технологических режимов и условий сварки конкретных узлов.

В настоящей работе сделана попытка разработать методику на основе расчетных термических циклов в конкретных точках ЗТВ и экспериментальных данных ТВД, построенной для конкретной стали. Идея такого подхода в определенной степени апробирована при прогнозировании степени сенсibilизации металла ЗТВ хромоникелевых сталей с повышенным содержанием углерода при образовании межкристаллитных коррозионных трещин.

В качестве объекта для разработки методики были выбраны образцы стыкового сварного соединения труб сечением 271×20 мм из дуплексной стали DSS 2205 следующего химического состава [3], мас. %: 22,43 Cr; 1,88 Ni; 3,13 Mo; 0,14 Mn; 0,07 Si; 0,18 N; 0,023 C. Указанный состав стали обеспечивает высокое сопротивление питтинговой коррозии в хлоридных растворах. Соответствующий эквивалент  $PRE = Cr + 3,3 \text{ мас. \% Mo} + 16 \text{ мас. \% N} = 35,64$ , что весьма близко к предельному значению  $PRE = 40$  [2]. Сталь DSS 2205 так же, как и другие дуплексные стали, в связи с высоким содержанием феррита (50 мас. %) чувствительна к нагреву свыше 475 °С, что проявляется в значительном охрупчивании. В дуплексных сталях при температуре более 538 °С происходит трансформация части феррита в  $\sigma$ -фазу, в которой сочетаются различные интерметаллиды, способствующие снижению пластичности сталей, а особенно при температурах ниже – 40 °С.

На рис. 1 на основании данных работы [2] представлено изменение положения границы ударной вязкости  $KCV = 27 \text{ Дж/см}^2$  стали DSS 2205 в зависимости от времени выдержки при различной

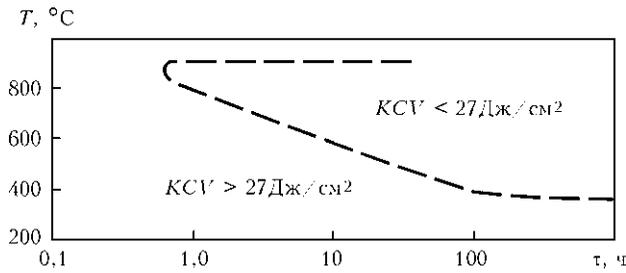


Рис. 1. Изменение положения границы ударной вязкости  $KCV = 27 \text{ Дж/см}^2$  стали DSS 2205 в зависимости от времени выдержки  $\tau$  при различной температуре

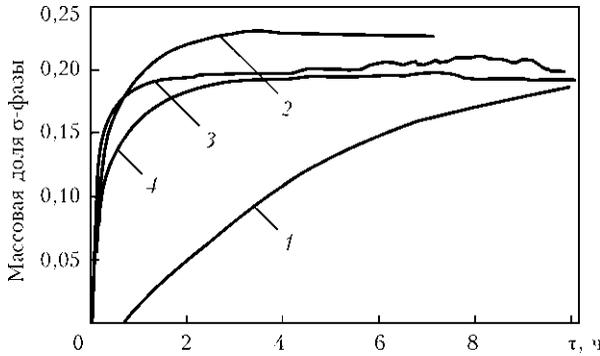


Рис. 2. Кинетика изменения содержания  $\sigma$ -фазы при изотермической выдержке образцов из стали DSS 2205 при температуре  $T = 700$  (1),  $750$  (2),  $800$  (3) и  $850$  °C (4) по результатам экспериментальных измерений

температуре. При наложении этих данных на экспериментальные данные [3] об изменении содержания  $\sigma$ -фазы в стали DSS 2205 (рис. 2, 3) видно, что снижение значения  $KCV$  происходит при содержании  $\sigma$ -фазы 15...18 мас. %.

На основании данных рис. 2, 3, полученных для конкретных термических циклов ЗТВ  $T(\tau)$ , можно рассчитать  $V$   $\sigma$ -фазы, мас. %:

$$V = \sum_j \int_{T_H}^{T_K} \frac{(V_j - V_{j-1}) V_j^{\max}(T)}{\tau_j(T) - \tau_{j-1}(T)} dt'(T),$$

где  $j = 1, \dots, 7$  — номер С-образных кривых (рис. 3);  $V_j = 1, 10, 25, 50, 75, 90, 99$  мас. % — «цена» этой кривой от максимального значения  $V^{\max}(T)$  при  $T_H > T > T_K$  (здесь  $T_H, T_K$  — температура соответственно начала и конца прослеживания термического цикла  $T(t')$ );  $t'$  — текущее время.

При выборе режимов многопроходной дуговой сварки плавлением использовали рекомендацию работы [2] относительно подводимой погонной электрической энергии

$$H = 60 \frac{IU}{v},$$

где  $I$  — сварочный ток;  $U$  — напряжение на дуге;  $v$  — скорость сварки. Согласно [2] значения  $H$  находятся в пределах  $512 <$

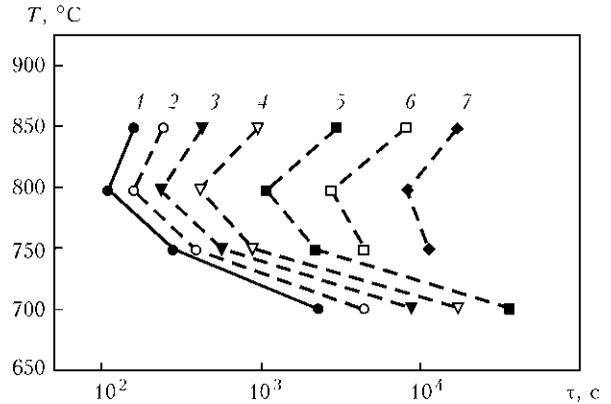


Рис. 3. С-образные кривые изменения содержания  $\sigma$ -фазы в зависимости от температуры  $T$  и времени выдержки  $\tau$ : 1 — 1; 2 — 10; 3 — 25; 4 — 50; 5 — 75; 6 — 90; 7 — 99 мас. %

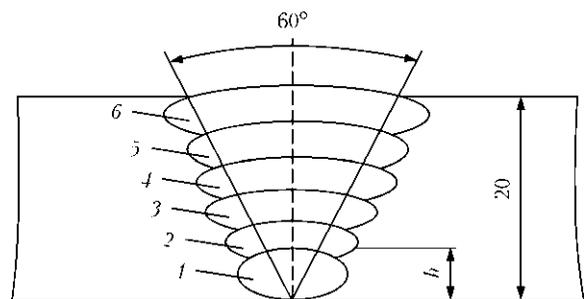


Рис. 4. Схема послойной сварки стыкового соединения многопроходной дуговой сваркой: 1–6 — количество проходов

$< H < 2520$  Дж/мм при условии применения перед каждым проходом предварительного подогрева ( $T_0 = 150$  °C).

Рассмотрим следующие варианты режимов сварки стыковых соединений за шесть проходов (рис. 4). Сечение каждого валика равно  $F = 25...35$  мм<sup>2</sup>. Толщина (высота) его  $h_i$  при угле разделки  $\alpha = 60^\circ$  изменяется в пределах  $7,0...1,8$  мм, а ширина  $a_i$  — в пределах  $7,0...20,0$  мм.

Результаты расчетов для указанных выше вариантов тепловложения приведены на рис. 5–7. Из полученных данных следует, что увеличение погонной энергии до  $q_n \leq 1700$  Дж/мм при  $T_0 = 20$  °C оказывает незначительное влияние на содержание  $\sigma$ -фазы при сварке рассматриваемого соединения. Однако при более высоком тепловложении ( $q_n > 3000$  Дж/мм) содержание  $\sigma$ -фазы металла ЗТВ приближается к уровню, при кото-

Результаты расчета содержания  $\sigma$ -фазы

№ варианта режима сварки	Способ сварки	$H$ , Дж/мм	$\eta_n$	$q_n$ , Дж/мм	$T_0$ , °C	$V^{\max}$ , мас. %
1	МИГ	2270	0,75	1700	20	1,0...1,2
2		2270	0,75	1700	150	2,0...2,4
3	ТИГ	5000	0,60	3000	20	3,5...4,0
4		5000	0,60	3000	150	5,6...6,4

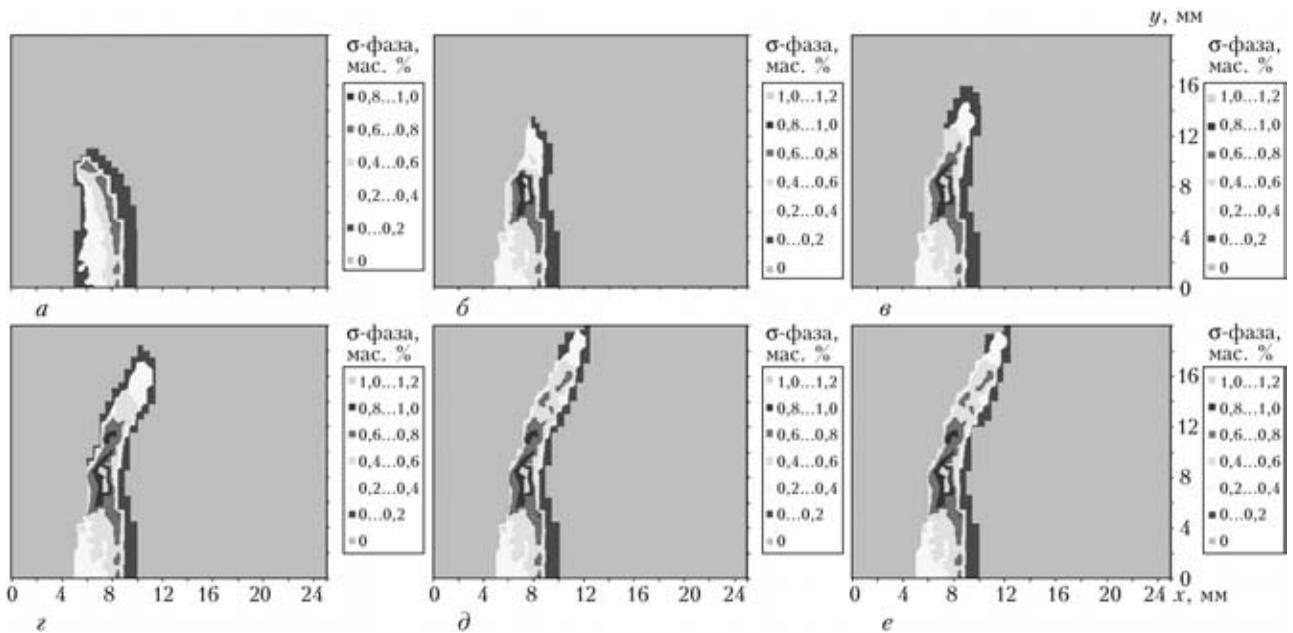


Рис. 5. Накопление  $\sigma$ -фазы в металле ЗТВ стыкового шва трубы Ду 270×20 мм, выполненного дуговой сваркой при  $q_{II} = 1700$  Дж/мм и  $T_0 = 20$  °С: а–е — соответственно после 1–6-го проходов

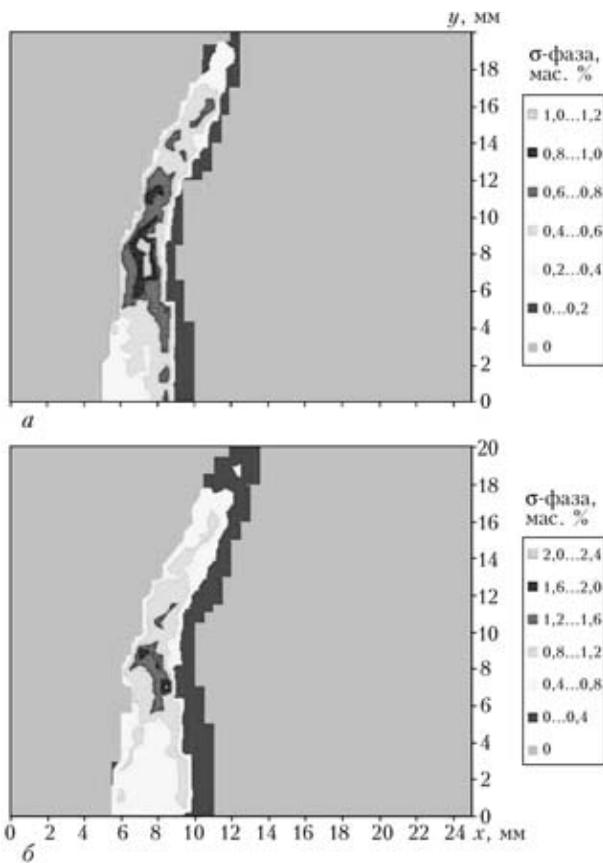


Рис. 6. Распределение  $\sigma$ -фазы в металле ЗТВ и стыкового шва трубы Ду 270×20 мм из стали DSS 2205, выполненного шестипроходной дуговой сваркой МИГ (после 6-го прохода) при  $q_{II} = 1700$  Дж/мм: а —  $T_0 = 20$ ; б — 150 °С

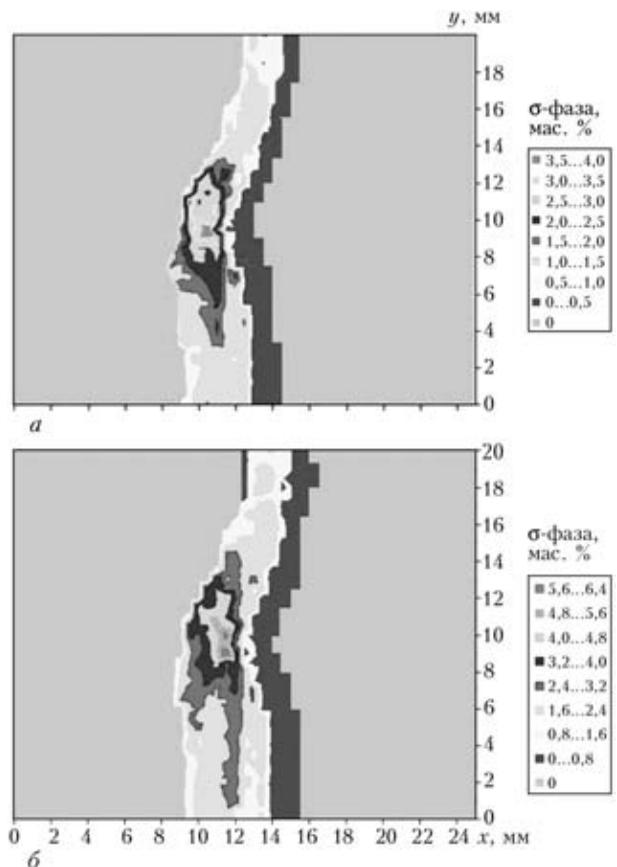


Рис. 7. Распределение  $\sigma$ -фазы в металле ЗТВ и стыкового шва трубы Ду 270×20 мм из стали DSS 2205, выполненного шестипроходной дуговой сваркой ТИГ (после 6-го прохода) при  $q_{II} = 3000$  Дж/мм: а, б — см. рис. 6

ром, согласно рис. 1–3, значение ударной вязкости снижается до 27 Дж/см<sup>2</sup>, что почти на порядок ниже таковой при отсутствии  $\sigma$ -фазы в металле ЗТВ стыкового соединения указанной стали. При-

веденные данные свидетельствуют о влиянии предварительного подогрева (температуры между двумя смежными проходами) на интенсивность образования  $\sigma$ -фазы в металле ЗТВ, от которой



зависит сохранение пластичности соединения при последующих технологических обработках либо эксплуатации. Отсюда следует, что ремонт сварных соединений дуплексных сталей, при котором в металле ЗТВ происходит накопление  $\sigma$ -фазы, требует осторожности и соответствующих прогнозных оценок. Получаемые на основе предлагаемой методики оценки (таблица) достаточно хорошо согласуются с рекомендациями работы [2] относительно ограничений тепловложений при сварке сталей рассматриваемого класса.

#### Выводы

1. Образование  $\sigma$ -фазы способствует резкому снижению пластичности дуплексных сталей при термическом воздействии, в том числе и при сварке,

и тем самым ограничивает использование этих материалов в современных конструкциях.

2. С помощью стандартных ТВД возможно достаточно эффективно прогнозировать содержание  $\sigma$ -фазы в металле ЗТВ при сварочном термическом цикле многопроходной сварки дуплексных сталей.

1. Palmer T. A., Elmer J. W., Wong J. In-site observations of ferrite-austenite transformations in duplex stainless steel weldments using synchrotron radiation // Sci. and Techn. of Welding and Joining. — 2002. — 7, № 3. — P. 159–171.
2. Welding Handbook. Vol. 4: Materials and Applications, pt 2. — Miami: AWS, 1998. — 621 p.
3. Elmer J. W., Palmer T. A., Specht E. D. Synchrotron based observations of sigma phase formation and dissolution in duplex stainless steel // Mathematical modeling of weld phenomena / Ed. H. Cerjak. — London: Manet publ., 2002. — P. 297–314.

Numerical algorithm is suggested for calculation of content of the  $\sigma$ -phase in HAZ metal of the multi-pass butt welded joints on duplex steel DSS 2205. Experimental temperature-time diagrams of formation of the  $\sigma$ -phase under isothermal conditions at different temperatures are used in combination with thermal cycles at points in HAZ of the welded joints.

Поступила в редакцию 04.11.2010

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА: СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ»

К 100-летию со дня рождения заслуженного деятеля  
науки и техники Украины,  
доктора технических наук Г. З. ВОЛОШКЕВИЧА

октябрь 2010

г. Киев ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

#### Тематика конференции:

- Технологические особенности электрошлаковой сварки
- Современное оборудование для ЭШС
- Применение электрошлаковой сварки и наплавки при изготовлении и ремонте промышленных изделий

#### Организаторы конференции:

- Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
- Общество сварщиков Украины при поддержке ЗАО «НКМЗ», ОАО «Азовмаш», ОАО «Сумское МПО им. Фрунзе»

Контакты: тел./факс: 044-205-22-29, 044-200-24-96  
e-mail: tzu@e-mail.ua