

Р и с. 3

Зарождение микротрещин и разрушение сплава начинается на цилиндрической поверхности в зоне сварного соединения со сталью. Согласно расчету, именно здесь происходит концентрация осевых растягивающих напряжений. Дальнейшему развитию разрушения способствуют также касательные напряжения, сосредоточенные у цилиндрической поверхности образца. Радиальные и окружные напряжения, будучи сжимающими в зоне соединения, не могут быть причиной разрушения твердого сплава, поскольку его прочность при сжатии несравненно выше, чем при растяжении. По этой же причине интенсивность напряжений, лишенная информации об их характере, не может служить критерием прочности твердого сплава. Расчеты и эксперименты убеждают, что таким критерием является осевое растягивающее напряжение на цилиндрической поверхности в зоне сварного соединения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключко Н. А. Основы технологии пайки и термообработки твердосплавного инструмента.— М.: Металлургия, 1981.
2. Белейчева Т. Г., Зилинг К. К. Термоупругая осесимметричная задача для двухслойного цилиндра // ПМТФ.— 1978.— № 1.
3. Цыбенко А. С., Майстренко А. Л., Кулаковский В. Н. и др. Анализ технологических напряжений в двухслойных дисках SiC—Si // Пробл. прочности.— 1982.— № 11.
4. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов.— М.: Мир, 1987.

г. Красноярск

Поступила 16/XII 1991 г.

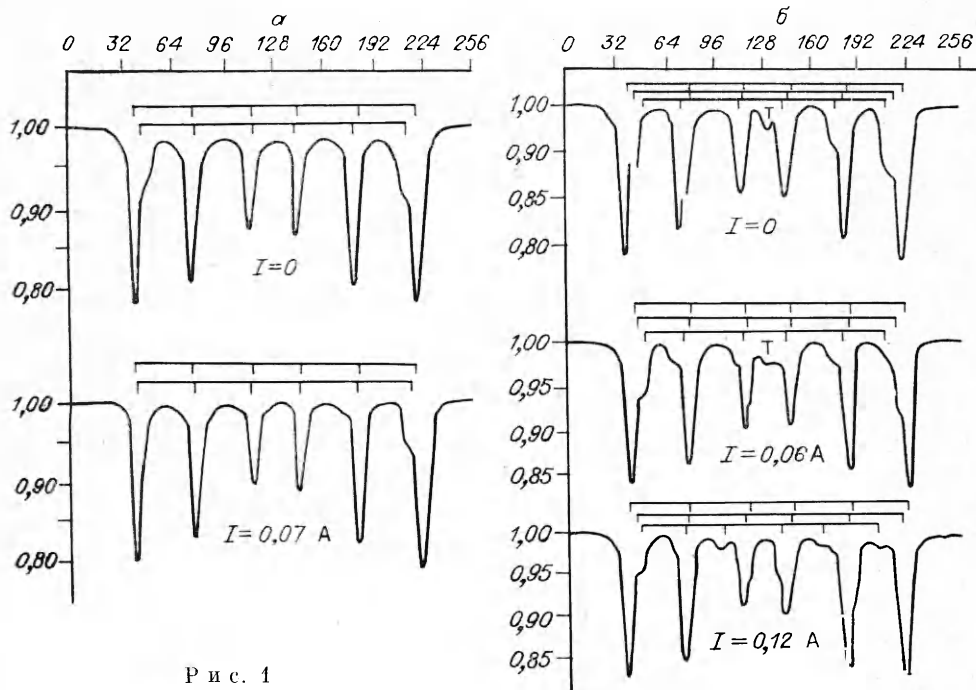
УДК 539.2 : 539.172.3 : 621.78

Я. С. Семенов, М. Н. Сивцев, А. А. Аргунова

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕНОСА НА ХЛАДОСТОЙКОСТЬ ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ

Известно, что электроперенос позволяет создавать атомные потоки и концентрационные сдвиги в сплавах и, таким образом, изучать подвижность и коэффициенты диффузии атомов [1, 2]. Электроперенос представляет интерес и с технологической точки зрения. Было доказано, что

© Я. С. Семенов, М. Н. Сивцев, А. А. Аргунова, 1993



Р и с. 1

электроперенос является ответственным за возникновение повреждений в металлических полосках интегральных схем. С другой стороны, электроперенос успешно использовался для очистки металлов от примесей внедрения [3]. Поэтому авторами [4] была разработана методика обработки сварочным электрическим током околошовной зоны (ОШЗ), в результате чего снижалась температура хладноломкости, но не была выявлена причина ее снижения.

В данной работе изучены микроструктура ОШЗ и с помощью мессбауэровской спектроскопии параметры электропереноса. В связи с этим разработана следующая методика мессбауэровских исследований электропереноса. Через образец-поглотитель пропускается постоянный электрический ток, который регулируется внешним переменным сопротивлением R . Электрический ток и подаваемое напряжение определяются по встроенным в блок питания приборам.

При больших значениях электрического тока, протекающего через образец, происходит его разогрев джоулевым теплом, которым нельзя пренебречь при определении параметров электропереноса. В этом случае поглотитель необходимо поместить в криостат, поддерживая постоянную температуру образца.

По вышеизложенной схеме исследовались параметры электропереноса сталей Ст. 3 и 14X2ГМР. Эти стали широко используются в народном хозяйстве северо-востока России и хорошо свариваются. Сталь Ст. 3 обычно применяется для испытаний свариваемости по ГОСТу. Поэтому они могут служить стандартным экспериментальным материалом.

Фольги для образцов готовились по общепринятой методике. Провода, подводящие электрический ток, приваривались к образцу. Мессбауэровские спектры были получены на спектрометре электродинамического типа с использованием γ -источника Co^{57} .

На рис. 1 приведены резонансные спектры сталей Ст. 3 и 14X2ГМР с различным током (ось абсцисс — номера каналов, ось ординат — относительные интенсивности, a — мессбауэровские спектры стали Ст. 3 в исходном состоянии и при прохождении электрического тока плотностью 70 мА/мм²). Резонансный спектр стали Ст. 3 в исходном состоянии состоит из суммы разделимых парциальных спектров феррита и мартенсита. При прохождении электрического тока резонансные линии сужаются и прак-

Таблица 1

Материал	I, A	$H_{эфф}, кЭ$	$(\delta_i - \delta_0), мм/с$	$\Delta\Gamma$
Ст. 3	0	333,36 321,09	-0,025	0,770
	0,07	335,25 325,86	-0,075	
14X2ГМР	0	333,36	0,075	0,706
		321,09	0,275	
		301,99		
	0,06	339,03	0,15	
		323,92	0,05	
		296,20	0,025	
0,12	342,81	0,05	1,412	
	326,75	0,075		
	311,34	0,025		

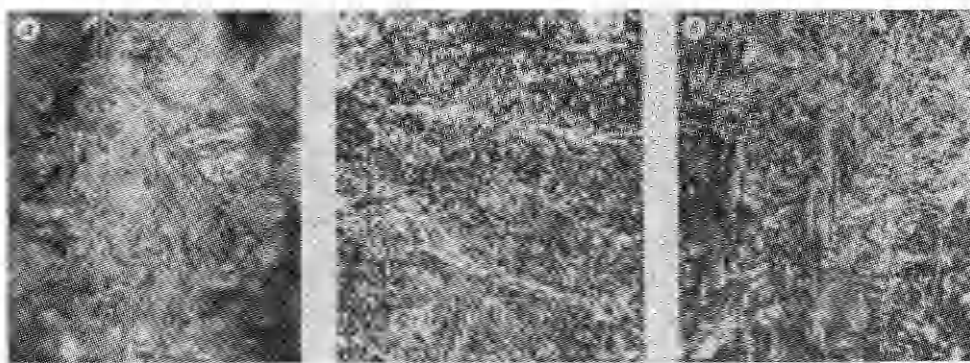
тически неразделим спектр мартенсита. Резонансные спектры стали 14X2ГМР приведены на рис. 1, б. Исходный резонансный спектр стали 14X2ГМР состоит из трех разделимых секстетов, соответствующих ферриту, мартенситу, хромсодержащей подсистеме и незначительному парамагнитному остаточному аустениту. При пропускании электрического тока по мере его увеличения резонансные линии сужаются, парамагнитная фаза исчезает.

Хорошо известно [5, 6], что сужение ширины резонансных линий спектра отвечает движению атомов в образце. На экспериментальных спектрах при пропускании электрического тока через образцы из сталей Ст. 3 и 14X2ГМР видим сужение ширины резонансных линий спектра, которое можно идентифицировать с электропереносом. Для определения коэффициентов электропереноса проводился расчет параметров экспериментальных спектров по методике [7] на ПЭВМ.

В табл. 1 представлены результаты расчетов эффективного магнитного поля, изомерного сдвига, изменения усредненной ширины резонансной линии. Полученные результаты показывают увеличение эффективного магнитного поля подсистем, положительный изомерный сдвиг относительно α -Fe и изменение ширины линии $\Delta\Gamma$. Как отмечено в [5], наиболее подвижными атомами могут быть атомы раствора внедрения, т. е. углерод. Электроперенос осуществляется непосредственным силовым полем $F = -eZ^* \text{grad } U$ и «электронным ветром», возникающим благодаря взаимодействию атома примеси с электронами проводимости. «Вымывание» такими силами атомов углерода из соответствующих подсистем ведет, как известно [8], к увеличению $H_{эфф}$, изменению изомерного сдвига и ширины γ -резонансной линии $\Delta\Gamma$.

Оценка коэффициентов диффузии атомов углерода из полученных параметров экспериментальных спектров по [6] дает следующие значения: для стали Ст. 3 $D = 8,3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ при $I = 0,07 \text{ А}$, для стали 14X2ГМР $D = 6,3 \cdot 10^{-5}$ и $1,52 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ при $I = 0,06$ и $0,12 \text{ А}$. Значит, диффузия атомов углерода, вызванная электропереносом, должна менять микроструктуру в зоне прохождения электрического тока при электродуговой сварке. По этой причине проведены анализ микроструктуры различных зон сварного соединения, а также фрактография поверхностей изломов ударных образцов Шарпи, полученных при различных температурах испытания. Металлографический анализ проведен на оптическом микроскопе «Neophot-21» при различных увеличениях ($\times 500$, $\times 1000$), а фрактографический — на сканирующем электронном микроскопе «Сомебах».

Микроструктура сварного шва стали 14X2ГМР имеет столбчатую направленность, о чем свидетельствует расположение доэвтектоидного феррита, который выделяется преимущественно по границам зерен в резуль-



Р и с. 2

тате распада аустенита. Бейнитная составляющая располагается между участками феррита (рис. 2, б).

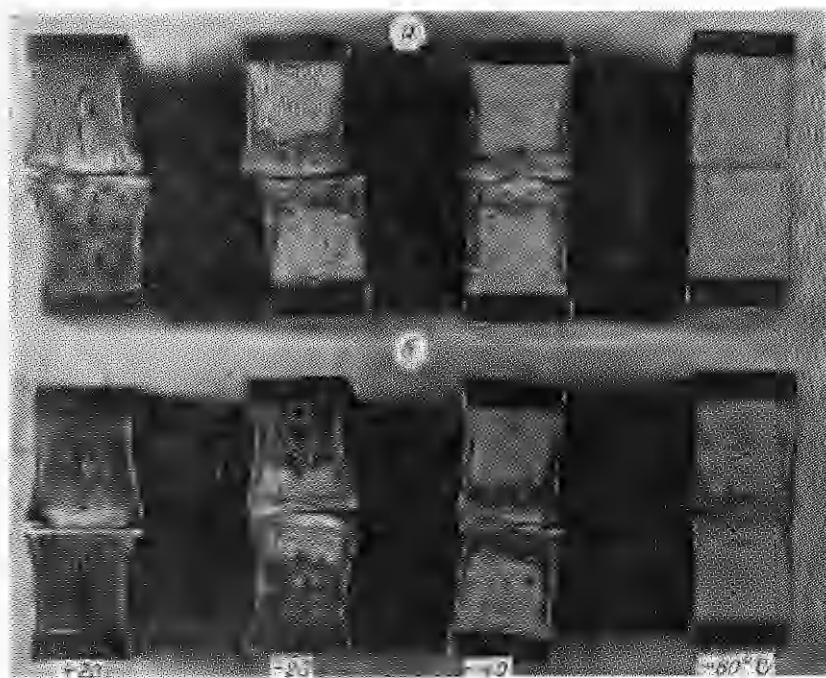
Температурная граница участка крупного зерна со стороны шва — температура плавления металла, со стороны основного металла — температура около 1200 °С. Высокая температура обуславливает рост аустенитного зерна и образование крупноигльчатой или крупнозернистой структуры в зависимости от химического состава металла, режима и способа сварки. Изучение микроструктур зоны термического влияния (ЗТВ) и зоны протекания электрического тока на одинаковом расстоянии от границ сплавления показало, что при одинаковой троостит-мартенситной структуре есть разница в размере бывшего аустенитного зерна (рис. 2, а, в).

Как показано, при протекании электрического тока значительно повышается коэффициент диффузии атомов углерода вдоль направления электрического поля. Диффундируя, атомы углерода осаждаются на субграницах зерен, что и измельчает зерно. Поэтому протекающий сварочный электрический ток значительно уменьшает размер зерна (рис. 2, в), согласно соотношению Холла — Петча повышая предел текучести, а при низких температурах снижая порог хладноломкости [9], что соответствует результатам [4].

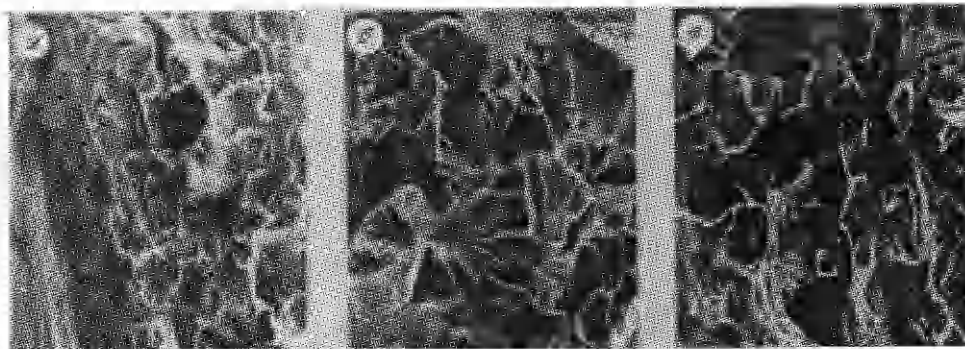
Измерения микротвердости по зонам сварного соединения проведены на микротвердомере ПМТ-3. Усредненные результаты измерений приведены в табл. 2, откуда видно, что основной металл в зоне прохождения электрического тока имеет меньшую микротвердость, это можно связать с углеродным обеднением троостит-мартенситной структуры, так как известно [10], что малолегированные стали с низким содержанием углерода имеют и меньшую микротвердость. Уменьшение микротвердости хорошо видно по макроструктуре изломов ударных образцов Шарпи (рис. 3, где а — изломы образцов без обработки электрическим током, б — с обработкой). Обычно макроструктура изломов не дает полной картины ха-

Т а б л и ц а 2

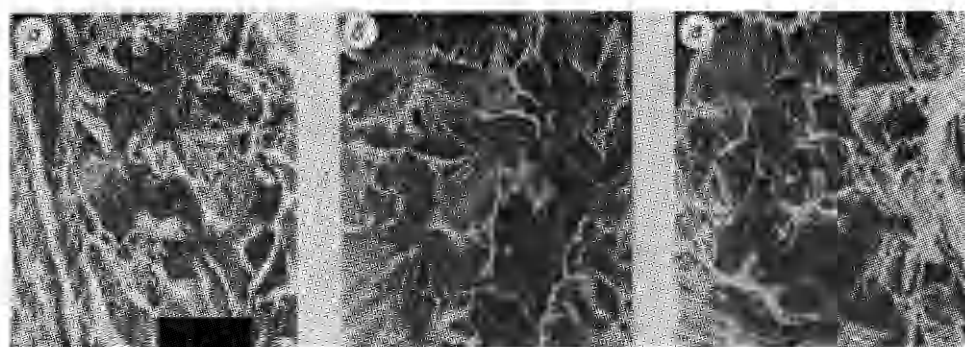
Зоны измерений	Образец (14Х2ГМР)	
	1	2
HV, кг/мм ²		
Основной металл ($I = I_{св}$)	201	191
ЗТВ	237	234
ОПЗ	340	328
Шов	221	212
ОПЗ	340	297
ЗТВ	259	248
Основной металл ($I = 0$)	224	234



Р и с. 3

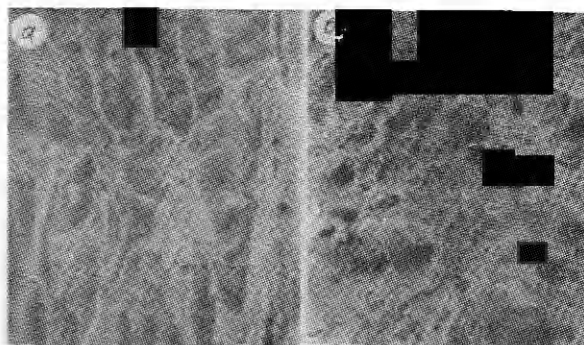


Р и с. 4



Р и с. 5

рактера разрушения, поэтому нами проведен фрактографический анализ изломов образцов, полученных при различных температурах. Изучены поверхности изломов образцов, испытанных при температурах $+20^{\circ}\text{C}$ и -60°C . Образцы взяты попарно (обработанные электрическим током и необработанные).

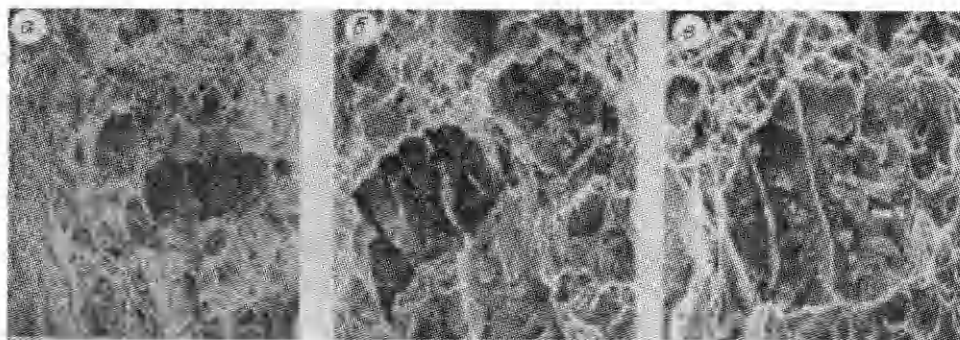


Р и с. 6

Рассмотрим фрактограммы образца без обработки электрическим током, излом которого получен при температуре -60°C . На фрактограмме почти с самой поверхности надреза начинается хрупкое разрушение, если не принимать во внимание зону страгивания (рис. 4, *а*). У поверхности излома длина 7,55 мм. На расстоянии 3,21 мм от надреза расположены самые крупные фасетки скола (рис. 4, *б*), что свидетельствует об ускоренном развитии трещины в этом месте излома. Переход от хрупкой зоны в вязкую происходит на расстоянии 7,22 мм от надреза и имеет длину 0,33 мм (рис. 4, *в*).

Фрактограммы различных зон образца, обработанного электрическим током и полученного при температуре -60°C , даны на рис. 5, где различаются зоны страгивания трещины (*а*), хрупкого (*б*) и вязкого (*в*) разрушений. По сравнению с предыдущим образцом зона страгивания трещины больше, а хрупкого разрушения меньше. Четко выделяется зона вязкого разрушения (1,25 мм). Это указывает на то, что образец без обработки электрическим током имеет более низкую энергоемкость, чем образец с обработкой, а значит, и более высокую температуру хладноломкости.

Визуальный осмотр поверхностей изломов образцов с обработкой и без обработки электрическим током, полученных при $+20^{\circ}\text{C}$, показывает вязкий характер разрушения с сильным сжатием по бокам и с зоной растрескивания по самому центру. Из фрактограмм обоих образцов виден почти полностью вязкий тип разрушения с некоторыми характерными особенностями, такими как усталостные бороздки (рис. 6, *а*), чередование скопления больших ямок в окружении мелких (рис. 6, *б*, 7, *а*) и т. д. Поверхности граней расслоения имеют хрупкий характер разрушения (рис. 7, *б*, *в*). Это объясняется тем, что электроперенос атомов углерода к границам и субграницам зерен ведет к образованию на этих границах хрупкой, насыщенной углеродом, фазы.



Р и с. 7

Таким образом можно заключить, что электроперенос в ОШЗ сварного соединения благоприятно влияет на ее хладостойкость. Снижение температуры хладноломкости происходит из-за измельчения бывшего аустенитного зерна, снижения усредненной микротвердости и концентрационных сдвигов атомов углерода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мерисов Б. А., Хаджай Г. Я., Хоткевич В. П. Особенности электропереноса изотопов водорода в тантале // ФММ.— 1975.— Т. 39, вып. 2.
2. Ивашкина Ю. К., Немченко В. Ф., Чарнецкий В. Г. Концентрационная зависимость электродиффузии водорода в тантале // ФММ.— 1975.— Т. 40, вып. 2.
3. Proc. of Second J. I. M. Intern. Symp. (YIMIS-2): Hydrogen in Metals, 1979, Japan — Suppl. to Trans. JIM, 1980.— V. 21.
4. Ларионов В. П., Семенов Я. С., Сивцев М. П. и др. Об одном способе повышения хладостойкости стали околошовной зоны сварного соединения // Сиб. физ.-техн. журн. (Изв. РАН).— 1991.— Вып. 2.
5. Випф Х. Электро- и термоперенос в системах металл — водород // Водород в металлах.— М.: Мир, 1981.
6. Шпинель В. С. Резонанс гамма-лучей в кристаллах.— М.: Наука, 1969.
7. Кузьмин Р. И., Ларионов В. П., Семенов Я. С. Исследование вязкохрупкого перехода некоторых бинарных сплавов на основе железа // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.— 1988.— Вып. 3, № 11.
8. Литвинов В. С., Каракишев С. Д., Овчинников В. В. Ядерная гамма-резонансная спектроскопия сплавов.— М.: Металлургия, 1982.
9. Владимиров В. И. Физическая природа разрушения металлов.— М.: Металлургия, 1984.
10. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов.— М.: Металлургия, 1976.

г. Якутск

Поступила 17/X 1991 г.,
в окончательном варианте — 8/I 1992 г.