



ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОАЗОТИСТЫХ ХРОМОМАНГАНЦЕВЫХ СТАЛЕЙ И ИХ КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ

А. И. БАЛИЦКИЙ, д-р техн. наук, **И. Ф. КОСТЮК**, инж., **О. А. КРОХМАЛЬНЫЙ**, канд. техн. наук
(Физико-механический ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины)

Рассмотрено формирование физико-механической неоднородности в металле сварных соединений в зависимости от легирования металла шва. Легирование швов азотом обеспечивает более высокую электрохимическую однородность соединений.

Ключевые слова: сварное соединение, высокоазотистые хромоманганцевые стали, неоднородность свойств, межкристаллитная коррозия, твердость, механические испытания

Высокоазотистые хромоманганцевые стали типа 18–18 находят все более широкое применение в энергетике [1–3], в том числе на электростанциях Украины. Сегодня для изготовления бандажей роторов современных турбогенераторов, достигающих единичной мощности 1000...1200 МВт, используют аустенитную хромоманганцевую сталь Р900 (12Х18АГ18Ш) со сверхравновесной концентрацией азота. Высокое содержание азота достигается шлаковым переплавом отливки в среде высокоазотистой шихты. Этой технологии посвящен ряд работ как применительно к новой бандажной хромоманганцевой стали типа 18–18 [4–13], так и традиционным сталям 60ХЗГ8Н8В и 40Х4Г18 [14,15]. Новая сталь имеет высокие значения прочности и вязкости разрушения, стойкостью к локальной коррозии и коррозионному растрескиванию [1]. Сведения о коррозионной стойкости хромоманганцевых сталей типа 18–18 весьма ограничены [16–20]. Разрушения бандажей, изготовленных из стали Р900, на сегодня не зарегистрировано, однако известны случаи их коррозионно-механических повреждений.

Технология сварки хромоманганцевых сталей типа 18–18 аналогична технологии сварки других аустенитных сталей. Однако без соблюдения определенной технологии (низкая мощность сварочной дуги, малые размеры жидкой ванны) могут возникнуть проблемы с образованием пор, сни-

жением прочности, вязкости, а также коррозионной стойкости. Содержание углерода, кремния и никеля в присадочном металле должно быть минимальным, поскольку эти элементы снижают растворимость азота в сварном шве (СШ). Кроме того, высокие концентрации никеля определяют химическую и структурную микрон неоднородность и связанную с ней низкую коррозионную стойкость сварных соединений (СС). Используя проволоку с 0,4...0,8 % N и защитный газ, содержащий азот до 4 %, можно получить бездефектные СС. Поэтому широко ведутся работы по созданию новых, более эффективных присадок и технологий сварки высокоазотистых аустенитных сталей [18, 19].

Исследовали физико-механическую и электрохимическую неоднородность СС двух близких по составу высокоазотистых аустенитных сталей и их коррозионную стойкость в растворах хлорида натрия, соляной кислоты и солей меди. Изучали свойства двухсторонних стыковых соединений, изготовленных из сталей 12Х18АГ18Ш и 08Х19АГ10Ш в состоянии поставки. В табл. 1 приведен химический состав основного и присадочных материалов.

Сварные соединения № 1 образцов из стали 12Х18АГ18Ш выполняли ручной аргодуговой сваркой вольфрамовым электродом с использованием присадочной проволоки Св-01Х19Н9. Сварные соединения № 2 образцов из стали 08Х19АГ10Ш выполнены автоматической дуговой сваркой в специальной защитной атмосфере, содержащей 4 % N₂. Присадочным материалом служила разработанная для сварки высокоазотис-

Таблица 1. Химический состав основного материала сварных соединений и присадочных проволок

Материал	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	N
Сталь 12Х18АГ18Ш	0,12	0,36	18,7	19,19	0,16	0,01	0,05	0,64
Сталь 08Х19АГ10Ш	<0,08	<0,5	10	19	<1,0	<0,5	–	0,5
Проволока № 1	0,04	0,7	5,5	25	21	3,6	–	0,38
Проволока Св-01Х19Н9	0,08	1,0	2,0	19	9	–	–	–
Проволока Св-07Х25Н13	0,09	0,8	1...2	25	13	–	–	–

Таблица 2. Глубинные показатели коррозии (*I*, мм/год) СС и ОМ в агрессивных средах

Среда	СС № 1	СС № 2	ОМ № 1	ОМ № 2
3-й % NaCl	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$
5-й % HCl	3,51	2,63	1,56	1,70
22-й % CuSO ₄	0,09	0,07	0,1	0,06
22-й % CuCl ₂	3,11	3,03	2,78	2,99

Таблица 3. Коррозионные потенциалы (*E_K*, мВ) в различных участках СС

Сварное соединение	Участок СС	3-й % NaCl	5-й % HCl	22-й % CuSO ₄	22-й % CuCl ₂
№ 1	ОМ	348	-272	416	-68
	ЗТВ	334	-254	407	-82
	СШ	415	-33	507	248
	СС	360	-263	438	-71
№ 2	ОМ	329	-283	358	-57
	ЗТВ	303	-285	361	-39
	СШ	368	-238	442	166
	СС	343	-256	401	-36

тых аустенитных сталей специальная проволока № 1 (табл. 1). Благодаря повышенному содержанию в ней хрома достигается получение беспористых швов с высоким уровнем механических характеристик.

Вследствие развития химической и структурной неоднородности в различных зонах СС высоколегированных сталей и прежде всего в металле шва и металле ЗТВ СС в целом следует рассматривать как сложную короткозамкнутую многоэлектродную коррозионную систему. В растворе электролита поверхность СС можно считать эк-

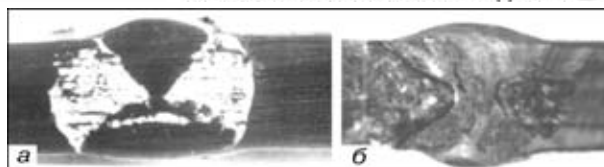


Рис. 1. Образцы СС № 1 после 240 ч выдержки в растворах 5 %-м HCl (а) и 22 %-м CuCl₂ (б)

випотенциальной, а каждый из его участков — поляризованным по отношению к компромиссному потенциалу коррозионной системы. Высокоазотистые стали имеют узкий диапазон пассивности в горячих растворах хлоридов, поэтому следует ожидать, что присадки с более высоким потенциалом будут предопределять их контактную коррозию. Образцы испытывали в растворах: 3 %-м NaCl, 5 %-м HCl, 22 %-м CuSO₄ и 22 %-м CuCl₂ в течение 720 ч. Глубинные показатели коррозии СС основного металла (ОМ) определяли по потерям массы, приведенным к площади коррозионного повреждения, взвешивая образцы на весах ВЛР-20. В ходе исследования потерь массы образцов (табл. 2) установлена высокая коррозионная стойкость СС высокоазотистых аустенитных сталей в растворах: 3 %-м NaCl и 22 %-м CuSO₄ (соответственно 2 и 5 баллов по ГОСТ 13819-68). Можно отметить, что более однородный по химическому составу образец СС № 2 имеет высокую коррозионную стойкость в 3 %-м растворе NaCl (в 1,5 раза). В 22 %-м растворе CuCl₂ скорости коррозии обоих образцов почти одинаковы и достаточно высоки. Это свидетельствует о том, что в среде хлоридов СС имеют низкую коррозионную стойкость (6 баллов). Причем более неоднородный металл СС № 1 имеет скорость коррозии в 1,5... 2,4 раза выше, чем ОМ, что является косвенным свидетельством его высокой электрохимической неоднородности.

Исследование макроструктуры околошовной зоны показало отсутствие пор или других крупных дефектов. Визуальным обследованием образцов обнаружено их неравномерную коррозию в зоне ОМ — металл ЗТВ в растворах 5 %-м HCl и 22 %-м CuCl₂ (рис. 1). Коррозии СШ практически не наблюдали. Вследствие образования гальванопары на СС № 1 в 22 %-м растворе CuCl₂ отмечено интенсивное катодное осаждение меди с одновременным образованием глубоких питтингов и язв в зоне сплавления и металле ЗТВ. В зоне сплавления наблюдается склонность к локальному коррозионному разрушению в виде подреза (щели). Скорость коррозии СС № 2 повышается незначительно (в 1,01... 1,34 раза) по сравнению с ОМ.

Вывод о более высокой электрохимической однородности СС № 2 подтверждают результаты измерений стационарных потенциалов коррозии участков СС (табл. 3). Для обоих СС наиболее высокими являются потенциалы зоны СШ. Для СС № 1 в растворах 3 %-м

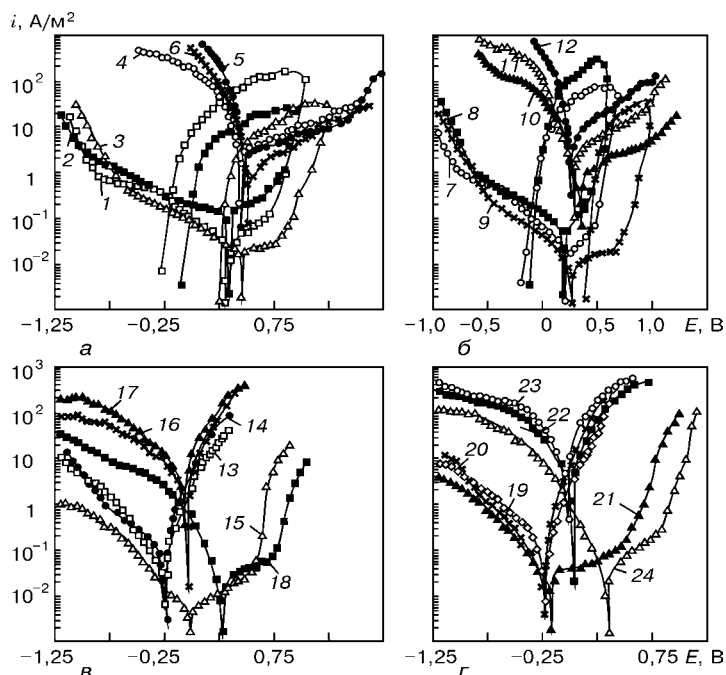


Рис. 2. Поляризационные кривые участков СС № 1 (а, б) и № 2 (в, г) в 3 %-м NaCl (1-3, 7-9); 22 %-м CuSO₄ (4-6, 10-12); 5 %-м HCl (13-15, 19-21) и 22 %-м CuCl₂ (16-18, 22-24): 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22 — ОМ; 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23 — металл ЗТВ; 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 — СШ

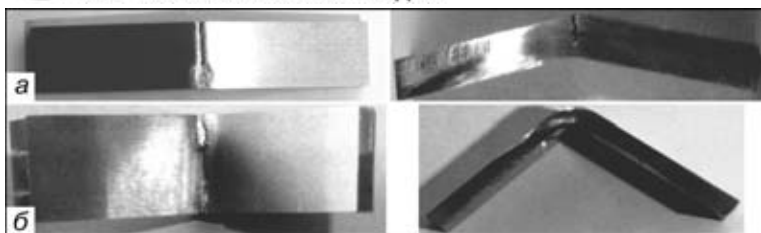


Рис. 3. Вид образцов после испытания на межкристаллитную коррозию: а — угол загиба 11°; б — 83

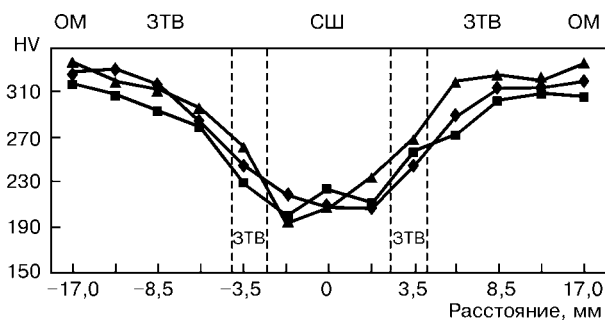


Рис. 4. Значения твердости трех образцов СС № 3

NaCl, 22 %-м CuSO₄ и 22 %-м CuCl₂ коррозионное растворение материала сосредоточено по металлу ЗТВ, а в 5 %-м HCl — по OM, поскольку эти участки имеют наиболее низкие потенциалы коррозии. Для СС № 2 в растворах 3 %-м NaCl и 5 %-м HCl наиболее низким является потенциал металла ЗТВ, а в растворах солей меди — OM. Разница между потенциалами определенных выше участков СС № 1 в 5 %-м HCl и 22 %-м CuCl₂ растворах составляет соответственно 239 и 330 мВ, тогда как СС № 2 — 47 и 223 мВ. В 3 %-м растворе NaCl анодная поляризация OM и металла ЗТВ, обусловленная контактом с более благородным металлом СШ, несущественно ускоряет коррозию СС в результате низкой эффективности катодного процесса (см. рис. 2, а, кривые 1–3 и 2, б, кривые 7–9). При компромиссном потенциале данной коррозионной системы, которым является потенциал СС (см. табл. 3), эти участки находятся в стойком пассивном состоянии, а скорость их анодного растворения является низкой (до 0,2 А/м²). В 22 %-м растворе CuSO₄ коррозия СС ускоряется на 1...2 порядка вследствие существенного повышения эффективности катодного процесса (см. рис. 2, а, кривые 4–6 и 2, б, кривые 10–12). Однако из-за отсутствия хлорид-ионов в растворе это не вызывает депассивации ни одного из участков СС. Коррозионный процесс протекает под катодным контролем.

Наличие хлорид-ионов и низкие значения рН определяют активацию материала OM и металла ЗТВ СС в 5 %-м растворе HCl, а материал СШ остается пассивным (см. рис. 2, в, з). Коррозионный процесс протекает под смешанным анодно-катодным контролем с высокой скоростью. Компромиссные потенциалы коррозионных систем СС — 22 %-й раствор CuCl₂ смещаются в область питтинговой коррозии участков OM и металла ЗТВ, а материал СШ находится в пассивном состоянии. Высокая скорость коррозии СС в этой среде определяется эффективностью катодных и

низкой поляризованностью анодных электродных процессов. Возникновение дополнительного электрода в результате катодного осаждения меди усложняет анализ такой многоэлектродной коррозионной системы. Поляризационные кривые с обратным ходом позволили установить потенциалы репассивации питтинга.

Сварные соединения № 2 исследовали также и на склонность к межкристаллитной коррозии. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 6032–89 по методу АМ. Образцы исследовали в водном растворе меди сернистой и серной кислоты с добавлением медной стружки. Перед испытаниями образцы обезжирили. После непрерывного кипячения (24 ч) промыли водой и просушили. Образцы загибали на угол до 90° по металлу шва. На рис. 3 показаны образцы после испытаний. На поверхности металла шва изогнутых образцов отмечены трещины. Характерно, что угол загиба составил: для образца 1 — 83, 2 — 11°. Опыты прекратили после появления трещин.

Образцы СС № 3 из стали 12X18AG18Ш сваривали проволокой Св-07X25H13, которая не содержит азот (см. табл. 1, 2). Измерения твердости проводили перпендикулярно шву. Определили, что значения твердости более низкие на СШ и зоне сплавления. Это объясняется отсутствием азота и различным химическим составом шва и OM. Характерно, что микротвердость металла СШ практически одинакова на всех образцах.

Выводы

1. В зоне сварного шва наблюдается неоднородность основных механических свойств в связи с уменьшением содержания азота в материале шва.
2. Исследование склонности сварных соединений хромомарганцевой стали 18–18 в насыщенном растворе CuCl₂ к коррозионно-механическому разрушению позволяет обнаружить наиболее ослабленные зоны сварного шва.
3. Сварные соединения, выполненные дуговой сваркой с использованием азотсодержащих присадок и защитной среды, характеризуются более высокой электрохимической однородностью, чем полученные с применением электрода Св-01X19H9. Такие сварные соединения отличаются высокой коррозионной стойкостью в 3 %-м NaCl и 22 %-м CuSO₄. Результаты испытаний дают основания рекомендовать азотсодержащие присадки для сварки высокоазотистых хромомарганцевых сталей.

1. Балыцкий О. И. Сучасні матеріали для потужних турбогенераторів. — Львів: Фізико-механічний ін-т НАН України, 1999. — 284 с.
2. Speidel M. O. Nichtmagnetisierbare Stähle für Generator-Kappenringe, ihr Widerstand gegen Spannungsrisskorrosion und Wasserstoffversprodnung // VGB Kraftwerttechnik. — 1981. — 61, № 5. — S. 417–427.
3. Stein G. Kappenringe-ein Krupp-Produkt mit Tradition und Zukunft // Techn. Mitt. Krupp. Werksbericht. — 1980. — 38, № 2. — S. 69–72.
4. Технология ЭШП высокоазотистой стали 12X18AG18 в слитки массой 18 т / Г. Г. Куткин, Л. М. Васильев, И. М. Зуев и др. // Тез. докл. I Всесоюз. конф. по вы-



- сокозотистым сталям (Киев, 18–20 апр. 1990 г.). — Киев, 1990. — С. 8.
5. Stein G., Menzel J., Kirschner W. Manufacturing and operation of retaining rings made out of stress corrosion resistant steels // MaTeh' 1996: Proc. 1-st Intern. conf. «Development, testing and application of materials» (Opatija, Croatia, 2–5 Oct., 1996). — P. 203–208.
 6. Stein G., Menzel J., Chondhury A. Industrial manufacturing of massively nitrogen-alloyed steels in a pressure ESR furnace // Steel Times. — 1989. — 217, № 3. — P. 146.
 7. Stein G., Menzel J., Dorr H. Möglichkeiten zur Herstellung von Smiedestücken mit hohen Stickstoffgehalten in der DESU-Anlage // Ergebnisse der Werkstoff-Forschung. B. 1: Moderne Stähle / Thubal-Kain, 1987. — S. 181–193.
 8. Arc-slag remelting of steel and alloys / B. I. Medovar, V. Ja. Saenko, G. M. Grigorenko et al. — Cambridge: Cambridge Intern. Sci. publ., 1996. — 160 p.
 9. New multilayer steel in welded structures / B. I. Medovar, V. Ja. Saenko, L. B. Medovar, V. I. Us. — New York: Harwood: Acad. publ., 1992. — Vol. 2, pt 2. — 128 p.
 10. Особенности электрошлакового переплава и свойства высокопрочной бандажной стали / А. И. Балицкий, В. И. Похмурский, А. С. Волков и др. // Проблемы коррозии і протикорозійного захисту матеріалів: Матеріали 4-ї міжнарод. конф.-виставки «Корозія-98» (Львів, 9–11 черв. 1998 р.). — Львів, 1998. — С. 151–154.
 11. Retaining rings: Product literature // Krupp Metal- und Schmiedewerke. — Essen, 1990. — 54 p.
 12. Электрошлаковый металл / Б. И. Медовар, Л. М. Ступак, Г. А. Бойко и др. / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.
 13. Влияние состава флюсов и газовой атмосферы на поглощение азота сталями и сплавами при индукционном и дуговом плавлении / Б. И. Медовар, Г. М. Григоренко, Ю. М. Помарин и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1995. — № 3. — С. 6–14.
 14. Пахурідзе В. Н., Чекотило Л. В. Методы изготовления бандажных колец роторов турбогенераторов (краткий обзор) // Спец. электрометаллургия. — 1974. — 27. — С. 51–58.
 15. Пахурідзе В. Н., Чекотило Л. В. Легирование аустенитных сталей 60X3Г8Н8В и 40X4Г18 азотом в процессе ЭШП // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1975. — 1. — С. 40–45.
 16. Балицький О. І. Оцінка схильності до корозійного розтріскування при зварюванні та різанні високоазотних хромомарганцевих сталей, отриманих електрошлаковим переплавом // Зварювання та споріднені технології — в ХХІ століття: 36. пр. міжнар. конф. (Київ, 24–27 лист., 1998). — К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона. — 1998. — С. 10.
 17. Balitskii A. I., Krokchmalny O. O., Kostyuk I. F. Corrosion-mechanical strength of welded joints of high-nitrogen steels // Abstracts of poster papers of Intern. conf. «Welded structures» (Kyiv, Ukraine, Oct., 2000). — Kyiv, 2000. — P. 37.
 18. Harzenmozer M., Diener M. Suitable filler material for welding high nitrogen stainless steels // Proc. 18th Intern. SAMPE Europe conf. of the society for the advancement of material and process engineering (Paris, La Defense, 23–25 Apr., 1997). — Paris, 1997. — P. 123–133.
 19. Coetzee M., Pistorius P. G. H. Elevated temperature phase transformations and weldability of experimental Cr–Mn–Ni stainless steels // Duplex stainless steels (Glasgow, 13–16 Nov., 1994). — Glasgow, 1994. — Paper 48. — 11 p.
 20. Костюк І. Ф. Неоднорідність фізико-механічних властивостей зварних з'єднань високоазотних хромомарганцевих сталей та їх корозійна стійкість // Матеріали для енергетики. — 2001. — 1. — С. 55–58.

The paper deals with development of physico-mechanical inhomogeneity in the metal of welded joints, depending on weld metal alloying. Weld alloying with nitrogen provides higher electrochemical homogeneity of the joints.

Поступила в редакцию 20.02.2002

Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций: Учеб. пособие для вузов / С. А. Куркин, В. М. Ховов, Ю. Н. Аксенов и др.; Под ред. С. А. Куркина, В. М. Ховова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 464 с.

Рассмотрены примеры эффективного использования компьютерных технологий на всех этапах подготовки производства сварных конструкций, начиная от расчета и проектирования самих конструкций до моделирования работы сварочных роботизированных технологических комплексов.

Содержание учебного пособия соответствует программам курсов лекций по компьютерным технологиям сварочного производства, которые авторы читают в МГТУ им. Н. Э. Баумана и других вузах.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов «Машиностроительные технологии и оборудование» по специальности «Оборудование и технология сварочного производства». Может быть полезно руководителям подразделений промышленных предприятий.

Более подробно с книгой можно ознакомиться в библиотеке ИЭС им. Е. О. Патона.

