

## ВЛИЯНИЕ ИТТРИЯ НА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА И СТРУКТУРУ МЕТАЛЛА ШВОВ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Академик НАН Украины **И. К. ПОХОДНЯ**, **А. П. ПАЛЬЦЕВИЧ**, **А. В. ИГНАТЕНКО**, кандидаты техн. наук, **Т. Г. СОЛОМИЙЧУК**, **В. С. СИНЮК**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследован переход иттрия в наплавленный высокопрочный низколегированный металл при сварке порошковыми проволоками в защитном газе и покрытыми электродами основного типа. С применением термодесорбционного анализа установлено взаимодействие иттрия с растворенным водородом с образованием остаточного водорода в зависимости от концентрации иттрия. Показано влияние иттрия на микроструктуру наплавленной низколегированной стали и механические характеристики металла.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, высокопрочные низколегированные стали, модифицирование металла шва, иттрий, перераспределение водорода, термодесорбционный анализ водорода, структура, механические свойства

Применение иттрия и других редкоземельных металлов (РЗМ) известно как средство микролегирования и модифицирования сталей и сварных швов с целью улучшения их механических свойств [1–6]. Наряду с этим иттрий, церий, лантан, неодим, празеодим образуют соединения с водородом, благодаря чему снижается флокочувствительность сталей [7].

Применение РЗМ в сварочных материалах с целью улучшения служебных характеристик металла швов освещено в работах [4–6]. Особый интерес представляют исследования, направленные на поиск снижения склонности сварных швов и соединений к водородному растрескиванию на высокопрочных низколегированных сталях (ВПНЛ). Попытки перераспределения водорода, поглощенного сварочной ванной, изложены в работах [6, 8, 9]. Однако количество проведенных исследований невелико, а их результаты содержат ряд противоречивых данных, касающихся влияния введения РЗМ на поведение водорода в металле сварных швов.

В настоящей работе рассматриваются исследования влияния иттрия на возможность перераспределения поглощенного водорода между диффузионной и остаточной формами и особенности изменения структуры и механических свойств металла шва. Ввиду высокого сродства иттрия к кислороду сравнивали эффект введения иттрия в металл сварочной ванны с применением порошковой проволоки, предназначенной для сварки в защитных газах, и покрытых электродов. Содержание иттрия в металле сварных швов определяли с использованием высокочувствительного эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной

плазмой iCAP 6000. Химический состав металла определяли с помощью прибора «Спектровак-1000». Содержание диффузионного водорода в металле сварных швов измеряли в соответствии с требованиями ГОСТ 23338–91 хроматографическим методом с применением газоанализатора ОБ 2781П.

Измерение содержания остаточного водорода в образцах металла швов выполняли в автоматическом режиме термодесорбционным методом, изложенным в работе [10] и усовершенствованным для измерения содержания остаточного водорода  $[H]_{\text{ост}}$  и исследования термодесорбции водорода из металлов.

Исследовали переход иттрия в металл шва и перераспределение поглощенного водорода при сварке порошковой проволокой ПП-АН 70 диаметром 1,6 мм, в сердечник которой вводили сплав системы Fe–Y. Сварку в среде аргона высокой чистоты выполняли на токе 220 А обратной полярности. В табл. 1 приведен химический состав многослойного наплавленного металла в зависимости от содержания иттрия в проволоке, диффузионного водорода в наплавленном металле  $[H]_{\text{диф. н.м}}$  и  $[H]_{\text{ост}}$  в однослойных швах.

Ниже приведены результаты анализа неметаллических включений в образце, полученном при сварке проволокой П4. Химический состав неметаллических включений определяли растровым электронным микроскопом «Jeol JSM-35CF» и дисперсионным энергоанализатором INCA Energy 350 фирмы «Oxford Instruments» (Великобритания). Состав неметаллических включений в образце, наплавленном проволокой П4, следующий, мас. %: 21,8 Y; 41,0 O; 13,7 Mn; 4,0 Si; 1,8 Al; 15,1 Ti; 2,6 S.

С увеличением содержания иттрия в сердечнике порошковой проволоки и благодаря его вы-

**Таблица 1.** Химический состав (мас. %) наплавленного металла в зависимости от содержания иттрия в порошковой проволоке

Порошковая проволока	Содержание иттрия в проволоке	С	Si	Mn	Al	Ti	Y	Концентрация водорода, мл/100 г	
								$[H]_{\text{диф. н.м}}$	$[H]_{\text{ост}}$
П1 (ППАН 70)	0	0,08	0,71	1,6	<0,05	<0,08	0	$\frac{2,2...4,4}{3,5 \times 3}$	0,6
П2	0,3	0,08	0,74	1,7	<0,05	<0,08	0,008	$\frac{4,6...5,0}{4,7 \times 3}$	0,5
П3	0,8	0,09	0,90	1,8	0,11	0,064	0,013	$\frac{6,1...6,8}{6,3 \times 3}$	0,9
П4	1,6	0,10	0,95	1,7	0,15	0,250	0,055	$\frac{6,7...8,7}{7,7 \times 2}$	6,0

Примечание. Здесь и в табл. 6 в числителе приведены крайние значения  $[H]_{\text{диф. н.м}}$ , а в знаменателе — средние значения по указанному числу проб.

сокой раскислительной способности в металле шва повышается содержание кремния, алюминия и титана, имеет место увеличение содержания  $[H]_{\text{диф. н.м}}$  и особенно  $[H]_{\text{ост}}$  в металле швов, выполненных проволоками П3 и П4 (табл. 1).

Можно предположить, что благодаря наличию водорода в сплаве системы Fe–Y, а также гидратации его при изготовлении и хранении проволок увеличивается содержание водорода, поглощенного сварочной ванной.

Для детального исследования возможности перераспределения поглощенного водорода в зависимости от содержания иттрия в металле измеряли содержание диффузионного водорода  $[H]_{\text{диф}}$  в пробах металла сварочной ванны, отобранных кварцевой трубкой при наплавке четвертого слоя (табл. 2), и проводили термодесорбционный анализ  $[H]_{\text{ост}}$ . Полученные пробы через 1...2 с охлаждали в воде и хранили в жидком азоте до анализа.

При содержании иттрия от 0,013 до 0,053 мас. % имеет место высокое содержание  $[H]_{\text{ост}}$  и возникает пик остаточного водорода (рис. 1) с максимальной температурой 340...350 °С.

Известно [11], что разложение гидрида иттрия  $YH_{1,6}$  при нагреве происходит в две стадии — при температуре 360...410 и 1100...1300 °С. На второй стадии при нагреве моногидрид иттрия переходит в металлический иттрий. При содержании иттрия 0,013 мас. % и более он находится в шве в неметаллических включениях и в растворе

**Таблица 2.** Распределение водорода в металле, наплавленном порошковыми проволоками, в среде аргона

Порошковая проволока	$[H]_{\text{диф}}$ , мл/100 г	$[H]_{\text{ост}}$ , мл/100 г
П1	3,8	0,2
П2	4,9	0,2
П3	4,8	1,9
П4	4,6	4,6

железа [12], благодаря чему образуется связь растворенного водорода с иттрием.

В опытах по сварке электродами с основным покрытием в покрытие вводили FeY (Y = 26 мас. %) или AlNiY (Y = 13,3 мас. %).

В табл. 3 и 4 приведены химические составы многослойного металла, наплавленного опытными электродами на постоянном токе 160...170 А обратной полярности. С повышением содержания FeY и AlNiY в покрытии происходит небольшое увеличение содержания иттрия в наплавленном металле обеих серий электродов, при этом содержание  $[H]_{\text{ост}}$  остается практически неизменным (рис. 2).

В серии экспериментов по сварке электродами, в покрытие которых вводили FeY+ПАМ, оценивали возможность повышения перехода иттрия в металл шва путем введения в покрытие сильных раскислителей — алюминия и магния.

В табл. 5 приведен химический состав многослойного металла, наплавленного на постоянном токе 160...170 А обратной полярности, в табл. 6 — результаты измерения содержания  $[H]_{\text{диф. н.м}}$  и  $[H]_{\text{ост}}$ .

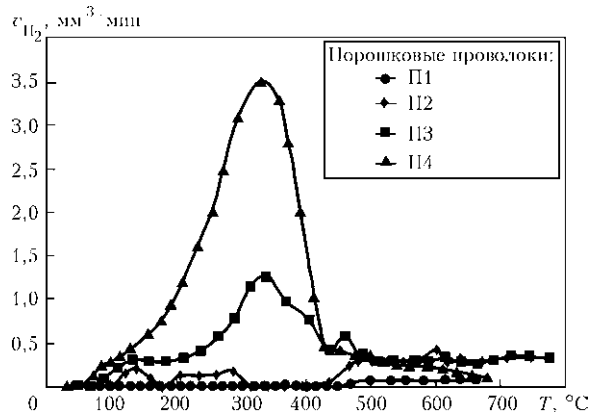


Рис. 1. Спектр термодесорбции остаточного водорода из проб, отобранных в кварцевую ампулу (средняя скорость нагрева образца составляет около 7 град/мин)

Таблица 3. Химический состав (мас. %) металла, наплавленного электродами с FeY в покрытии

Индекс электрода	Содержание Y в покрытии	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Al	Ti	Y
ИП 1	0	0,043	0,274	0,98	0,007	0,015	0,88	2,36	0,45	0,18	0,007	0,005	—
ИП 2	0,026	0,041	0,276	0,99	0,006	0,014	0,86	2,35	0,45	0,18	0,006	0,006	0,0001
ИП 3	0,052	0,044	0,256	0,99	0,007	0,016	1,02	2,37	0,46	0,18	0,006	0,006	0,0001
ИП 4	0,078	0,044	0,281	1,02	0,006	0,015	0,77	2,35	0,47	0,18	0,006	0,007	0,0001
ИП 5	0,156	0,044	0,252	1,00	0,005	0,015	0,94	2,53	0,53	0,18	0,007	0,007	0,0002
ИП 6	0,26	0,048	0,280	1,02	0,006	0,015	0,85	2,38	0,44	0,17	0,006	0,007	0,0006

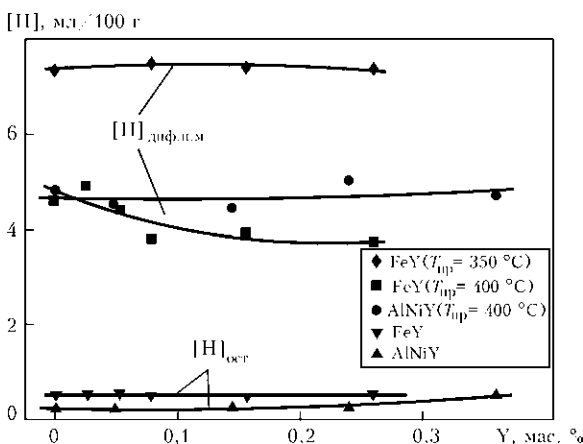
Таблица 4. Химический состав (мас. %) металла, наплавленного электродами с AlNiY в покрытии

Индекс электрода	Содержание Y в покрытии	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Al	Ti	Y
ИП 7	0	0,035	0,278	0,95	0,005	0,012	0,83	2,14	0,45	0,21	0,007	0,005	—
ИП 8	0,043	0,035	0,320	1,00	0,006	0,014	0,87	2,33	0,46	0,21	0,008	0,007	0,0001
ИП 9	0,128	0,048	0,381	1,08	0,006	0,013	0,88	2,32	0,47	0,16	0,009	0,009	0,0001
ИП 10	0,212	0,042	0,466	1,18	0,007	0,014	0,88	2,39	0,48	0,16	0,011	0,008	0,0001
ИП 11	0,320	0,046	0,571	1,25	0,007	0,015	0,93	2,45	0,51	0,23	0,015	0,009	0,0002

Таблица 5. Химический состав (мас. %) металла, наплавленного электродами с FeY + ПАМ в покрытии

Индекс электрода	Содержание ПАМ и Y в покрытии	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	V	Al	Ti	Y
ИП 12	—	0,079	0,278	1,20	0,015	0,021	0,94	0,45	0,21	0,007	0,016	—
ИП 13	ПАМ — 1,5	0,081	0,347	1,30	0,015	0,024	0,98	0,44	0,23	0,009	0,017	—
ИП 14	Y — 0,56, ПАМ — 1,5	0,090	0,376	1,29	0,013	0,021	0,94	0,44	0,23	0,009	0,017	0,0006
ИП 15	ПАМ — 3,0	0,087	0,490	1,42	0,013	0,022	0,98	0,45	0,24	0,013	0,022	—
ИП 16	Y — 0,56, ПАМ — 3,0	0,097	0,460	1,41	0,013	0,025	0,99	0,46	0,23	0,013	0,025	0,001

Введение порошка алюминиево-магниевого (ПАМ) в покрытие приводит к существенному повышению содержания кремния, марганца, алюминия, титана и иттрия (табл. 5). Содержание  $[H]_{\text{ост}}$  остается практически постоянным (табл. 6), в спектре термодесорбции (рис. 3), отсутствует пик водорода в области температуры 340 °С.

Рис. 2. Зависимость содержания  $[H]_{\text{диф. н.м}}$  и  $[H]_{\text{ост}}$  от содержания иттрия в покрытии электродов

Введение иттрия в электродное покрытие совместно с ПАМ позволяет повысить содержание иттрия в металле шва до 0,001 мас. %. Однако перераспределение водорода при этом не наблюдалось.

Влияние иттрия на структуру металла и содержание неметаллических включений исследовали на образцах десятислойных швов, выполненных на следующем режиме:  $I_{\text{св}} = 160...165$  А (постоянный, обратная полярность);  $U_{\text{д}} = 24...26$  В;  $v_{\text{св}} = 8...9$  м/ч; опытные электроды.

Микроструктуры металла многослойного шва исследовали на микроскопе «Neophot-32». Микроструктура, представленная на рис. 4, получена с помощью фотокамеры «Olympus».

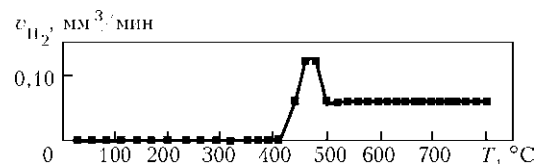


Рис. 3. Спектр термодесорбции водорода из наплавленного металла однослойного шва, выполненного электродом ИП 16

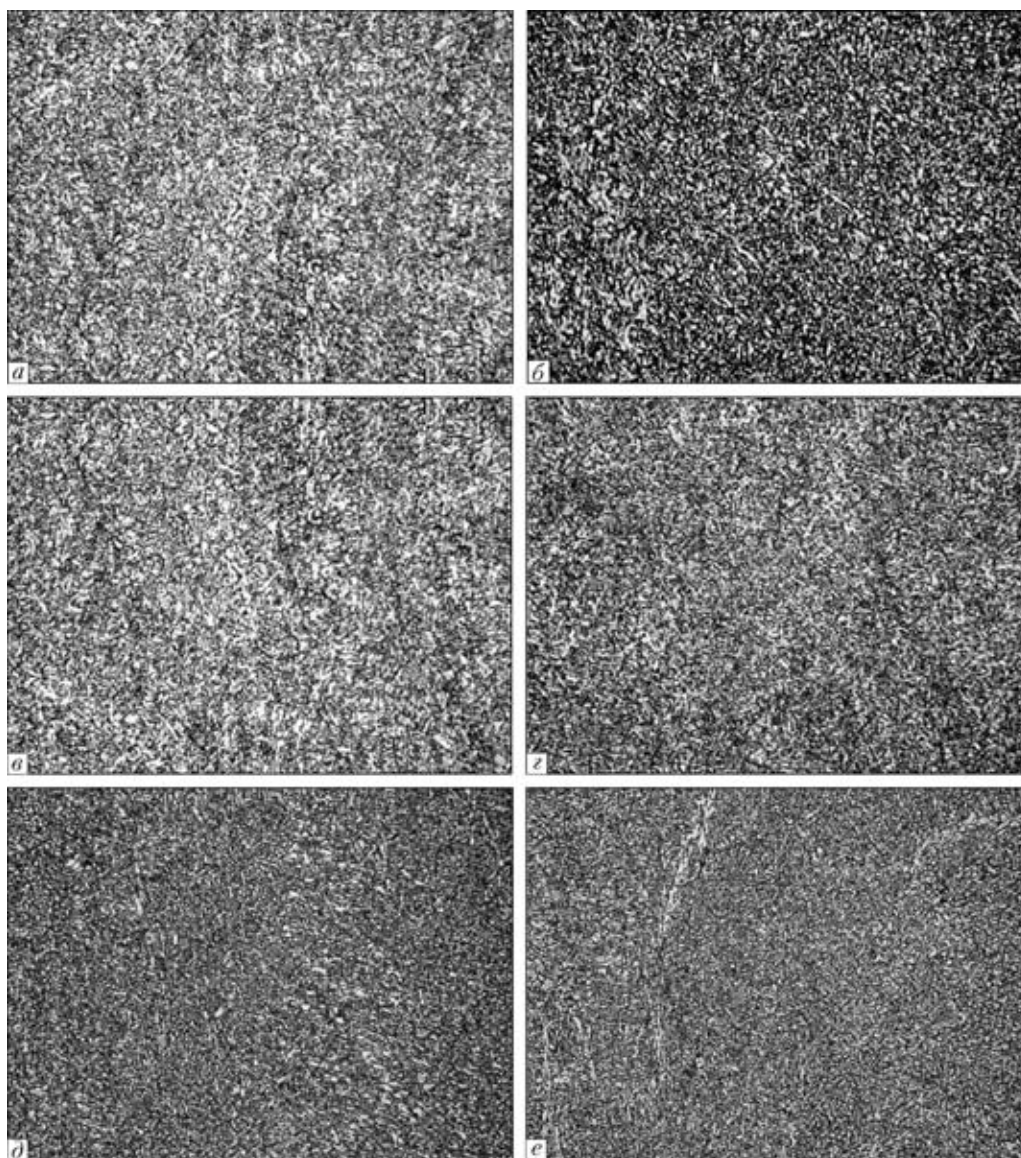


Рис. 4. Микроструктуры ( $\times 500$ ) металла многослойного шва, выполненного опытными электродами: *a* — ИП 1; *б* — ИП 6; *в* — ИП 7; *г* — ИП 11; *д* — ИП 12; *е* — ИП 16

Микроструктуры образцов в верхнем слое наплавленного металла примерно одинаковы — бейнитного типа с тонкими выделениями полигонального феррита по границам литых кристаллитов.

Таблица 6. Содержание водорода в металле швов, выполненных электродами с FeY + ПАМ в покрытии

Индекс электрода	$[H]_{\text{диф. н.м.}}$ мл/100 г	$[H]_{\text{ост}}$ при нагреве до 800 °С, мл/100 г
ИП 12 (базовый)	$\frac{3,8...4,1}{3,9 \times 3}$	0,5
ИП 13 (ПАМ — 1,5 мас. %)	$\frac{3,9...4,2}{4,0 \times 3}$	0,5
ИП 14 (Y — 0,56 мас. %, ПАМ — 1,5 мас. %)	$4,9 \times 3$	0,7
ИП 15 (ПАМ — 3 мас. %)	$\frac{5,0...5,2}{5,1 \times 3}$	0,3
ИП 16 (Y — 0,56 мас. %, ПАМ — 3 мас. %)	$\frac{5,5...5,7}{5,6 \times 3}$	0,5

Термообработанные участки образцов имеют структуру преимущественно бейнитного типа без полигонального феррита.

Мелкозернистая структура во всех образцах обусловлена легированием металла шва хромом, никелем, алюминием [13], снижение ее дисперсности определяется введением иттрия.

Установлено, что введение FeY и AlNiY в покрытие электродов приводит к уменьшению объемной доли неметаллических включений. Химический состав неметаллических включений в металле образцов швов с максимальным содержанием иттрия приведен в табл. 7. Включения представляют собой в основном оксиды кремния и марганца с небольшим содержанием серы. При наибольшем содержании в электродном покрытии FeY + ПАМ во включениях увеличилось содержание алюминия и титана, а в некоторых включениях обнаружен иттрий.

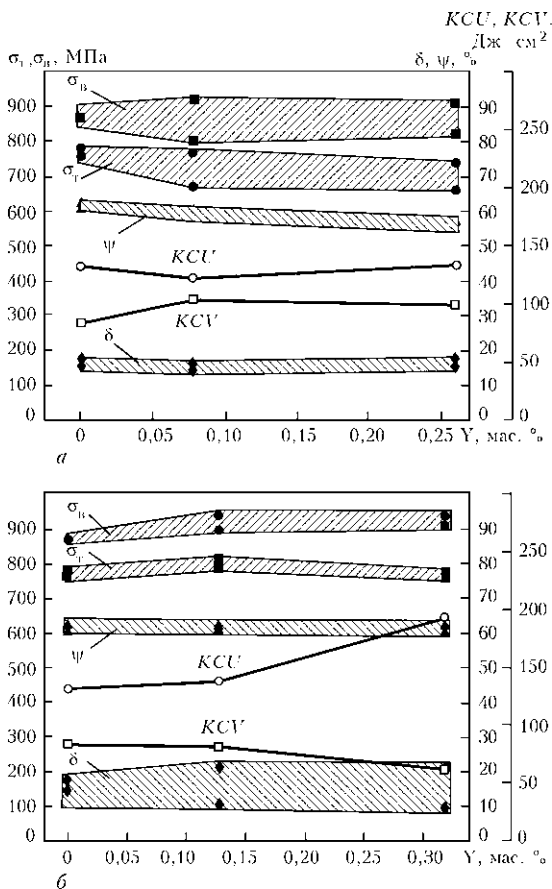


Рис. 5. Влияние иттрия на механические свойства металла шва: а — электроды с FeY в покрытии (серия ИП 1–6); б — электроды с AlNiY в покрытии (серия ИП 7–11)

Таблица 7. Химический состав (мас. %) неметаллических включений

Индекс электрода	O	Si	Mn	Al	Ti	S	Y
ИП 6	38	13,6	43	0,5	2,8	2,1	–
ИП 11	38	13,2	39	3,7	4,0	2,1	–

Для определения влияния иттрия на механические свойства наплавленного металла выполняли наплавку на пластину из стали ВСтЗсп по ГОСТ 9466–75 на режиме:  $I_{св} = 160...165$  А (постоянный ток, обратная полярность);  $U_{д} = 24...26$  В;  $v_{св} = 8$  м/ч. Результаты механических испытаний при 20 °С приведены на рис. 5.

Благодаря легированию (см. табл. 3 и 4) и мелкозернистой структуре сохраняются высокие значения прочности и пластичности наплавленного металла при температуре 20 °С (рис. 5).

Yttrium transition into the deposited high-strength low-alloyed metal in gas-shielded flux-cored wire and coated basic electrode welding was studied. Thermal desorption analysis allowed establishing the interaction of yttrium with dissolved hydrogen with formation of residual hydrogen depending on yttrium concentration. Yttrium influence on microstructure of deposited low-alloyed steel and mechanical characteristics of metal is shown

## Выводы

1. При наплавке порошковыми проволоками в среде аргона обеспечивается заметный переход иттрия в наплавленный металл и взаимодействие его с водородом.

2. С помощью термодесорбционного анализа установлено образование остаточного водорода с температурой максимума удаления 340...350 °С при содержании Y  $\geq 0,013$  %.

3. При сварке электродами основного типа с содержанием иттрия до 0,35 мас. % в покрытии не удалось достичь содержания иттрия в наплавленном металле, необходимого для перераспределения водорода из-за высокого окислительного потенциала покрытия.

4. С введением иттрия снижается дисперсность структуры наплавленного металла, объемная доля неметаллических включений уменьшается. Прочность и пластичность наплавленного металла сохраняются на постоянном уровне.

1. Крещановский Н. С., Сидоренко М. Ф. Модифицирование стали. — М.: Металлургия, 1970. — 296 с.
2. Браун М. П. Микролегирование стали. — Киев: Наук. думка, 1982. — 303 с.
3. Гольдштейн Я. Е., Мизин В. Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. — М.: Металлургия, 1986. — 272 с.
4. Ефименко Н. Г. Комплексная оценка влияния иттрия на свойства сварных швов сталей // Автомат. сварка. — 2003. — № 8. — С. 24–27.
5. Ефименко Н. Г. Применение редкоземельных металлов в покрытиях сварочных электродов // Свароч. пр-во. — 1980. — № 7. — С. 28–29.
6. Влияние модифицирования неметаллических включений редкоземельными металлами на структуру и свойства металла шва при сварке высокопрочных сталей / В. Ф. Мусяиченко, И. С. Мельник, М. Б. Мовчан, В. М. Кирьяков // Автомат. сварка. — 1987. — № 6. — С. 1–6.
7. Влияние обработки жидкой хромоникелевой стали церием на характер ее кристаллизации / Я. Е. Гольдштейн, В. И. Зельдович, Н. В. Кейс и др. // Сталь. — 1962. — № 3. — С. 258–261.
8. Naoyukis S. The prevention of weld cracking by addition of special elements. — S.I., [1980]. — 37 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. II-A-513–80).
9. Yttrium hydrogen trapping to manage hydrogen in HSLA steel welds / C. A. Lensing, Y. D. Park, I. S. Marooff, D. L. Olson // Welding J. — 2004. — N 9. — P. 254–s–266–s.
10. Пальцевич А. П. Хроматографический способ определения содержания водорода в компонентах электродных покрытий // Автомат. сварка. — 1999. — № 6. — С. 45–48.
11. Кост М. Е. О гидриде иттрия // Докл. АН СССР. — 1962. — 143, № 1. — С. 119–121.
12. Терехова В. Ф., Савицкий Е. М. Иттрий. — М.: Наука, 1967. — 158 с.
13. Грабин В. Ф. Металловедение сварки плавлением. — Киев: Наук. думка, 1982. — 416 с.

Поступила в редакцию 18.04.2010