



# СВОЙСТВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА ДЛЯ ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ АРМАТУРЫ

**Е. Ф. ПЕРЕПЛЕТЧИКОВ**, канд. техн. наук, **И. А. РЯБЦЕВ**, д-р техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты исследования свойств сплавов на основе железа, предназначенных для плазменно-порошковой наплавки уплотнительных поверхностей арматуры различного назначения. Показано, что наилучшим сочетанием коррозионной стойкости, горячей твердости, стойкости против задирания, термической выносливости отличается наплавленный металл 15X19H9M4C5ГЗД.

*Ключевые слова:* плазменно-порошковая наплавка, наплавочные материалы, свойства наплавленного металла, наплавка арматуры, коррозионная стойкость, горячая твердость

Для наплавки уплотнительных поверхностей арматуры в энергетическом, нефтехимическом, судовом и общем машиностроении достаточно широко используют сплавы на основе железа. При этом на многих предприятиях стран СНГ для этой цели применяют ручную или механизированную электродуговую наплавку. В зависимости от условий эксплуатации арматуры для ручной электродуговой наплавки используют электроды УО-НИ-13/НЖ-2, ЦН-6Л, ЦН-12М, ЦН-24, а для механизированной под флюсом — проволоки сплошного сечения Нп-20Х14, Св-20Х13, Св-10Х17Т, Св-13Х25Т, порошковые проволоки ПП-АН106, ПП-АН133, ПП-АН157 и порошковую ленту ПЛ-АН150.

Механизированная электродуговая наплавка порошковыми проволоками по сравнению с ручной дуговой наплавкой штучными электродами обеспечивает получение более качественного наплавленного металла. Однако ее выполняют, по крайней мере, в три слоя, что ведет к перерасходу наплавочных материалов и увеличению продолжительности процесса наплавки [1]. Кроме того, при механизированной электродуговой наплавке деталей малых диаметров ( $\leq 200$  мм) имеют место трудности, связанные с удалением шлаковой корки с предыдущего наплавленного слоя. В этом случае при наплавке седел необходимо также применять формирующие устройства.

Как показал опыт, плазменно-порошковая наплавка обеспечивает получение наплавленного металла заданного химического состава уже в первом слое и лишена многих недостатков дуговой наплавки [2].

Цель данной работы — исследование свойств сплавов на основе железа применительно к плазменно-порошковой наплавке уплотнительных поверхностей арматуры различного назначения.

На основе имеющегося опыта для исследования были выбраны следующие материалы: хромистая сталь 22Х16Н2М; хромоникелькремнистая сталь 08Х17Н8С6Г (соответствует металлу, наплавленному электродами ЦН-6Л); сталь 13Х16Н8М5С5Г4Б (соответствует металлу, наплавленному электродами ЦН-12М, порошками зарубежного производства марок DS ZN12, Hoganas X-FeSP573, C1111, а также порошковой проволокой марки SK AF Antinit Dur500 [3]); опытные хромоникелькремнистые стали 04Х19Н10М4С5ГФА и 15Х19Н9М4С5ГЗД, которые отличаются содержанием углерода, ванадия, азота и меди; никелевый сплав Н77Х16С3Р3 (в качестве эталона).

Легирование опытных хромоникелькремнистых сталей азотом проводили с целью повышения их пластичности, а медью — для улучшения антифрикционных свойств. Молибден в стали 22Х16Н2М способствует увеличению ее жаростойкости и твердости в наплавленном состоянии.

Все указанные наплавочные материалы использовали в виде порошков фракции 80...200 мкм, которые изготавливали распылением жидкого металла азотом в промышленных условиях.

Плазменно-порошковую наплавку образцов для исследований выполняли на серийном наплавочном оборудовании, укомплектованном плазмотроном с локальным боковым вводом порошка в дугу, который обеспечивает стабильность наплавки при использовании ферромагнитных порошков [4].

Измерения твердости при рабочих температурах проводили на приборе «Помея» фирмы «Помп Сельтик» при нагрузке на индентор 108 Н, выдержке 1 мин и давлении воздуха в рабочей камере 1,33 МПа. Твердость измеряли на наплавленных образцах диаметром 37 мм и высотой 5 мм.



Рис. 1. Вид колец с наплавленным слоем для испытаний на термостойкость

Испытания на общую коррозионную стойкость проводили в водяном паре и на воздухе при температуре 700 °С в течение 500 ч, а также в дистиллированной воде при температуре 300 °С и давлении 20 МПа в течение 1000 ч. Образцы размером 40×10×3,5 мм вырезали из наплавленного металла после отпуска при температуре 600 °С в течение 2 ч.

Стойкость наплавленного металла к межкристаллитной коррозии (МКК) изучали по методу АМУ (ГОСТ 6032–2003) [5] и электрохимическим методом [6]. Для последнего образцы размером 30×10×50 мм выдерживали в растворе  $\text{HClO}_4 + \text{NaCl}$  после провоцирующего отпуска при температурах 650, 730 и 850 °С в течение 2 ч. Склонность к МКК оценивали по росту анодного тока растворения  $i$  при постоянном потенциале +0,3 В в пределах активационного участка.

Испытания на стойкость против задиранья проводили на специальном стенде в среде пара на следующих режимах:  $T = 300$  °С и  $P = 12,0$  МПа;  $T = 540$  °С и  $P = 16,0$  МПа;  $T = 545$  °С и  $P = 25,5$  МПа. Образцами служили реальные детали затвора задвижки DN150, уплотнительные поверхности которой работают в ус-

ловиях наибольшего удельного давления. Максимальное количество открытий и закрытий при испытаниях было принято равным 100. Путь относительного перемещения деталей затвора под действием давления составлял за один цикл около 32 мм. Контроль за состоянием затвора при испытаниях производили по протечкам пара. Допускаемая протечка пара составляла около 55 г/мин. Показателем стойкости служило значение удельного задира, т. е. отношение максимальной глубины царапин (в микрометрах) к суммарному пути трения (в метрах).

Испытаниям на стойкость против растрескивания при теплосменах (на термостойкость) подвергали кольца из стали 20 наружного диаметра 130 мм, шириной 18 мм и высотой 25 мм с односторонней наплавкой на торцевой поверхности (рис. 1). Толщина наплавленного слоя составляла 3,8...4,0 мм. После наплавки проводили отпуск при температуре 600 °С в течение 2 ч. Испытания предусматривали нагрев колец в электропечи до 300 °С и охлаждение их в проточной воде комнатной температуры. Термическую выносливость исследуемых сплавов оценивали по количеству теплосмен до появления трещин в наплавленном слое. Наличие трещин контролировали люминесцентным методом.

Зависимость твердости исследуемых сплавов от температуры показана на рис. 2. Там же для сравнения приведена горячая твердость никелевого и кобальтового сплавов, которые отличаются превосходными служебными характеристиками. Все типы наплавленного металла на основе железа, за исключением 08X17H8C6Г, сохраняют достаточно высокий уровень твердости при  $T = 400...600$  °С. Наибольшая горячая твердость у серийного сплава 13X16H8M5C5Г4Б и опытного наплавленного металла 15X19H9M4C5Г3Д, однако она ниже, чем у никелевых и кобальтовых сплавов.

В водяном паре и на воздухе все материалы на основе железа окисляются существенно меньше, чем сплав на основе никеля. По коррозионной стойкости в дистиллированной воде все исследуемые типы наплавленного металла принадлежат к группе «весьма стойких» (ГОСТ 13819–68).

Как видно по анодным потенциометрическим кривым прямого хода (рис. 3), наплавленные металлы 22X16H2M и 08X17H8C6Г характеризуются увеличением тока  $i$  при потенциале +0,3 В, что свидетельствует об их склонности к МКК. Остальные типы наплавленного металла проявляют стойкость к МКК, поскольку не имеют активационного участка при потенциале +0,3 В.

При испытаниях на МКК по методу АМУ все образцы после кипячения в растворе, содержащем 160 г/дм<sup>3</sup>  $\text{CuSO}_4$  и 100 г/дм<sup>3</sup>  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , в течение 24 ч при загибании на угол 90° разрушались. Комплексные исследования показали, что у наплав-

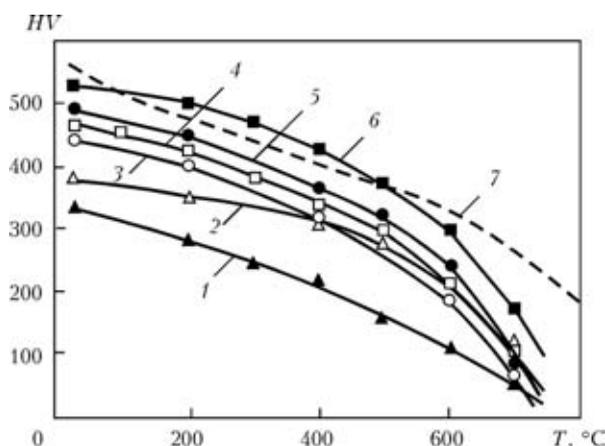


Рис. 2. Зависимость твердости HV наплавленного металла для упрочнения уплотнительных поверхностей от температуры [6]: 1 — 08X17H8C6Г; 2 — 04X19H10M4C5ГФА; 3 — 22X16H2M; 4 — 13X16H8M5C5Г4Б; 5 — 15X19H9M4C5Г3Д; 6 — Н77X16C3P3; 7 — стеллит № 6

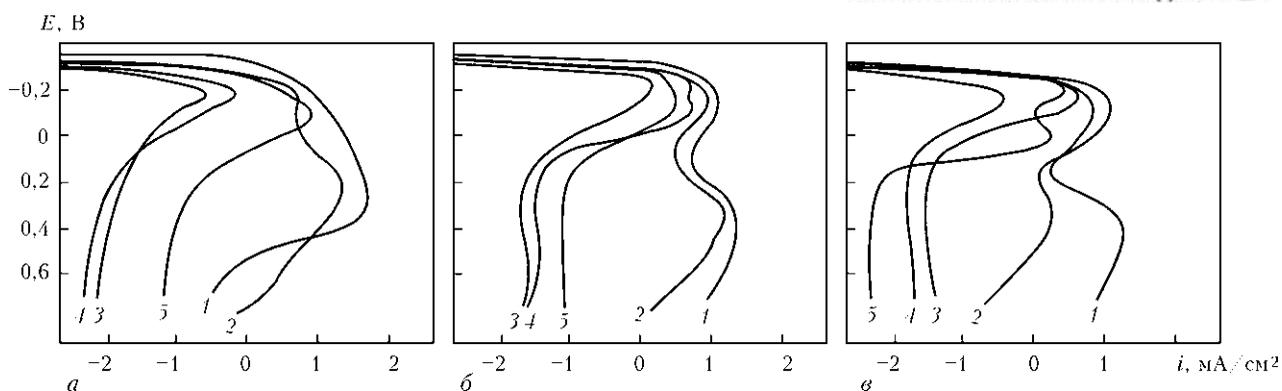


Рис. 3. Анодные потенциометрические кривые прямого хода наплавленного металла при различных температурах отпуска 650 (а), 730 (б) и 850 (в) °С в течение 2 ч: 1 — 22Х16Н2М; 2 — 08Х17Н8С6Г; 3 — 13Х16Н8М5С5Г4Б; 4 — 04Х19Н10М4С5ГФА; 5 — 15Х19Н9М4С5Г3Д

ленных металлов 22Х16Н2М и 08Х17Н8С6Г в результате обеднения приграничной области зерен хромом имеет место развитие МКК в глубь наплавленного слоя.

Обычно стойкость материалов уплотнительных поверхностей на задиране и термическую выносливость определяют по методикам, предусматривающим испытания небольших образцов, вырезанных из наплавленного металла либо наплавленных дисков диаметром 45 мм на специальных лабораторных установках, которые имитируют рабочие условия [7, 8].

В отличие от испытаний малых образцов проведенные нами опыты на реальных деталях позволяют учесть ряд факторов, способных вызвать или ускорить образование трещин термической усталости и задигов, а именно состояние структуры наплавленного слоя, наличие в нем значительных напряжений (рабочих, сварочных, термических и др.), а также технологических дефектов (рыхлот, несплавлений, неметаллических включений и др.).

Испытания показали, что наплавленный металл типа хромистой стали 22Х16Н2М имеет хорошую стойкость против задиранья при температуре пара 300 °С и давлении 12 МПа, но в условиях высоких параметров рабочей среды (соответственно 545 °С и 25,5 МПа) его стойкость

существенно уменьшается (таблица), хотя при этом горячая твердость остается на достаточно высоком уровне (см. рис. 2).

Среди хромоникелькремнистых материалов наилучшую стойкость против задиранья имел наплавленный металл 15Х19Н9М4С5Г3Д. Как при ручной наплавке электродами ЦН-6Л, так и плазменной наплавке с использованием в качестве присадки порошка наплавленный металл типа 08Х17Н8С6Г уступает по стойкости против задиранья 13Х16Н8М5С5Г4Б [9, 10]. Как видно из таблицы, все типы наплавленного металла на основе железа по стойкости против задиранья существенно уступают никелевым сплавам.

Низкой термостойкостью характеризуется наплавленный металл 13Х16Н8М5С5Г4Б независимо от способа его наплавки и вида наплавочного материала (рис. 4). Следует отметить, что термостойкость рассматриваемых материалов, как правило, уменьшается с увеличением их твердости и сопротивляемости задиранью, что обычно сопровождается резким снижением пластичности. Вместе с тем представляется возможным за счет рационального комплексного легирования и модифицирования наплавленного металла системы Fe–Cr–Ni–Si–Mo обеспечить оптимальный уровень этих характеристик. Как видно из рис. 3, оптимальную термостойкость имел наплавленный

**Результаты испытаний на задиране и коррозионную стойкость [9]**

Тип наплавленного металла	Твердость наплавленного металла HRC	Удельный задр, мкм/м	Длительность испытаний, ч		
			500		1000
			Водяной пар	Воздух	Дистиллированная вода
08Х17Н8С6Г	31...34	9,3	0,0135	0,0186	0,0097
13Х16Н8М5С5Г4Б	45...49	4,6	0,0093	0,0145	0,0061
22Х16Н2М	42...45	14,5	0,0087	0,0137	0,0081
15Х19Н9М4С5Г3Д	48...51	1,8	0,0075	0,0132	0,0051
04Х19Н10М4С5ГФА	37...42	2,8	0,0061	0,0121	0,0041
Н77Х16С3Р3	51...53	1,3	0,0991	0,0250	0,0038

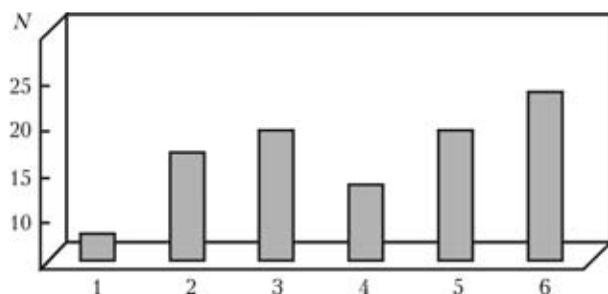


Рис. 4. Термостойкость наплавленного металла [9]: 1 — 13X16H8M5C5Г4Б; 2 — 22X16H2M; 3 — 15X19H9M4C5Г3Д; 4 — 04X20H10M4C5ГФА; 5 — H77X16C3P3; 6 — 08X17H8C6Г (*N* — количество теплов до появления первой трещины)

металл 15X19H9M4C5Г3Д. Имея примерно одинаковую твердость со сплавом на никелевой основе типа H77X16C3P3 (*HRC* 50...51), он обеспечивает примерно равную с ним термостойкость.

Структура наплавленного металла 15X19H9M4C5Г3Д в исходном состоянии аустенитно-ферритная, объемная доля ферритной фазы составляет 40 %. В зависимости от типа основного металла, его теплофизических характеристик, определяющих условия кристаллизации наплавленного металла, структура упомянутого типа наплавленного металла заметно изменяется (рис. 5).

После наплавки этот металл имеет сравнительно высокую твердость (*HRC* 42...44), что указывает на возможность присутствия в его структуре

карбидно-силицидной фазы. Как известно, концентрация элементов-ферритизаторов (хрома, кремния, молибдена и др.) в ферритной фазе выше, чем в аустенитной; более высока в ней и их диффузионная подвижность, что способствует более интенсивному упрочнению ферритной составляющей за счет процессов ее упорядочения и распада при выдержках в соответствующем диапазоне температуры. Отпуск в интервале 650...850 °C приводит к повышению твердости этого типа наплавленного металла до *HRC* 46... 51 и по данным магнитных измерений сопровождается заметным уменьшением количества феррита — тем более значительным, чем больше было его в исходной структуре (рис. 5). Возможно, распад феррита в этих условиях происходит по следующей схеме:  $\alpha \rightarrow \gamma'' + \text{карбиды типа } \text{Me}_6\text{C} + \text{интерметаллиды типа } \sigma\text{-фазы} + \text{силициды типа } \text{Cr}_3\text{Ni}_5\text{Si}_2$  (где  $\alpha$  — ферритная фаза;  $\gamma''$  — вторичный аустенит).

Как видно из рис. 6, благодаря характерному для плазменной наплавки малому проплавлению основного металла требуемая твердость и заданный химический состав наплавленного металла обеспечивается уже на расстоянии 0,3...0,5 мм от поверхности сплавления. В результате старения при 600 °C в течение 500 и 1000 ч процессы распада феррита приобретают большую завершенность. Существенных изменений твердости наплавленного слоя не наблюдается. В зоне сплав-

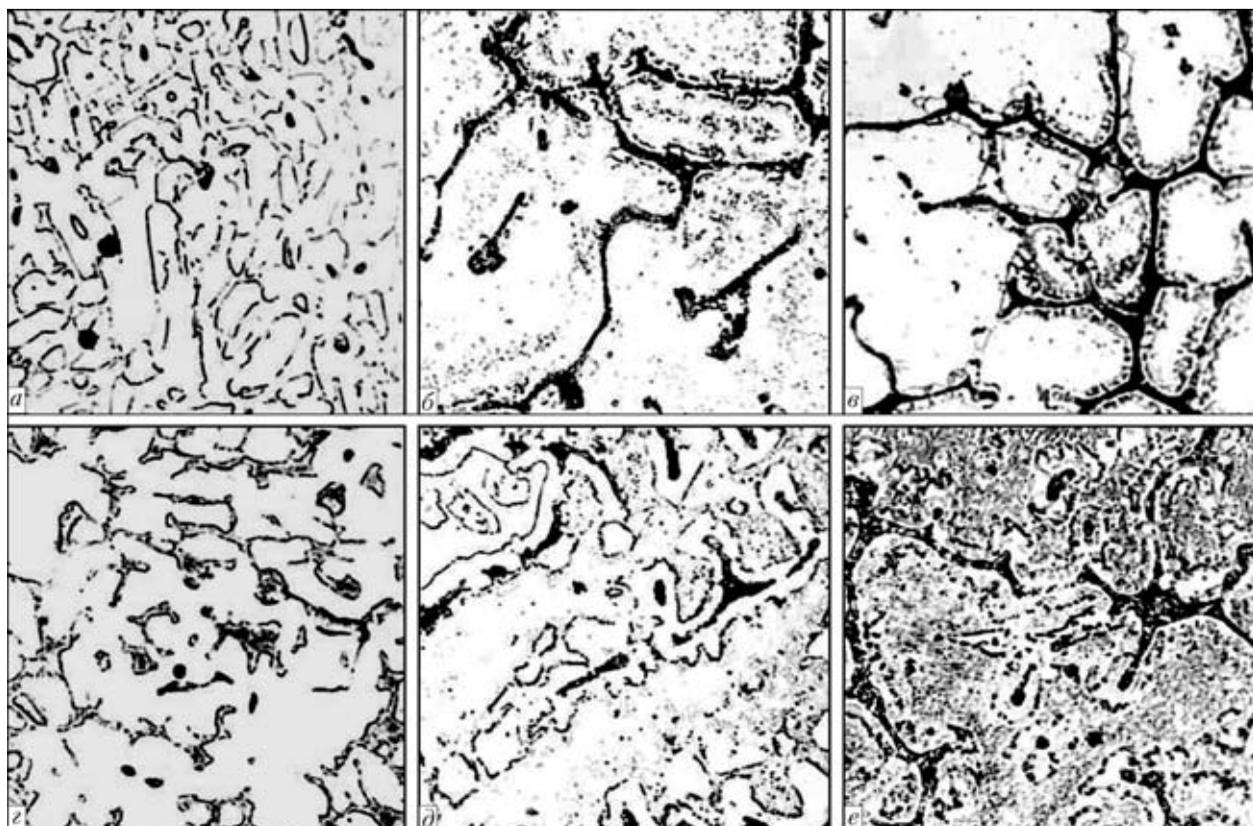


Рис. 5. Микроструктуры ( $\times 500$ ) металла, наплавленного порошком 15X19H9M4C5Г3Д на стали 20 (*а, г*), 12X1МФ (*б, д*) и 08X18H10Т (*в, е*) в исходном состоянии (*а-в*) и после отпуска при температуре 650 °C в течение 2 ч (*г-е*)

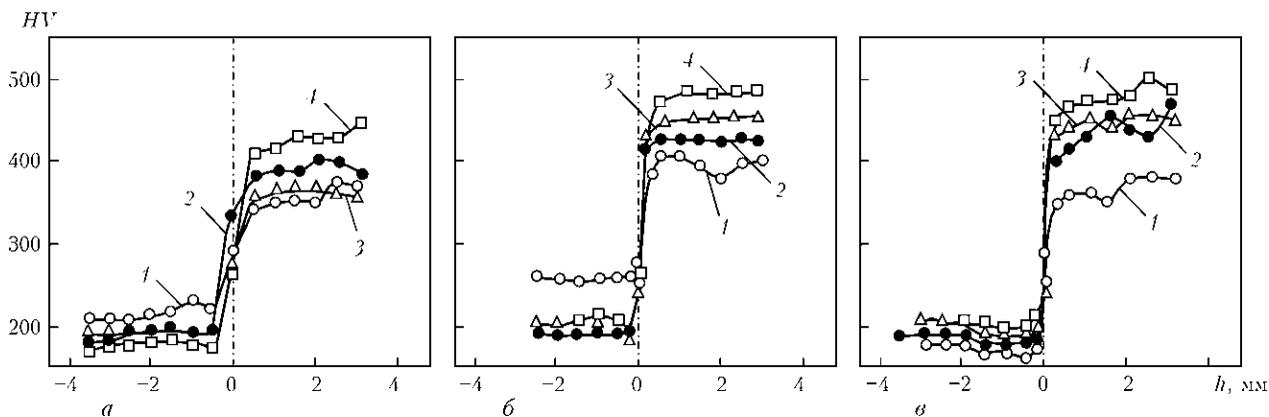


Рис. 6. Распределение твердости по высоте наплавленного слоя 15X19H9M4C5ГЗД: а — основного металла сталь 20; б — то же сталь 12X1MФ; в — то же сталь 08X18H10T; 1 — исходное состояние; 2 — после отпуска; 3, 4 — после отпуска и старения при  $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение соответственно 500 и 1000 ч

ления не образуется твердых и хрупких составляющих, что должно благоприятно сказываться на работоспособности и надежности наплавленной арматуры.

Проведенные испытания сплавов на основе железа в условиях, максимально приближающихся к условиям работы энергетической арматуры, показали, что наилучшим сочетанием коррозионной стойкости, горячей твердости, стойкости против задира, термической выносливости характеризуется наплавленный металл 15X19H9M4C5ГЗД. По термической выносливости при резких теплосменах и стойкости против задира этот материал не уступает известным хромоникелевым сплавам с бором и кремнием и существенно превосходит металл 13X16H8M5C5Г4Б (наплавка электродами ЦН-12М и его аналогами). Хромистая сталь 22X16H2М по ряду эксплуатационных свойств и стоимости вполне приемлема для наплавки уплотнительных поверхностей деталей общепромышленной арматуры, которые эксплуатируются при температуре до  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлении 16 МПа.

1. Химическая макронеоднородность металла, наплавленного различными электродными материалами / В. Б. Еремеев, Ю. В. Стреляный, В. А. Корбут, Л. В. Песня // Свойства и испытания наплавленного металла: Теорети-

ческие и технологические основы наплавки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. — С. 36–42.

2. Переплетчиков Е. Ф. Плазменно-порошковая наплавка износо- и коррозионностойких сплавов в арматуростроении // Автомат. сварка. — 2004. — № 10. — С. 37–43.

3. Степин В. С., Старченко Е. Г. Применение дисперсионно-твердеющих Cr–Ni–Si-сталей для элементов затворов и наплавки уплотнительных поверхностей арматуры ТЭС и АЭС // Арматуростроение. — 2010. — № 3. — С. 66–69.

4. Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменная наплавка. — Киев: Экотехнология, 2007. — 292 с.

5. ГОСТ 6023–2003. (Взамен ГОСТ 6032–89). Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии. — Минск: Изд-во стандартов, 2003. — 23 с.

6. Электрохимический способ количественного определения склонности сталей к межкристаллитной коррозии / Л. Л. Медведева, В. М. Княжева, Я. М. Колотыркин, С. Г. Бабич // Защита металлов. — 1975. — II, № 6. — С. 699–705.

7. Ратнер А. В. Арматура для пара сверхкритических параметров. — М.-Л.: Энергия, 1965. — 256 с.

8. Оценка стойкости к теплосменам материалов уплотнительных поверхностей арматуры / Б. Я. Ивницкий, В. А. Галанов, В. В. Чернышова, Ю. Н. Сидоренко // Энергомашиностроение. — 1975. — № 7. — С. 27–29.

9. Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рабинович В. И. Плазменная наплавка в энергетическом арматуростроении. — М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1970. — 36 с.

10. Благов Э. Е., Ивницкий Б. Я. Дроссельно-регулирующая арматура в энергетике. — М.: Энергия, 1974. — 264 с.

The paper gives the results of investigation of the properties of iron-based alloys designed for plasma-powder surfacing of sealing surfaces of various-purpose reinforcement bars. It is shown that 15Kh19N9M4S5G3D deposited metal features the best combination of corrosion resistance, hot hardness, burr resistance, and thermal endurance.

Поступила в редакцию 10.05.2011