



УДК 669.187.56.001.1

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АРМАТУРНОГО ПРОФИЛЯ С КОРРОЗИОННО-СТОЙКИМ ПЛАКИРУЮЩИМ СЛОЕМ ИЗ СТАЛИ 316L

Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, В. И. Ус, В. М. Ярош

Рассмотрены особенности конструирования биметаллических заготовок, предназначенных для прокатки арматурного профиля с коррозионно-стойким плакирующим слоем из низкоуглеродистой аустенитной стали типа 316 L. С помощью диаграммы А. Шеффлера проведена оценка ожидаемой структуры коррозионно-стойкого слоя биметаллической заготовки диаметром 350 мм, наплавленной жидким металлом способом электрошлаковой наплавки жидким металлом, в зависимости от толщины наплавки, глубины проплавления и химического состава основного слоя.

Specifics is shown in designing of bimetel billets designed for rolling a reinforcing section with a corrosion-resistant cladding layer of low-carbon austenitic steel of 316L type. Using the diagrams of A.Schaeffler, the evaluation of expected structure of a corrosion-resistant layer of 350 mm diameter bimetel billet, deposited using an electroslag cladding with a molten metal, is made depending on thickness of cladding, depth of penetration and chemical composition.

Ключевые слова: биметаллический слиток; биметаллическая заготовка; биметаллический арматурный профиль; железобетонные конструкции; электрошлаковая наплавка жидким металлом; арматурная сталь с коррозионно-стойким плакирующим слоем

Преждевременное разрушение железобетонных конструкций из-за коррозии арматурной стали — давняя и серьезная проблема. При использовании конструкций с тонким слоем бетона в условиях, например морского климата или воздействия размораживающих солей, необходима дополнительная защита арматурного каркаса от коррозии [1]. На рис. 1 показано типичное разрушение железобетонной конструкции, вызванное коррозией в процессе эксплуатации.

В настоящее время в мировой практике снижения металлоемкости железобетонных конструкций достигают путем повышения прочностных характеристик арматуры. Однако применение высокопрочных сталей для арматурных профилей может ограничиваться из-за резкого снижения их коррозионно-механической прочности [2].

Одним из перспективных способов решения указанной проблемы может быть применение биметаллической арматуры с основным слоем из высокопрочной стали и плакирующим слоем из коррозионно-стойкой аустенитной стали толщиной 5...50 % общей толщины биметаллического профиля. Бла-

годаря разработанному в ИЭС им. Е. О. Патона способу электрошлаковой наплавки жидким металлом (ЭШН ЖМ) с применением токоподводящего кристаллизатора открываются новые возможности для совершенствования технологии получения биметаллических заготовок различного назначения [3, 4], в том числе в производстве биметаллических арматурных профилей для ответственных железобетонных конструкций [5].

Способ ЭШН ЖМ отличается рядом преимуществ, главными из которых являются высокое со-



Рис. 1. Общий вид железобетонных конструкций автодорожного моста после 19 лет эксплуатации

© Л. Б. МЕДОВАР, В. Я. САЕНКО, В. И. УС, В. М. ЯРОШ, 2005

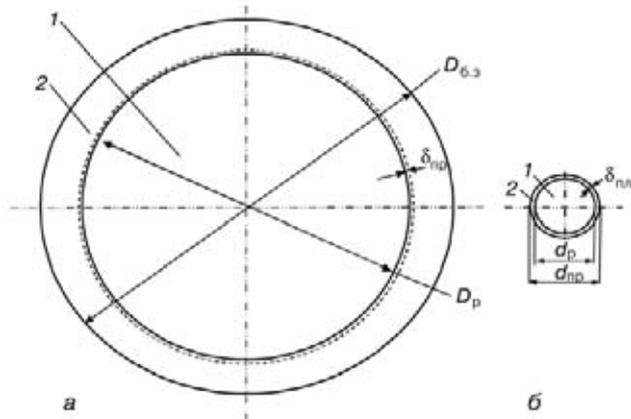


Рис. 2. Поперечное сечение биметаллической заготовки (а) и готового биметаллического профиля (б): 1 — основной; 2 — плакирующий слой

противление срезу плакирующего и основного слоев (≥ 400 МПа) и возможность получения биметаллического проката практически с любым соотношением толщин плакирующего и основного слоев.

При производстве биметаллических полуфабрикатов перлитная сталь—аустенитная сталь вследствие горячего деформирования в большинстве случаев при установившемся процессе происходит пропорциональная деформация слоев разнородных металлов [6]. При этом сохраняется постоянным объемный коэффициент плакирования $n_{пл}$ — отношение площади поперечного сечения плакирующего слоя $F_{пл}$ к общей площади поперечного сечения готового профиля $F_{общ}$ или передельной заготовки:

$$n_{пл} = F_{пл} / F_{общ}. \quad (1)$$

Поскольку при деформировании зачастую происходит одинаковая осевая деформация слоев, то имеется возможность определения размеров слоев исходной биметаллической заготовки по заданным размерам слоев в готовом биметаллическом профиле [7].

Применительно к производству биметаллической арматуры с использованием горячего передела биметаллических заготовок способом ЭШН ЖМ (рис. 2) объемный коэффициент плакирования может быть выражен следующим отношением:

$$n_{пл} = F_{пл} / F_{общ} = (d_{np}^2 - d_p^2) / d_{np}^2 = (D_{6.3}^2 - D_p^2) / D_{6.3}^2, \quad (2)$$

где d_{np} и $D_{6.3}$ — диаметры соответственно готового профиля и биметаллической заготовки; d_p и D_p — разделительные диаметры соответственно плакирующего и основного слоев в готовом профиле и в биметаллической заготовке.

Размеры исходной биметаллической заготовки рассчитывают с учетом заданных размеров готовых биметаллических профилей и технических требований к ним, а также возможностей оборудования для ЭШН ЖМ и горячего передела заготовок.

Средняя толщина плакирующего слоя $\delta_{пл}$ в готовом биметаллическом профиле в зависимости от

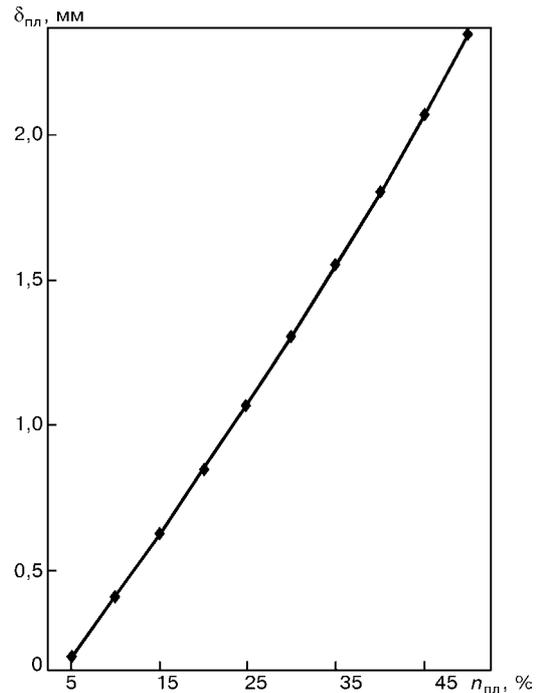


Рис. 3. Толщина плакирующего $\delta_{пл}$ слоя в биметаллическом арматурном профиле диаметром 16 мм в зависимости от заданного объемного коэффициента плакирования $n_{пл}$

объемного коэффициента плакирования может быть вычислена по формуле, приведенной в работе [7]:

$$\delta_{пл} = 0,5d_{np}[1 - (1 - n_{пл})^{1/2}]. \quad (3)$$

Результаты расчета по формуле (3) средней толщины плакирующего слоя для биметаллического круглого профиля диаметром 16 мм показывают, что толщина плакирующего слоя в зависимости от заданного объемного коэффициента плакирования $n_{пл} = 5... 50 \%$ составляет 0,20... 2,34 мм (рис. 3).

Следует отметить, что в производстве биметаллического плоского или профильного проката и труб применяют два вида заготовок: двухслойные и биметаллические. В двухслойных (пакетах, составных цилиндрических и трубных заготовках и др.) отсутствует металлическая связь между слоями, в отличие от биметаллических, где между слоями существуют межзатомные связи, т. е. заготовки представляют собой неразъемное соединение разнородных металлов.

При производстве биметаллических прутков и труб с использованием двухслойных заготовок необходимо учитывать минимально допустимую степень деформации, обеспечивающую надежное сцепление соединяемых слоев. Так, при прокатке двухслойных заготовок на непрерывном стане для обеспечения прочного сцепления слоев в биметаллической трубе деформация по стенке должна быть не менее 40 %; коэффициент вытяжки при прессовании — не менее 5,5 [8]. Кроме того, в начальной стадии прессования металл сердцевины течет значительно быстрее металла поверхностных слоев. Для двухслойной заготовки это усугубляется еще и



тем, что в начальный период горячей деформации еще нет сцепления между сердечником и плакировкой, в результате чего резко нарушается начальное соотношение площадей сердечника и плакировки, что приводит, как правило, к неравномерному распределению плакирующего слоя по длине профиля [9].

Важной особенностью способа ЭШН ЖМ является возможность наплавлять плакирующий металл за один проход, при этом толщина наплавляемого слоя в биметаллическом слитке может быть задана в широких пределах (20...120 мм и более) [10]. Прочное соединение слоев в готовом биметаллическом профиле не зависит от степени обжатия при горячей деформации и достигается еще до прокатки в результате гарантированного оплавления основного металла при ЭШП (рис. 4).

Кроме того, в процессе наплавки происходит смешивание оплавленного металла с наплавляемым, как правило, имеющим более низкое содержание углерода, по сравнению с металлом, на который производится наплавка. При большой глубине проплавления это сопряжено с нежелательным повышением содержания углерода в наплавленном металле сверх нормативного уровня и как следствие — с опасностью понижения стойкости плакирующего слоя против межкристаллитной коррозии.

Проведена оценка влияния глубины проплавления основного металла и его химического состава на содержание углерода и основных легирующих элементов в наплавленном металле с использованием ЭШН ЖМ стали 316 L, имеющей в соответствии со стандартом UNS No.S31603 низкое содержание

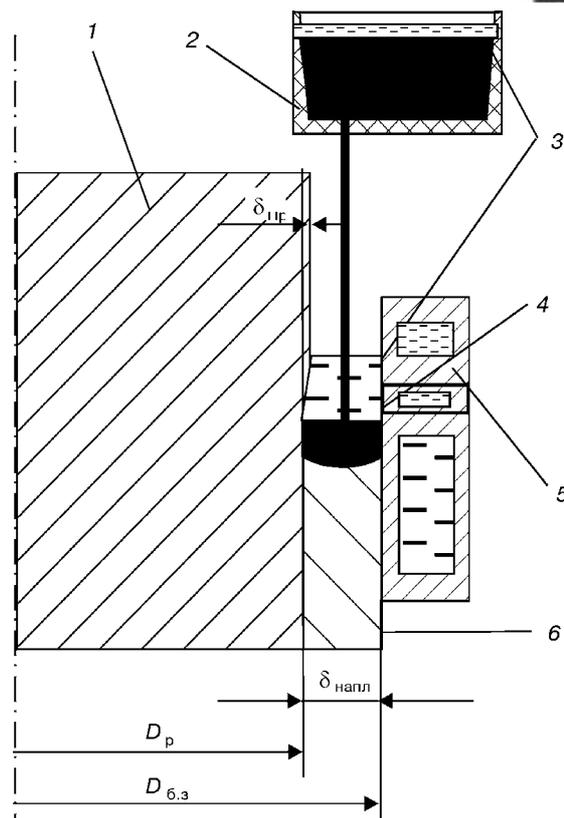


Рис. 4. Принципиальная схема получения биметаллической заготовки способом ЭШП ЖМ для производства арматурного биметаллического профиля с коррозионно-стойким плакирующим слоем: 1 — основной металл; 2 — устройство для хранения и заливки жидкого металла; 3 — шлаковая ванна; 4 — металлическая ванна; 5 — токоподводящий кристаллизатор; 6 — наплавленный слой

Химический состав нержавеющей и арматурных сталей								
Марка стали	Стандарт	Массовая доля элементов, %						
		C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	Другие элементы
08X17T	ГОСТ 5632-72	≤ 0,08	17	—	Г 0,80	≤ 1,00	—	Ti = 5C - 0,8
08X18H10T	ГОСТ 5632-72	≤ 0,08	18	10,00	≤ 2,00	≤ 0,80	—	Ti = 5C - 0,7
304	S30400	≤ 0,08	19	9,50	9,50	—	—	—
304L	S30403	≤ 0,03	19	10,00	10,00	—	—	—
316	S31600	≤ 0,08	17	12,00	12,00	—	2,5	—
316L	S31603	≤ 0,03	17	12,00	12,00	—	2,5	—
316LN	S31653	≤ 0,03	17	12,00	12,00	—	2,5	N = 0,13
2205	S31803	≤ 0,03	22	5,00	5,00	—	3,0	N = 0,14
LF2	40011	0,17	0,13	0,03	1,27	0,28	0,004	V = 0,004 Nb = 0,003 Cu = 0,05 Al = 0,38 S = 0,005 P = 0,01
10ГТ, Ас-II	ГОСТ 5781-82	≤ 0,13	≤ 0,3	—	1,00...1,40	0,45...0,65	—	—
35ГС, А-III	ГОСТ 5781-82	0,30...0,37	≤ 0,3	≤ 0,3	0,80...1,20	0,60...0,90	—	—
25Г2С, А-III	ГОСТ 5781-82	0,20...0,29	≤ 0,3	≤ 0,3	1,20...1,60	0,60...0,90	—	—
08Г2С, Ат-V	ГОСТ 10884-81	0,09...0,11	≤ 0,3	≤ 0,3	1,83...1,97	0,79...0,85	—	—

Примечание. Химический состав стали LF2 приведен в состоянии поставки.

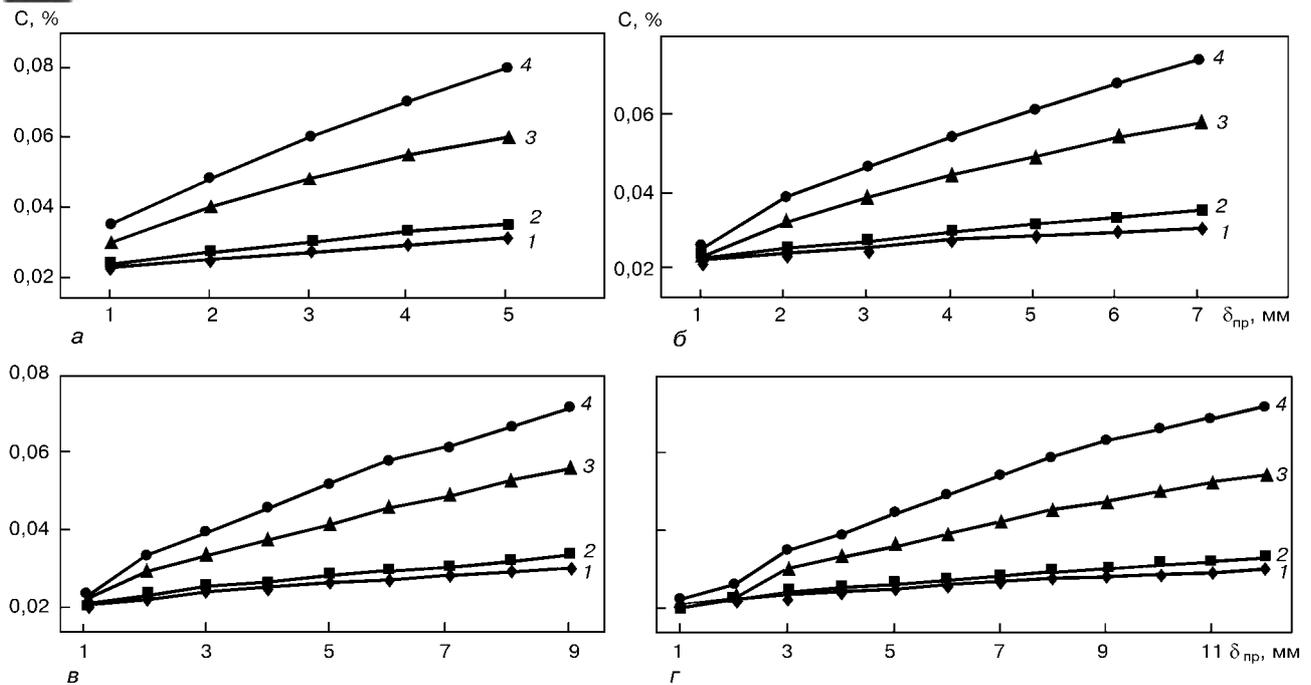


Рис. 5. Расчетное содержание углерода в коррозионно-стойком слое биметаллической заготовки диаметром 350 мм при наплавке способом ЭШН ЖМ стали 316L на сталь марок 08Г2С (1), 10ГТ (2), 25Г2С (3) и 35ГС (4) в зависимости от глубины проплавления $\delta_{пр}$ при толщине наплавленного $\delta_{напл}$ слоя: а — 20; б — 30; в — 40; г — 50 мм

углерода ($\leq 0,03\%$). В качестве материала основного слоя для расчета выбраны арматурные стали марок 10ГТ, 35ГС, 25Г2С и 08Г2С (таблица).

Расчет содержания углерода, хрома, никеля, молибдена в металле наплавки производили для биметаллической заготовки диаметром 350 мм при условии наплавления стали 316 L на ось из сталей 10ГТ, 35ГС, 25Г2С, 08Г2С и наплавки различной толщины (20, 30, 40 и 50 мм); при этом для каждой толщины изменяли глубину проплавления от 1 до 12 мм (рис. 5, 6). Для расчетов принят средний химический состав указанных в таблице сталей. Содержание углерода в исходной стали 316L равнялось 0,02 %. Рассчитанные по формуле (2) объемные коэффициенты плакирования биметаллических заготовок с толщиной наплавки коррозионно-стойкого слоя 20, 30, 40 и 50 мм составляли соответственно 0,22; 0,32; 0,41; 0,49.

Допустимая максимальная глубина проплавления заготовки основного металла при ЭШН ЖМ стали 316 L зависит от содержания углерода в основном металле и от толщины наплаваемого слоя. Так, если для стали 08Г2С при толщине наплавки 20 мм допустимая глубина проплавления, при которой выполняется требование $C \leq 0,03\%$ для наплавленного слоя из стали 316 L, составляет 4,5 мм, то для стали 25Г2С эта глубина проплавления не должна превышать 1 мм, а для стали 35ГС — 0,8 мм. При толщине наплавки 40 мм допустимая глубина проплавления составляет соответственно 9,0; 2,0 и 1,8 мм, а для наплавки толщиной 50 мм — 12; 3 и 2,3 мм.

С помощью диаграммы А. Шеффлера [11] проведена оценка ожидаемой структуры коррозионно-стойкого слоя, наплавленного способом ЭШН ЖМ

стали 316 L, в зависимости от толщины наплавки, глубины проплавления и химического состава основного слоя (арматурных сталей марок 08Г2С и 25Г2С) биметаллической заготовки. При толщине наплавки 20 мм для глубины проплавления 1 мм ожидаемая структура металла наплавленного слоя на сталь 25Г2С — аустенитная, а при наплавке на сталь 08Г2С в аустенитной структуре наплавленного слоя возможно появление ферритной составляющей (рис. 7).

С увеличением глубины проплавления $\delta_{пр}$ до 4 мм в слое, наплавленном как на сталь 08Г2С, так и на сталь 25Г2С, сохраняется чисто аустенитная структура. При возрастании $\delta_{пр}$ до 5 мм в случае наплавки на сталь 08Г2С возможно появление мартенситной составляющей в металле наплавленного слоя, а для стали 25Г2С сохраняется чисто аустенитная структура. Это объясняется более высоким содержанием углерода (0,033 %) в металле слоя, наплавленного на сталь 25Г2С, по сравнению с наплавленным на сталь 08Г2С (0,029 %), который является сильным аустенизатором (наравне с азотом). Следует, однако, отметить, что при этом содержание углерода в металле наплавки на сталь 25Г2С несколько превышает допустимое для стали 316L ($C \leq 0,03\%$).

При увеличении толщины наплавки относительная доля основного металла в наплавленном слое соответственно уменьшается и определяется глубиной проплавления.

Изучение характера образования структуры в металле плакирующего слоя биметаллической заготовки диаметром 350 мм в зависимости от изменения толщины наплавки от 30 до 50 мм показывает, что при глубине проплавления 5 мм в металле, напла-

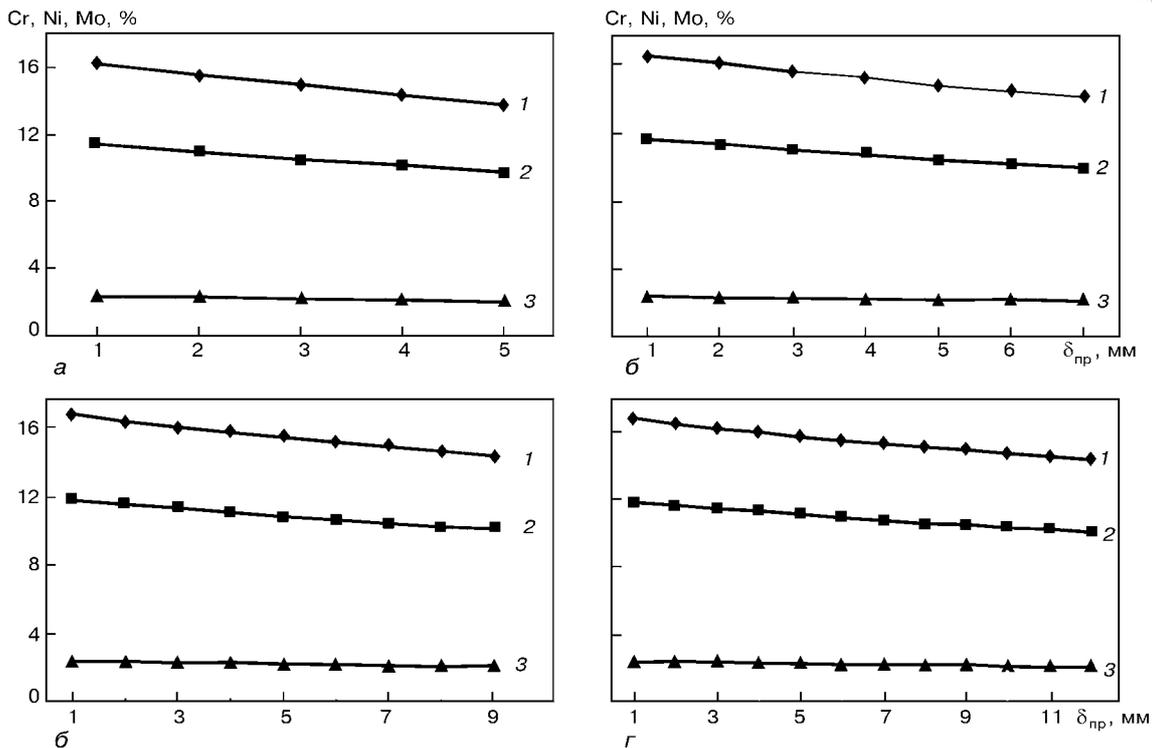


Рис. 6. Расчетное содержание хрома (1), никеля (2), молибдена (3) в коррозионно-стойком слое биметаллической заготовки диаметром 350 мм при наплавке способом ЭШН ЖМ стали 316L на сталь марок 08Г2С, 10ГТ, 25Г2С и 35ГС в зависимости от глубины проплавления при толщине наплавленного слоя: а – 20; б – 30; в – 40; г – 50 мм

ленным как на сталь 08Г2С, так и на сталь 25Г2С, обеспечивается аустенитная структура. Важно и то, что во всех рассматриваемых случаях содержание углерода в металле наплавки не превышает 0,03 %.

Следует иметь ввиду, что применение арматуры класса А400 вместо А500С позволило сократить металлоемкость железобетона в среднем на 10 % [12]. Низкое содержание углерода (не более 0,22 %) в

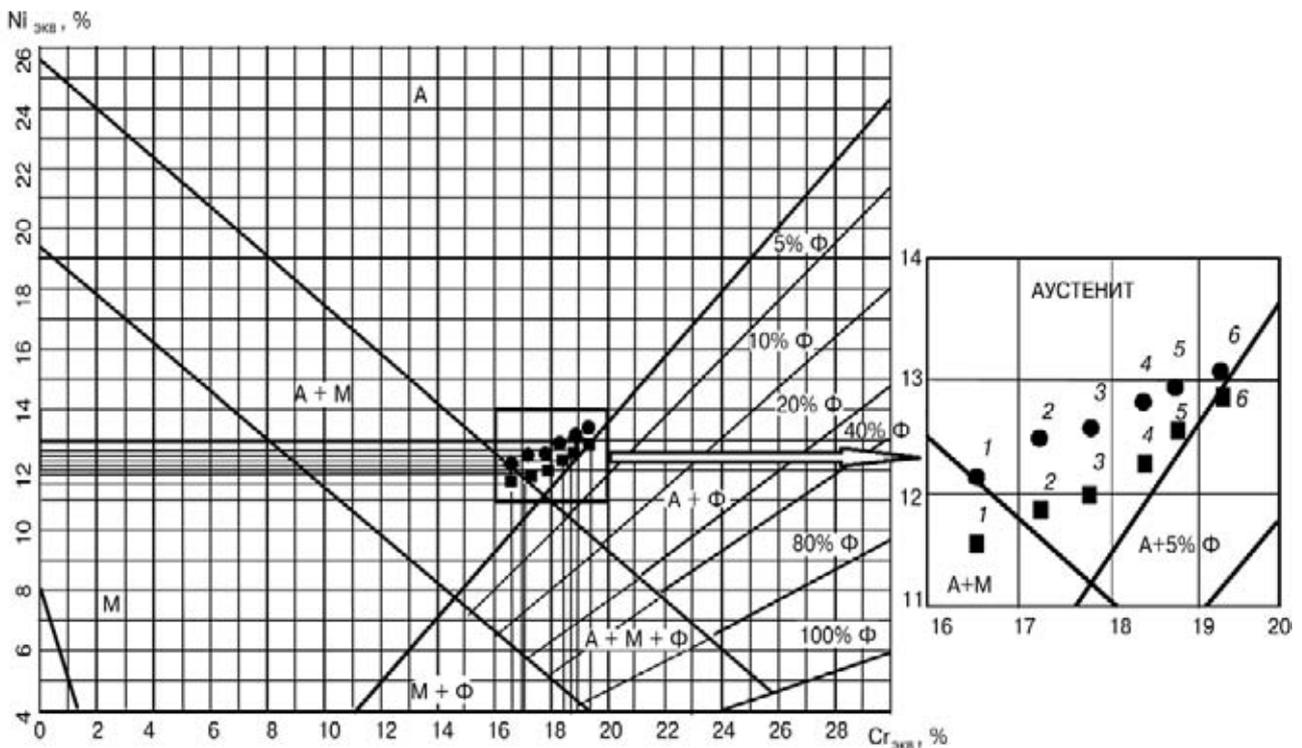


Рис. 7. Определение ожидаемого структурного состава металла плакирующего слоя биметаллической заготовки диаметром 350 мм, наплавленного сталью 316L способом ЭШН ЖМ в зависимости от толщины наплавки $\delta_{напл}$, глубины проплавления $\delta_{пр}$ и химического состава основного слоя (■ – 08Г2С; ● – 25Г2С): 1 – $\delta_{пр} = 5$ мм, $\delta_{напл} = 20$ мм; 2 – $\delta_{пр} = 4$, $\delta_{напл} = 20$; 3 – $\delta_{пр} = 5$, $\delta_{напл} = 30$; 4 – $\delta_{пр} = 5$, $\delta_{напл} = 40$; 5 – $\delta_{пр} = 5$, $\delta_{напл} = 20$; 6 – $\delta_{пр} = 1$, $\delta_{напл} = 20$; А – аустенит; М – мартенсит; Ф – феррит; $Ni_{экв} = \% Ni + 30 \% C + 0,5 \% Mn$; $Cr_{экв} = \% Cr + \% Mo + 1,5 \% Si + 0,5 \% Nb + 2,0 \% Ti + 2,0 \% V + \% W$



сочетании с термомеханической обработкой обеспечивает улучшенную свариваемость и пластичность, повышенную вязкость и долговечность.

Таким образом, при изготовлении способом ЭШН ЖМ биметаллических заготовок диаметром 350 мм коррозионно-стойкой наплавкой толщиной 20 мм из низкоуглеродистой аустенитной стали типа 316L в качестве материала основного слоя предпочтение следует отдавать арматурным сталям типа 08Г2С, содержание углерода в которых не превышает 0,1%. Применение такого типа сталей позволяет обеспечить стабильную аустенитную структуру и требуемое содержание углерода ($\leq 0,03\%$) в наплавленном металле при $\delta_{пр}$ основного металла до 4 мм. Для сталей типа 25Г2С такое содержание углерода в наплавке может быть обеспечено, если глубина проплавления составляет ≤ 1 мм. При увеличении толщины наплавленного коррозионно-стойкого слоя до 30, 40 и 50 мм технологические возможности для наплавки на сталь типа 25Г2С расширяются, и допустимые значения глубины проплавления составляют соответственно 1,5; 2,5 и 3,0 мм.

1. Манг Р., Мюллер Г. Х. Применение горячекатаной арматуры в железобетонных конструкциях // Черные металлы (Stahl und Eisen). — 1983. — № 18. — С. 29–34.
2. Высокопрочная арматурная сталь / А. А. Кугушин, И. Г. Узлов, В. В. Калмыков и др. — М.: Металлургия, 1986. — 272 с.
3. Медовар Б. И., Саенко В. Я., Медовар Л. Б. Получение заготовок коррозионно-стойкого биметалла методом элект-

рошлаковой наплавки // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2000. — № 2. — С. 3–7.

4. Электрошлаковая технология в производстве биметаллических изделий / Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Е. Шевченко и др. // Современ. электрометаллургия. — 2004. — № 2. — С. 5–11.
5. Патон Б. Е., Медовар Л. Б., Саенко В. Я. О перспективах производства биметалла с применением электрошлакового процесса // Современ. электрометаллургия. — 2004. — № 3. — С. 5–9.
6. Биметаллические материалы / М. И. Чепурко, В. Я. Остренко, Глускин Л. Я. и др. — Л.: Судостроение, 1984. — 272 с.
7. Тарнавский А. Л., Гурылев В. В., Шуровский Б. Б. Биметаллическая проволока. — М.: Металлургияиздат, 1963. — 123 с.
8. Производство биметаллических труб и прутков. М. И. Чепурко, В. Я. Остренко, А. А. Когадеев и др. — М.: Металлургия, 1986. — 240 с.
9. Чернов А. Н., Голованенко С. А., Гуляев В. В. Особенности изготовления биметаллических профилей методом горячего прессования // Производство биметаллов. Металлургия: Сб. тр. ЦНИИЧМ. — 1965. — Вып. 42. — С. 92–100.
10. Электрошлаковая наплавка жидким металлом — новый способ производства высококачественных композитных заготовок валков прокатных станов / Б. И. Медовар, Л. Б. Медовар, А. В. Чернец и др. // Черн. металлургия. — 2001. — № 4. — С. 42–45.
11. Schaeffler A. Selection of austenitic electrode for welding dissimilar metals // Welding J. — 1947. — 26, № 10. — P. 601–620.
12. Андрианов Н. В., Тихонов И. Н. Производство арматурной стали класса А500С с улучшенными потребительскими свойствами // Черн. металлургия. — 2004. — № 10. — С. 55–57.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 07.04.2005

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ



Предложения по сотрудничеству

- Качественное и количественное определение содержания основных легирующих и примесных элементов, включая газы, в различных материалах — рудах, концентратах, минералах, порошках, шлаках, флюсах, чугунах, сталях, сплавах на основе никеля, титана, алюминия, меди и др.
- Изготовление микрошлифов, выявление и фотографирование микроструктуры, металлографический контроль качества и установление природы дефектов металлопродукции, фрактографические исследования.
- Разработка методик исследования, определение и идентификация нитридных, оксидных и сульфидных включений, изучение фазового состава интерметаллидов, карбидов и других фаз в различных материалах.
- Исследование структуры и фазового состава материалов методами световой и электронной микроскопии (количественной и высокотемпературной металлографии, рентгеноструктурного и микроспектрального анализов).
- Разработка методик и исследование некоторых физических свойств металлов, шлаков, покрытий методами дилатометрии, высокотемпературного дифференциального термического анализа, калориметрии, а также исследование взаимодействия в системе газ-шлак-металл при нагреве различными источниками тепловой энергии.

- Обучение, стажировка, консультации инженерных и научных работников по

указанным направлениям.

Отдел оснащен просвечивающим электронным микроскопом JEM-200CX (фирма JEOL, Япония); растровым электронным микроскопом JSM-840 с системой анализа "Link" (фирма JEOL, Япония); фотоэлектрическим вакуумным спектрометром ДФС-51У; микронзондом для микрорентгеновского спектрального анализа SX-50 (фирма "Самеса", Франция); оптическим эмиссионным спектрометром SPECTROVAC-1000 DV-4 (фирма "Baird", Нидерланды).

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Тел.: (38044) 289 01 30; 289 65 40. Факс: (38044) 287 23 66
E-mail: leco@carrier.kiev.ua