

ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.791.927-3:669.018.4

© 2008 г. С.Н. Цурихин, Г.Н. Соколов, В.И. Лысак

РАСЧЕТ СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ НАПЛАВКИ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДА НИКЕЛЯ Ni_3Al

Введение

Жаропрочные сплавы на основе алюминидов никеля Ni_3Al , такие как ЖС6У-НК, ВКНА-1В-НК [1, 2] и их зарубежные аналоги WAZ-16, NX188, TAZ-8B, TRW [3], наиболее эффективны в условиях термического и силового воздействия в температурном интервале 1000–1100 °С. Однако в промышленности Российской Федерации такие сплавы пока не получили широкого применения ввиду отсутствия наплавочных материалов, а также методик расчета их состава.

Для электрошлаковой наплавки (ЭШН) высоколегированных сплавов подобного типа, содержащих большое количество туго- и легкоплавких компонентов, выгодно применять композиционные проволоки, состоящие из многослойной трубчатой оболочки и наполнителя, в состав которого входят металлические порошки, а также проволоки различного химического состава [4].

Целью настоящего исследования является разработка методики расчета состава композиционной проволоки, обеспечивающего в процессе ЭШН получение высококачественного наплавленного металла на основе легированного алюминидов никеля Ni_3Al .

Материалы и методы исследования

Композиционная проволока для ЭШН сплава на основе алюминидов никеля Ni_3Al состоит из биметаллической оболочки, внутренний слой которой выполнен из алюминиевой ленты, а наружный — из никелевой [5]. Технологические стыки слоев оболочки проволоки для обеспечения герметизации наполнителя расположены в диаметрально противоположных направлениях. Наполнитель проволоки содержит металлические порошки Al, Ni, Ta, Zr, борид молибдена, графита, а также проволоочные компоненты из вольфрама, молибдена и сплава X20H80T, которые расположены коаксиально оболочке.

ЭШН осуществляли в секционном токоподводящем кристаллизаторе (СТК) с полым графитовым электродом [6] при использовании двухконтурной схемы питания шлаковой ванны постоянным током с флюсом АНФ-6. Такой процесс обеспечивает мощное тепловыделение в подэлектродной области шлаковой ванны, что приводит к повышению температуры

шлака до 3300–3500 °С. Это способствует быстрому и равномерному расплавлению компонентов композиционной проволоки и образованию однородного расплава металлических капель. Диаметр полого неплавящегося электрода и диаметр отверстия в нем устанавливали исходя из расчета получения устойчивого электрошлакового процесса при заданном (до 100 мл) объеме шлаковой ванны. Режим наплавки: напряжение и сила постоянного тока прямой полярности составляли соответственно на шлаке в СТК 20 В и 150 А, с полого электрода 23 В и 200 А; расход охлаждающей воды в СТК 1,2 л/мин; скорость подачи проволоки в шлак через отверстие в электроде 5 мм/с. Поверхность шлака обдували аргоном.

Микроструктуру наплавленного металла исследовали на цифровом микроскопе OLIMPUS BX61. Фазовый состав металла определяли рентгеноструктурным анализом в медном излучении на дифрактометре ДРОН-3М со скоростью движения счетчика 1°/мин и диапазоне углов отражения $2\theta = 20 \div 120^\circ$.

Методика расчета состава композиционной проволоки

Расчет состава композиционной проволоки реализуется в два этапа в программе Microsoft Office Excel 2003. На первом этапе определяют состав композиционной проволоки в массовых процентах, который учитывает стехиометрическое соотношение между содержанием никеля и алюминия, обеспечивающее в наплавленном металле получение алюминидов никеля Ni_3Al . На втором этапе устанавливают геометрические характеристики композиционной проволоки и массы компонентов, необходимых для ее изготовления (рис. 1).

Расчетный состав композиционной проволоки в массовых процентах определяли исходя из усредненного содержания компонентов, % (по массе): 8,6 Al; 5,7 Cr; 3,5 W; 3,2 Mo; 1,6 Ti; 0,5 Zr; 0,035 C; 0,005 S; 0,005 P; основа — Ni) в известном типе литейного сплава ВКНА (ФГУП “Всероссийский институт авиационных материалов”, Москва) с тем отличием, что для увеличения сопротивления наплавленного металла деформации при высокотемпературном нагружении в композиционную проволоку дополнительно

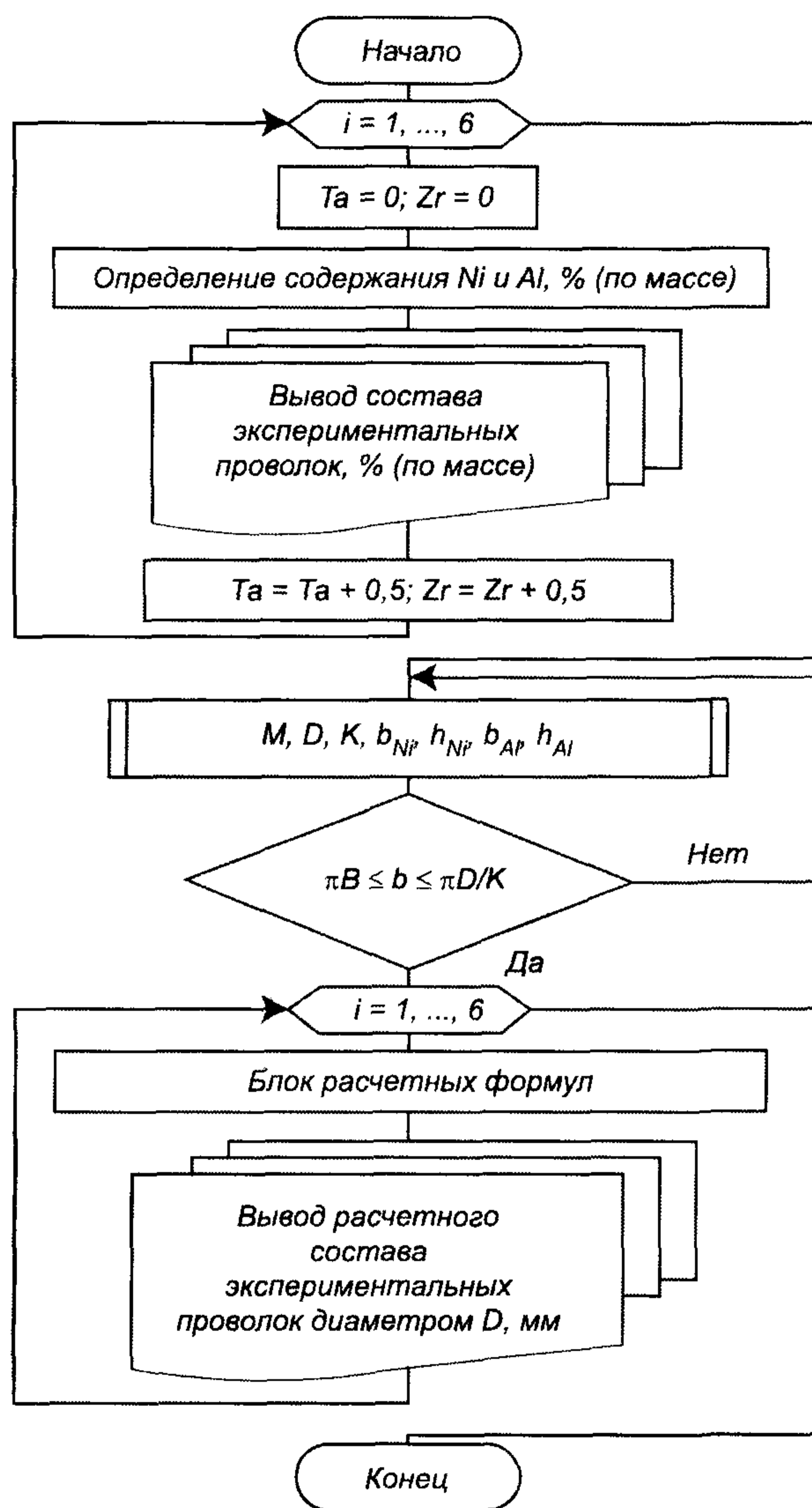


Рис. 1. Алгоритма определения состава композиционной проволоки

вводили металлические порошки тантала и циркония в диапазоне 0,5–2,5 % (по массе) каждого. Содержание W, Mo, Cr, B, C во всех экспериментальных сплавах было постоянным и составляло 3,0, 3,0, 4,4, 0,035 и 0,6 % (по массе) соответственно (таблица). Одновременное варьирование количества циркония и тантала в сплавах обусловлено их разным влиянием на фазовой состав наплавленного металла на основе Ni₃Al.

С учетом обеспечения заданного химического состава наплавленного металла содержание никеля и алюминия в оболочке и шихте проволоки определяли исходя из стехиометрического соотношения этих элементов, гарантирующего выделение в качестве матричной фазы металла алюминид никеля Ni₃Al:

$$\frac{Ni_{\text{ших}} + Ni_{\text{обол}}}{Al_{\text{ших}} + Al_{\text{обол}}} = 6,52 \left[\frac{\% \text{ (по массе)}}{\% \text{ (по массе)}} \right] = 3 \left[\frac{\% \text{ ат.}}{\% \text{ ат.}} \right], \quad (1)$$

Состав экспериментальных композиционных проволок, % (по массе)

Номер сплава	Ni	Al	Ta	Zr
1 (базовый)	76,81	11,79	0	0
2	75,83	11,63	0,5	0,5
3	74,85	11,48	1,0	1,0
4	73,86	11,33	1,5	1,5
5	72,87	11,18	2,0	2,0
6	71,88	11,02	2,5	2,5

Примечание. Содержание примесей (Si, Mn, Ti, S, P) от введения Нп-Х20Н80Т не учитывали.

где Ni_{ших}, Ni_{обол}, Al_{ших}, Al_{обол} – массы никеля и алюминия в шихте и в никелевом и алюминиевом слоях оболочки композиционной проволоки в массовых или атомных процентах.

Решая систему уравнений для случая, когда содержание порошков тантала и циркония в шихте проволоки равно нулю, определяли необходимые количества никеля и алюминия в % (по массе), обеспечивающие выполнение равенства (1):

$$\begin{cases} 3W + 3Mo + 0Zr + 0Ta + (0,023C + 0,15Si + 0,132Mn + \\ + 4,4Cr + 0,22Fe + 0,076Ti + 0,044Al + 0,11Zr + 0,0028S + \\ + 0,0038P + 14,14Ni) + 0,035B + 0,577C + xAl + yNi = 100; \\ \frac{14,14Ni + xNi}{yAl} = 6,52. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь выражение в скобках учитывает химический состав, введенный в наполнитель проволоки Нп-Х20Н80Т по ГОСТ 10543. Полученные расчетом химические составы экспериментальных проволок приведены в таблице.

Для расчета состава задают исходные данные: массу композиционной проволоки M, кг; диаметр композиционной проволоки D, мм; коэффициент заполнения композиционной проволоки K; заданный химический состав наплавленного металла, % (по массе); ширину b и толщину h никелевой и алюминиевой лент, мм.

Расчет проводят по математическим зависимостям исходя из площади ее поперечного сечения в обжатом состоянии. Толщины слоев оболочки назначают в пределах: никелевого – 0,4–2,0 мм, алюминиевого – 0,08–0,52 мм, конкретное значение которых зависит от требуемого диаметра композиционной проволоки.

Размеры лент выбирают по номограмме (рис. 2), полученной расчетным путем с использованием персонального компьютера, в следующем порядке. Сначала задают диаметр композиционной проволоки и

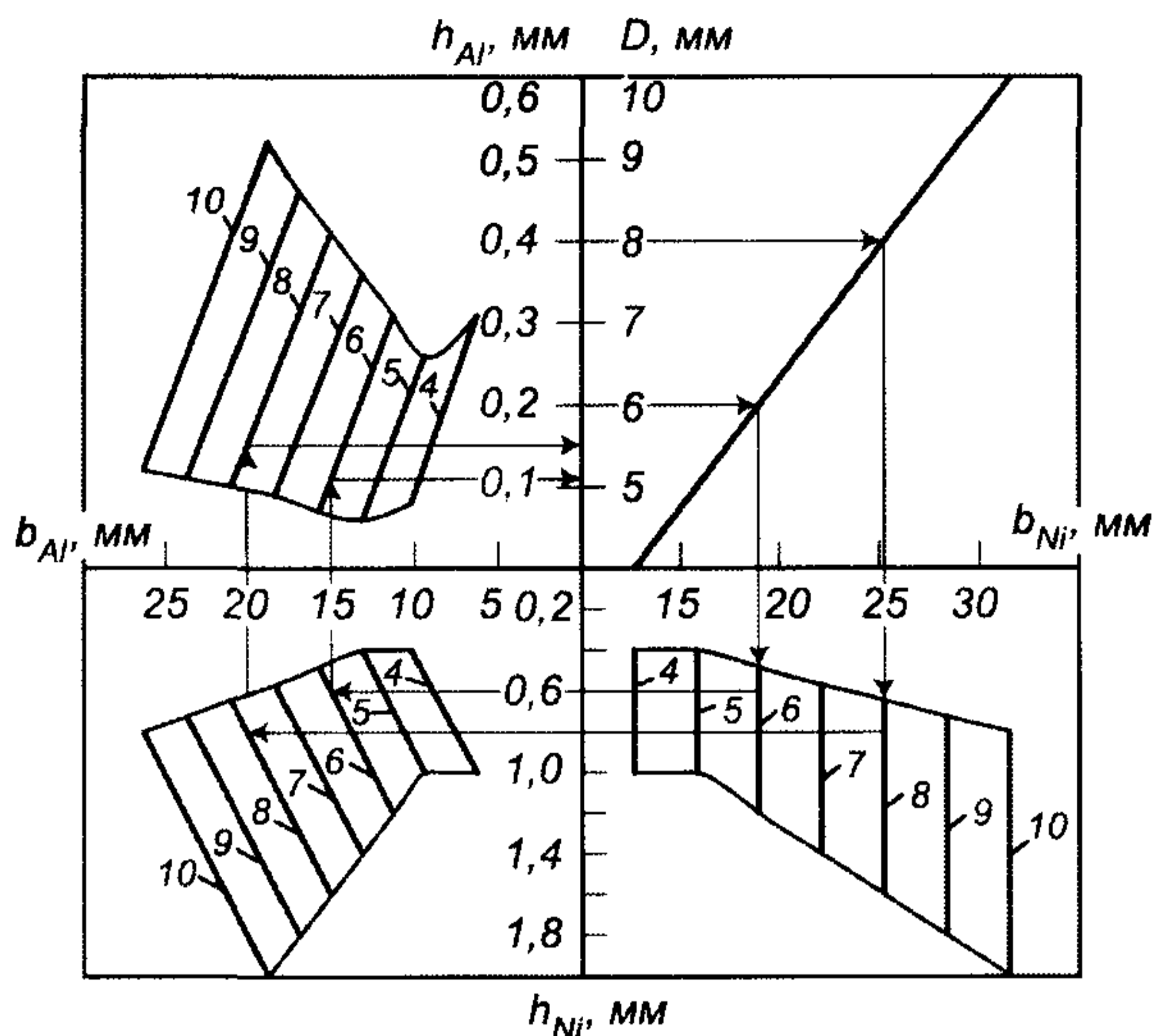


Рис. 2. Номограмма для определения размеров никелевой и алюминиевой лент в зависимости от диаметров D композиционных проволок (4–6 мм) и стержней (6–10 мм)

определяют ширину никелевой ленты b_{Ni} , далее на пересечении с выбранным значением диаметра и областью толщин слоев оболочки проволоки определяют толщину никелевой ленты h_{Ni} . Выбор значения h_{Ni} проводят в границах данной области, так как изготовление композиционной проволоки диаметром менее 4 мм и с толщиной никелевого слоя ее оболочки h_{Ni} , равной 0,4 мм, нецелесообразно, поскольку в этом случае предельно уменьшается коэффициент заполнения проволоки K , что ограничивает возможность легирования металла. Возможны расчет и изготовление композиционной проволоки или стержней из нее диаметром более 10 мм с $h_{Ni} = 2,0$ мм. Выбранное по номограмме значение h_{Ni} округляют до ближайшего значения толщины ленты в сортаменте ГОСТа. В зависимости от выбранного на этом этапе значения h_{Ni} определяют ширину алюминиевой ленты b_{Al} в заданной граничной области. Далее на пересечении с областью исходного диаметра композиционной проволоки находят толщину алюминиевой ленты h_{Al} , которую также округляют до ближайшего ее значения в сортаменте ГОСТа.

Исходя из коэффициента заполнения композиционной проволоки, а также ее диаметра проверяют условие полного закрытия стыка слоев ее оболочки:

$$\pi D \leq b \leq \frac{\pi D}{K}, \quad (3)$$

где $K = 0,6 \div 1$ – коэффициент заполнения композиционной проволоки (с учетом массы в ее наполнителе проволочных компонентов); b – ширина никелевой или алюминиевой ленты, мм; D – диаметр композиционной проволоки, мм.

В результате расчета определяют необходимые для изготовления композиционной проволоки габарит-

ные размеры (м) и массы (кг) никелевой и алюминиевой лент, проволочных элементов и металлических порошков.

Результаты и их обсуждение

По изложенной методике рассчитали составы и изготовили экспериментальные композиционные проволоки с двухслойной оболочкой Ni–Al диаметром 5 мм. Коэффициент заполнения проволок составлял 0,9. При расчете коэффициента заполнения массу порошкообразной шихты определяли с учетом массы входящих в наполнитель проволочных компонентов. Обрывов проволоки при ее волочении не наблюдали.

Исследованиями показано, что в состоянии после наплавки структура металла состоит преимущественно из относительно крупных (линейный размер 10...40 мкм) первичных дендритов легированного интерметаллида никеля Ni_3Al . В них содержатся: неупорядоченный, также легированный хромом, вольфрамом, молибденом, танталом, титаном и железом γ -твердый раствор на основе никеля; дисперсные (0,2...0,5 мкм) вторичные γ'_{BT} -фазы; интерметаллиды $CrNiMoTiZr$ (κ -фаза); тугоплавкие карбиды Ta_2C , WC , Mo_2C и небольшое количество неравновесных включений β -NiAl-фазы, непрореагировавшей в результате перитектической реакции $L + \beta-NiAl \leftrightarrow \gamma-Ni_3Al$.

В междендритных пространствах расположены имеющие неправильную форму алюминиды $\gamma'_{ЭВ}$ эвтектического происхождения, в которых есть выделения κ -фазы. Состоящая из карбидов Cr_7C_3 и Mo_2C карбидная эвтектика и γ'_{BT} -фаза равномерно распределены между первичными кристаллитами γ' . Суммарное содержание фаз $\gamma'-Ni_3Al$ различного происхождения в наплавленном металле составляет 75–80 % объем.

Полученная структура так называемого “естественного” композита обеспечивает повышенную в сравнении с известными типами наплавленного металла (рис. 3) твердость при температурах до 1100 °С.

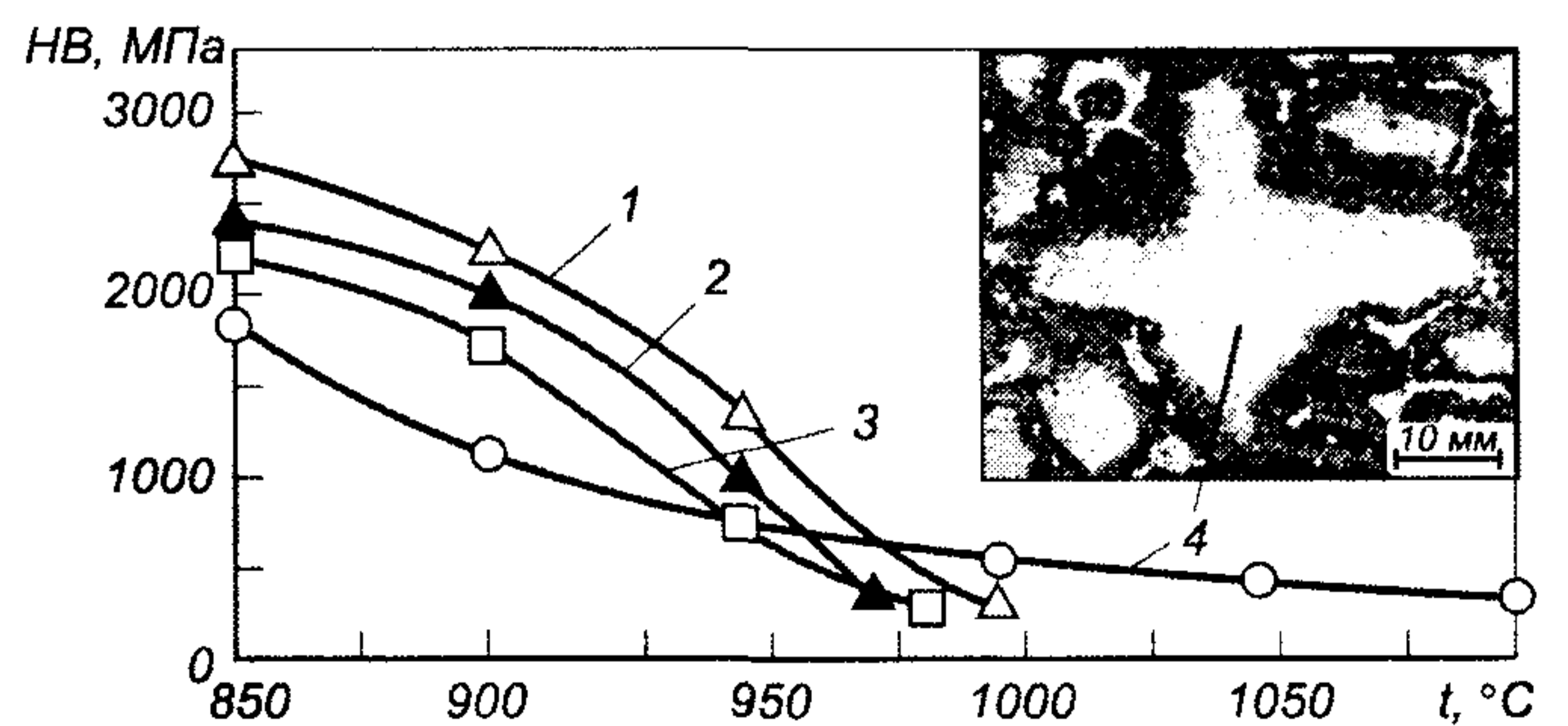


Рис. 3. Микроструктура и зависимость твердости наплавленного металла HV от температуры испытаний t :
1 – сплав 160X28K60B8H (стеллит); 2 – сплав ХН65М (хастеллой С); 3 – 250X22H66M4B2; 4 – наплавленный металл на основе легированного $\gamma'-Ni_3Al$

Выводы. Разработанные алгоритм и методика расчета состава композиционной проволоки позволяют с достаточной точностью получить в наплавленном ЭШН металле сложнолегированный сплав на основе Ni_3Al , обладающий повышенным сопротивлением деформации в диапазоне температур 1000...1100 °С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скачков О.А. // Сталь. 2002. № 2. С. 74–77.
2. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А., Морозова Г.И. // Металловедение и термическая обработка металлов. 1999. № 1. С. 32–34.
3. High technology welding filler metals for the aerospace industry. – USA: Houston, Texas. Universal wire works Inc, 1996. – 22 p.
4. Цурихин С.Н., Соколов Г.Н., Зорин И.В. и др. // Сварочное производство. № 1. 2006. С. 17–22.
5. Пат. 2274536 Российская Федерация, МПК⁷ В 23 К 35/40. Способ изготовления композиционной порошковой проволоки для наплавки сплава на основе алюминиды никеля Ni_3Al / Цурихин С.Н., Соколов Г.Н., Лысак В.И., Зорин И.В.; заявитель и патентообладатель Волгоградский гос. техн. ун-т. – заявл. 28.06.2004. опубл. 20.04.2006, Бюл. № 11. – 9 с.
6. Соколов Г.Н., Зорин И.В., Цурихин С.Н. и др. // Вопросы материаловедения. 2004. № 2. С. 87–98.
Волгоградский государственный технический университет.
Поступила 29 октября 2007 г.