

*Ю. Н. Дубцов, И. В. Зорин, Г. Н. Соколов, В. И. Лысак*

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ НАПЛАВКИ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДА НИКЕЛЯ\***

**Волгоградский государственный технический университет**

(e-mail: [naplavka34@yandex.ru](mailto:naplavka34@yandex.ru))

Представлена методика проектирования композиционной проволоки для дуговой наплавки сплава на основе алюминид никеля. Показано, что разработанная с использованием методики композиционная проволока имеет повышенные сварочно-технологические свойства и обеспечивает качественный наплавленный металл на основе алюминид никеля  $Ni_3Al$ .

*Ключевые слова:* композиционная проволока, электродуговая наплавка, алюминид никеля, проектирование проволок.

A method of designing composite wires for arc welding of alloy on the basis of nickel aluminide. It is shown that the developed methodology using composite wire has a higher welding-technological properties and provides a high quality weld metal on the basis of nickel aluminide  $Ni_3Al$ .

*Keywords:* composite wire, arc welding, nickel aluminide, design of the wires.

### **Введение**

Эксплуатация дорогостоящих деталей и узлов газотурбинных установок, изготовленных из жаропрочных никелевых сплавов с различным содержанием  $\gamma'$ - $Ni_3Al$  фазы, связана с необходимостью восстановления их изношенных или поврежденных участков [1]. В настоящее время для этой цели в зависимости от геометрии изделия применяют способы лазерной [2], электронно-лучевой [3] и дуговой наплавки неплавящимся электродом [4], общим для которых является использование в качестве наплавочного материала литых присадочных стержней. Это не всегда технологически оправдано, так как качество сложнолегированного наплавленного металла зависит от приемов манипулирования присадочным материалом, а также производительности способов сварки и наплавки. Дуговая наплавка электродной проволокой в защитных газах позволяет в широких пределах управлять тепловложением в основной металл, что теоретически способствует получению при высоком градиенте температур на фронте кристаллизации направленно ориентированной структуры жаропрочного сплава. Однако применение таких процессов сдерживается отсутствием на отечественном рынке сва-

рочных проволок, обеспечивающих получение наплавленного металла на основе алюминид никеля. Разработанные в РФ композиционные проволоки [5] предназначены для использования только в качестве присадочного материала [6]. Методика расчета химического состава таких проволок не предусматривает возможность изменения конструкции их сердечников, содержащих разнородные проволочные компоненты и порошки металлов, неравномерно распределенные по поперечному сечению [7]. Это не обеспечивает стабильное существование дуги с такой проволокой.

Целью настоящей работы является разработка методики проектирования конструкции электродной композиционной проволоки с повышенными сварочно-технологическими свойствами наплавленного металла на основе легированного алюминид никеля  $Ni_3Al$ .

### **Материалы и методы экспериментальных исследований**

Проектирование композиционных проволок производили из условия обеспечения их технологической надежности после однократного обжата на волочильном стане.

Оболочку композиционной проволоки диаметром 3,0 мм формировали из никелевой ленты марки НП-2 ГОСТ 2170 шириной 8 мм и толщиной 0,6 мм. В составе наполнителя ис-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке государственного контракта Минобрнауки № 16.740.11.0017.

пользовали проволоки алюминия Св-А99 диаметром 1,2 мм, молибдена МЧ и вольфрама ВА диаметрами 0,5 мм, ленту из тантала шириной 1,5 мм и толщиной 0,05 мм, а также порошки хрома алюмотермического и циркония. Расчет вели из условия получения в наплавленном металле жаропрочного сплава, имеющего химический состав: (масс. %) 0,2...0,4 С; 3,0...3,2 W; 2,5...3,0 Мо; 1,8...2,0 Zr; 4,1...4,4 Cr; 1,8...2,0 Та; 10,5...11,2 Al; Ni – остальное.

Наплавку экспериментальных образцов из низкоуглеродистой стали проводили с использованием композиционной проволоки, подключенной к источнику постоянного тока обратной полярности. Скорость наплавки составляла 16–18 м/ч, расход защитного газа (аргон высшего сорта) – 40–50 л/мин. Сварочно-технологические свойства экспериментальных композиционных проволок оценивали по стабильности дугового процесса, контролируемого по осциллограммам сварочного тока и напряжения на дуге. С этой целью аналого-цифровой преобразователь ЛА-450 USB подключали в сварочную цепь. Также оценивали формирования наплавленного металла.

Металлографические исследования экспериментальных образцов производили на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axiovert 40 MAT.

#### Методика расчета композиционной проволоки и результаты ее испытания

Алгоритм расчета композиционной проволоки реализован в программе AlMe-WireLab [8] в два этапа. На первом этапе уточняют химический состав композиционной проволоки в массовых процентах путем его перерасчета с учетом коэффициентов перехода легирующих компонентов и обеспечения стехиометрического соотношения между элементами, входящими в интерметаллическое соединение. На втором этапе определяют геометрические параметры компонентов и уточняют состав композиционной проволоки, исходя из анализа ее поперечного сечения в обжатом состоянии.

В программе предусмотрена возможность введения исходного материала в виде металлических порошковых или проволочных компонентов двух типов: «нелегированный», состоящий из одного металла, и «легированный», представляющий легированные порошки, проволоки и ленты. После задания типов материалов вводят значения их содержания (масс. %) с учетом коэффициентов перехода в напла-

вленный металл, а также – геометрические параметры. Для проволочных компонентов задают их диаметры, а для компонентов в виде лент – их толщину и ширину. При необходимости введения компонентов в виде трубок задают их наружный диаметр и толщину стенки. Для порошков задаются значениями их массового (масс. %) содержания.

Конфигурирование расчетного состава композиционной проволоки осуществляют путем выбора способов введения исходных компонентов в состав проволоки. Они заключаются в использовании сформованной из лент трубчатых оболочек и порошка (рис. 1, а) трубчатой оболочки и проволоки (рис. 1, б), а также трубчатой оболочки, лент и проволок различных диаметров (рис. 1, в–г).

Расчет производят исходя из требуемой массы проволоки заданного диаметра и площади ее поперечного сечения с тем отличием от методики [6], что отношение толщины оболочки к ее наружному диаметру является функцией, зависящей от стехиометрического соотношения  $k_c$  между массами элементов, входящими в интерметаллическое соединение  $Ni_3Al$ . Так как это соединение состоит из двух элементов, то коэффициент  $k_c$  можно представить как соотношение:

$$\frac{M_{Me_1}^H + M_{Me_1}^L}{M_{Me_2}^H + M_{Me_2}^L} = k_c, \quad (1)$$

где  $M_{Me_1}^H, M_{Me_2}^H$  – массы необходимые для обеспечения стехиометрического соотношения между первым и вторым элементами соответственно;  $M_{Me_1}^L, M_{Me_2}^L$  – массы первого и второго элементов соответственно, содержащиеся в составе легирующих материалов.

Расчет масс необходимых компонентов ведут из условия обеспечения заданного химического состава в любом поперечном сечении композиционной проволоки, что при ее расплавлении в дуге способствует высокой однородности наплавленного металла или сварного шва. Если всю площадь поперечного сечения композиционной проволоки ( $S_o$ ) принять за 100 %, то долевое участие площадей  $S_{Me_1}^H, S_{Me_2}^H$  элементов интерметаллического соединения в  $S_o$  будет определяться из формулы:

$$S_{Me_2}^H = \frac{(S_o - S_a) \cdot \rho_{Me_1} - S_{Me_2}^L}{k_c \cdot \rho_{Me_2} + \rho_{Me_1}}, \quad (2)$$

$$S_{Me_1}^H = S_o - S_l - S_{Me_2}^H - S_{Me_2}^L - S_{Me_1}^L, \quad (3)$$

где  $S_o$  – площадь поперечного сечения композиционной проволоки;  $S_{Me_1}^L, S_{Me_2}^L$  – площади элементов интерметаллического соединения, занимае-

мые ими в составе легирующих материалов;  $S_l$  – общая площадь всех легирующих элементов без учета площадей  $S_{Me_1}^L$  и  $S_{Me_2}^L$ ;  $\rho_{Me_1}, \rho_{Me_2}$  – плотность элементов интерметаллического соединения.

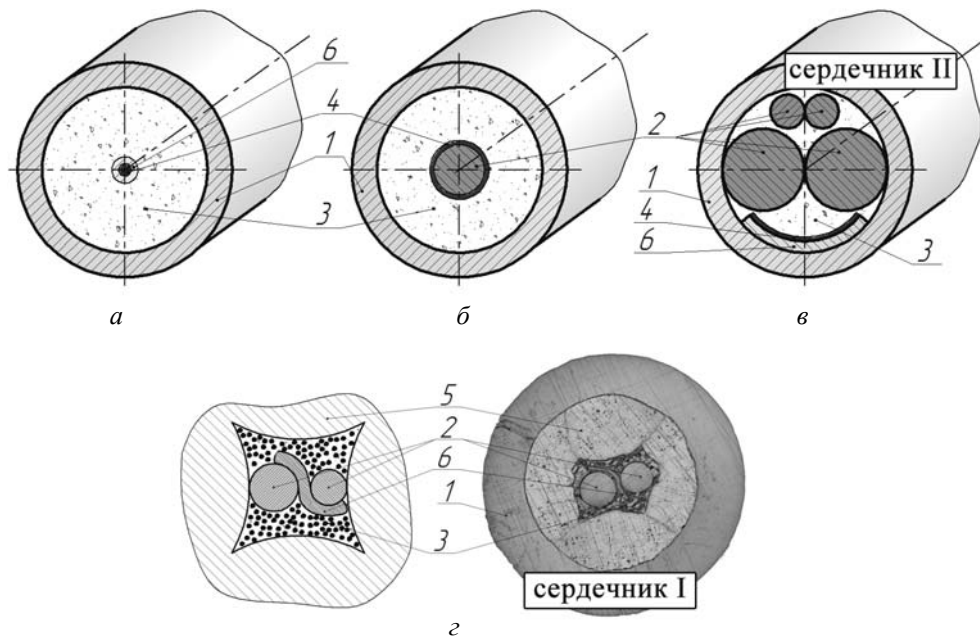


Рис. 1. Схематичные изображения спроектированных композиционных проволок с различной конструкцией сердечника: для использования в процессе ЭШН (а, б) и электродуговой наплавки (в, г):

1 – оболочка; 2 – проволочные компоненты; 3 – шихта; 4 – ультрадисперсный порошок; 5 – внутренней слой оболочки; 6 – металлические ленты

По найденным значениям площадей  $S_{Me_1}^H, S_{Me_2}^H$  и известным значениям плотности компонентов производят расчет масс каждого компонента проектируемой композиционной проволоки.

Примером графической интерпретации расчета является номограмма (рис. 2), по которой для заданного диаметра композиционной проволоки можно выбрать количество алюминиевых проволочных компонентов и их диаметры.

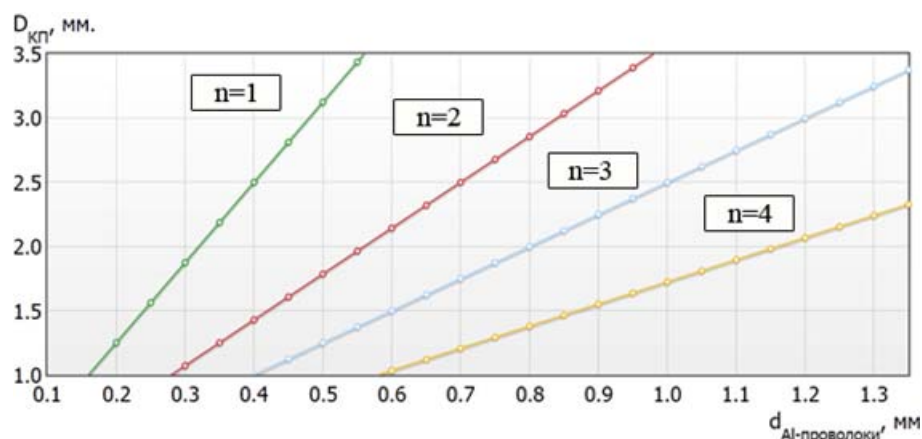


Рис. 2. Зависимость диаметра композиционной  $D_{кп}$  проволоки от диаметра  $d_{Ал-проволоки}$  и количества  $n$  проволочных компонентов

Исследование поперечного сечения (рис. 1, г) готовой композиционной проволоки показало

хорошую сходимость расчетных и экспериментальных значений площадей и масс проволоч-

ных и порошковых компонентов наполнителя, что обуславливает надежную герметизацию композиционной проволоки уже после однократного обжатия при высокой плотности стыкового соединения кромок оболочки по длине проволоки. В процессе дуговой наплавки с использованием композиционной проволоки (сердечник I) электрические параметры режима ( $I_{св}$  и  $U_{д}$ ) стабильные (рис. 3, а), короткие замыкания отсутствуют, что свидетельствует об относительно равномерной плотности сварочного

тока по сечению проволоки с коаксиально расположенными компонентами. Процесс горения дуги с композиционной проволокой, имеющей конструктивное исполнение сердечника II (рис. 3, б), характеризуется короткими замыканиями, которые вероятно обусловлены замедленным расплавлением тугоплавких проводочных компонентов в сварочной дуге вследствие неравномерного распределения плотности тока по сечению проволоки.

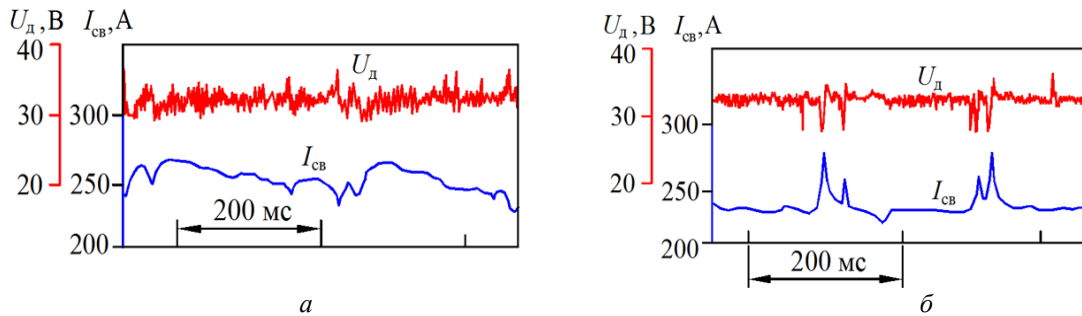


Рис. 3. Осциллограммы горения дуги с использованием разработанной композиционной проволоки с сердечниками I (а) и II (б)

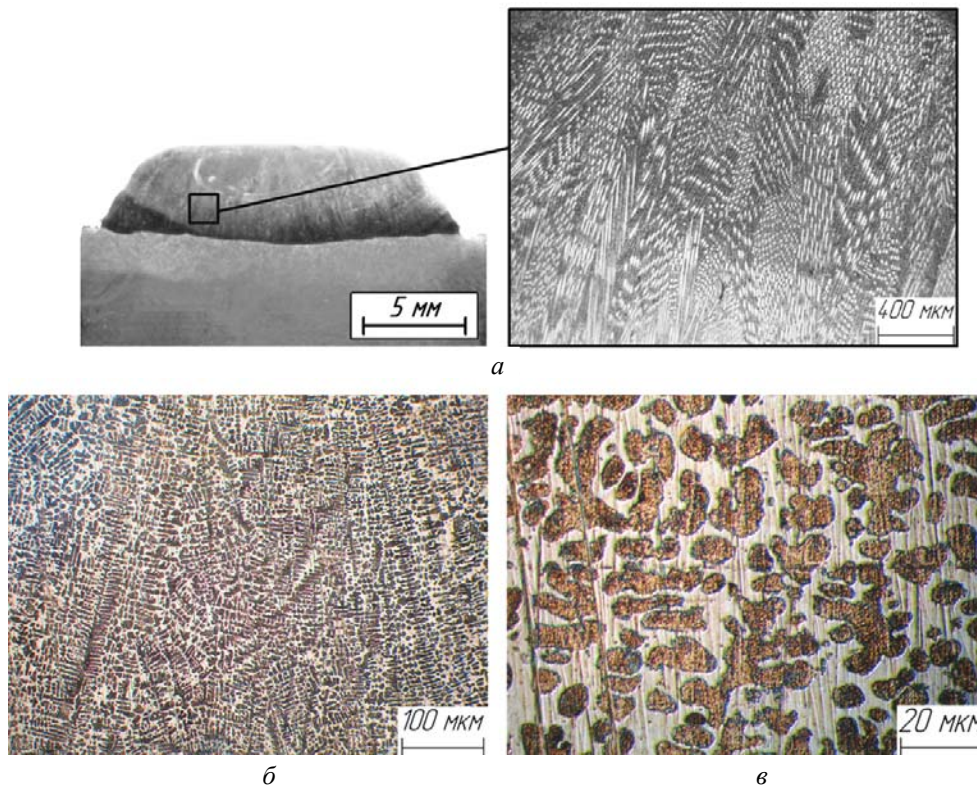


Рис. 4. Макроструктура поперечного сечения (а) и микроструктура (б) ( $\times 200$ ) – в ( $\times 1000$ ) наплавленного металла на основе легированного алюминидом никеля

При анализе поперечного сечения макрошлифа образца, наплавленного с использованием разработанной методики, выявлено неболь-

шое ( $\gamma_0 < 10\%$ ) проплавление основного металла. Возможной причиной этого является невысокое воздействие сварочной дуги на дно сва-

рочной ванны вследствие уменьшения тепловой мощности дуги, обусловленного большими затратами на плавление тугоплавких компонентов композиционной проволоки.

Формирование наплавленного металла, имеющего направленно ориентированной характер структуры, удовлетворительное (рис. 4, а). Основной фазой в структуре является дендритообразный  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al твердый раствор, содержащий многочисленные карбидные фазы различного состава и происхождения, а также неупорядоченный твердый раствор алюминия в никеле (рис. 4, б–в). Сварочных дефектов в наплавленном металле не обнаружено, что подтверждает высокое качество композиционной проволоки.

### Вывод

Разработанная методика позволяет рассчитывать состав и конструкцию композиционной проволоки, обеспечивающей при электродуговой наплавке качественное формирование и заданный химический состав жаропрочного наплавленного металла на основе легированного Ni<sub>3</sub>Al.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Welding and Weld Repair of Single Crystal Gas Turbine Alloys / J. M. Vitek, S. A. David, and S. S. Babu // Tur-

bine Power Systems Conference Galveston. – Texas February 25-26, 2002.

2. Laser beam weld-metal microstructure in a yttrium modified directionally solidified Ni<sub>3</sub>Al-base alloy / R.G. Ding, O.A. Ojo, M.C. Chaturvedi // *Intermetallics*. – 2007. – № 15. – P. 1504–1510.

3. Сварка и наплавка жаропрочных никелевых сплавов с монокристаллической структурой / К. А. Ющенко [и др.] // *Автоматическая сварка*. – 2008. – № 11. – С. 217–222.

4. Anderson, T. D. Stray Grain Formation in Welds of Single-Crystal Ni-Base Superalloy CMSX-4 / T. D. Anderson, J. N. Dupont, and T. Debroy // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2010. – V. 41a. – P. 181–193.

5. Flux-cored wire for the deposition of alloys based on nickel aluminide / S. N. Tsurikhin, G. N. Sokolov, V. I. Lysak, I. V. Zorin, E. I. Lebedev // *Welding International*. – 2006. – Vol. 20, No. 6. – С. 483–487.

6. Восстановление рабочих поверхностей деталей и инструмента сборочно-сварочной оснастки электрошлаковым способом композиционными жаропрочными материалами / И. В. Зорин, Г. Н. Соколов, С. Н. Цурихин, Е. И. Лебедев, В. И. Лысак // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2005. – № 5. – С. 17–20.

7. Цурихин, С. Н. Расчет состава композиционной проволоки для наплавки жаропрочного сплава на основе алюминида никеля Ni<sub>3</sub>Al / С. Н. Цурихин, Г. Н. Соколов, В. И. Лысак // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2008. – № 4. – С. 41–44.

8. Дубцов, Ю. Н. Программное обеспечение расчета конструкции и состава композиционной проволоки для наплавки сплавов на основе интерметаллических соединений AlMe WireLab – 1 / Ю. Н. Дубцов, И. В. Зорин, С. Н. Цурихин, Г. Н. Соколов // *Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2010616144*. – М.: РОСПАТЕНТ, 17.09.2010.