

## НАНОМОДИФИЦИРОВАНИЕ В ПРОЦЕССАХ СВАРКИ И НАПЛАВКИ

**П. Ташев<sup>1</sup>, Н. Алексиев<sup>1</sup>, В. Манолов<sup>1</sup>, А. Н. Черепанов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт металловедения, сооружений и технологий им. академика А. Балевского  
с центром гидроаэродинамики – БАН, г. София, Болгария

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

Выполнены экспериментальные исследования влияния наномодифицирующих порошков тугоплавких соединений на свойства сварного шва при сварке алюминиевого сплава и наплавке защитного покрытия на стальную пластину. Сварка алюминиевого сплава АМгб осуществлялась с помощью аппарата для дуговой сварки с неплавящимся (вольфрамовым) электродом – ВИГ-сварка. В качестве модифицирующей добавки использовался наноразмерный порошок тугоплавкого соединения TiCN. Дополнительный электрод (модифицирующая порошковая проволока) изготовлялся с использованием вибрационной шаровой мельницы, в которой была подготовлена смесь из сечки стандартной добавочной проволоки марки АМгб и нанопорошка TiCN. Смесь помещали в тонкостенный контейнер из сплава АМгб, после чего уплотняли, а затем проводили экструдирование с применением вертикального пресса. В результате были получены проволоки диаметром 3 мм, содержащие соответственно 2 % TiCN и 0,7 % TiCN. Сварку пластин проводили со стандартной добавочной проволокой и с модифицированными проволоками, содержащими TiCN. При наплавке защитного покрытия на сталь использовались пластины толщиной 3 мм из стали S235JR. Они заранее подвергались механической очистке и обезжириванию. Наплавка осуществлялась по методу ВИГ. В качестве материала покрытия применялась стандартная дополнительная проволока DT-SGMo по DIN 8576 с диаметром 1,6 мм. На поверхность проволоки наносилась тонкая пленка, содержащая плакированные хромом наночастицы TiN. Плакирование частиц осуществлено с помощью механохимической обработки в планетарной мельнице. Исследования показали, что при модифицировании нанопорошками имеет место существенное измельчение структуры шва и увеличение его твердости как при сварке алюминиевого сплава, так и при наплавке конструкционной стали.

*Ключевые слова:* ВИГ-сварка, защитное покрытие, нанопорошки, алюминиевый сплав, стальная пластина, структура, твердость.

### Введение

Сварка конструкций из деформируемых алюминиевых сплавов АМгб с использованием сварочной проволоки часто сопровождается формированием крупных зерен твердого раствора и фазы (Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>), которая выделяется по границам зерен, что отрицательно сказывается на прочности неразъемного соединения [1, 2].

Для улучшения свойства металла шва необходимо создать условия кристаллизации, обеспечивающие формирование мелкозернистой структуры с равномерным распределением примесей. В последнее время для этой цели применяются модифицирующие добавки [1–5]. Структуру шва можно из-

мельчить используя наноразмерные порошки TiN, TiCN, TiC, BN и др. Введение специально подготовленных нанопорошков в сварную жидкую ванну осуществляется различными способами, в частности, нанесением нанопорошка на поверхность сварки [4] или с помощью специально изготовленных проволочных электродов, содержащих нанопорошки [1, 2]. Исследования процессов модифицирования сплавов с применением наноразмерных нанопорошков приведены в работах [3–6].

### 1. Экспериментальные исследования

Целью данной работы является получение и исследование сварных швов и наплавленных слоев, содержащих наноразмерные порошки. Сварка осуществлялась с помощью аппарата для дуговой свар-

ки с неплавящимся (вольфрамовым) электродом – ВИГ-сварка. Были проведены эксперименты с использованием TiCN для шва из алюминиевого сплава AMg6 и TiN для наплавленного слоя из стали S235JR.

### 1.1. Сварка алюминиевого сплава

Дополнительный электрод (добавочная проволока) изготовлен согласно [7]. Для этой цели с использованием вибрационной шаровой мельницы была подготовлена смесь из сечки (диаметром 2 мм и длиной 1–2 мм) стандартной добавочной проволоки марки AMg6 и нанопорошка TiCN.

Смесь помещали в тонкостенный контейнер из сплава AMg6, уплотняли ее и потом проводили экструдирование с применением вертикального пресса (рис. 1). В результате были получены проволоки диаметром 3 мм, содержащие соответственно 2 % TiCN и 0,7 % TiCN.

В качестве образцов для эксперимента использовались пластины толщиной 4 мм из сплава AMg6, которые предварительно подвергались механической очистке и обезжириванию. Сварка осуществлялась с помощью источника СЕБОРА SOUND AC-DC2240/М в защитной среде (аргон). Были получены сварные швы со стандартной добавочной проволокой и с модифицированной проволокой, содержащей TiCN.

Шов, полученный с применением проволоки с 2 % TiCN, имел множество дефектов и не отвечал технологическим требованиям. Шов

с использованием проволоки с 0,7 % TiCN имел хороший внешний вид без технологических дефектов.

### 1.2. Наплавка на стальную пластину

Для наплавки защитного покрытия применялась стандартная проволока DT-SGМо по DIN 8576 с диаметром 1,6 мм. На поверхность проволоки наносилась тонкая пленка, содержащая плакированный хромом нанопорошок TiN. Плакирование осуществлялось с помощью механохимической обработки в планетарной мельнице [3]. Образцами для эксперимента служили пластины толщиной 3 мм из стали S235JR, которые предварительно подвергались механической очистке и обезжириванию. Наплавление осуществлялось по методу ВИГ с помощью источника FRONIUS Magic Wave 2500.

Использовалась сварочная установка с механизированным движением электрода, ручной подачей проволоки и защитным газом (аргоном).

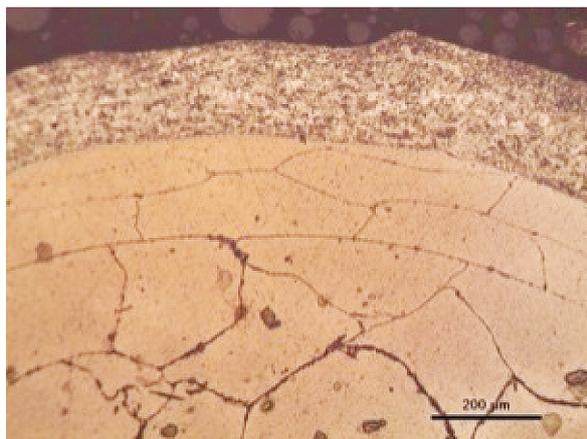
## 2. Результаты экспериментов

### 2.1. Результаты по сварке алюминиевого сплава

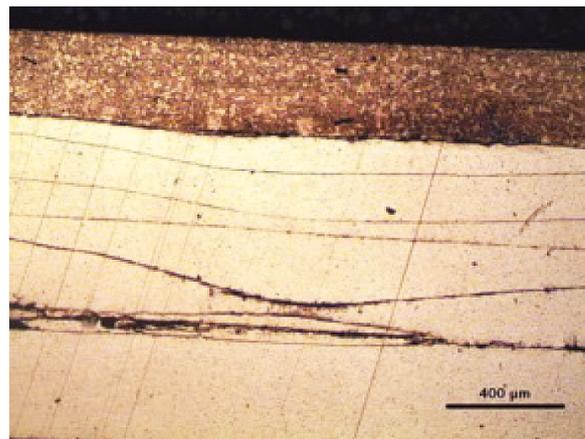
Проведен металлографический анализ образцов из полученной экструдированием проволоки, а также из образцов, вырезанных из опытных сварных соединений. Микроструктура образцов поперечного и продольного сечений проволоки



Рис. 1. Экструдирование проволоки с помощью пресса

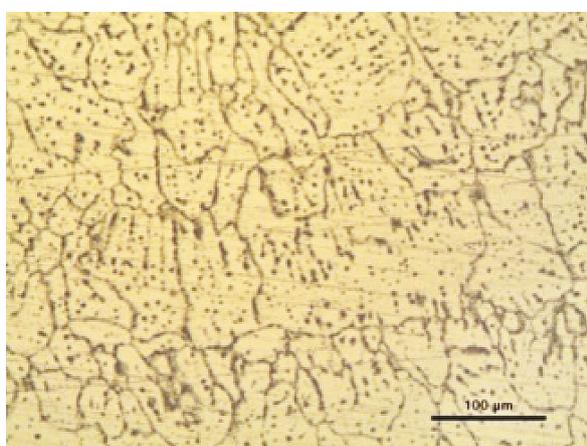


*a*

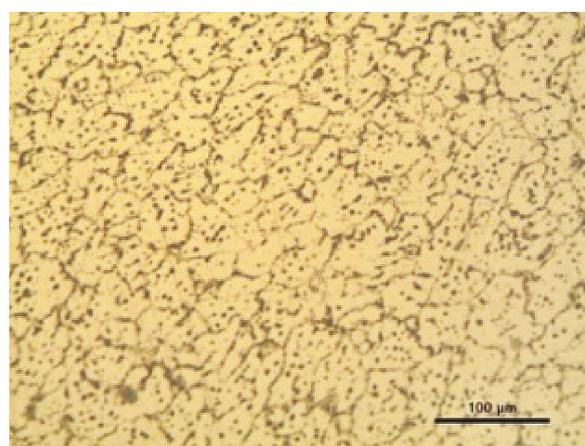


*б*

Рис. 2. Микроструктура образцов поперечного (*a*) и продольного (*б*) сечений проволоки AMg6 + 0,7 % TiCN



*a*



*б*

Рис. 3. Микроструктура сварных швов: *a* – образец, сваренный проволокой AMg6; *б* – образец, сваренный проволокой AMg6 + 0,7 % TiCN

AMg6 + 0,7 % TiCN (рис. 2) состоит из удлиненных экструдированных частиц сечки стандартной добавочной проволоки.

В поперечном сечении эти частицы выглядят как равноосные зерна (рис. 2, *a*), а в продольном сечении – как волокна (рис. 2, *б*). Микроструктура оболочки состоит из равноосных полиэдрических зерен.

Микроструктура образцов сварных швов, полученных с проволокой AMg6 без нанопорошковой добавки, имеет равноосные округленные зерна со средним диаметром зерен 80 μm (рис. 3, *a*).

Применение модифицирующей добавки AMg6 + 0,7 % TiCN повышает дисперсность структуры шва, которая состоит из более однородных по размерам полиэдрических округленных зерен со средним диаметром 39 μm (рис. 3, *б*). Измельчение структуры составляет 51 % по сравнению со структурой шва без ввода нанопорошка.

Измерение микротвердости по Виккерсу (с нагрузкой 98 N (10 kg) (рис. 4) показало увели-

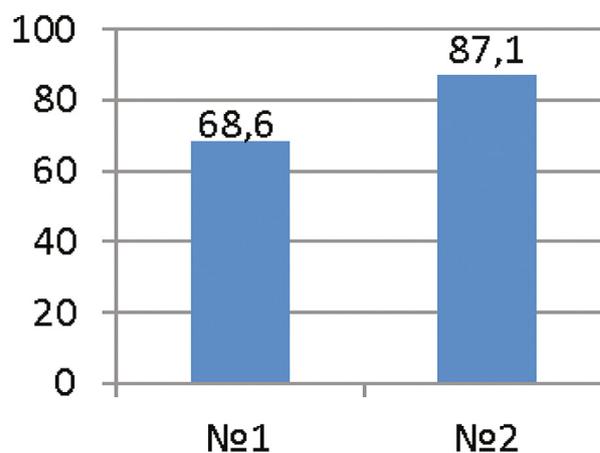
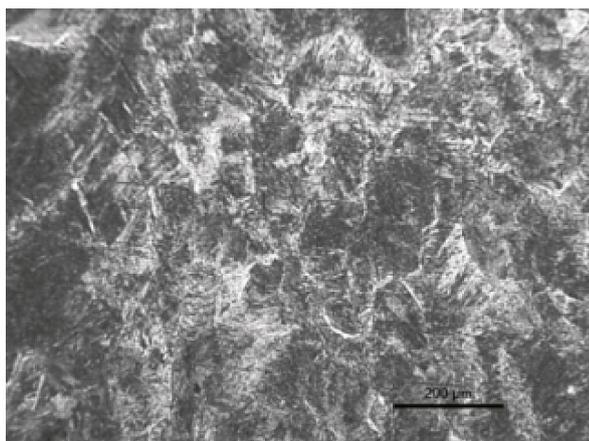
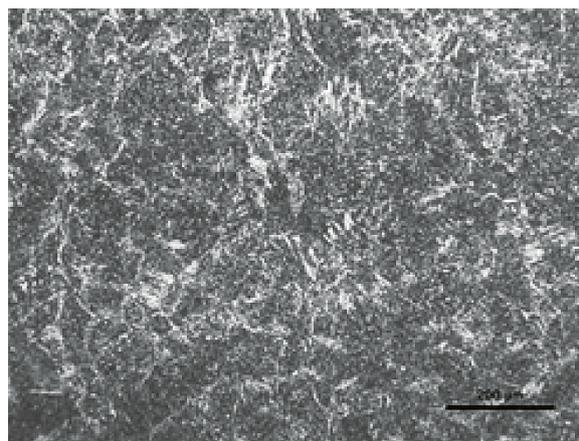


Рис. 4. Микротвердость образцов: № 1 – образец, сваренный проволокой AMg6; № 2 – образец, сваренный проволокой AMg6 + 0,7 % TiCN



*a*



*б*

Рис. 5. Структура однослойно наплавленного образца стандартной проволокой (*a*) и проволокой, содержащей TiN + Cr (*б*)

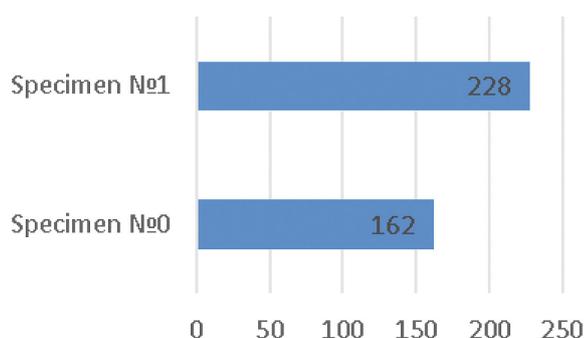


Рис. 6. Твердость по Викерсу HV: № 0 – однослойно наплавленный образец стандартной проволокой; № 1 – однослойно наплавленный образец с проволокой, содержащей TiN + Cr

чение ее значения на 22 % в результате применения проволоки с TiCN.

## 2.2. Результаты для наплавки стали

Проведен металлографический анализ однослойно наплавленных образцов, полученных с применением стандартной проволоки (рис. 5, *a*), и образцов с использованием стандартной про-

локи, покрытой пленкой, содержащей нанопорошок TiN, плакированный хромом (рис. 5, *б*).

Установлено измельчение структуры и повышение микротвердости поверхностного слоя на 23 % для образца с применением TiN. Твердость по Викерсу HV наплавленных слоев (с нагрузкой 98 N (10 kg)) показана на рис. 6.

Получено увеличение твердости на 41 % для образца с применением TiN.

## Выводы

1. Проведены исследования влияния наноразмерных порошков TiCN и TiN на свойства сварных швов алюминиевого сплава и наплавленных слоев стали.
2. Измельчение микроструктуры шва из алюминиевого сплава АМг6 при внесении TiCN составляет 51 %.
3. Наблюдается измельчение микроструктуры наплавленного слоя из стали S235JR при внесении TiN.
4. Получено увеличение микротвердости по Викерсу (HV) после ввода нанопорошков. При этом повышение HV для сварного шва из сплава АМг6 после применения проволоки с TiCN составляет 22 %, а для наплавленного слоя из стали S235JR с применением TiN – 41 %.

## Список литературы

1. Крушенко Г. Г., Мишин А. С. Сварка листов из сплава АМг6 прутком, содержащим ультрадисперсные порошки // Сварочное производство. 1995. № 1. С. 2–3.
2. Балашов Б. А., Крушенко Г. Г., Лепихин А. М. Применение модифицирующего прутка Al–Ti–Be в сварке алюминия и алюминиевых сплавов // Современные проблемы сварочной науки и техники : материалы российской науч.-техн. конф. Ч. I. Пермь, 1995. С. 197–198.
3. Низкотемпературная плазма. Т. 12. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / В. П. Сабуров, А. Н. Черепанов, М. Ф. Жуков и др. Новосибирск : Наука ; Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 330 с.

4. Черепанов А. Н., Афонин Ю. В., Маликов А. Г., Оришич А. М. О применении нанопорошков тугоплавких соединений при сварке и обработке металлов и сплавов // Тяжелое машиностроение. 2008. № 4/2. С. 25–26.
5. Черепанов А. Н., Овчаренко В. Е. Влияние наноразмерных композиционных порошков на структуру и свойства жаропрочного сплава Incone1 718 // Физика металлов и металловедение. 2015. Т. 116, № 12. С. 1339–1344.
6. Karagiuzova Z., Manolov V., Tarasov M. Elektroless iron coating on nanosized particles, Tribological Journal BULTRIB, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 73–79.
7. Патент 2429958 Российская Федерация, С2 МПК В 23 К 35/40. Способ изготовления электродной проволоки для сварки алюминиевых сплавов / Крушенко Г. Г. Заявка № 2009131289/02 от 17.08.2009. Бюл. № 27, 2011.

*История статьи*

*Поступила в редакцию 10 октября 2016 г.*

*Принята к публикации 13 января 2017 г.*

## MODIFYING THE LIQUID PHASE WITH NANOSCALE POWDERS IN THE PROCESS OF WELDING AND CLADDING

**P. Tashev<sup>1</sup>, N. Alexiev<sup>1</sup>, V. Manolov<sup>1</sup>, A. N. Cherepanov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Metal Science, Equipment and Technologies «Acad. A. Bolevsci»  
with Hydroaerodynamics centre – BAS, Sofia, Bulgaria*

<sup>2</sup>*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch RAS,  
Novosibirsk, Russian Federation*

*Experimental studies of effect of nanomodifying powders of refractory compounds on properties of weld seam at welding of aluminum alloy and cladding a protective coating on a steel plate were conducted. The welding of aluminum alloy AMg6 was carried out using an electric arc welding with non-consumable (tungsten) electrode (TIG welding). The modifying agent was nanoscale powder of TiCN refractory compound. Additional electrode (modifying powder wire) was produced using a vibrating ball mill, in which a mixture of sliced standard additional wire AMg6 and nanopowder TiCN had been prepared. The mixture was placed in a thin-walled container made of AMg6, compacted, and then, it was extruded using a vertical press. As a result, wires with diameter of 3 mm were obtained, containing 2 % of TiCN and 0.7 % of TiCN, respectively. Welds were obtained with the standard additional wire and modified wire containing TiCN. The protective coating for steel was deposited using plates with thickness of 3 mm made of steel S235JR. Beforehand, they were subjected to mechanical cleaning and degreasing. The depositing was accomplished by the TIG method. The coating was standard additional wire DT-SGMo by DIN 8576 with diameter of 1.6 mm. The wire surface was covered by a thin film containing chromium clad TiN nanoparticles. The cladding was accomplished by mechanical chemical treatment in a planetary mill. The studies have shown that the modification by nanopowders leads to a substantial refinement of the seam structure and increase of its hardness both for aluminum alloy and structural steel cladding.*

*Keywords: TIG welding, protective coating, nanopowders, aluminum alloy, steel plate, structure, hardness.*

## References

1. Krushenko G. G., Mishin A. S. *Svarka listov iz splava AMg6 prutkom, sodержashchem ultradispersnie poroshki* [Welding of sheets of AMg6 alloy rod containing ultrafine powders]. Svarchnoe proizvodstvo, 1995, no. 1, pp. 2–3. (In Russian).
2. Balashov B. A., Krushenko G. G., Lepikhin A. M. *Primenenie modifiziruyushchego prutka Al-Ti-Be v svarke aluminia i aluminievikh spлавov* [The use of the modified rod, Al-Ti-Be in the welding of aluminum and aluminum alloys]. Sovremennye problemi svarchnoy nauki i tekhniki, Materiali Rossiiskoy Nauchno-tekhnich. Conf., Part. I, Perm, pp. 197–198. (In Russian).
3. *Plasmokhimiichesky sintez ultradispersnikh poroshkov i ih primeneniye dlya modifizirovaniya metallov i spлавov* [Plasmochemical synthesis of ultrafine powders and their application for modification of steels and alloys]. V. P. Saburov, A. N. Cherepanov, M. F. Zhukov, e.a. Novosibirsk, Nauka, 1995, p. 330. (In Russian).
4. Cherepanov A. N., Aфонin Yu. V., Malikov A. G., Orishich A. M. *O primeneniye nanoporoshkov tugoplavkikh soedineniy pri lasernoy obrabotke materialov* [On the application of nanopowders of refractory compounds in the welding and processing of metals and alloys]. Tyazheloe Mashinostroenie, 2008, no. 4, pp. 25–26. (In Russian).

5. Cherepanov A. N., Ovcharenko V. E. *Vliyanie nanostrukturirovannikh kompozitsi-onnikh poproshkov na strukturu i svoystva zharoprochnogo splava Inconei 718*. [Effect of Nanostructured Composite Powders on the Structure and Strength Properties of the Hightemperature Inconel 718 Alloy]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2015, vol. 116, no. 12, pp. 1339–1344. (In Russian).
6. Karaguiozova Z., Manolov V., Tarasov M. Elektroless iron coating on nanosized particles, *Tribological Journal BULTRIB*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 73–79.
7. Krushenko G. G. Sposob izgotovleniya elektrodnoy provoloki dlya svarki alyuminievykh splavov. [A method of manufacturing an electrode wire for welding of aluminium alloys]. Patent RF, no. 2429958, 2011.

**Article history**

*Received 10 October 2016*

*Accepted 13 January 2017*