



УДК 621.791.923

**РАЗРАБОТКА НАПЛАВОЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ СПЛАВА СИСТЕМЫ AL-SN-CU ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ
АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННОГО
ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

**DEVELOPMENT OF SURFACING COMPOSITE MATERIALS BASED
ON AN AL-SN-CU SYSTEM ALLOY FOR THE FORMATION
OF ANTI-FRICTION COATINGS FOR FRICTION UNITS OF CRITICAL EQUIPMENT
IN OIL AND GAS INDUSTRY**

Михеев Роман Сергеевич

доктор технических наук,
профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики»,
Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский
университет)
mikheev.roman@mail.ru

Калашников Игорь Евгеньевич

доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник «Лаборатории прочности
и пластичности металлических и композиционных
материалов и наноматериалов (№ 10)»,
Институт металлургии и материаловедения
имени А.А. Байкова Российской академии наук
kalash2605@mail.ru

Быков Павел Андреевич

научный сотрудник «Лаборатории прочности и пластичности
металлических и композиционных материалов
и наноматериалов (№ 10)»,
Институт металлургии и материаловедения
имени А.А. Байкова Российской академии наук
pavel_imet@mail.ru

Кобелева Любовь Ивановна

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник «Лаборатории прочности
и пластичности металлических и композиционных материалов
и наноматериалов (№ 10)»,
Институт металлургии и материаловедения
имени А.А. Байкова Российской академии наук
likob@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе разработана технология изготовления наплавочных композиционных материалов на основе сплава системы Al-Sn-Cu (марка АО6-1), содержащего в качестве наполнителя частицы орторомбической фазы (Ti_2NbAl) в количестве 10 мас. %, в форме стандартных прутков диаметром 3 мм. Показано, что установленные технологические параметры процесса экструзии позволяют исключить химическое взаимодействие между материалом матрицы и наполнителя на всех стадиях получения наплавочных материалов. Достигнутые результаты позволяют рекомендовать разработанные наплавочные материалы для формирования антифрикционных покрытий узлов трения ответственного оборудования нефтегазовой отрасли.

Mikheev Roman Sergeevich

Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department «Technologies
of welding and diagnostics»,
Bauman Moscow State Technical University
mikheev.roman@mail.ru

Kalashnikov Igor Evgenevich

Doctor of Technical Sciences,
Leading Researcher of the Laboratory
of Strength and Plasticity of Metallic
and Composite Materials and Nanomaterials
(No. 10),
Baikov Institute of Metallurgy and Materials
Science RAS
kalash2605@mail.ru

Bykov Pavel Andreevich

Researcher of the Laboratory of Strength
and Plasticity of Metallic and Composite
Materials and Nanomaterials (No. 10),
Baikov Institute of Metallurgy
and Materials Science RAS
pavel_imet@mail.ru

Kobeleva Lubov Ivanovna

PhD, Leading Researcher of the Laboratory
of Strength and Plasticity of Metallic
and Composite Materials and Nanomaterials
(No. 10),
Baikov Institute of Metallurgy and Materials
Science RAS
likob@mail.ru

Annotation. In the present work, a technology has been developed for the manufacture of filler composite materials based on an alloy of the Al-Sn-Cu system (mark AO6-1), containing particles of the orthorhombic phase (Ti_2NbAl) in an amount of 10 wt. %, in the form of standard rods with a diameter of 3 mm. It is shown that the established technological parameters of the extrusion process make it possible to exclude the chemical interaction between the matrix material and the reinforcements at all stages of obtaining surfacing materials. The achieved results make it possible to recommend the developed surfacing materials for the antifriction coatings formation for friction units of critical equipment in the oil and gas industry.



Ключевые слова: композиционные материалы, дуговая наплавка, наплавочные прутки, функционально организованные композиции.

Keywords: composite materials, arc surfacing, surfacing rods, functionally organized compositions.

На современном этапе развития нефтегазовой отрасли промышленности существует потребность в принципиально новых функциональных материалах. В частности, дальнейшее совершенствование за счет легирования или специальной обработки антифрикционных сплавов, применяемых в качестве рабочего слоя узлов трения ответственного оборудования, исчерпало себя и практически невозможно [1–3].

За последние годы значительные успехи достигнуты в разработке изотропных дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе алюминия, обладающих лучшим сочетанием триботехнических, механических и других свойств [4–6]. Однако, наибольший интерес представляет задача применения подобных композиционных материалов в качестве рабочих слоев в составе многослойных композиций с функционально-организованной структурой [6, 7]. Для решения такой важной задачи ключевое значение имеет разработка присадочных или наплавочных композиционных материалов, позволяющих применять для обеспечения функциональной организации слоев из подобных материалов экономичные и широко распространенные на практике дуговые процессы.

В настоящей работе для изготовления наплавочных композиционных материалов в форме прутков применяли процесс экструзии предварительно подготовленной порошковой смеси (рис. 1, а). Исходными компонентами при этом являлись порошок матричного сплава АО6-1 (6 % Sn, 1 % Cu, остальное – алюминий, ГОСТ 14113) и частицы орторомбической фазы (Ti2NbAl) средним размером не более 100 мкм, изготовленные в ООО «Метсинтез». Выбор в качестве матричного сплава системы Al-Sn-Cu обусловлен уровнем его внедрения и востребованности в нефтегазовой отрасли. В частности, условия его эксплуатации допускают сочетание следующих параметров: удельных давлений до 32 МПа, окружных скоростей до 20 м/с и температур нагрева окружающей среды до плюс 120°C в условиях смазки. Частицы орто-фазы характеризуются наибольшим уровнем металлической составляющей химической связи поскольку являются интерметаллидным соединением, что и определило их выбор для применения в качестве наполнителя [8, 9]. Изготовленные наплавочные прутки из композиционных материалов обладали диаметром 3,0 мм и длиной 350 мм (рис. 1, б), что соответствует требованиям к пруткам, предназначенным для наплавки износостойкого слоя на детали машин и оборудования, работающего в условиях воздействия абразивного изнашивания, ударных нагрузок, коррозии, эрозии при повышенных температурах или в агрессивных средах согласно ГОСТ 21449.

Матричный порошок фракцией (300–400) мкм изготавливали обработкой стружки литой заготовки из сплава АО6-1 в планетарной мельнице Retch PM100 при скорости вращения 300 об/мин в течение 1 ч. С целью обеспечения равномерности распределения частиц Ti2NbAl в матричном порошке предварительно подготовленные композиционные порошковые навески (масса 80 г) подвергали обработке в планетарной мельнице Retsch PM100. Перемешивание осуществляли в защитной среде аргона высшего сорта по ГОСТ 10157 на следующих режимах: скорость вращения 350 об/мин, длительность 15 мин.



а)



б)

Рисунок 1 – Внешний вид оснастки и оборудования для осуществления процесса экструзии (а), а также изготовленных наплавочных композиционных прутков (б)

Важно отметить, что предельная доля частиц наполнителя в изготавливаемых составах композиционных материалов 10 масс. %. В противном случае эксплуатация функционально-организованных композиционных слоев будет сопровождаться интенсивным изнашиванием сопряженных деталей конструкций. Кроме того, увеличение доли наполнителя в наплавочных композиционных материалах приводит к ухуд-



шению их технологических свойств, определяющих возможность формирования из них качественных наплавочных прутков, а также функционально-организованных композиционных слоев процессами наплавки.

Проведены исследования структуры и фазового состава изготовленных наплавочных прутков. Исследования проводили средствами оптической и электронной микроскопии, а также с применением метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. В частности, применяли оптический микроскоп Leika DMILM, укомплектованный программным комплексом Qwin для анализа изображений; растровые электронные микроскопы Zeiss 1540EsB и JEOL JSM-6000PLUS (NEOSCOPE II), оснащенные детекторами вторичных и обратно отраженных электронов, а также энергодисперсионной системой микроанализа. Важно отметить, что с целью обеспечения достоверности полученных результатов исследования структуры и фазового состава изготовленных наплавочных прутков расходуемых стержней проводили в разных областях по всему поперечному сечению.

Характерные изломы наплавочных прутков из композиционных материалов, изготовленных процессом экструзии, представлены на рисунке 2. Видно, что разрушение наплавочных прутков из композиционных материалов имеет типичный для дисперсно-наполненных композиционных материалов смешанный характер: в одном изломе сочетаются скольные фасетки межфазного разрушения и участки вязкого разрушения матрицы. При выходе армирующих частиц в плоскость излома на их поверхности видны отдельные островки матрицы, свидетельствующие о дискретной межфазной связи частиц с матрицей. Результаты анализа поверхностей излома наплавочных прутков из композиционных материалов на основе сплава системы Al-Sn-Cu свидетельствуют об отсутствии признаков деградации наполнителя и подтверждают его сохранение в составе прутков.

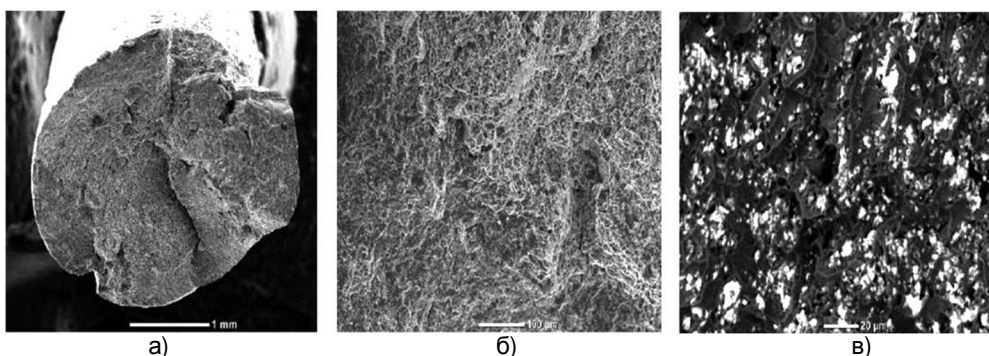


Рисунок 2 – Характерный вид изломов наплавочных прутков из композиционного материала состава AO6-1 + 10 % Ti₂NbAl (< 100) во вторичных (а, б) и обратно-отраженных электронах (в)

Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии поверхностей изготовленных процессом экструзии наплавочных прутков представлены на рисунке 3. Видно, что изготовленные наплавочные прутки сохраняют заданный код армирования, т.е. в их составе присутствуют частицы наполнителя. Кроме того, различие в количественных результатах поэлементного энергодисперсионного анализа в исследованных областях не превышает 3 %. Это позволяет считать состав изготовленных процессом экструзии наплавочных прутков однородным, а распределение частиц наполнителя удовлетворительным.

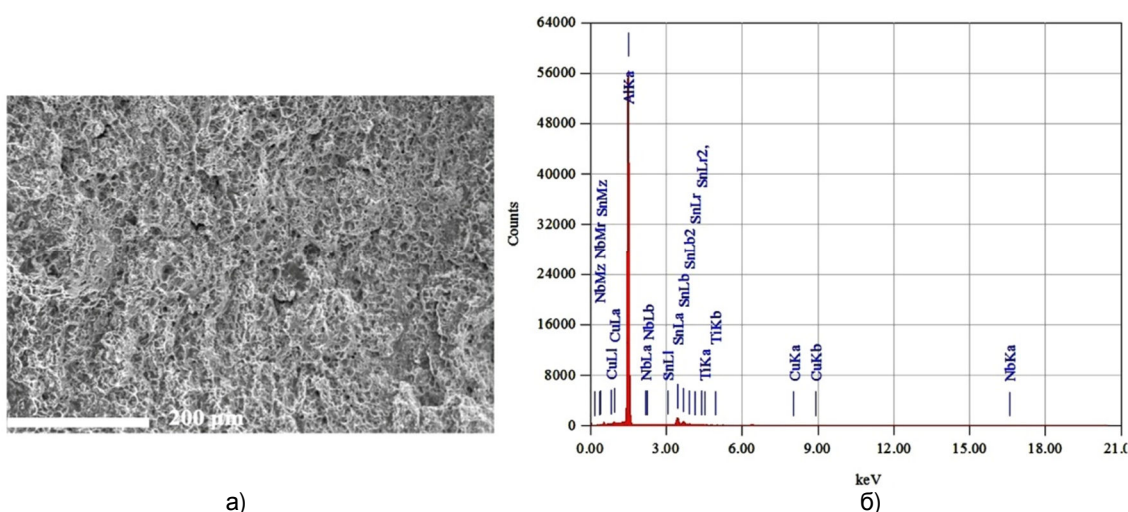


Рисунок 3 – Характерная поверхность излома (а) наплавочного прутка и соответствующие ей результаты спектрального анализа (б)



Таким образом, в настоящей работе разработана технология изготовления наплавочных композиционных материалов на основе сплава системы Al-Sn-Cu, содержащего в качестве наполнителя частицы орторомбической фазы (Ti_2NbAl) в количестве 10 мас. %, в форме стандартных прутков диаметром 3 мм. Установленные технологические параметры процесса экструзии позволяют исключить химическое взаимодействие между материалом матрицы и наполнителя на всех стадиях получения наплавочных материалов, что позволяет рекомендовать их для формирования антифрикционных покрытий узлов трения ответственного оборудования нефтегазовой отрасли.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00366, <https://rscf.ru/project/22-29-00366/>.

Список литературы:

1. Анализ трендов перспективных материалов для нефтегазовой отрасли / В.В. Жуков [и др.] // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2022. – Т. 7. – № 3. – С. 136–147.
2. Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications / P. Garg [et. al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2019. – Vol. 8. – № 5. – P. 4924–4939.
3. Development and testing of Al-SiC and Al-TiC composite materials for application in friction units of oil production equipment / T.A. Chernyshova [et. al.] // Inorganic Materials: Applied Research. – 2011. – Vol. 2. – № 3. – P. 282–289.
4. Gill R.S., Samra P.S., Kumar A. Effect of different types of reinforcement on tribological properties of aluminium metal matrix composites (MMCs) – A review of recent studies // Materials Today. Proceedings. – 2022. – Vol. 56. – № 5. – P. 3094–3101.
5. Разработка функционально-организованных композиций для узлов трения центробежных насосов нефтегазовой отрасли / Р.С. Михеев [и др.] // Булатовские чтения. – 2022. Т. 2. – С. 198–200.
6. Zabihi A., Soltani R. Tribological properties of B4C reinforced aluminum composite coating produced by TIG re-melting of flame sprayed Al-Mg-B4C powder // Surface and Coating Technology. – 2018. – Vol. 15. – P. 707–718.
7. Mikheev R.S. Application of the friction surfacing process for the production of functional gradient layered composition // Journal of Physycs: Conference Series. – 2021. – Vol. 1990. – № 012036. – P. 1–6.
8. Исследование структуры и свойств композиционных покрытий системы SnSbCu-Ti2NbAl, сформированных на стальных подложках процессом дуговой наплавки / Г.П. Савицкий [и др.] // Металлы. – 2022. – № 5. – С. 50–56.
9. Оценка равномерности распределения частиц Ti_2NbAl в алюмоматричном композиционном материале / И.Е. Калашников [и др.] // Перспективные материалы. – 2022. – № 5. – С. 40–48.

List of references:

1. Trend analysis of promising materials for the oil and gas industry / V.V. Zhukov [et al.] // PRONEFT. Professionally about oil. – 2022. – V. 7. – № 3. – P. 136–147.
2. Advance research progresses in aluminum matrix composites: manufacturing & applications / P. Garg [et. al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2019. – V. 8. – № 5. – P. 4924–4939.
3. Development and testing of Al-SiC and Al-TiC composite materials for application in friction units of oil production equipment / T.A. Chernyshova [et. al.] // Inorganic Materials: Applied Research. – 2011. – V. 2. – № 3. – P. 282–289.
4. Gill R.S., Samra P.S., Kumar A. Effect of different types of reinforcement on tribological properties of aluminum metal matrix composites (MMCs) – A review of recent studies // Materials Today. Proceedings. – 2022. – Vol. 56. – № 5. – P. 3094–3101.
5. Development of functionally organized compositions for friction units of centrifugal pumps of oil and gas industry / R.S. Mikheev [et al.]. – 2022. – V. 2. – P. 198–200.
6. Zabihi A., Soltani R. Tribological properties of B4C reinforced aluminum composite coating produced by TIG re-melting of flame sprayed Al-Mg-B4C powder // Surface and Coating Technology. – 2018. – V. 15. – P. 707–718.
7. Mikheev R.S. Application of the friction surfacing process for the production of functional gradient layered composition // Journal of Physycs: Conference Series. – 2021. – V. 1990. – № 012036. – P. 1–6.
8. Study of structure and properties of composite coatings of SnSbCu-Ti2NbAl system, formed on steel substrates by arc cladding process / G.P. Savitsky [et al.] // Metally. – 2022. – № 5. – P. 50–56.
9. Estimation of the uniformity of particles Ti_2NbAl distribution in aluminomatrix composite material / I.E. Kalashnikov [et al.] // Perspective materials. – 2022. – № 5. – P. 40–48.