

Розробка вольфрамідних сильнострумових контактів на основі відходів металообробки

А. В. Мініцький, кандидат технічних наук, доцент, minitsky@i.ua

Є. Г. Биба, кандидат технічних наук, доцент

Н. В. Мініцька, кандидат технічних наук, доцент

О. В. Власова*, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Д. В. Ведель*

Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського», Київ

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

Для виготовлення псевдосплавів системи «вольфрам - мідь», які використовують в електротехнічній промисловості для умов високої напруги, перспективними є технології порошкової металургії. При цьому, у зв'язку з великою різницею температур плавлення основних компонентів, пористий каркас тугоплавкого компонента (W) погано просочується розплавом міді через низьку її змочуваність. Для усунення цього недоліку використовують додаткове легування елементами VIII групи Періодичної системи – нікелем або кобальтом, що значно підвищують собівартість виробів.

Запропоновано використовувати відходи металообробки важких сплавів ВНЖ у вигляді стружки та відходи міді для створення сильно струмових контактів. Досліджено вплив тиску на ущільнення стружки із сплаву на основі вольфраму при пресуванні. Встановлено, що тиск при якому досягається пористість 30 – 35 % складає 550 – 600 МПа. Відпрацьовано технологію просочування міддю пористих каркасів із важкого сплаву. Показано, що після просочування брикетів утворюється каркасна структура із сплаву ВНЖ з прошарками міді. Встановлено взаємодію між каркасом та мідним розплавом, яка забезпечується нікелем та залізом, що входять до складу важкого сплаву на основі вольфраму. Результати випробувань ерозійної стійкості показали, що розроблений композиційний матеріал втрачає вагу при утворенні електричної дуги на рівні стандартних псевдосплавів. Показано можливість здешевлення технології отримання псевдосплавів для сильно струмових контактів, що мають низький питомий електричний опір та високі значення ерозійної стійкості.

Ключові слова: псевдосплав, сильно струмовий, контакт, вольфрам, мідь, стружка, електричний опір, ерозійна стійкість.

Псевдосплави на основі системи W – Cu, мають широке застосування в електротехнічній промисловості завдяки комплексу унікальних властивостей, що дозволяє застосовувати їх в якості розривних контактів, працюючих за умов високої напруги та струму [1-3]. Для створення псевдосплавів використовують технології порошкової металургії, які

Технічна інформація

забезпечують поєднання властивостей компонентів, що є несумісними між собою через високу різницю температур плавлення [4-6]. До того ж, перевагою порошкового псевдосплаву є те, що такий матеріал може витратити надлишок тепла, яке виділяється при горінні електричної дуги, на плавлення і випаровування легкоплавкого компоненту. При вмісті тугоплавкого компоненту більше 50 % є можливість формувати пористий каркас з наступною інфільтрацією легкоплавкої складової [7, 8]. Проте, недоліком таких композитів є погана змочуваність міддю тугоплавких складових, що вимагає додаткового введення до складу матеріалів елементів VIII групи Періодичної системи елементів: нікелю або кобальту [9, 10]. Введення даних елементів у вигляді чистих порошоків значно підвищує собівартість матеріалів, тому більш доцільно використовувати відходи металообробки важких сплавів з певним співвідношенням вольфраму та нікелю.

Метою даної роботи є розробка сильнострумівих контактів шляхом формування пористого каркасу на основі відходів металообробки важких сплавів з наступною інфільтрацією розплавом міді.

В роботі застосовували відходи сплаву ВНЖ у вигляді стружки та відходи міді у вигляді подрібненого дроту діаметром 0,2 – 0,3 мм. Результати аналізу хімічного складу, проведеного на хімічному аналізаторі «Expert 3L», показали, що важкий сплав містить 92 % вольфраму та 5 і 3 % нікелю і заліза відповідно, що відповідає сплаву ВНЖ-5-3 (табл. 1).

Таблиця 1

Хімічний склад стружки сплаву ВНЖ

№	Елемент	Масова частка, %
1	W	90.882 ± 0.107
2	Ni	5.637 ± 0.084
3	Fe	3.481 ± 0.072

Стружку відсіювали на ситі з розміром комірок 0,63. Пористий каркас формували методом статичного пресування у розбірній прес-формі діаметром 10,0 мм в діапазоні тисків 300 – 700 МПа.

Як показали дослідження впливу тиску пресування на пористість каркасів, остання знаходиться в межах 30 – 35 %, тобто практично не залежить від прикладеного тиску (рис. 1 (крива 2)). Це обумовлено характером деформації частинок стружки при стисненні, яка формується у міцний каркас вже при низьких тисках. Каркаси із важкого сплаву попередньо спікали при температурі 1200 °С у середовищі водню протягом 1 години для відновлення оксидних плівок. Низькотемпературне спікання приводить до незначного зростання пористості на 1 – 2 %, що пов'язано із зменшенням ваги каркасів внаслідок відновлення (рис. 1, крива 1).

Враховуючи об'єм пор каркасів на основі сплаву ВНЖ із відходів міді, які представляють собою подрібнений дріт діаметром 0,3 мм, було сформовано пресовки при тиску 300 МПа. Мідні пресовки встановлювали на каркаси із сплаву ВНЖ і проводили інфільтрацію при температурі 1200 °С протягом 30 – 40 хв. В результаті після просочування брикетів спресованих

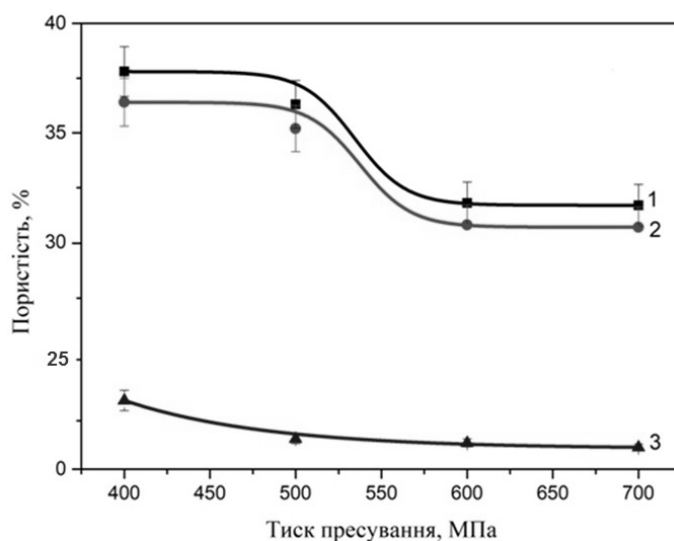


Рис. 1. Залежність пористості брикетів від тиску пресування. 1 - після пресування та спікання; 2 - після пресування; 3 - після просочування розплавом міді.

при тисках 500-700 МПа було отримано беспористі композити (рис. 1, крива 3).

Результати дослідження макроструктури композитів показали, що після просочування брикетів утворюється каркасна структура із сплаву ВНЖ з прошарками міді (рис. 2).

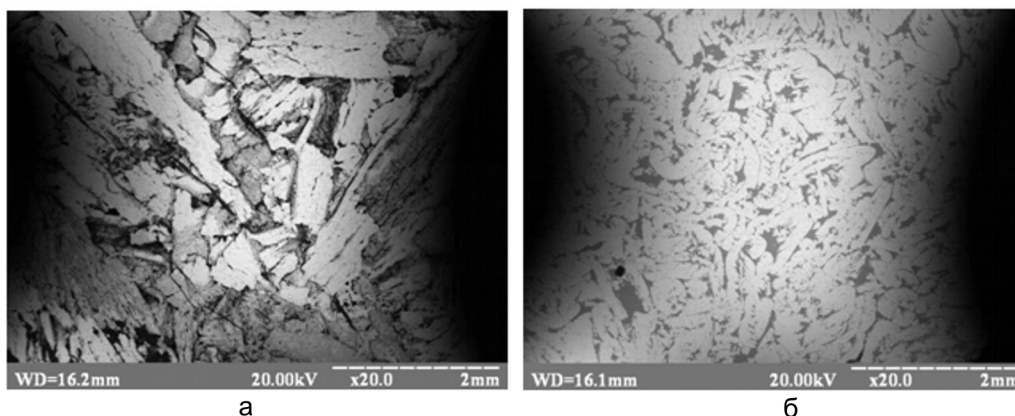


Рис. 2. Макроструктура композиту: а – вихідний каркас сплаву ВНЖ; б – каркас сплаву ВНЖ після просочування міддю.

Мікрорентгеноспектральний аналіз отриманого композиту, проведеного за допомогою скануючого електронного мікроскопу SELM-106, показав, що структура композиту складається переважно із трьох складових (рис. 3, табл. 3). Основна частина матеріалу складається із вольфраму з незначною кількістю розчинених нікелю та заліза (близько 2 %). При взаємодії міді із матеріалом каркасу в ній розчинилось близько 12 % нікелю та 1 % заліза. Третя складова на границі між каркасом та міддю складається із вольфраму та значної кількості нікелю (до 25 %) і заліза (до 18 %). Високий

Технічна інформація

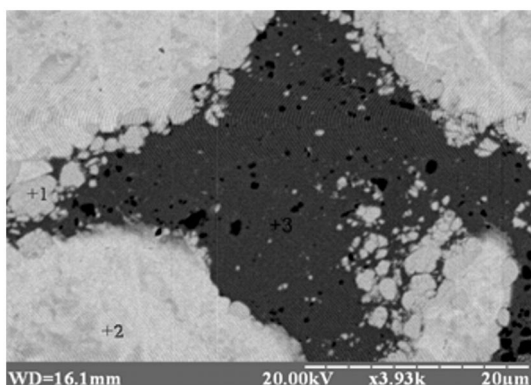


Рис. 3. Мікроструктура композиту із сплаву ВНЖ просоченого міддю.

вміст нікелю та заліза на границі розподілу каркасу та мідного розплаву підтверджує взаємодію між сплавом ВНЖ та міддю, що забезпечило хорошу адгезію між складовими композиту.

Мікротвердість фазових складових композиту, яка визначалась на автоматичному приладі МНВ-1000, також показала відмінність значень між трьома фазами. При цьому слід зазначити високі значення для фази №3 – $1,63 \pm 0,2$ ГПа (табл. 3).

Високі значення мікротвердості для фази №3, яка складається переважно із міді, пояснюється утворенням твердих розчинів нікелю в міді, що підтверджують результати рентгенофазового аналізу, який був проведений на дифрактометрі марки RIGAKU ULTIMA-3M. В рентгенографічних дослідженнях використано-увались $\text{CuK}\alpha_{1,2}$ -випромінення ($\lambda_{\text{CuK}\alpha 1} = 0,154187$ нм), графітовий монохроматор. Дифрактограми обробляли з використанням пакету програм RIR та Ріетвельда.

Таблиця 2

Хімічний аналіз матеріалу

№	Масова частка, %			
	W	Ni	Cu	Fe
1	57,51	24,36	0	17,76
2	94,91	2,09	0	2,41
3	0	12,78	86,16	1,04

Таблиця 3

Мікротвердість фаз композиту при навантаженні 50 г

№	H_v , ГПа
1	$3,56 \pm 0,2$
2	$4,52 \pm 0,1$
3	$1,63 \pm 0,2$

Аналізуючи рис. 4, можна побачити що лінії, як вольфраму так і міді уширені та зміцнені в бік менших кутів, що свідчить про можливе утворення твердих розчинів на їх основі.

У випадку вольфраму де розчинені атоми нікелю та заліза, які мають менший атомний радіус (124 пм та 126 пм відповідно), порівняно з 141 пм для вольфраму, призводять до зсуву ліній в бік менших кутів (рис. 5 а, б).

Схожий ефект спостерігається в міді (128 пм), в якій присутність менших атомів заліза та нікелю приводять до здвигу та уширенню ліній (рис. 5 в, г).

Визначення електричних властивостей композиту, проведених на одинарно-подвійному мості постійного струму РЗО09 з по елементною повіркою і підстроюванням, що призначений для вимірювання в діапазоні від 10^{-8} до $1,1111 \cdot 10^8 \Omega$ на постійному струмі за ТО 3.454.019 показало, що вихідний каркас має питомий електричний опір 18,0 – 18,5 мкОм, а після просочення міддю близько 6,0 – 6,5 мкОм. Тобто отриманий композит має

достатньо високу електропровідність, що зумовлено характером каркасної

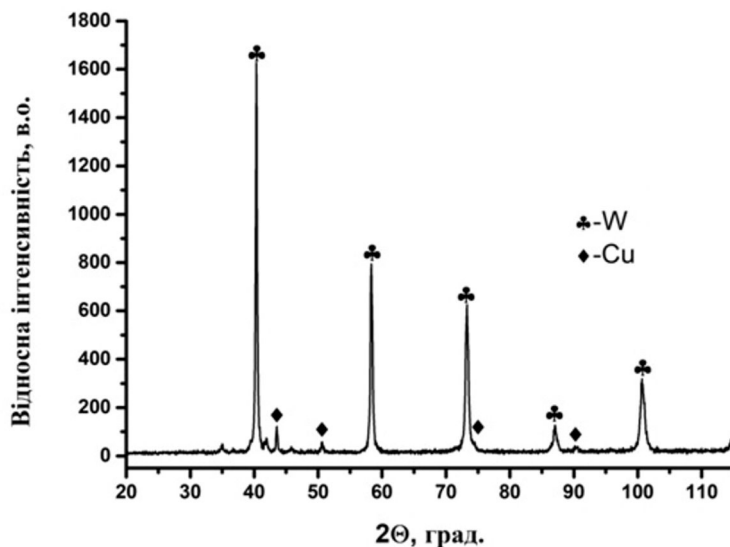


Рис. 4. Дифрактограма композиту на основі каркасу із сплаву ВНЖ просоченого міддю.

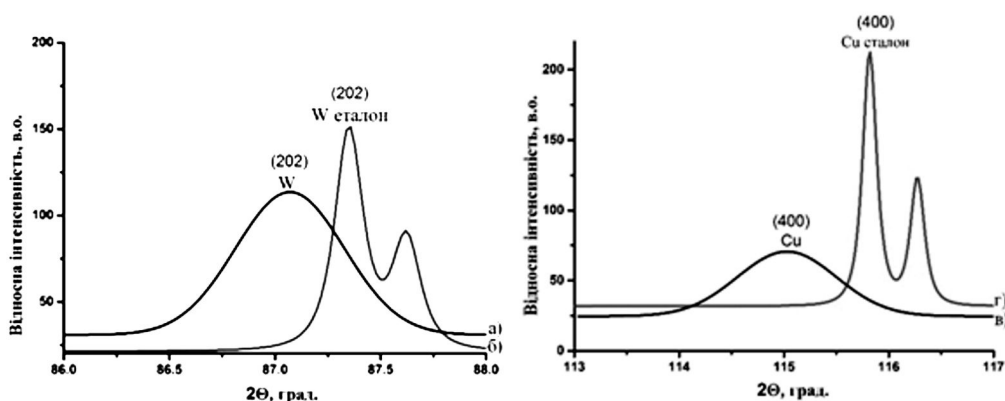


Рис. 5. Часткове зображення лінії дифракції вольфраму (а, б) та міді (в, г) та порівняння їх з еталонними.

структури в якій мідь розташована безперервними ланцюгами.

Оскільки однією з основних експлуатаційних характеристик для розроблених композитів є ерозійна стійкість, проведено їх випробування на спеціальному стенді. Випробування електричної ерозії проводили на повітрі при струмі 3кА при відстані між електродами 2 мм. Результати випробувань показали, що розроблений композиційний матеріал втрачає вагу при утворенні електричної дуги при різній кількості циклів (від 10 до 50) на рівні стандартних псевдосплавів типу МВ70 та КМК-Б25 [11], які мають таке ж співвідношення вмісту вольфраму та міді, а саме 70/30 (табл. 4).

Таким чином відпрацьовано технологію виготовлення вольфрам-мідних сплавів із відходів металообробки у вигляді стружки. Показано можливість створення беспористих композитів шляхом просочування міддю пористих каркасів сплаву ВНЖ. Встановлено взаємодію між міддю та тугоплавким каркасом. Визначення електричних властивостей композиту

Технічна інформація

Таблиця 4

Випробування ерозійної стійкості композиту на основі каркасу із сплаву ВНЖ просоченого міддю

Кількість циклів	10	20	30	40	50
Втрата ваги, г					
Розроблений	0,4531	0,9024	1,7361	2,4253	2,7852
МВ70 ^[11]	–	1,101	–	2,579	2,984

показало, що вихідний каркас має питомий електричний опір 18,0 – 18,5 мкОм, а після просочення міддю близько 6,0 – 6,5 мкОм, що є цілком прийнятним при виготовленні контактних матеріалів. Результати випробувань ерозійної стійкості показали, що розроблений композиційний матеріал втрачає вагу при утворенні електричної дуги при різній кількості циклів (від 10 до 50) на рівні стандартних псевдосплавів. Результати роботи можуть бути використанні при створенні струмових контактів із відходів металообробки, що значно здешевлює такі матеріали.

Література

1. Dong L.L. Recent progress in development of tungsten-copper composites: Fabrication, modification and applications / L.L. Dong, M. Ahangarkani, W.G. Chen, Y.S. Zhang // *Refractory Metals and Hard Mater.* – 2018. – Vol. 75. – P. 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.03.014>.
2. Muller A.V. Melt infiltrated tungsten-copper composites as advanced heat sink materials for plasma facing components of future nuclear fusion devices / A.V. Muller, Ewert D., Galatanu A. Milwich, R. Neu, J.Y. Pastor, U. Siefken, E. Tejado, J.H. You // *Fusion Engineering and Design.* – 2017. – Vol. 124. – P. 455-459. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.01.042>.
3. Zhao P. Fabrication of W-Cu functionally graded material with improved mechanical strength / P. Zhao, S. Guo, G. Liu, Y. Chen, J. Li // *J. Alloys Compd.* – 2014. – Vol. 601. – P. 289-292. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.01.180>.
4. Montealegre-Melendez I. Analysis of the Influence of Starting Materials and Processing Conditions on the Properties of W/Cu Alloys / C. Arevalo, E.M. Perez-Soriano, E. Neubauer, C. Rubio-Escudero, M. Kitzmantel // *Materials.* – 2017. – Vol. 10. – P. 142-149. <https://doi.org/10.3390/ma10020142>.
5. Chen X. Explosive compact-coating of tungsten-copper alloy to a copper surface / X. Chen, X. Li, H. Yan, X. Wang, Y. Miao // *Materials Research Express.* – 2017. – No. 4. – P. 138-147. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa664c>.
6. Епифанцева Т.А. Влияние объемной доли и дисперсности вольфрамовых частиц на электрическое сопротивление гетерогенного материала на медной основе / Т.А. Епифанцева, О.В. Власова, Ю.М. Солонин, Г.А. Баглюк, М.Б. Штерн, А.Ю. Коваль // *Электрические контакты и электроды: Труды Института пробл. Материаловедения И.Н. Францевича НАН Украины. Серия «Композиционные, слоистые и градиентные материалы и покрытия».* Ред. кол. Гречанюк Н.И. (отв. ред.) и др. – Киев, 2018. – С. 99–107.
7. Hamidi A.G. Tungsten-copper composite production by activated sintering and infiltration / A.G. Hamidi, H. Arabi, S. Rastegari // *Refractory Metals and Hard Mater.* – 2011. – Vol. 29. – P. 538-541. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.03.009>.
8. Duan L., Lin W., Wang J., Yang G. Thermal properties of W-Cu composites

- manufactured by copper infiltration into tungsten fiber matrix / L. Duan, W Lin., J. Wang, G. Yang // *Refractory Metals and Hard Mater.* – 2014. – Vol. 46. – P. 96-100. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.05.022>.
9. Еременко В.Н. Растворимость вольфрама в медно-никелевых расплавах / В.Н. Еременко, Р.В. Минакова, М.М. Чураков // *Порошковая металлургия.* – 1977. – № 4. – С. 55–58
 10. Найдич Ю.В. Исследование процесса уплотнения при жидкофазном спекании под давлением в системе вольфрам – медь / Ю.В. Найдич, И.А. Лавренко, В.А. Евдокимов // *Порошковая металлургия.* – 1974. – №1. – С.34-39.
 11. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов / Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Вещенков Н.А., Жаворонков М.А. – М.: Энергия, 1978. – 256 с.

References

1. Dong L.L. Ahangarkani M., Chen W.G., Zhang Y.S., *Refractory Metals and Hard Mater.*, 2018, Vol. 75, pp. 30-42 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.03.014>.
2. Muller A.V. Ewert D., Galatanu A., Milwich M., Neu R., Pastor J. Y., Siefken U., Tejado E., You J.H., *Fusion Engineering and Design*, 2017, Vol. 124, pp. 455-459 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.01.042>.
3. Zhao P., Guo S., Liu G., Chen Y., Li J., *J. Alloys Compd.*, 2014, Vol. 601, pp. 289-292 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.01.180>.
4. Montealegre-Melendez I., Arevalo C., Perez-Soriano E.M., Neubauer E., Rubio-Escudero C., Kitzmantel M., *Materials.*, 2017, No. 10, pp.142-149 [in English]. <https://doi.org/10.3390/ma10020142>.
5. Chen X., Li X., Yan H., Wang X., Miao Y., *Materials Research Express*, 2017, No. 4, pp.138-147 [in English]. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa664c>.
6. Epifantseva T.A., Vlasova O.V., Solonin Yu.M., Baglyuk G.A., Stern M.B., Koval A.Yu., *Electrical Contacts and Electrodes: Proceedings of the Institute probl. Material Science I.N. Frantsevich NAS of Ukraine.*, Kiev, 2018, pp. 99-107 [in Russian].
7. Hamidi A.G., Arabi H., Rastegari S., *Refractory Metals and Hard Mater.*, 2011, Vol. 29, pp. 538-541[in English]. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.03.00>.
8. Eremenko V.N., Minakova R.V., Churakov M.M., *Powder Metallurgy*, 1977, No. 4, pp. 55-58 [in Russian]. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.05.022>.
10. Naidich Yu.V., Lavrenko I.A., Evdokimov V.A., *Powder Metallurgy*, 1974, No. 1, pp. 34-39[in Russian].
11. Butkevich G.V., Belkin G.S., Veshchenkov N.A., Zhavoronkov M.A. *Electrical erosion of high-current contacts and electrodes*, Moskva: Energy, 1978, 256 p. [in Russian].

Одержано 21.11.19

А. В. Миницкий, Е. Г. Биба, Н. В. Миницкая, О. В. Власова, Д. В. Ведель

Разработка вольфрамсодержащих сильноточных контактов на основе отходов металлообработки

Резюме

Для изготовления псевдосплавов системы «вольфрам - медь», которые используют в электротехнической промышленности для условий высокого напряжения, перспективными являются технологии порошковой металлургии. При этом, в связи с большой разницей температур плавления основных компонентов, пористый каркас

тугоплавкого компонента (W) плохо просачивается расплавом меди из-за низкой ее смачиваемость. Для устранения этого недостатка используют дополнительное легирование элементами VIII группы Периодической системы – никелем или кобальтом, что значительно повышает себестоимость изделий.

Предложено использовать отходы металлообработки тяжелых сплавов ВНЖ в виде стружки и отходы меди для создания сильно токовых контактов. Исследовано влияние давления на уплотнение стружки из сплава на основе вольфрама при прессовании. Отработана технология пропитки медью пористых каркасов из тяжелого сплава. Показано, что после пропитки брикетов образуется каркасная структура из сплава ВНЖ с прослойками меди. Установлено взаимодействие между каркасом и медным расплавом, что обеспечивается никелем и железом, которые входят в состав тяжелого сплава на основе вольфрама. Результаты испытаний эрозионной стойкости показали, что разработанный композиционный материал теряет вес при образовании электрической дуги на уровне стандартных псевдосплавов. Показана возможность удешевления технологии получения псевдосплавов для сильно токовых контактов, которые имеют низкое удельное электрическое сопротивление и высокие значения эрозионной стойкости.

Ключевые слова: псевдосплав, сильнотоковый, контакт, вольфрам, медь, стружка, электрическое сопротивление, эрозионная стойкость.

A. V. Minitsky, Ye. G. Byba, N. V. Minitska, O. V. Vlasova, D. V. Vedel

Development of tungsten high-current contacts based on

Summary

For the manufacture of pseudo-alloys of the tungsten-copper system, which are used in the electrical industry for high voltage conditions, powder metallurgy technologies are promising. Moreover, due to the large difference in the melting temperatures of the main components, the porous skeleton of the refractory component (W) is poorly leaked by the copper melt due to its low wettability. To eliminate this drawback, additional alloying is used with elements of group VIII of the Periodic system - nickel or cobalt, which significantly increases the cost of products.

In the work, it is proposed to use metalworking wastes of heavy residence permits alloys in the form of shavings and copper wastes in the form of a ground rod to create highly current contacts.. The effect of pressure on the compaction of tungsten-based alloy shavings is investigated. The technology of impregnating copper with porous frames of heavy alloy was developed. Studies of the macrostructure of composites showed that after the briquettes are impregnated, a skeleton structure of a residence permit alloy with copper layers is formed. The interaction between the frame and the copper melt is established, which is ensured by nickel and iron, which are part of the tungsten-based heavy alloy. The results of testing the erosion rate showed that fragmentation of the composite material in the case of approved electric arcs on the level of standard pseudo-alloys. The possibility of cheapening the technology for producing pseudo-alloys for high current contacts is shown to have a low electrical resistivity and high values of erosion resistance.

Keywords: pseudo-alloy, high current, contact, tungsten, copper, shavings, electrical resistance, erosion resistance.