

## ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДОВ «АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ / МЕДЬ» МЕТОДОМ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ

Рогачев С.О.<sup>1</sup>, Андреев В.А.<sup>2,3</sup>, Юсупов В.С.<sup>2</sup>, Хаткевич В.М.<sup>1</sup>, Токарь А.А.<sup>1</sup>,  
Николаев Е.В.<sup>1</sup>, Перкас М.М.<sup>2</sup>, Бондарева С.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г.  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН, г. Москва,  
Россия

<sup>3</sup>ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ», г. Москва, Россия  
E-mail: csaap@misis.ru

**Введение.** Композиционные и гибридные материалы широко применяются во многих отраслях промышленности благодаря комплексу свойств, который не может быть достигнут с использованием одного материала [1]. Например, в электротехнике и электроэнергетике перспективно использование биметаллических проводников типа алюминий / медь, что обеспечивает наряду с высокой электропроводностью снижение массы, а также стоимости по сравнению с чистой медью или медным сплавом. Производство таких материалов освоено методами экструзии или волочения [2].

Новым направлением в области создания композиционных и гибридных металлических материалов является получение в их компонентах ультрамелкозернистой (nano- и субмикрокристаллической) структуры, обеспечивающей более высокие свойства материалов [3]. Такие структуры могут быть сформированы при больших пластических (мегапластических) деформациях с использованием методов равноканального углового прессования (РКУП), равноканальной угловой экструзии (РКУЭ), кручения под высоким квазигидростатическим давлением (КВД) или их модификаций [4]. Известно применение метода РКУЭ для получения биметаллических прутков с алюминиевым стержнем и медной оболочкой [5]. Существенным недостатком этих методов является малый размер обрабатываемой заготовки.

Для получения длинномерных металлических заготовок с одновременным измельчением зеренной структуры и повышением прочности перспективно использовать такие методы больших пластических деформаций, как ротационная или радиальная ковка [6].

В настоящей работе с использованием процесса ротационной ковки получены длинномерные биметаллические прутки «алюминиевый сплав / медь», и проведено исследование их микроструктуры и механических свойств.

**Материалы и методики исследования.** Биметаллическая заготовка для ротационной ковки представляла собой медный стержень диаметром 10 мм, помещенный в алюминиевую оболочку с внешним диаметром 20 мм. Начальная длина заготовки составила 200 мм (рис. 1 а). В качестве компонентов заготовки использовали прутки из алюминиевого сплава марки Д16 (Al – 4,3 Cu – 1,7 Mg – 0,8 Mn – 0,3 Fe – 0,3 Si – 0,1 Zn) и меди чистотой 99,95 % в холоднодеформированном состоянии. Резку компонентов биметаллической заготовки из прутков осуществляли на токарном станке СКЕ6130i с ЧПУ. Перед сборкой заготовки ее компоненты подвергали разупрочняющему отжигу в вакууме: при температуре 400 °C с выдержкой 2 ч для алюминиевого сплава и при температуре 500 °C с выдержкой 40 мин для меди.

Ковку биметаллической заготовки осуществляли на модернизированной двухбойковой ротационно-ковочной машине РКМ1 (В2129.01) (рис. 1 б) без нагрева, при комнатной температуре. На больших диаметрах 20 – 10 мм

подача заготовки осуществлялась вручную, на дальнейших проходах использовалась валковая подача, что позволило получить более прямолинейную заготовку и равномерное распределение деформации по длине. Обжатие за проход составило 8 – 35 %. После накопления суммарной деформации 96,4 %, начиная с диаметра 3,8 мм, осуществляли периодический низкотемпературный отжиг для снятия наклёпа заготовки при температуре 120 °С в трубчатой печи ПТС-2000-60-1200. Конечный диаметр заготовки составил 2,5 мм.



Рисунок 1 - Биметаллическая заготовка «алюминиевый сплав / медь» (слева) и процесс ротационной ковки (справа)

Металлографический анализ структуры биметаллических образцов после ротационной ковки с разными степенями обжатия проводили на поперечных шлифах на оптическом микроскопе «Buehler».

Измерения микротвердости на поперечных шлифах биметаллических образцов проводили по методу Виккерса (нагрузка 50 г, время выдержки 10 с) с помощью микротвердометра MICROMET 5101 с цифровой камерой и программы «ImageExpert MicroHardness 2».

Испытания на одноосное растяжение биметаллических образцов проводили на универсальной испытательной машине INSTRON 150LX при комнатной температуре со скоростью растяжения 1 мм/мин.

**Результаты исследования.** Визуальный анализ биметаллических образцов после ротационной ковки с конечным диаметром 2,5 мм показал хорошее качество поверхности и отсутствие дефектов на границе раздела алюминиевой оболочки и медного стержня.

Увеличение степени обжатия привело к существенному упрочнению компонентов биметаллической заготовки. При уменьшении диаметра заготовки с 20 до 15 мм микротвердость медного стержня повышается с 63 HV до 110 HV, а оболочки из алюминиевого сплава с 67 HV до 90 HV. При дальнейшем уменьшении диаметра до 5,1 и 2,5 мм микротвердость медного стержня увеличивается слабо (до 120 HV), а оболочки из алюминиевого сплава последовательно повышается до 105 и 125 HV. Таким образом, при конечном диаметре заготовки 2,5 мм наблюдается равномерное распределение микротвердости в поперечном сечении.

Предел текучести и прочности биметаллического образца диаметром 5,1 мм составили, соответственно, 330 и 375 МПа. При этом относительное удлинение не

превышает 2 %. Для повышения запаса пластичности рекомендуется проводить низкотемпературный отжиг заготовки после ротационной ковки.

**Acknowledgement:** *The work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of Increase Competitiveness Program of NUST «MISiS (№ K2-2019-008), implemented by a governmental decree dated 16th of March 2013, N 211. The authors greatly thank A.A. Komissarov for the help with tensile testing.*

#### **Список литературы**

- [1] Ashby M.F., Brechet Y.J.M. Designing hybrid materials. *Acta Mater.* 51 (2003) 5801–5821.
- [2] Ahmed N. Extrusion of copper clad aluminum wire. *J. Mech. Work. Technol.* 2 (1978) 19–32.
- [3] Beygelzimer Y., Estrin Y., Kulagin R. Synthesis of hybrid materials by severe plastic deformation: a new paradigm of SPD processing *Adv. Eng. Mater.* 17 (2015) 1853–1861.
- [4] S.O. Rogachev, S.A. Nikulin, A.B. Rozhnov, V.M. Khatkevich, T.A. Nechaykina, M.V. Gorshenkov, R.V. Sundeev. Multilayer “Steel/Vanadium Alloy/Steel” Hybrid Material Obtained by High-Pressure Torsion at Different Temperatures // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 48 (2017) 6091–6101.
- [5] Eivani A.R., Taheri A.K. A new method for producing bimetallic rods. *Mater. Lett.* 61 (2007) 4110–4113.
- [6] V.A. Andreev, V.S. Yusupov, M.M. Perkas, V.V. Prosvirnin, A.E. Shelest, S.D. Prokoshkin, I.Yu. Khmelevskaya, A.V. Korotitskii, S.A. Bondareva, R.D. Kareljin. Mechanical and Functional Properties of Commercial Alloy TN-1 Semiproducts Fabricated by Warm Rotary Forging and ECAP. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2017 (2017) 890–894.