

## УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ПРОВОДОВ Cu/Nb, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ «ПЛАВКА+ДЕФОРМАЦИЯ»

<sup>1</sup>Никулин С.А., <sup>1</sup>Рогачев С.О., <sup>1</sup>Крайнев А.В., <sup>2</sup>Панцырный В.И.,

<sup>1</sup>Рожнов А.Б., <sup>2</sup>Хлебова Н.Е., <sup>1</sup>Задорожный М.Ю.

<sup>1</sup>НИТУ «МИСис», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО «Научно-Производственное Предприятие «НАНОЭЛЕКТРО», г. Москва, Россия

E-mail: nikulin@misis.ru, csaap@mail.ru

### Введение

Бинарные нанокomпозиционные проводники in-situ на основе металлической медной матрицы с добавками ОЦК металлов, такие как Cu/Nb, Cu/Fe, Cu/Cr, Cu/V являются предметом интенсивных исследований более 30 лет [1-9]. Уникальное сочетание высокой прочности с высокой электропроводностью, обусловленное переходом к наноразмерной дисперсности компонентов, выделяет их в отдельный класс нанокomпозиционных материалов и позволяет использовать их в качестве перспективных материалов для изготовления элементов устройств, работающих в сильных электромагнитных полях, например, в высокопольных магнитах, в индукторах для магнитно-импульсной штамповки, а также в кабельных изделиях, работающих в условиях больших нагрузок. Высокую прочность (>1100 МПа) композиционных проводов больших сечений можно получить методом «плавка+деформация», которая включает комбинацию выплавки слитка на основе меди с использованием дуговой вакуумной плавки с расходуемым электродом, его деформацию в медной оболочке, с целью получения элементов in-situ, сборки элементов insitu в медный чехол с последующей холодной деформацией волочением до необходимого размера.

В данной работе проведены сравнительные испытания на усталостную прочность образцов нанокomпозиционных проводов Cu/Nb, изготовленных методом «плавка+деформация», и образцов чистой меди, с использованием динамического механического анализатора (ДМА).

### Материалы и методики исследования

Исследовали проволочные образцы нанокomпозиционного проводника диаметром 0,5 мм на основе сплава Cu-20%Nb, изготовленного методом «плавка+деформация». Суммарная степень холодной деформации волочением составила  $\ln(A_0/A) \sim 8$ . Структура композита Cu/Nb в поперечном направлении показана на рисунке 1.

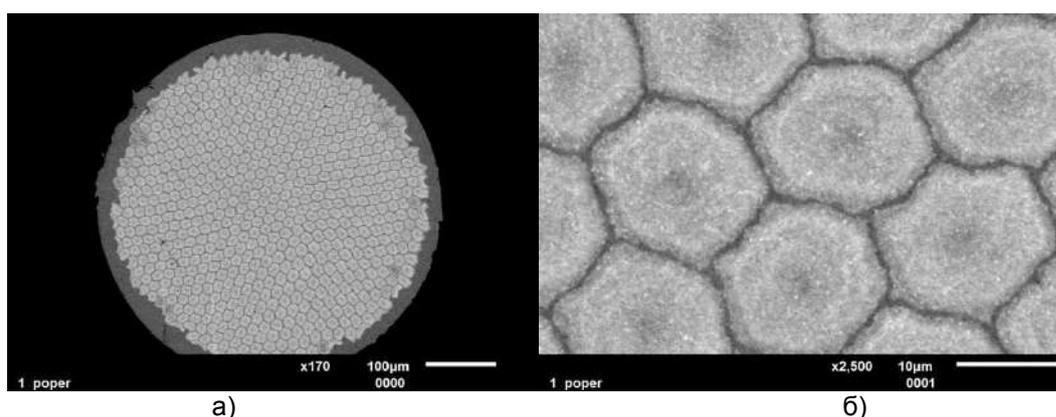


Рисунок 1 – Структура композита Cu/Nb в поперечном направлении (СЭМ):  
а) – общий вид; б) – фрагмент структуры

Для сравнения использовали проволочные образцы чистой меди диаметром 0,5 мм, полученные холодной деформацией волочением. Предел прочности образцов композита Cu/Nb и чистой меди составил, соответственно 1125 и 415 МПа.

Испытания на малоцикловую усталость образцов длиной 30 мм проводили на ДМА Q800 (TA Instrument) [10]. Испытания проводили по схеме поперечного изгиба в одной плоскости при постоянном уровне напряжений со знакопеременным

симметричным циклом нагружения (коэффициент асимметрии  $R = -1$ ) с использованием одинарного кантилеверного захвата, до момента разрушения образцов (рис. 2).

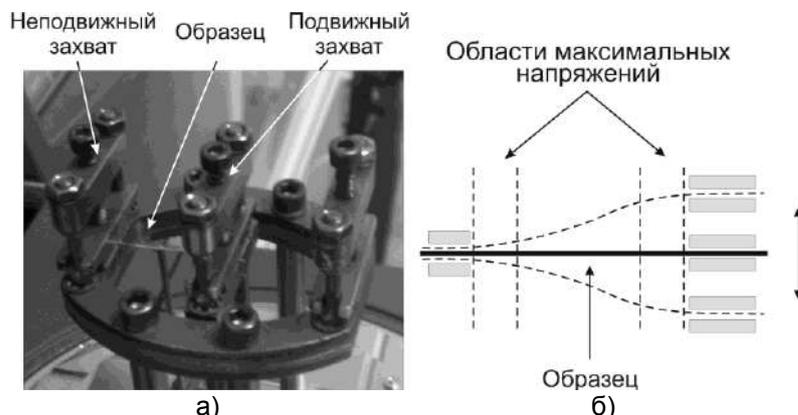


Рисунок 2 – Образец в одинарном кантилеверном захвате ДМА Q800:  
а) – фото образца и зажима; б) – схема деформирования образца при испытании на двусторонний изгиб

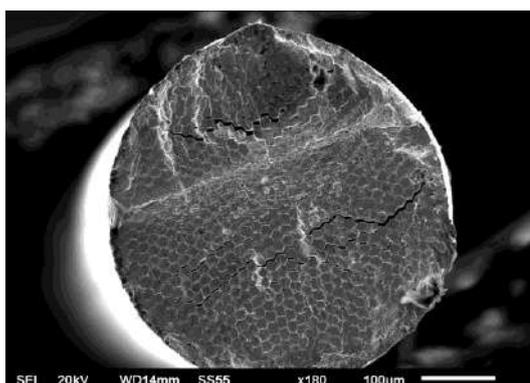
При движении захвата, во время испытаний образец симметрично отклонялся на заданную амплитуду от первоначального положения. Испытания проводили при напряжениях цикла 30...80 % от напряжения разрушения образца при испытаниях с инкрементом амплитуды напряжения. Использовали мягкую схему нагружения (при постоянной амплитуде напряжения цикла) с частотой циклов нагружения 10 Гц при температуре 30°C, с определением количества циклов до разрушения  $N$  (на базе  $2 \times 10^4$  циклов). Для каждого уровня напряжений  $\sigma_a$  использовали не менее трех образцов каждого материала.

### Результаты исследования

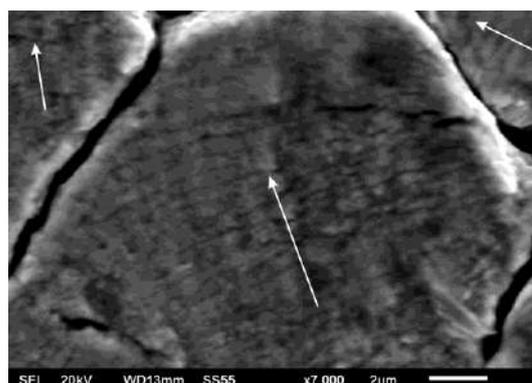
Показано, что нанокпозиционные проводники Cu/Nb, изготовленные методом «плавка+деформация», имеют зеренно-субзеренную структуру с размером зерна 100 нм с выделениями второй фазы (ниобия), имеющими «закрученную» форму в поперечном сечении и вытянутую – в продольном, и расположенными преимущественно по границам медных зерен.

Установлено, что характеристики сопротивления усталостному разрушению нанокпозиционных проводников Cu/Nb существенно превышают сопротивление усталости чистой меди. Ограниченный предел выносливости ( $\sigma_{RN}$ ) при долговечности  $N = 2 \times 10^4$  циклов для композита Cu/Nb и чистой меди равен 500 и 390 МПа, соответственно.

Распространение усталостной трещины в образце композита Cu/Nb происходит на двух масштабных уровнях: в пределах отдельных стрендов с образованием микробороздок и в пределах всего объема композита с формированием макробороздчатого рельефа (рис. 3).



а)



б)

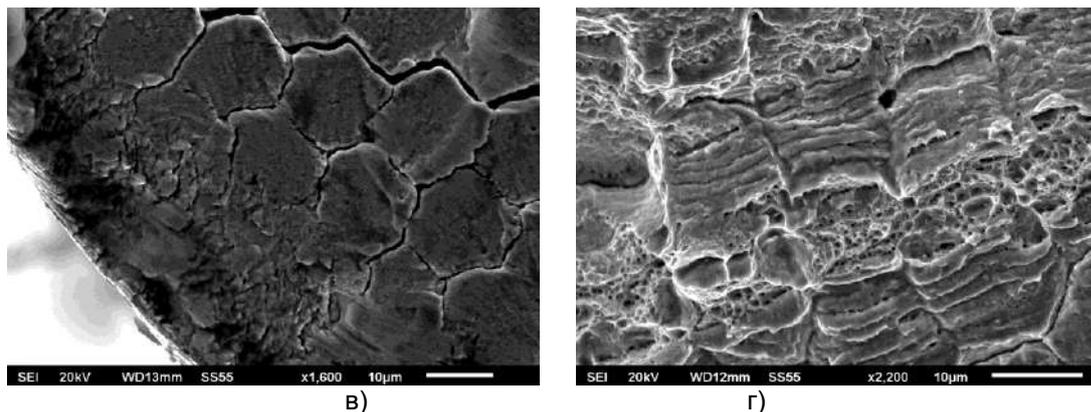


Рисунок 3 – Усталостные изломы образцов композита Cu/Nb при малом напряжении цикла (стрелками указано направление движения усталостной трещины)

**Список литературы:**

1. J. Bevk, J.P. Harbison, J.L. Bell. Anomalous increase in strength of in situ formed Cu-Nb multifilamentary composites // *Journal of Applied Physics*. - 1978. - V. 49. - P. 6031-6038
2. V. Pantsyrnyi, A. Shikov, A. Vorobieva, et al. Structure, Mechanical Properties and Electroconductivity of Cu-Nb Microcomposite Winding wires for High Field Pulsed Magnets // *Physica C*. - 2001. - V. 354. - P. 410-414
3. V. Pantsyrnyi. Status and Perspectives for Microcomposite Winding Materials for High Field Pulsed Magnets // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. - 2002. - V. 12. - P. 1189-1194
4. V. Pantsyrnyi, A. Shikov, A. Vorobieva, et al. High strength, high conductivity microcomposite Cu-Nb with cross-section in the range of 0,01-100 mm<sup>2</sup> // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. - 2008. - V. 18. - N. 2. - P. 616-619
5. C. Biselli, D.G. Morris. Microstructure and strength of Cu-Fe in situ composites obtained from prealloyed Cu-Fe powders // *Acta Metallurgica et Materialia*. - 1994. - V. 42. - P. 163-76
6. E. Snoeck, F. Lecouturier, L. Thilly, et al. Microstructural Studies of in Situ Produced Filamentary Cu/Nb Wires // *Scripta Materialia*. - 1998. - V. 38. - P. 1643-1648.
7. D. Raabe, U. Hangen. Simulation of the yield strength of wire drawn Cu-based in-situ composites // *Computational Materials Science*. - 1996. - V. 5. - P. 195-202.
8. Ge J.P., Zhao H., Yao Z.Q. Strength of deformation-processed Cu-Fe in-situ composites // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. - 2005. - V. 15, N 3. P. 553-559
9. Pantsyrny V., Shikov A., Khlebova N., et al. The nanostructured high strength high conductivity Cu matrix composites with different BCC metals strengthening filaments // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. - 2010. - V. 20 (3). - P. 1614-1618.
10. Sergey A. Nikulin, Stanislav O. Rogachev, Andrey B. Rozhnov, et al. Microstructure and fatigue strength of high-strength Cu-Fe and Cu-V in-situ nanocomposite wires // *Composites: Part B*. - 2015. - V. 70. - P. 92-98