

Формирование острой кубической текстуры в лентах-подложках из сплавов (Cu+Ni)–Me (Me=Mo, Mn, Nb) для высокотемпературных сверхпроводников второго поколения

© 2022

Суаридзе Теона Романовна*¹, младший научный сотрудник

Хлебникова Юлия Валентиновна², кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник

Егорова Лада Юрьевна³, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

*E-mail: t.suaridze@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4845-1102>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2196-1647>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1951-2976>

Поступила в редакцию 16.08.2021

Принята к публикации 16.02.2022

Аннотация: После холодной прокатки со степенями обжатия более 97 % и рекристаллизационного отжига в ряде металлов с гранцентрированной кубической решеткой, обладающих высоким или средним значением энергии дефектов упаковки, таких как Ni, Cu, Al, Pt и некоторых сплавов на их основе, формируется острая кубическая текстура. Протяженные ленты из этих металлов и сплавов с гранцентрированной кубической решеткой могут быть использованы для нанесения многослойных функциональных композиций. Проведено исследование структуры и кристаллографической текстуры в лентах из тройных сплавов на медно-никелевой основе. Показана принципиальная возможность создания многокомпонентных сплавов на базе бинарного сплава Cu+40% Ni, дополнительно легированного такими элементами, как Mo или Nb. Рассмотрено формирование острой кубической текстуры в лентах из сплавов Cu–Ni–Mn, Cu–Ni–Nb и Cu–Ni–Mo, полученных путем холодной деформации прокаткой и рекристаллизационного отжига, проведенного при различных температурах. Установлено, что оптимальным режимом рекристаллизационного отжига, при котором на поверхности деформированных на ~99 % лент из сплавов (Cu+40% Ni)–Me (где Me=Mn, Mo, Nb) реализуется наиболее совершенная кубическая текстура, является отжиг в течение 1 ч при 1050 °С. Согласно полученным данным, после такого режима отжига в сплавах Cu–40% Ni–1,3% Mn, Cu–40% Ni–0,8% Mo и Cu–40% Ni–0,5% Nb сформировалось от 94 до 98 % зерен с ориентацией {001}<100>, что открывает перспективу использования данных сплавов в качестве эпитаксиальных подложек в технологии высокотемпературных сверхпроводников второго поколения. Оценка механических характеристик показала, что легирование способствовало повышению величины предела текучести сплавов Cu–40% Ni–1,3% Mn, Cu–40% Ni–0,8% Mo и Cu–40% Ni–0,5% Nb в 3–4 раза по сравнению с величиной предела текучести текстурованной медной ленты.

Ключевые слова: текстурованные ленты; сплавы на медно-никелевой основе; деформация; рекристаллизационный отжиг; кубическая текстура; предел текучести.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» (№ г.р. АААА-А18-118020190116-6) при частичной финансовой поддержке РФФИ и Свердловской области в рамках научного проекта № 20-43-660034.

Исследования структуры и текстуры образцов были проведены в отделе электронной микроскопии ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН.

Статья подготовлена по материалам докладов участников X Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2021), Тольятти, 13–17 сентября 2021 года.

Для цитирования: Суаридзе Т.Р., Хлебникова Ю.В., Егорова Л.Ю. Формирование острой кубической текстуры в лентах-подложках из сплавов (Cu+Ni)–Me (Me=Mo, Mn, Nb) для высокотемпературных сверхпроводников второго поколения // Frontier Materials and Technologies. 2022. № 1. С. 73–81. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-1-73-81.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, биаксиально текстурированная лента из ГЦК-сплавов на никелевой или медной основе может быть использована в качестве подложки для эпитаксиального нанесения на нее функциональных слоев при создании высокотемпературных сверхпроводящих материалов второго поколения (ВТСП материалов 2-го поколения) (2G HTS – second-generation high-temperature superconductors) [1]. RABiTS (Rolling-

Assisted-Biaxially-Textured-Substrates) – это одна из технологий создания ВТСП материалов 2-го поколения, при которой подложки с биаксиальной текстурой получают посредством прокатки и рекристаллизационного отжига. Ленты-подложки из медных сплавов, изготовленные по технологии RABiTS, ввиду их относительно невысокой стоимости и немагнитности представляются весьма перспективными, как альтернатива используемым на сегодняшний день в производстве лентам из сплавов на основе никеля, обладающим острой

кубической текстурой. Среди обилия разработанных и запатентованных составов сплавов на никелевой и медной основах наиболее широко применяемым в технологии производства кабелей 2G HTS по-прежнему остается ферромагнитный сплав Ni–4,8 at. % W [2–4]. Разные группы исследователей предпринимают попытки создать немагнитные сплавы системы Ni–W посредством увеличения содержания вольфрама [5–7]. Например, в работе [5] смешивали сплавы на основе никеля с содержанием 8 и 12 at. % W. В полученной подложке сформировалось около 98 % зерен с ориентацией $\{001\} \langle 100 \rangle$, однако она обладала незначительным магнетизмом. Кроме того, создание сплавов методом порошковой металлургии существенно дороже, чем традиционная выплавка, особенно в случае если речь идет о перспективе производства многокилометрового кабеля. В работе [7] авторам не удалось получить в ленте из сплава Ni–9,3 at. % W текстуру, аналогичную по степени совершенства текстуре сплава Ni–4,8 at. % W, ставшего классическим. В связи с этим актуальной является задача разработки лент-подложек из немагнитных при 77 К ГЦК-сплавов на медной основе, не уступающих по степени совершенства и прочностным характеристикам сплавам на основе никеля.

В меди после холодной деформации прокаткой формируется текстура деформации такого компонентного состава, который позволяет при последующем рекристаллизационном отжиге формировать острую биаксиальную текстуру. Однако значение энергии дефектов упаковки (ЭДУ) меди согласно [8] существенно ниже, чем у никеля, что ограничивает возможности легирования при создании медных сплавов, поскольку легирование всегда снижает ЭДУ. Это, в свою очередь, приводит к увеличению объемной доли компонент $\{110\} \langle 112 \rangle$ за счет снижения объемной доли суммы компонент $\{123\} \langle 634 \rangle$ и $\{112\} \langle 111 \rangle$. Подобное изменение компонентного состава текстуры деформации приводит к формированию на поверхности сплавов текстуры типа латуни, которая не позволяет в дальнейшем формировать острую биаксиальную текстуру [9; 10]. Из всех химических элементов, ввиду неограниченной растворимости, только никель можно вводить в медную матрицу без ограничений, не снижая при этом ЭДУ сплава. Однако по оценке [11], в сплавах меди с содержанием ~46–47 at. % Ni точка Кюри ниже 77 К. Это обстоятельство количественно ограничивает легирование меди никелем. Наиболее эффективными с точки зрения упрочнения являются тугоплавкие элементы, такие как вольфрам, молибден и ниобий, но медь не образует с ними твердого раствора. Процесс получения, например, бинарных сплавов Cu–Me (Mo, Nb) технологически невозможен из-за существенной разницы в температурах плавления этих металлов.

Технология получения протяженных лент из бинарных сплавов системы Cu–Ni, обладающих острой биаксиальной текстурой, была рассмотрена в ряде работ [12–14]. Выбор медно-никелевой базы для создания лент-подложек из тройных сплавов (Cu+40 % Ni)–Me связан с тем, что в данных сплавах с увеличением содержания никеля расширяется область ГЦК-твердого раствора [15; 16]. Авторами [17] была рассмотрена возможность формирования острой биаксиальной тексту-

ры в тройном сплаве на медно-никелевой основе с добавкой такого тугоплавкого элемента, как вольфрам. В настоящей работе предложено рассмотреть возможность получения совершенной биаксиальной текстуры в тройных сплавах на медно-никелевой основе с добавками ниобия, молибдена и марганца. Согласно [18] сплав Cu–Ni–Mn (или промышленный константан) является одним из наиболее перспективных и привлекательных сплавов при создании лент-подложек с совершенной кубической текстурой, близкой к монокристалльной. Исходя из данных работ [19–21], можно ожидать, что легирование сплавов приведет к увеличению прочностных и антикоррозионных свойств лент.

Цель работы – исследование структуры, кристаллографической текстуры и механических свойств тонких протяженных лент из сплавов (Cu+Ni)–Me (где Me=Mn, Mo, Nb), имеющих перспективу использования в качестве эпитаксиальных подложек при производстве высокотемпературных сверхпроводящих материалов второго поколения.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материалов для исследований были выбраны следующие сплавы (at. %): Cu–40% Ni–1,3% Mn, Cu–40% Ni–0,8% Mo и Cu–40% Ni–0,5% Nb. Выплавка тройных сплавов на медно-никелевой основе была произведена в вакуумной индукционной печи в атмосфере аргона с использованием меди марки М0 (чистота 99,95 wt. %), никеля (чистота 99,99 wt. %), а также ниобия, марганца и молибдена (чистота не ниже 99,94 wt. %). Полученные слитки (вес ~500 г) после удаления усадочной раковины ковали на прутки 10×10 мм в интервале температур 900–1100 °С. После шлифовки заготовки отжигались в течение 1,5 ч при 650 °С.

Далее заготовки аналогично [10; 20] были подвергнуты холодной деформации прокаткой в 2 этапа с не менее чем 70 проходами, до толщины ~90–100 мкм. Общая степень обжатия протяженных лент-подложек составляла 98,6–99,1 %.

Температура начала рекристаллизации холоднокатаных лент из тройных сплавов на медно-никелевой основе определена на кварцевом dilatометре ULVAC-SINKU RIKO по изменению коэффициента термического расширения сплава. Съемка кривых проводилась в интервале температур от 20 до 850 °С со скоростью нагрева 2 К/мин.

Рекристаллизационные отжиги с целью получения кубической текстуры ленточных образцов из сплавов (Cu+Ni)–Me, помещенных в вакуумный контейнер, были проведены посадкой в печь при следующих температурах: 950, 1000, 1050 и 1100 °С. Время выдержки составляло 1 ч, охлаждение образцов происходило при комнатной температуре.

Исследование структуры лент-подложек было выполнено с помощью оптического микроскопа Neophot-30. Для этого образцы травили в смеси концентрированных кислот HNO₃, HCl и H₃PO₄ в равных долях с добавлением 30–40 % H₂O₂.

Величина среднего размера зерен в образцах вычислялась по структуре отожженных лент с помощью

метода секущих, как среднее арифметическое ~ 80 измерений. Подсчет производился по изображениям структуры, полученным на оптическом микроскопе.

Качество текстуры, сформировавшейся на поверхности лент после рекристаллизационных отжигов, было проанализировано с помощью сканирующего электронного микроскопа FEI Quanta 200 с использованием метода дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD). Сканирование ориентационных данных осуществлялось с поверхности площадью $3 \times 3,2$ мм с шагом 2 мкм.

Анализ механических характеристик проводился с использованием текстурованных лент (отжиг 1050 °С, 1 ч). Данные о величине $\sigma_{0,2}$ получены в результате испытаний на растяжение образцов толщиной 100 мкм, длиной 120 мм и шириной 5 мм. Исследования были выполнены при комнатной температуре.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Текстура и структура лент-подложек из тройных сплавов на медно-никелевой основе

По результатам проведенных электронно-микроскопических исследований было определено, что после всех примененных режимов рекристаллизационного отжига (от 950 до 1100 °С в течение 1 ч) в тонких лентах-подложках из тройных сплавов формируется острая биаксиальная текстура. Однако по мере увеличения температуры отжига до 1050 °С степень совершенства полученной текстуры существенно возрастала. Доля кубических зерен после отжигов при 950 – 1050 °С варьировалась от 78 до 97 % для сплавов разных составов. Например, в текстурованной ленте из сплава Cu–40% Ni–0,8% Mo после отжига 1000 °С, 1 ч сформировалось 88 % зерен с ориентацией $\{001\} \langle 100 \rangle$, а после отжига при 1050 °С в течение 1 ч их доля за счет резкого снижения количества двойниковой составляющей увеличилась до 97 %. На рис. 1 приведены данные EBSD-анализа, характеризующие качество сформировавшейся текстуры в лентах-подложках из сплава (Cu+40% Ni)–0,8% Mo после отжига при 1050 °С, 1 ч. На гистограмме распределения углов разориентировки границ зерен (рис. 1 с) слабый пик в области углов 60° соответствует зернам с двойниковой ориентацией.

Повышение температуры рекристаллизационного отжига до 1100 °С привело к уменьшению степени совершенства текстуры во всех исследованных сплавах. На рис. 2 приведены данные для ленты-подложки из сплава Cu–40% Ni–1,3% Mn. В результате отжига при 1050 °С в течение 1 ч доля зерен с ориентацией $\{001\} \langle 100 \rangle$ на поверхности сплава составляла 94 % (рис. 2 а, 2 б). Однако последующее увеличение температуры отжига на 50 °С (режим отжига 1100 °С, 1 ч), согласно полученным данным, привело к росту отдельных зерен и развитию в структуре сплава процесса вторичной рекристаллизации (рис. 2 с, 2 д).

Вследствие этого, оптимальным режимом рекристаллизационного отжига для сплавов всех составов, при котором на поверхности лент-подложек формируется текстура максимальной степени совершенства (близкая к монокристалльной), является отжиг при 1050 °С, 1 ч. Высокое значение температуры отжига связано

с тем, что введение даже малого количества тугоплавкого элемента в медно-никелевую основу заметно повышает температуру начала рекристаллизации сплава (таблица 1).

Металлографические исследования показали, что с повышением температуры рекристаллизационного отжига до 1050 °С структура исследованных образцов из сплавов Cu–40% Ni–1,3% Mn, Cu–40% Ni–0,8% Mo и Cu–40% Ni–0,5% Nb становится более однородной по размеру зерна. В качестве примера на рис. 3 а, 3 б приведена структура тонкой ленты из сплава Cu–40% Ni–0,8% Mo после отжигов при 1000 и 1050 °С. На рис. 3 а стрелками показаны зерна с двойниковой ориентацией, на рис. 3 б ввиду формирования более совершенной текстуры двойниковой составляющей не наблюдалось. Следует отметить, что для каждого сплава в ходе работы было проанализировано несколько различных участков по длине текстурованной ленты.

Механические свойства текстурованных лент из тройных сплавов на медно-никелевой основе

Анализ механических характеристик, а именно величины предела текучести, показал, что легирование сплавов привело к повышению прочности лент. Данные, полученные в результате испытаний на растяжение, для лент-подложек из сплавов Cu–40% Ni–1,3% Mn, Cu–40% Ni–0,8% Mo и Cu–40% Ni–0,5% Nb приведены в таблице 1. Согласно им, величина предела текучести лент-подложек из тройных сплавов составляла от 85 до 108 МПа. Для изученных ранее лент из чистой меди и базового сплава Cu–40% Ni величина $\sigma_{0,2}$ составляла 25 и 80 МПа соответственно [10; 20].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основной характеристикой ленточных многослойных ВТСП является величина критического тока, которая в значительной степени определяется остротой кристаллографической текстуры в материале сверхпроводника, наследуемой от кубической текстуры металлической подложки. Существующие межзеренные границы в сверхпроводящем слое создают препятствие протеканию тока сверхпроводимости, но эти препятствия уменьшаются с увеличением степени текстурованности [20]. Электронно-микроскопические исследования показали, что рассмотренные в настоящей работе ленты-подложки из сплавов Cu–40% Ni–1,3% Mn, Cu–40% Ni–0,8% Mo и Cu–40% Ni–0,5% Nb не уступают по степени совершенства текстуры лентам-подложкам из сплавов на никелевой и медной основах, в которых доля кубических зерен составляла от 93 до 99–100 % [2; 7; 17; 18].

Кроме того, для производства протяженных лент в промышленности необходимо иметь достаточно высокие прочностные характеристики несущей металлической основы. Испытания на растяжение показали, что дополнительное легирование медно-никелевой базы 0,8 % W и 0,5 % Nb способствовало увеличению механических свойств лент-подложек до 25 %, а введение 1,3% Mn практически не привело к изменению величины предела текучести. Отметим, что рассмотренные прочностные характеристики сплавов Cu–40% Ni–0,8% Mo и Cu–40% Ni–0,5% Nb не уступают изученным

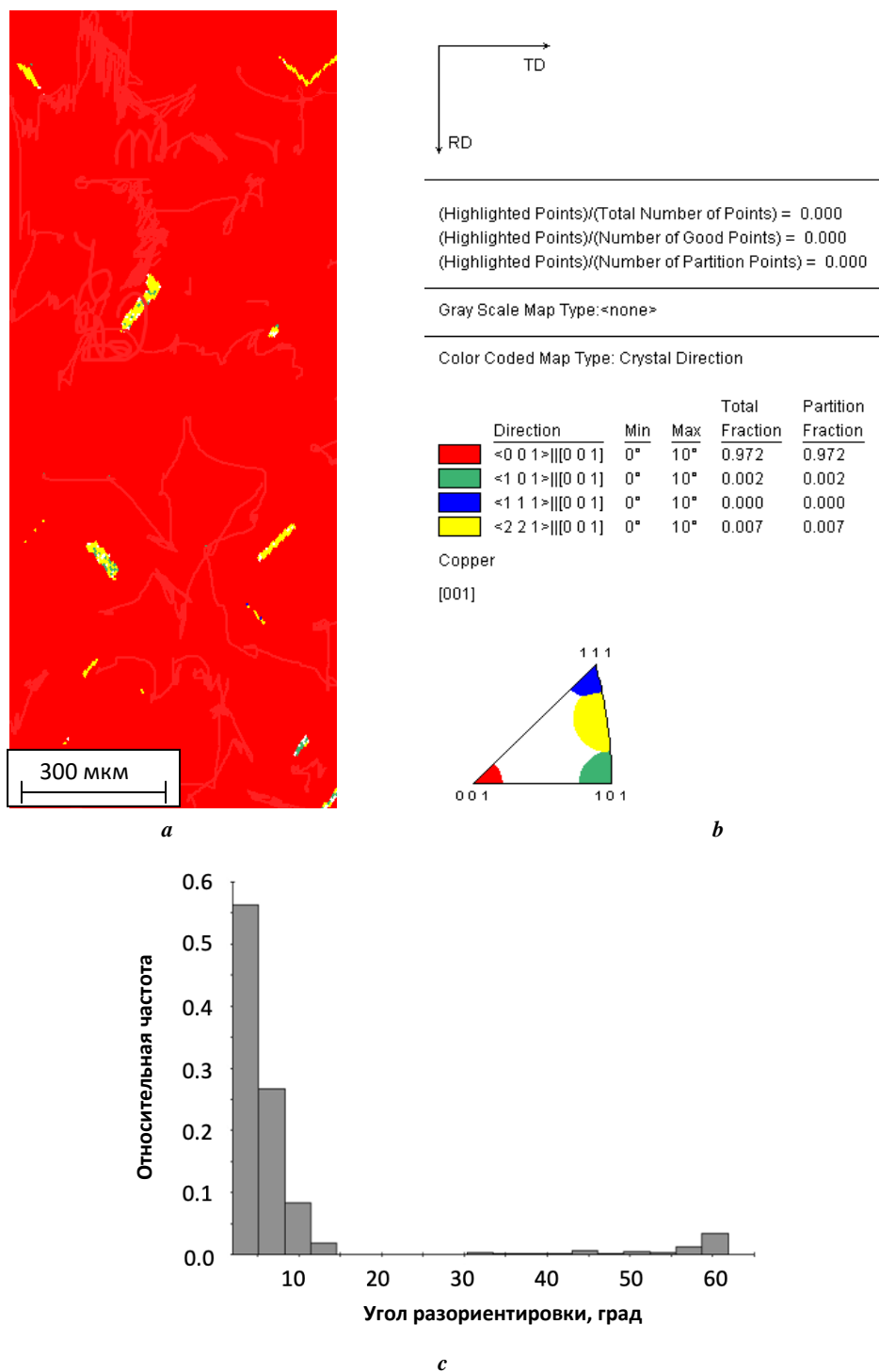


Рис. 1. Микрокарта ориентировок зерен (а), компонентный состав текстуры рекристаллизации (б) и гистограмма разориентировки границ зерен (с) для ленты из сплава Cu–40% Ni–0,8% Mo после отжига при 1050 °С в течение 1 ч

Fig. 1. Micromaps of grains' orientations (a), component composition of a recrystallization texture (b), and a misorientation bar chart of grain boundaries (c) for a band made of Cu–40% Ni–0.8% Mo alloy after annealing at 1050 °C during 1 h

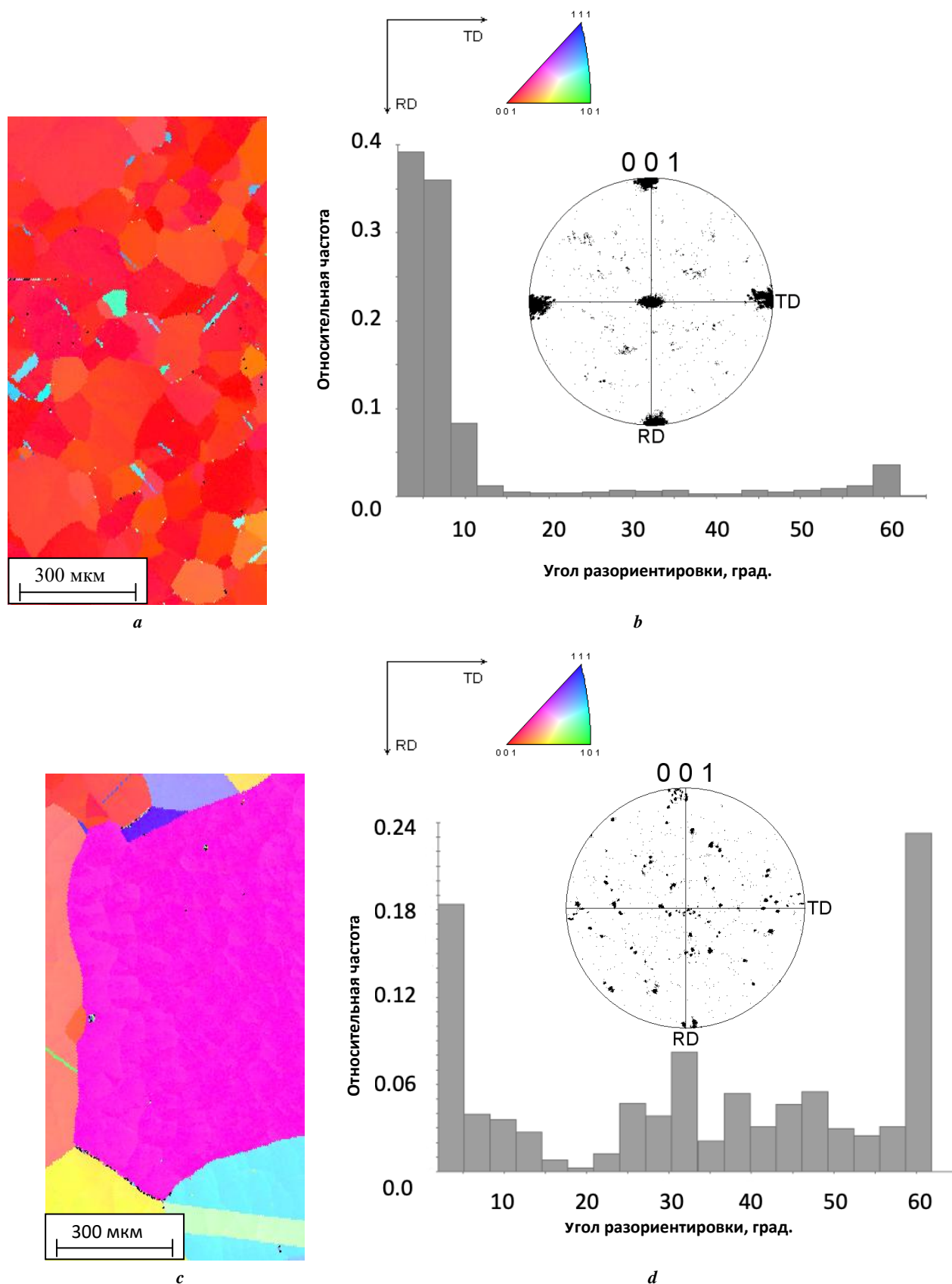


Рис. 2. Микрокарты ориентировок зерен (а, с), полюсные фигуры {001} и гистограммы разориентировки границ зерен (b, d) для ленты из сплава Cu-40% Ni-1,3% Mn после рекристаллизационных отжигов в течение 1 ч при 1050 °C (а, b) и 1100 °C (с, d)

Fig. 2. Micromaps of grains' orientations (a, c), pole figures {001}, and a misorientation bar charts of grain boundaries (b, d) for a band made of Cu-40% Ni-1.3% Mn alloy after recrystallization annealing at 1050 °C (a, b) and 1100 °C (c, d) during 1 h

Таблица 1. Химический состав, температура начала привычной рекристаллизации, предел текучести при 20 °С и параметры текстуры отожженных лент-подложек
Table 1. Chemical composition, temperature of regular recrystallization start, yield strength at 20 °С, and texture parameters of the annealed bands-substrates

Состав сплава, at. %	Температура начала рекристаллизации, °С	Температура отжига, °С	Количество кубических зерен, %	Средний размер рекристаллизованного зерна d_{cp} , мкм	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа*
Cu (99,95 wt. %)	200	600	95	30±2	25
Cu-40 Ni	535	1050	96	35±5	80
Cu-40 Ni-1,3 Mn	575	1050	94	50±5	85
Cu-40 Ni-0,5 Nb	640	1050	98	38±2	102
Cu-40 Ni-0,8 Mo	630	1050	97	38±2	108

* Приведено среднее значение по результатам измерений не менее трех образцов.

* An average value according to the results of measuring at least three specimens is indicated.

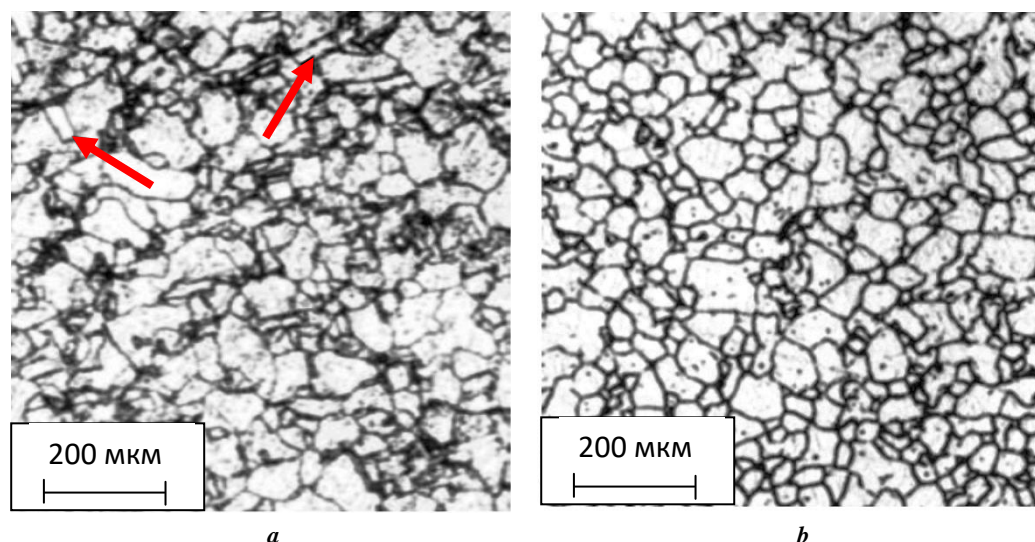


Рис. 3. Структура поверхности текстурированных лент из сплава Cu-40% Ni-0,8% Mo после отжига в течение 1 ч при 1000 °С (а) и 1050 °С (б)

Fig. 3. Surface structure of textured bands made of Cu-40% Ni-0.8% Mo alloy after annealing during 1 hour at 1000 °С (a) and 1050 °С (b)

ранее тройным сплавам Cu-40% Ni-1,1% V, Cu-40% Ni-1,2% Cr и Cu-40% Ni-1,4% Fe, для которых величина $\sigma_{0,2}$ составляла 96–100 МПа [20].

Следует отметить, что при испытаниях на растяжение текстурированных образцов из лент-подложек необходимо учитывать, что в ГЦК-кристаллах в направлении $\langle 001 \rangle$ механические свойства наименьшие, т. е. чем совершеннее текстура, тем ниже $\sigma_{0,2}$. Известно, что помимо степени совершенства кубической текстуры на уровень прочностных свойств оказывают влияние и технологические параметры изготовления ленты, в частности степень чистоты металлов основы и легирующих элементов. Например, если при выплавке сплава использовать никель чистотой 99,93 вес. % вместо 99,99 вес. %, то примеси, даже в таком малом количестве, будут сдерживать рост зерна при отжиге, и в результате сред-

ний размер рекристаллизованного зерна будет меньше, а прочностные свойства выше.

Рассмотренные в работе тройные сплавы на медно-никелевой основе парамагнитны при рабочей температуре высокотемпературного сверхпроводника и обладают меньшей стоимостью по сравнению с никелевыми сплавами. В связи с этим текстурированные ленты из сплавов Cu-Ni-Mn, Cu-Ni-Nb и Cu-Ni-Mo могут быть использованы в качестве подложек, как альтернатива используемому в технологии производства 2G HTS сплаву Ni-4,8 at. % W.

ВЫВОДЫ

Получены опытные образцы лент-подложек из тройных сплавов на медно-никелевой основе с Mo, Nb

и Mn. В результате EBSD-анализа установлено, что ленты из сплавов Cu–40% Ni–1,3% Mn, Cu–40% Ni–0,8% Mo и Cu–40% Ni–0,5% Nb, обладающие совершенной кубической текстурой, могут быть использованы в качестве эпитаксиальных подложек при производстве высокотемпературных сверхпроводящих кабелей второго поколения. Оптимальным режимом рекристаллизационного отжига для формирования высокотекстурованного состояния в сплавах является отжиг в течение 1 ч при температуре 1050 °С. Металлографические исследования показали, что в лентах из сплавов Cu–Ni–Nb, Cu–Ni–Mn и Cu–Ni–Mo после холодной деформации и рекристаллизационного отжига формируется однородная структура.

Произведена оценка механических характеристик лент-подложек. Установлено, что величина предела текучести сплавов Cu–40% Ni–1,3% Mn, Cu–40% Ni–0,8% Mo и Cu–40% Ni–0,5% Nb в 3–4 раза выше предела текучести текстурованной ленты из чистой меди.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Токонесущие ленты второго поколения на основе высокотемпературных сверхпроводников / под ред. А. Гояла. М.: ЛКИ, 2010. 432 с.
2. Subramanya Sarma V., Eickemeyer J., Schultz L., Holzapfel B. Recrystallization texture and magnetization behaviour of some FCC Ni-W alloys // *Scripta Materialia*. 2004. Vol. 50. № 7. P. 953–957. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2004.01.004](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.01.004).
3. Strickland N.M., Wimbush S.C., Rupich M.W., Long N.J. Asymmetries in the field and angle dependences of the critical current in HTS tapes // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019. Vol. 29. № 5. Article number 8620293. DOI: [10.1109/TASC.2019.2894278](https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2894278).
4. Gao M.M., Zhang F.Y., Liang S., Li H.B., Ma L., Liu M., Kausar S., Suo H.L. Influence of cube texture development on magnetic properties of Ni–5 at.% W alloy substrates // *Journal Magnetism and Magnetic Materials*. 2019. Vol. 469. P. 515–521. DOI: [10.1016/j.jmmm.2018.09.029](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.09.029).
5. Ji Y., Suo H., Zhang Z., Ma L., Wu X., Zhang C., Wu X., Zhang C., Li J., Cui J., Li C., Kausar S., Liu M., Wang Y., Wang Q. Strong cube texture of super-high tungsten Ni-W alloy substrates used in REBCO coated conductors // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 820. Article number 153430. DOI: [10.1016/j.jallcom.2019.153430](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153430).
6. Ji Y., Suo H., Meng Y., Wu X., Shaheen K., Ma L., Liu M., Wang L., Zang Z. A Study about Ni–8 at. % W Alloy Substrates Used for REBCO Coated Conductors // *Physics of Metals and Metallography*. 2021. Vol. 122. P. 1473–1481. DOI: [10.1134/S0031918X21140118](https://doi.org/10.1134/S0031918X21140118).
7. Jia Y.T., Suo H.L., Ma L., Wang Z., Yua D., Shaheena K., Cuia J., Liu J., Gao M.M. Formation of Recrystallization Cube Texture in Highly Rolled Ni–9.3 at. % W // *Physics of Metals and Metallography*. 2020. Vol. 121. № 3. P. 248–253. DOI: [10.1134/S0031918X20020180](https://doi.org/10.1134/S0031918X20020180).
8. Вишняков Я.Д. Дефекты упаковки в кристаллической структуре. М.: Металлургия, 1970. 216 с.
9. Гервасьева И.В., Родионов Д.П., Хлебникова Ю.В. Текстура деформации прокатанных лент из сплавов на основе меди как условие получения острой кубической текстуры при рекристаллизации // *Физика металлов и металловедение*. 2015. Т. 116. № 7. С. 729–736. DOI: [10.7868/S0015323015070074](https://doi.org/10.7868/S0015323015070074).
10. Хлебникова Ю.В., Родионов Д.П., Гервасьева И.В., Суаридзе Т.Р., Акшенцев Ю.Н., Казанцев В.А. Выбор сплавов на основе меди для создания лент-подложек с острой кубической текстурой // *Физика металлов и металловедение*. 2014. Т. 115. № 12. С. 1299–1308. DOI: [10.7868/S0015323014120031](https://doi.org/10.7868/S0015323014120031).
11. Soubeyroux J.L., Bruzek C.E., Girard A., Jorda J.L. Thermal Treatments for Biaxially Textured Cu-Ni Alloys for YBCO Coated Conductors // *IEEE Transactions on applied superconductivity*. 2005. Vol. 15. № 2. P. 2687–2690. DOI: [10.1109/TASC.2005.847783](https://doi.org/10.1109/TASC.2005.847783).
12. Girard A., Bruzek C.E., Jorda J.L., Ortega L., Soubeyroux J.L. Industrial Cu-Ni alloys for HTS coated conductor tape // *Journal of Physics: Conference Series*. 2006. Vol. 43. № 1. P. 341–343. DOI: [10.1088/1742-6596/43/1/085](https://doi.org/10.1088/1742-6596/43/1/085).
13. Cui J., Suo H.-L., Wang J.-H., Grivel J.-C., Ma L., Li C.-Y., Ji Y.-T., Kausar S., Liu M., Wang Y. Effect of different deformation and annealing procedures on non-magnetic textured Cu₆₀Ni₄₀ alloy substrates // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2018. Vol. 25. № 8. P. 930–936. DOI: [10.1007/s12613-018-1642-3](https://doi.org/10.1007/s12613-018-1642-3).
14. Chen X., Chen D., Sun H., Wang L. Effects of Cold Rolling Reduction and Annealing Temperature on Microstructure and Texture Evolution of Cu-44% Ni Alloy // *Rare Metal Materials and Engineering*. 2018. Vol. 47. № 7. P. 1958–1964. DOI: [10.1016/S1875-5372\(18\)30165-6](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(18)30165-6).
15. Prasad Rao P., Agrawal B.K., Rao A.M. Studies on spinodal decomposition in Cu-27Ni-2Cr alloy // *Journal of Materials Science*. 1986. Vol. 21. P. 3759–3766. DOI: [10.1007/BF00553427](https://doi.org/10.1007/BF00553427).
16. Raghavendra Bhat R., Prasad Rao P. Effect of thermomechanical treatment on the phase transformation in Cu-44Ni-5Cr alloy // *Journal of Materials Science*. 1994. Vol. 29. № 18. P. 4808–4818. DOI: [10.1007/BF00356527](https://doi.org/10.1007/BF00356527).
17. Liu Z., Liu P., Fan R., Li W., Zhang F. Effect of hot deformation of cube texture in annealed Cu-Ni-W substrate // *Physica C: Superconductivity and its applications*. 2019. Vol. 563. P. 63–66. DOI: [10.1016/j.physc.2019.04.014](https://doi.org/10.1016/j.physc.2019.04.014).
18. Varanasi C.V., Brunke L., Burke J., Maartense I., Padmaja N., Efstathiadis H., Chaney A., Barnes P.N. Biaxially textured constantan alloy (Cu 55 wt%, Ni 44 wt%, Mn 1 wt%) substrates for YBa₂Cu₃O_{7-x} coated conductors // *Superconductor Science and Technology*. 2006. Vol. 19. № 9. P. 896–901. DOI: [10.1088/0953-2048/19/9/002](https://doi.org/10.1088/0953-2048/19/9/002).
19. Хлебникова Ю.В., Суаридзе Т.Р., Родионов Д.П., Егорова Л.Ю., Гервасьева И.В., Гуляева Р.И. Антикоррозионные свойства текстурованных лент-подложек из тройных сплавов на медно-никелевой основе // *Физика металлов и металловедение*. 2017. Т. 118. № 11. С. 1214–1222. DOI: [10.7868/S0015323017110043](https://doi.org/10.7868/S0015323017110043).
20. Родионов Д.П., Акшенцев Ю.Н., Гервасьева И.В., Хлебникова Ю.В., Суаридзе Т.Р. Способ изготовления биаксиально текстурированной подложки из трой-

- ного сплава на медно-никелевой основе: патент РФ № 2624564, 2017. 9 с.
- Vannozzi A., Thalmaier Gy., Armenio A.A., Augieri A., Galluzzi V., Mancini A., Rufoloni A., Petrisor T., Celentano G. Development and characterization of cube-textured Ni-Cu-Co substrates for YBCO-coated conductors // *Acta Materialia*. 2010. Vol. 58. № 3. P. 910–918. DOI: [10.1016/j.actamat.2009.10.006](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.10.006).
- ## REFERENCES
- Goyal A., ed. *Tokonesushchie lenty vtorogo pokoleniya na osnove vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikov* [Second-Generation HTS Conductors]. Moscow, LKI Publ., 2010. 432 p.
 - Subramanya Sarma V., Eickemeyer J., Schultz L., Holzapfel B. Recrystallization texture and magnetization behaviour of some FCC Ni-W alloys. *Scripta Materialia*, 2004, vol. 50, no. 7, pp. 953–957. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2004.01.004](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.01.004).
 - Strickland N.M., Wimbush S.C., Rupich M.W., Long N.J. Asymmetries in the field and angle dependences of the critical current in HTS tapes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, no. 5, article number 8620293. DOI: [10.1109/TASC.2019.2894278](https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2894278).
 - Gao M.M., Zhang F.Y., Liang S., Li H.B., Ma L., Liu M., Kausar S., Suo H.L. Influence of cube texture development on magnetic properties of Ni–5 at.%W alloy substrates. *Journal Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 469, pp. 515–521. DOI: [10.1016/j.jmmm.2018.09.029](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.09.029).
 - Ji Y., Suo H., Zhang Z., Ma L., Wu X., Zhang C., Wu X., Zhang C., Li J., Cui J., Li C., Kausar S., Liu M., Wang Y., Wang Q. Strong cube texture of super-high tungsten Ni-W alloy substrates used in REBCO coated conductors. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 820, article number 153430. DOI: [10.1016/j.jallcom.2019.153430](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153430).
 - Ji Y., Suo H., Meng Y., Wu X., Shaheen K., Ma L., Liu M., Wang L., Zang Z. A Study about Ni–8 at. % W Alloy Substrates Used for REBCO Coated Conductors. *Physics of Metals and Metallography*, 2021, vol. 122, pp. 1473–1481. DOI: [10.1134/S0031918X21140118](https://doi.org/10.1134/S0031918X21140118).
 - Jia Y.T., Suo H.L., Ma L., Wang Z., Yua D., Shaheena K., Cuia J., Liu J., Gao M.M. Formation of Recrystallization Cube Texture in Highly Rolled Ni–9.3 at. % W. *Physics of Metals and Metallography*, 2020, vol. 121, no. 3, pp. 248–253. DOI: [10.1134/S0031918X20020180](https://doi.org/10.1134/S0031918X20020180).
 - Vishnyakov Ya.D. *Defekty upakovki v kristallicheskoj structure* [Stacking faults in crystal structure]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 216 p.
 - Gervas'eva I.V., Rodionov D.P., Khlebnikova Y.V. The deformation texture of rolled ribbons of copper-based alloys as a condition of producing a sharp cubic texture upon recrystallization. *The Physics of Metals and Metallography*, 2015, vol. 116, no. 7, pp. 690–697. DOI: [10.7868/S0015323015070074](https://doi.org/10.7868/S0015323015070074).
 - Khlebnikova Y.V., Rodionov D.P., Gervas'eva I.V., Suaridze T.R., Akshentsev Y.N., Kazantsev V.A. Choice of copper-based alloys for ribbon substrates with a sharp cube texture. *The Physics of Metals and Metallography*, 2014, vol. 115, no. 12, pp. 1231–1240. DOI: [10.7868/S0015323014120031](https://doi.org/10.7868/S0015323014120031).
 - Soubeyroux J.L., Bruzek C.E., Girard A., Jorda J.L. Thermal Treatments for Biaxially Textured Cu-Ni Alloys for YBCO Coated Conductors. *IEEE Transactions on applied superconductivity*, 2005, vol. 15, no. 2, pp. 2687–2690. DOI: [10.1109/TASC.2005.847783](https://doi.org/10.1109/TASC.2005.847783).
 - Girard A., Bruzek C.E., Jorda J.L., Ortega L., Soubeyroux J.L. Industrial Cu-Ni alloys for HTS coated conductor tape. *Journal of Physics: Conference Series*, 2006, vol. 43, no. 1, pp. 341–343. DOI: [10.1088/1742-6596/43/1/085](https://doi.org/10.1088/1742-6596/43/1/085).
 - Cui J., Suo H.-L., Wang J.-H., Grivel J.-C., Ma L., Li C.-Y., Ji Y.-T., Kausar S., Liu M., Wang Y. Effect of different deformation and annealing procedures on non-magnetic textured Cu₆₀Ni₄₀ alloy substrates. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2018, vol. 25, no. 8, pp. 930–936. DOI: [10.1007/s12613-018-1642-3](https://doi.org/10.1007/s12613-018-1642-3).
 - Chen X., Chen D., Sun H., Wang L. Effects of Cold Rolling Reduction and Annealing Temperature on Microstructure and Texture Evolution of Cu-44% Ni Alloy. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, vol. 47, no. 7, pp. 1958–1964. DOI: [10.1016/S1875-5372\(18\)30165-6](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(18)30165-6).
 - Prasad Rao P., Agrawal B.K., Rao A.M. Studies on spinodal decomposition in Cu-27Ni-2Cr alloy. *Journal of Materials Science*, 1986, vol. 21, pp. 3759–3766. DOI: [10.1007/BF00553427](https://doi.org/10.1007/BF00553427).
 - Raghavendra Bhat R., Prasad Rao P. Effect of thermomechanical treatment on the phase transformation in Cu-44Ni-5Cr alloy. *Journal of Materials Science*, 1994, vol. 29, no. 18, pp. 4808–4818. DOI: [10.1007/BF00356527](https://doi.org/10.1007/BF00356527).
 - Liu Z., Liu P., Fan R., Li W., Zhang F. Effect of hot deformation of cube texture in annealed Cu-Ni-W substrate. *Physica C: Superconductivity and its applications*, 2019, vol. 563, pp. 63–66. DOI: [10.1016/j.physc.2019.04.014](https://doi.org/10.1016/j.physc.2019.04.014).
 - Varanasi C.V., Brunke L., Burke J., Maartense I., Padmaja N., Efstathiadis H., Chaney A., Barnes P.N. Biaxially textured constantan alloy (Cu 55 wt%, Ni 44 wt%, Mn 1 wt%) substrates for YBa₂Cu₃O_{7-x} coated conductors. *Superconductor Science and Technology*, 2006, vol. 19, no. 9, pp. 896–901. DOI: [10.1088/0953-2048/19/9/002](https://doi.org/10.1088/0953-2048/19/9/002).
 - Khlebnikova Y.V., Suaridze T.R., Rodionov D.P., Egorova L.Y., Gervas'eva I.V., Gulyaeva R.I. Anticorrosion properties of textured substrates made of copper-nickel-based ternary alloys. *The Physics of Metals and Metallography*, 2017, vol. 118, no. 11, pp. 1147–1154. DOI: [10.7868/S0015323017110043](https://doi.org/10.7868/S0015323017110043).
 - Rodionov D.P., Akshentsev Yu.N., Gervaseva I.V., Khlebnikova Yu.V., Suaridze T.R. *Sposob izgotovleniya biaksialno teksturovannoy podlozhki iz troynogo splava na medno-nikelevoy osnove* [The technique of production of a biaxial textured substrate made of a ternary copper-nickel-base alloy], patent RF no. 2624564, 2017. 9 p.
 - Vannozzi A., Thalmaier Gy., Armenio A.A., Augieri A., Galluzzi V., Mancini A., Rufoloni A., Petrisor T., Celentano G. Development and characterization of cube-textured Ni-Cu-Co substrates for YBCO-coated conductors. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, no. 3, pp. 910–918. DOI: [10.1016/j.actamat.2009.10.006](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.10.006).

Forming an edged cubic texture in band substrates made of (Cu+Ni)–Me (Me=Mo, Mn, Nb) alloys for high-temperature second-generation superconductors

© 2022

Teona R. Suaridze*¹, junior researcher

Yuliya V. Khlebnikova², PhD (Engineering), leading researcher

Lada Yu. Egorova³, PhD (Engineering), senior researcher

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg (Russia)

*E-mail: t.suaridze@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4845-1102>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2196-1647>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1951-2976>

Received 16.08.2021

Accepted 16.02.2022

Abstract: After cold-rolling reduction with the shrinkage of more than 97 % and recrystallization annealing, the edged cubic texture develops in some fcc lattice metals with the high and medium values of stacking fault energy such as Ni, Cu, Al, Pt, and some alloys on their base. The extended bands of metals and fcc lattice alloys can be used to apply multilayer functional compositions. The authors studied the structure and crystallographic texture in bands of three-component copper-nickel-based alloys. The study showed the crucial possibility of creating multi-component alloys based on the Cu+40% Ni binary alloy doped with such elements as Mo or Nb. The paper considers the formation of an edged cubic texture in bands of Cu–Ni–Mn, Cu–Ni–Nb, and Cu–Ni–Mo alloys produced through cold deformation with rolling and recrystallization annealing performed at different temperatures. The study identified that annealing during one hour at 1050 °C was an optimal recrystallization annealing mode when on the surface of bands made of (Cu+40 % Ni)–Me alloys (where Me=Mn, Mo, Nb) deformed at ~99 %, the most perfect cubic texture was realized. According to the data obtained, after such annealing mode, from 94% to 98% of grains with orientation {001}<100> developed in the Cu–40% Ni–1.3% Mn, Cu–40% Ni–0.8% Mo, and Cu–40% Ni–0.5% Nb alloys. It opens the prospect of using these alloys as epitaxial substrates in the technology of high-temperature second-generation superconductors. The evaluation of mechanical characteristics showed that alloying contributed to an increase in the yield strength of Cu–40% Ni–1.3% Mn, Cu–40% Ni–0.8% Mo, and Cu–40% Ni–0.5% Nb alloys by 3–4 times compared with the yield strength value of a textured copper band.

Keywords: textured tapes; copper-nickel-based alloys; deformation; recrystallization annealing; cubic texture; yield strength.

Acknowledgements: The work was carried out within the state assignment on the topic “Structure” (No. AAAA-A18-118020190116-6) under the partial financial support of the Russian Foundation for Basic Research and the Sverdlovsk Region within the scientific project No. 20-43-660034.

The research of the structure and texture of samples was conducted at the Electron Microscopy Center of the Collaborative Access Center “Testing Center of Nanotechnology and Advanced Materials” of M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, UB RAS.

The paper was written on the reports of the participants of the X International School of Physical Materials Science (SPM-2021), Togliatti, September 13–17, 2021.

For citation: Suaridze T.R., Khlebnikova Yu.V., Egorova L.Yu. Forming an edged cubic texture in band substrates made of (Cu+Ni)–Me (Me=Mo, Mn, Nb) alloys for high-temperature second-generation superconductors. *Frontier Materials and Technologies*, 2022, no. 1, pp. 73–81. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-1-73-81.