

УДК [669.23.055:669.295]:532.66]:621.315.212

EDN GOVIDX

Исследование влияния деформации на качество поверхности и механические свойства капиллярных трубок на основе Nb-Ti сплава для сверхпроводящих коаксиальных кабелей квантовых компьютеров

*М.В. Крылова^{1,2}, И.М. Абдюханов¹, М.В. Алексеев¹, А.Г. Силаев¹,
М.М. Потапенко¹, Д.В. Соколовский¹, С.А. Шевякова¹, В.И. Ткаченко^{1,2},
С.М. Зернов³, М.Ю. Шляхов³, П.О. Русинов²*

¹АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва

²РТУ МИРЭА

³АО «ТВЭЛ», Москва

Основным материалом для изготовления капиллярных трубок сверхпроводящих коаксиальных кабелей квантовых компьютеров является ниобий-титан. Использование Nb-Ti обусловлено низкими энергетическими потерями и низкой теплопроводностью в сверхпроводящем состоянии. Важной характеристикой коаксиальных кабелей является волновое затухание в частотах до 20 ГГц при криогенных температурах. Волновое затухание напрямую связано с качеством внутренней поверхности капиллярных трубок, поэтому требуется низкий уровень ее разветвленности и искажения. Кроме этого, требуется достижение высоких пластических характеристик капиллярных трубок, позволяющих проводить технологический передел с большой степенью деформации. В статье представлены результаты исследования влияния режимов изготовления на качество поверхности и механические свойства капиллярных трубок на основе Nb-Ti для сверхпроводящих коаксиальных кабелей квантовых компьютеров

Ключевые слова: ниобий-титан, капиллярная трубка, коаксиальный кабель, механические свойства, коэффициент разветвленности, коэффициент искажения, квантовый компьютер

Study of the deformation influence on the surface quality and mechanical properties of Nb-Ti based capillary tubes for superconducting coaxial cables of quantum computers

*M.V. Krylova^{1,2}, I.M. Abdyukhanov¹, M.V. Alekseev¹, A.G. Silaev¹,
M.M. Potapenko¹, D.V. Sokolovskii¹, S.A. Shevyakova¹, V.I. Tkachenko^{1,2},
S.M. Zernov³, M.Y. Shlyakhov³, P.O. Rusinov²*

¹JSC « A. A. Bochvar High-tech Research Institute of Inorganic Materials», Moscow

²RTU MIREA

³JSC TVEL, Moscow

The main material for the production of capillary tubes for superconducting coaxial cables of quantum computers is niobium-titanium. NbTi is used due to its low energy loss and low thermal conductivity in the superconducting state. The important characteristic of coaxial cables is wave attenuation at frequencies up to 20 GHz at cryogenic temperatures. Wave attenuation is directly related to the quality of the capillary tube's inner surface, requiring low branching and distortion. Furthermore, achieving high plastic properties of the capillary tubes, allowing for high-deformation processing, is essential. This article presents the results of the study examining the influence of manufacturing conditions on the surface quality and mechanical properties of Nb-Ti-based capillary tubes for superconducting coaxial cables for quantum computers.

Keywords: niobium-titanium, capillary tube, coaxial cable, mechanical properties, branching coefficient, distortion coefficient, quantum computer.

Введение

Главным преимуществом квантовых компьютеров перед современными компьютерами является значительно более высокая скорость вычислений, что открывает новые возможности для физического моделирования, криптографии, исследований в области искусственного интеллекта и т. д. [1].

Что касается комплектующих подобных устройств, то одним из элементов квантового компьютера является кабель на основе сверхпроводящих материалов. Причем, в данном случае, требуется кабель коаксиального типа, который содержит центральный проводник под слоем изоляции внутри капиллярной трубки.

Наиболее подходящим материалом для центрального проводника и капиллярной трубки является сверхпроводящий сплав Nb-Ti, поскольку он обладает низкой теплопроводностью, высокой пластичностью и низкими энергетическими потерями за счет сверхпроводимости [2], [3]. В частности, теплопроводность сверхпроводящего Nb-Ti сплава при температуре 4 К на четыре порядка ниже, чем у меди, а электрическое сопротивление стремится к нулю. Кроме того, благодаря эффекту Мейснера, экранируется внешнее электромагнитное воздействие, а потери на гистерезис при переменном токе на несколько порядков меньше, чем на лучших медных кабелях. В связи с этим проводники на основе сверхпроводящего Nb-Ti сплава наиболее предпочтительны для использования в СВЧ-кабелях квантовых компьютеров.

Одной из основных проблем разработки конструкции и технологии производства кабелей на основе сверхпроводящих материалов является сложность изготовления их комплектующих, особенно тонкостенной капиллярной трубки. В процессе получения капиллярных труб заготовки из сверхпроводящего сплава Nb-Ti подвергаются

операциям прессования, прокатки и волочения с высокой степенью суммарной деформации, а также промежуточной термообработке. Поэтому целью данной работы являлось изучение влияния режимов деформации и термообработки на качество поверхности и механические характеристики капиллярных трубок.

1. Требования к капиллярным трубкам на основе сплава Nb-Ti

Ранее в АО «ВНИИНМ» были разработаны режимы получения прутков на основе Nb-Ti в качестве комплектующих многоволоконных сверхпроводников. Изготовление тонкостенных капиллярных трубок из этого материала в отечественной практике проведено впервые.

При изготовлении капиллярных трубок на основе сплава Nb-Ti для квантовых компьютеров было необходимо учитывать требования к их размерам, которые приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, в качестве комплектующих требуется изготовление капиллярных трубок двух типоразмеров: $\varnothing 2,41 \pm 0,02 \times 0,26 \pm 0,01$ мм и $\varnothing 1,82 \pm 0,02 \times 0,275 \pm 0,01$ мм. В дальнейшем полученные капиллярные трубки с помещенными внутри изолированными сердечниками подвергаются обжатию, что позволяет получить требуемые типоразмеры кабеля: $\varnothing 2,19$ мм и $\varnothing 1,6$ мм.

Для получения капиллярных трубок требуется осуществить переработку исходных заготовок со степенью истинной деформации $\ln \mu$ более 7,6 единиц. Для этого потребовалась разработка оптимальных режимов деформации и термообработки для исключения обрывов и дефектов трубок необходимого типоразмера с высоким качеством поверхности и приемлемым выходом в годное. Задачей работы явилась разработка технологии, обеспечивающей возможность выпуска мелкосерийных партий капиллярных трубок на основе Nb-Ti сплава.

Таблица 1
Основные требования к геометрическим размерам капиллярных трубок на основе сплава Nb-Ti

Характеристики	Типоразмер 1	Типоразмер 2
Внешний диаметр, мм	$1,82 \pm 0,02$	$2,41 \pm 0,02$
Толщина стенки, мм	$0,26 \pm 0,01$	$0,275 \pm 0,01$
Минимальная длина единичного куска, м	1,5	1,5

2. Методы исследований и используемое оборудование

Микроструктура поперечного сечения капиллярных трубок была исследована методом металлографического анализа с помощью оптического микроскопа Leica DMi8 [4] с увеличением до 500 крат в автоматическом режиме, при этом была использована покадровая съемка отдельных участков образца при помощи камеры с последующим сшиванием в цельное изображение.

Обработка полученных изображений для оценки разветвленности и искажений проводилась в графическом редакторе.

Оценку разветвленности внешней и внутренней поверхности трубчатых образцов производили в соответствии с ранее разработанной «Методикой оценки разветвленности геометрии» [5] по формуле (1):

$$K_p = \frac{P_{НГ}}{P_{Р-В}}, \quad (1)$$

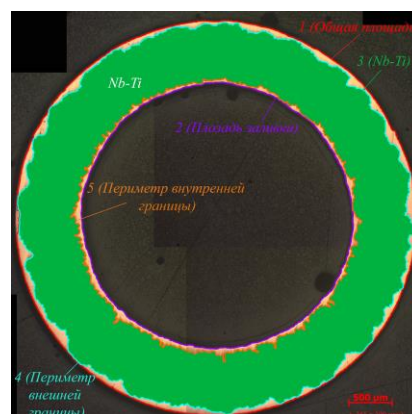
где K_p – коэффициент разветвленности по внешней или внутренней границе Nb-Ti, $P_{НГ}$ – периметр внешней или внутренней границы Nb-Ti, а $P_{Р-В}$ – периметр равновеликой окружности внешней или внутренней границы Nb-Ti.

Оценка искажений по Nb-Ti производилась по формуле (2):

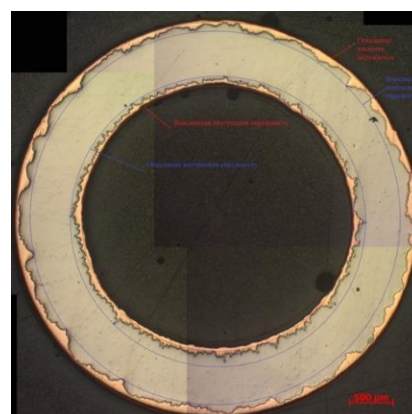
$$K_u = \frac{D_o}{D_v}, \quad (2)$$

где K_u – коэффициент искажений по внешней или внутренней границам Cu/NbTi, D_o – диаметр описанной окружности по внешней или внутренней границам Cu/NbTi, D_v – диаметр вписанной окружности по внешней или внутренней границам Cu/NbTi

Примеры изображений поперечного сечения образцов капиллярной трубки с выделенными участками для расчета коэффициента разветвленности и построенными окружностями (вписанными и описанными) для расчета коэффициента искажения приведены на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Изображение поперечного сечения образца капиллярной трубки на основе Nb-Ti с выделенными участками для расчета коэффициента разветвленности (а) и построенными окружностями для расчета коэффициента искажения (б)

Испытания образцов трубок на растяжение проводились по ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84) [5] при помощи универсальной испытательной машины УТС 110-50, имеющей максимальную нагрузку в 50 кН.

В ходе испытаний были определены следующие параметры: временное сопротивление разрыву (σ_v), условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и относительное удлинение (δ). Значения параметров определялись как среднее из трех полученных результатов измерений.

Для измерения твердости образцов по Викерсу использовали цифровой твердомер DM8 [7]. Измерения проводились в соответствии с ГОСТ 2999-75 [8] при увеличении 100х, шаге 100-160 мкм и нагрузке 50-500 г. Всего было проведено по 16-20 измерений для каждого образца.

Пример участка образца с отпечатками после измерения твердости представлен на рис. 2.

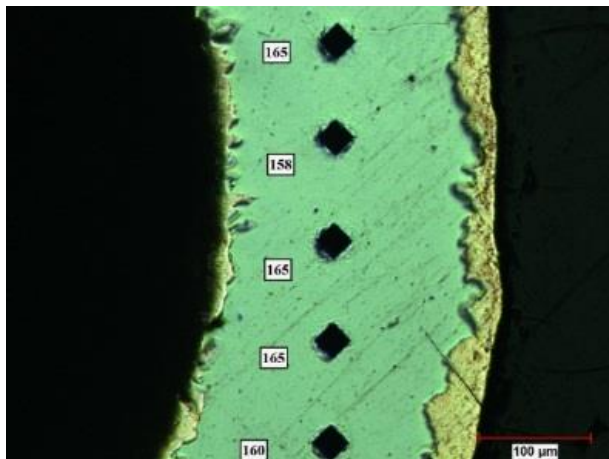


Рис. 2. Изображение участка образца диаметром 1,82 мм с отпечатками после измерения твердости по Виккерсу при увеличении 100х. Шаг: 90 мкм, нагрузка: 100 г. Статистическая обработка была проведена в соответствии с ГОСТ Р 8.736—2011 [9] (п.4-5).

3. Исследуемые образцы

Капиллярные трубки были получены на оборудовании АО «ВНИИНМ» и ОАО «МИЗ-Ворсма».

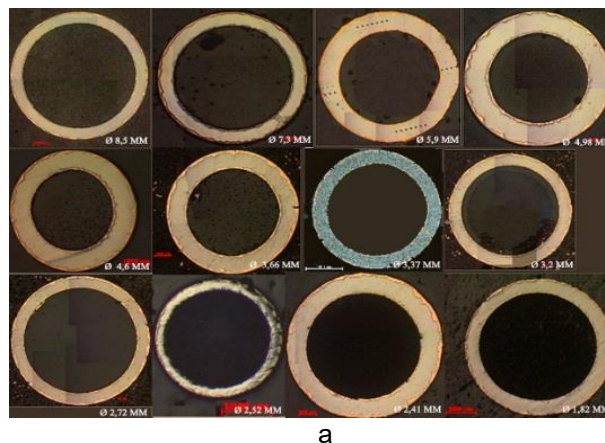
Для получения капиллярных трубок на основе сплава Nb-Ti использовали трубную заготовку в медной оболочке. Медную оболочку использовали для исключения налипания материала трубок на инструмент в процессе деформации. На конечном этапе технологического передела медь удаляли травлением. Заготовки подвергались следующему технологическому переделу: выдавливанию, холодной прокатке и волочению на дорне до получения финишных размеров. На промежуточном размере, на диаметре 8,5 мм, проводилась одна термообработка для снятия деформационного упрочнения и обеспечения необходимых механических свойств.

В процессе волочения были отобраны образцы капиллярных трубок на основе сплава Nb-Ti в медной оболочке: один образец диаметром 8,5 мм после термообработки, а также образцы с наружным диаметров в диапазоне 7,3 - 1,82 мм, отобранные на промежуточных этапах деформации.

Отбор образцов производился от задней части трубки на участке с устоявшейся деформацией после отрезки дефектной краевой части, содержащей окалину, загрязнения и микроскопические трещины. Суммарная длина образцов на каждом диаметре составляла более 650 мм.

4. Структура Nb-Ti полуфабрикатов на различных стадиях деформации

Металлографический анализ геометрии поперечного сечения полученных образцов капиллярных трубок был проведен на промежуточных этапах волочения на различных стадиях деформации. Изображения поперечного сечения образцов представлены на рис. 3.



а



б

Рис. 3. Изображения поперечного сечения образцов Nb-Ti капиллярных трубок на промежуточных стадиях волочения с $\varnothing 8,5 \times 0,8$ мм до $1,82 \times 0,275$ мм (а), в составе коаксиального кабеля без медной оболочки (б)

Изображения образцов были обработаны в графическом редакторе для получения коэффициентов разветвленности и искажения на внешней и внутренней границах раздела Cu-NbTi.

По полученным данным были построены графики зависимости коэффициентов разветвленности (рис. 4) поверхности Nb-Ti капиллярных трубок на границе раздела Cu-NbTi от степени деформации образцов.

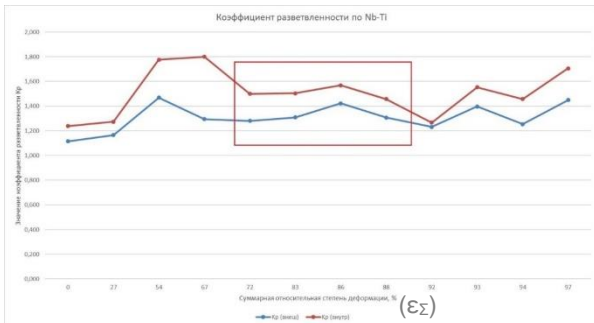


Рис. 4. Распределение величины коэффициента разветвленности по внешней и внутренней границам Cu-NbTi трубок в зависимости от суммарной относительной степени деформации (ϵ_{Σ})

Показано, что на первых проходах коэффициент разветвленности поверхности (как внутренней, так и внешней) сначала возрастает на 45%, а затем резко падает. Это связано с особенностями технологического процесса деформации: на первых проходах использовалось волочение без оправки, а начиная с 72% (ϵ_{Σ}) - дорновое волочение, благодаря которому и разветвленность заметно снижалась (область отмечена на графике красным прямоугольником).

Внутренняя поверхность проводника является критически важным фактором затухания сигнала на высоких частотах, поскольку, в соответствии со скин-эффектом, плотность переменного тока экспоненциально возрастает к поверхности, что приводит к концентрации омических потерь (Джоулевы потери) в приповерхностном слое, толщина которого определяется скин-слоем. Следовательно, шероховатость поверхности, оксидные пленки и другие приповерхностные дефекты напрямую определяют эффективную площадь поперечного сечения для протекания тока и, как следствие, величину резистивных потерь.

Показано, что коэффициент разветвленности внешней границы раздела систематически ниже на всем протяжении волочения, чем на внутренней, что связано с особенностями деформации, заключающейся в более интенсивной деформации сдвига.

По полученным данным также были построены графики зависимости коэффициентов искажения образцов капиллярных трубок на границе раздела медь-ниобий-титан от степени деформации (рис. 5).

Как видно на рис. 4, на участке, где применяли дорновое волочение (область отмечена на графике красным прямоугольником), наблюдается значительное снижение коэффициента искажения. Это можно объяснить тем, что наличие внутри трубы оправки правильного круглого

профиля обеспечивает более равномерную деформацию ее внутренней поверхности.

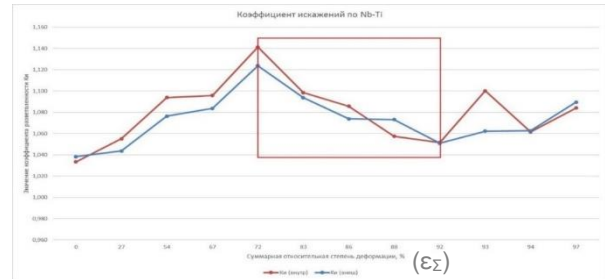


Рис. 5. Распределение коэффициентов искажений по внешней и внутренней границам Cu-NbTi трубок в зависимости от ϵ_{Σ}

5. Механические свойства Nb-Ti полуфабрикатов на различных стадиях деформации

Исследование образцов полуфабрикатов включало в себя проведение испытаний их механических свойств при растяжении и измерение твердости по Виккерсу.

Кривая зависимости твердости образцов трубок от (ϵ_{Σ}) представлена на рис. 6. Установлено, что на начальном участке в диапазоне ϵ_{Σ} с 0 до 54% твердость повышается с 120 до 150 HV. Далее на протяжении большого количества проходов (ϵ_{Σ} с 54 до 97%) твердость почти не повышалась и находилась в диапазоне 150-160 HV, что, вероятно, связано с динамическим возвратом, характерным для материалов с ОЦК решеткой фазы с ниобиевой составляющей при высокой степени деформации, когда активно происходит перестройка и частичная аннигиляция дислокаций, что компенсирует деформационное упрочнение, приводя к стабилизации твердости. На финишном размере твердость составила 160 HV, что свидетельствует о достаточно большом запасе пластичности (критическое значение твердости для HT47 находится на уровне 200 HV – отмечено пунктирной линией - после которого наблюдается активное трещинообразование).



Рис. 6. Зависимость твердости образцов трубок от суммарной степени деформации от ϵ_{Σ}

По результатам испытаний капиллярных трубок на растяжение были построены графики зависимости временного сопротивления разрыву, условного предела текучести и относительного удлинения от суммарной степени деформации (рис. 7-9). Кроме того, ниже представлен график зависимости деформации от усилия на примере образца диаметром 1,85 мм (рис. 10).

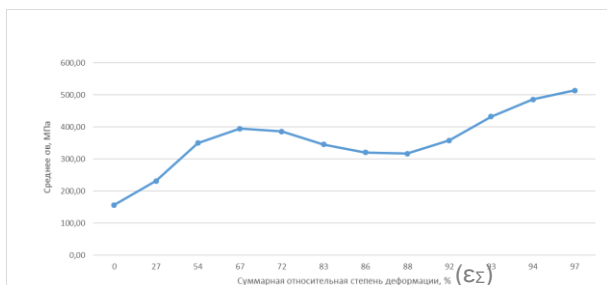


Рис. 7. Зависимость среднего значения временного сопротивления разрыву σ_v от ϵ_{Σ}

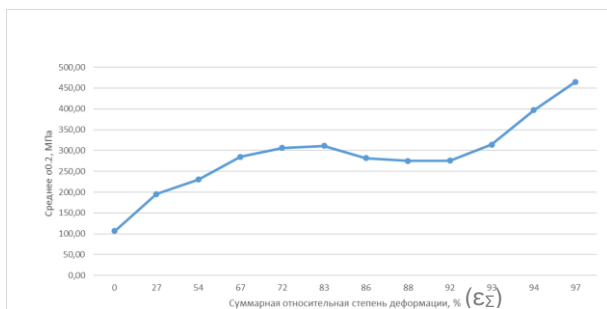


Рис. 8. Зависимость среднего значения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ от ϵ_{Σ}

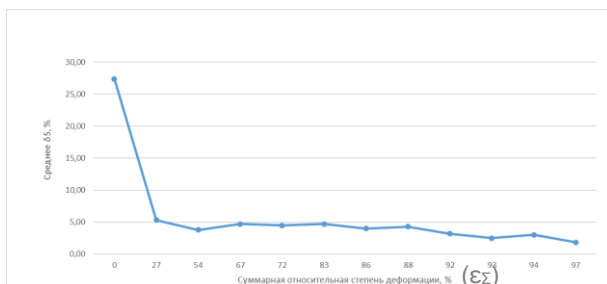


Рис. 9. Зависимость среднего значения относительного удлинения δ от ϵ_{Σ}

На графике зависимости σ_v от суммарной деформации (рис. 7) на участке 67-92% наблюдается плато со значением σ_v на уровне 300-350 МПа и дальнейшее повышение временного сопротивления до 500 МПа при значении ϵ_{Σ} 97%.

При анализе графика зависимости $\sigma_{0,2}$ от деформации (рис. 8) отмечено устоявшееся значение $\sigma_{0,2}$ на уровне 275-300 МПа на участке 67-92% и дальнейшее повышение $\sigma_{0,2}$ до 460 МПа при суммарной деформации ϵ_{Σ} 97%.

На графике зависимости относительного удлинения от деформации наблюдается значительное снижение пластичности на участке 0-27%. Это связано с тем, что на диаметре 8,5 мм образцы подвергли отжигу, что привело к значительному повышению пластичности. Далее на участке деформации 27-97% наблюдается плато.

Анализ характерной кривой растяжения Nb-Ti образцов с пределом текучести 506 МПа и временным сопротивлением 562 МПа показал, что данные образцы имеют ограниченную способность к упрочнению после начала пластической деформации (рис. 10). Данный материал демонстрирует достаточно низкий модуль Юнга до 22,4 ГПа, что обеспечивает возможность многократных изгибов при его использовании.

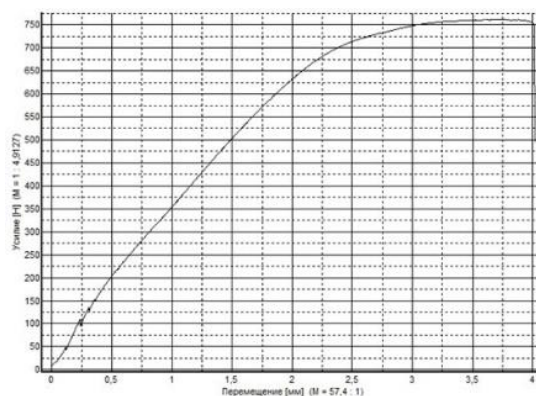


Рис. 10. Характерный график зависимости усилия от перемещения при испытаниях на растяжение для образца Nb-Ti трубки с наружным диаметром 1,82 мм после термообработки

На основе проведенных исследований были разработаны рекомендации на технологические режимы, совместно разработанные АО «ВНИИНМ» и АО «МИЗ-Ворсма», в соответствии с которыми была изготовлена партия капиллярных трубок размерами 2,41 x 0,26 мм и 1,82 x 0,28 мм общей длиной около 450 метров с высоким качеством поверхности и удовлетворительным запасом пластичности.

Заключение

Изучено влияние режимов деформации на качество поверхности и механические свойства капиллярных трубок на основе Nb-Ti.

Выявлено, что применение волочения на оправках специальной формы (дорнов) в диапазоне суммарной относительной деформации ϵ от 72 до 92% позволяет значительно снизить коэффициент разветвленности и искажения поверхности капиллярных трубок на основе Nb-Ti.

Показано, что коэффициенты разветвленности и искажения на внутренней границе раздела Cu-NbTi имели более высокие значения на протяжении всего процесса волочения, чем на внешней. Это связано с особенностями схемы деформации: более интенсивная деформация сдвига на внешней поверхности трубки, по-видимому, приводит к более активному “сглаживанию” неровностей, чем на внутренней.

Установлено, что на начальном участке волочения, при степени деформации в диапазоне с 0 до 54%, твердость повышается с 120 до 150 HV. Далее, на протяжении большого количества проходов твердость почти не повышалась и находилась в диапазоне 150-160 HV, что, вероятно, связано с динамическим возвратом, характерным для материалов с ОЦК решеткой ниобиевой составляющей.

На финишном размере трубки твердость составила 160 HV, что свидетельствует о достаточно большом запасе пластичности (по сравнению с критическим значением ~ 200 HV, после которого наблюдается активное трещинообразование).

Показано, что на графике зависимости временного сопротивления разрыву от деформации на участке 67-92% наблюдается плато со значением σ_B на уровне 300-350 МПа.

На графике зависимости условного предела текучести от деформации видно, что имеется плато со значением $\sigma_{0,2}$ на уровне 275-300 МПа на участке деформации 67-92%.

Отмечено значительное падение величины относительного удлинения отожженных образцов на начальном участке деформации (с 27 до 5%), что, по-видимому, связано с увеличением плотности дислокаций во время волочения по сравнению с исходным на размере трубы 8,5 x 0,8 мм. Далее наблюдается плато на участке деформации 27-97%, что, по-видимому, связано с процессами динамического возврата.

В результате проведенных исследований специалистами АО «ВНИИНМ» и АО «МИЗ-Ворсма» были разработаны режимы изготовления в промышленных условиях бесшовных тонкостенных капиллярных трубок на основе сплава Nb-Ti для получения коаксиальных кабелей и кабельных сборок для квантовых компьютеров.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам цеха АО «ВНИИНМ» и лично Я.С. Краевскому, А.А. Чугину, К.М. Миначеву, А.М. Михалеву, сотрудникам ОАО «МИЗ-Ворсма», А. Полякову, И.Е. Суськову, Л.И. Суськовой.

Обеспечение работы

Данная НИОКР выполнена в 2024-2025 гг. при финансовом обеспечении АО «ТВЭЛ».

Список литературы

1. Yvonne Y. Gao, M. Adriaan Rol, Steven Touzard et al., «Practical Guide for Building Superconducting Quantum Devices», PRX QUANTUM 2, 2021. [1]
2. Yvonne Y. Gao, M. Adriaan Rol, Steven Touzard et al., «Practical Guide for Building Superconducting Quantum Devices», PRX QUANTUM 2, 2021. [2]
3. M. N. Wilson, «NbTi superconductors with low ac loss: A review», Cryogenics, 2008. [3]
4. Металлографический микроскоп Leica DM8. Технические характеристики. [4]
5. КРЫЛОВА М.В., ПЕТРОВА И.В., ГЛАГАЗИНА Н.Ю., ЦАПЛЕВА А.С., АЛИЕВ Р.Т., АЛЕКСЕЕВ М.В., АБДЮХАНОВ И.М., ФИГУРОВСКИЙ Д.К., ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ Nb-Cu-Sn КОМПОЗИТА НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ NbSSN СВЕРХПРОВОДНИКОВ, 2018. [5]
6. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84). Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Стандартинформ, 2008. 26 с. [6]
7. Микротвердомеры цифровые DM8. Описание типа средства измерений. [7]
8. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. М.: Издательство стандартов, 1975. 31 с. [8]
9. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. [9]

Поступила в редакцию / Received 03.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 11.12.2025

Принята к публикации / Accepted 12.12.2025