

05;12

Механические испытания труб-оболочек проводника для тороидальной обмотки Международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР)

© А.В. Кривых¹, О.П. Анашкин¹, В.Е. Кейлин¹, Д.Н. Диев¹, А.С. Динисиллов¹,
В.И. Щербаков¹, В.И. Тронза²

¹ Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия

² Институт „Международный экспериментальный термоядерный реактор (ИТЭР)–Центр проект“,
123182 Москва, Россия

e-mail: krivykh@issph.kiae.ru

(Поступило в Редакцию 11 октября 2011 г. В окончательной редакции 3 февраля 2012 г.)

К материалу труб-оболочек проводника для сверхпроводящих тороидальных обмоток Международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР) предъявляются очень жесткие требования, включающие вязкость при температуре жидкого гелия. В качестве материала труб-оболочек рекомендована нержавеющая сталь 316LN-IG-модифицированная. Образцы труб из 316LN-IG (как полноразмерные, так и суб-образцы), проходили механические испытания на различных стадиях технологического процесса изготовления проводника: в состоянии поставки, а также после их компактирования, предварительной вытяжки на 2.5% при комнатной температуре и отжига в режиме 650°C, 200 h в атмосфере чистого газообразного гелия. Испытания проводились при комнатной, азотной и гелиевой температурах и соответствовали стандартам Американского общества инженеров-механиков (ASME и ASTM). Результаты испытаний субобразцов и полноразмерных труб показывают, что последний тип испытаний дает более представительные результаты для квалификации сварных соединений, работающих в жидком гелии. При понижении температуры и увеличении степени деформации происходило увеличение намагничности образцов, особенно при наличии сварного шва. Измерение деформации с помощью экстензометра показывает, что внутрикристаллические процессы при температуре жидкого гелия могут приводить к значительному изменению локальной нагрузки, вплоть до полной разгрузки в области деформации. На экстензометре, расположенном непосредственно по обе стороны от сварного соединения, при испытаниях в жидком гелии наблюдалась необычная локальная скачкообразная деформации. Она происходила скачками на сжатие, против направления действия нагрузки.

Введение

Сверхпроводящие обмотки тороидального поля (ТП) Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) по своей конструкции практически не ремонтпригодны [1], поэтому их надежность должна быть чрезвычайно высокой. Катушки наматываются проводником типа кабель-в-оболочке, представляющим собой многоступенчатую скрутку большого числа проволок (стрендов) на основе Nb₃Sn, затянутую в оболочку из нержавеющей стали (кондуит). Внешний диаметр оболочки составляет 43.7 mm (у компактированной трубы), толщина стенки — 2.0 ± 0.1 mm. Согласно требованиям Международной организации ИТЭР (МО), механическим испытаниям подвергались как полноразмерные трубы, так и изготовленные из труб суб-образцы при комнатной температуре (RT), температуре жидкого азота (LN₂) и жидкого гелия (LHe).

Установки для испытаний

Суб-образцы (рис. 1, а) испытывались на стандартной установке „Инстрон-1195“. Для измерения деформации использовался штатный экстензометр с базой 10 mm.

Ранее эта установка использовалась в Курчатовском институте для изучения механических свойств сверхпроводящих проводов и обмоток при низких температурах [2]. Полноразмерные трубы (рис. 1, б) испытывались на установке собственной разработки F-250. Эта уникальная установка была создана и успешно использована для испытаний деталей подвеса сверхпроводящего тороидального магнита детектора АТЛАС (ЦЕРН, Швейцария). Она развивала растягивающее усилие до 2.5 MN при градиенте температур от 300 до 7 K на испытываемых деталях подвеса [3].

Для испытаний оболочек ТП-проводников обе установки были оснащены специально разработанными погружными криостатами, передающими силу. Внутренний диаметр криостата для „Инстрон-1195“ около 100 mm, нагрузка до 40 kN. Диаметр криостата F-250 около 200 mm, нагрузка до 0.45 MN. Жесткость первой установки при криогенных испытаниях составляет $C_1 \sim 7.5 \cdot 10^{-2} \mu\text{m/N}$, второй $C_2 \sim 1.5 \cdot 10^{-2} \mu\text{m/N}$. При испытаниях скорость относительной деформации составляла, как правило, около $\dot{\epsilon}_0 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

Возможности установки F-250 (0.45 MN при температуре жидкого гелия) являются уникальными. Только в Технологическом институте Карлсруэ (ФРГ) существует

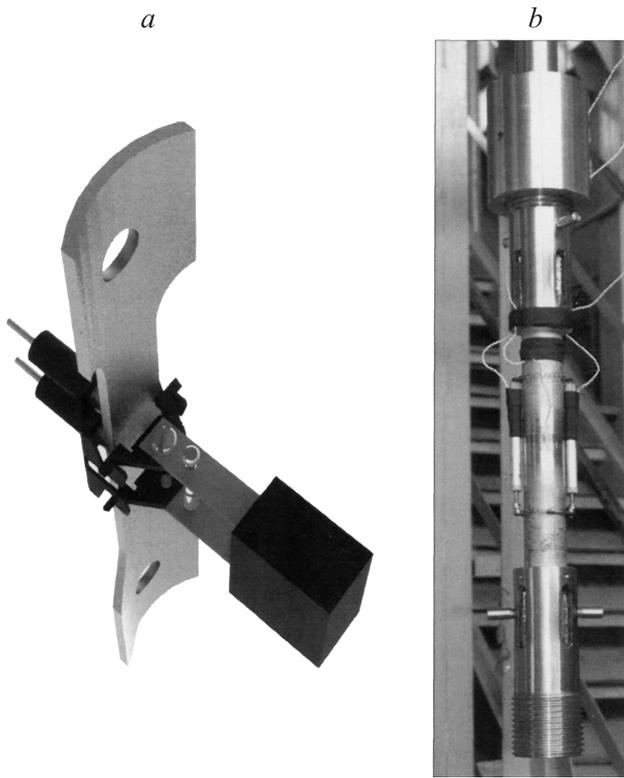


Рис. 1. Суб-образец (а) с экстензометром (10 mm) и труба (b) с экстензометрами (150 mm) и креплениями для растяжения при температуре жидкого гелия.

установка приблизительно с такими же параметрами, однако ее пользователям не удалось справиться с проблемой зажима образцов труб (проскальзывание в захватах). Нами для закрепления образцов использовалась сварка специальной геометрии, эта конфигурация сварки является зарегистрированным коммерческим ноу-хау.

Испытания при комнатной и азотной температурах

Согласно техническим требованиям [4], механические испытания должны проводиться на суб-образцах и трубах в состоянии поставки (VIR), а также после прохождения компактирования, вытяжки на 2.5% (С) и отжига в гелии 650°C, 200 h (НТ) как со сварными швами, так и без них. Сварные соединения на трубах по качеству были двух видов: швы, выполненные до (before qual.) и после (after qual.) процедуры квалификации сварки. Процедура квалификации состояла в подборе режима сварки. Графики зависимостей „нагрузка-деформация“, полученные в ходе испытаний при комнатной температуре полноразмерных образцов труб, приведены на рис. 2.

Нетрудно заметить, что при комнатной температуре предельное напряжение в основном зависит только от состояния трубы, а наличие сварного шва не столь существенно. Максимальное удлинение (ϵ_{max}), напротив,

очень сильно зависит и от состояния трубы, и от наличия сварного шва. В состоянии поставки материал обладает высокой пластичностью ($\epsilon_{max} = 48\%$), однако процедуры компактирования, вытяжки и отжига, с одной стороны, и сварки делают его менее пластичным ($\epsilon_{max} = 32\%$ без наличия сварного шва и 23% со швом). Особенно низкопластичным оказался компактированный, вытянутый и отожженный образец со сварным швом, который был выполнен до квалификации сварки ($\epsilon_{max} = 5.5\%$).

Максимальная деформация трубы со швом (С + НТ) возросла с 5.5% до $\epsilon_{max} = 10\%$ при улучшении качества швов после квалификации процедуры сварки.

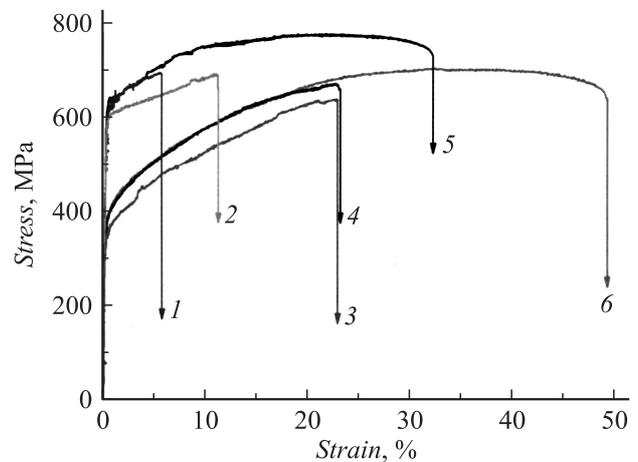


Рис. 2. Результаты испытаний труб с различных производственных стадий при комнатной температуре. 1) — С + НТ со швом before qual.; 2) — С + НТ со швом after qual.; 3) — VIR со швом after qual.; 4) — VIR со швом before qual.; 5) — С + НТ труба; 6) — VIR труба.

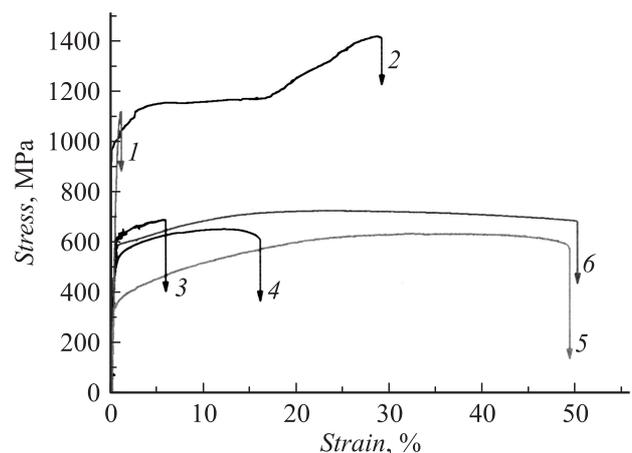


Рис. 3. Испытания труб и суб-образцов со швом разных стадий производства при комнатной температуре и температуре жидкого азота. 1) — С + НТ труба со швом before qual. LN₂; 2) — С + НТ суб-образец со швом before qual. LN₂; 3) — С + НТ труба со швом before qual. RT; 4) — С + НТ суб-образец со швом before qual. RT; 5) — VIR труба RT; 6) — VIR суб-образец со швом RT.

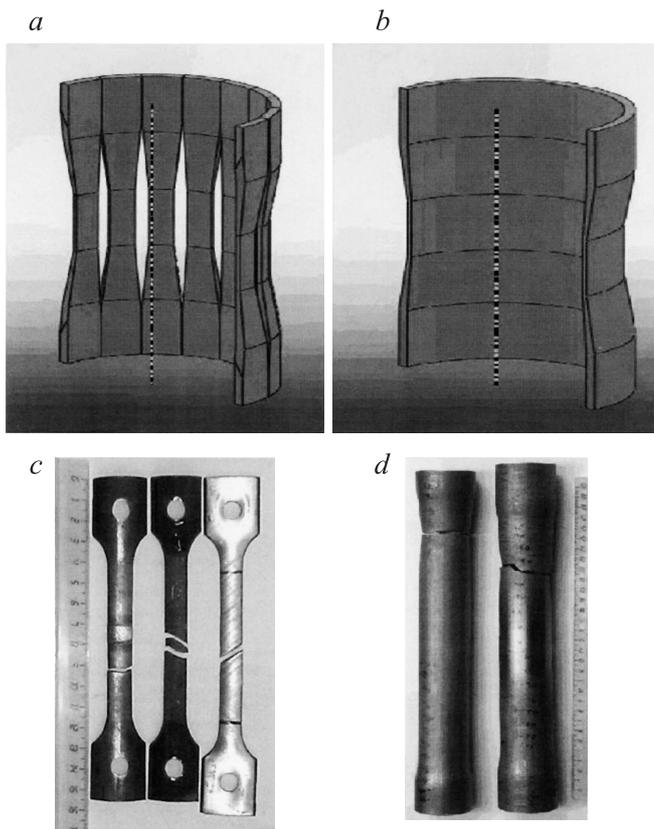


Рис. 4. Иллюстрация различия в распределении механических напряжений и фото разорванных суб-образцов и труб.

На рис. 3 приведены зависимости „нагрузка–деформация“ для полноразмерных труб и суб-образцов при комнатной температуре и температуре жидкого азота. Они также демонстрируют негативное влияние сварки, компактирования и отжига на вязкость материала как на суб-образцах, так и на трубах.

Деградация пластичности наблюдалась для трубы (С + НТ) со швом, изготовленной до квалификации уже при азотной температуре. И напряжение разрыва, и особенно ϵ_{max} материала со сваркой, были гораздо ниже, чем без нее.

Из общих соображений ясно, что при растяжении полноразмерных труб распределение деформаций и напряжений в них существенно отличается от такового в суб-образцах. Это различие проиллюстрировано следующей схемой.

На рис. 4, *a* изображена „трубообразная“ совокупность суб-образцов, на рис. 4, *b* — деформированная полно-масштабная труба. Очевидно, что в последнем случае в трубе должны возникать тангенциальные напряжения, которые отсутствуют в случае суб-образцов. Несколько упрощая, можно считать напряженное состояние в суб-образцах одномерным, а в полномасштабной трубе двумерным. Там же на рис. 4, *c* приведены фотографии разорванных суб-образцов и труб (рис. 4, *d*). Наличие

шва усугубляет различие в поведении труб и суб-образцов.

Стандарт ASTM E8M также рекомендует использовать для испытания сварных швов на трубах диаметром менее трех дюймов только полноразмерные образцы труб. Как следствие, результаты испытаний полноразмерных труб в жидком гелии и азоте, предположительно, более достоверны, чем испытаний суб-образцов в жидком гелии несмотря на то, что первый тип испытаний более трудоемок и дорог.

Это предположение было подтверждено экспериментами в жидком гелии, которые представлены ниже.

Испытания при температуре жидкого гелия

Механические испытания на растяжение при температуре жидкого гелия проводились как на полноразмерных трубах, так и на суб-образцах.

Хорошо известно, что пластическая деформация различных металлов, включая 316LN-IG, при низких температурах (от 35 К и ниже) сопровождаются скачками деформации и нагрузки [5,6]. Каждый скачок можно рассматривать как локальное удлинение внутри малого

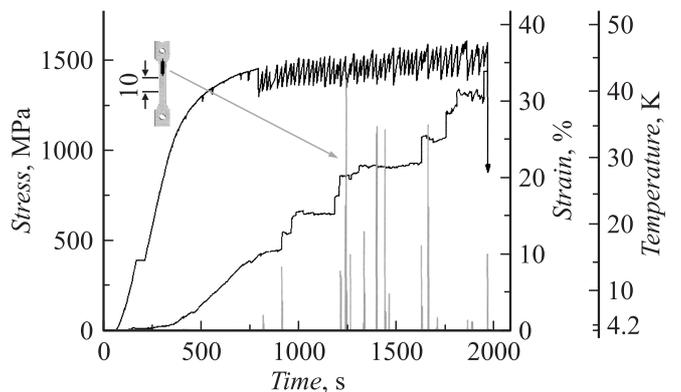


Рис. 5. Напряжение, деформация и температура на поверхности суб-образца при испытаниях в жидком гелии.

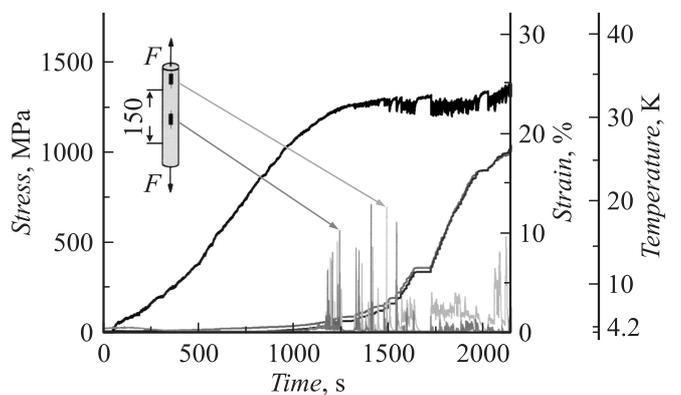


Рис. 6. Напряжение, деформация и температура на поверхности трубы при испытаниях в жидком гелии.

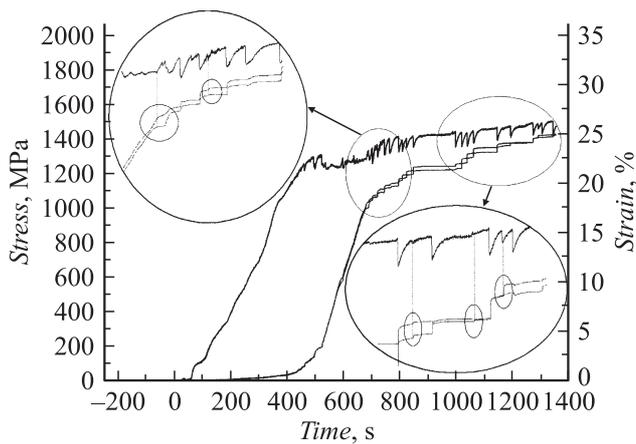


Рис. 7. Скачки деформации при испытаниях труб в жидком гелии.

объема по сравнению с объемом образца. Узкая полоса сдвига распространяется на большие расстояния, как правило, на всю толщину образца и сопровождается локальным нагревом. Полосы в суб-образцах расположены под углом 55° к направлению действия силы [7].

Чтобы оценить рост температуры при скачках, на образцы устанавливались угольные термометры сопротивления. Зависимости нагрузки, деформации и температуры от времени, полученные при испытании (VIR) суб-образцов (правый на рис. 4, *c*) и полноразмерной (VIR) трубы (левая на рис. 4, *d*), приведены на рис. 5 и 6. На рисунках видны скачки температуры до 40 и 20 К соответственно. Различие в величине скачков температуры, возможно, связано с тем, что в трубе область деформации локализована не только по длине, но и по окружности, и тепло перераспределяется не только в осевом, но и тангенциальном направлении. Очевидно, что с учетом отвода тепла в жидкий гелий реальная температура непосредственно в области деформации выше измеренной и по оценкам может достигать для суб-образца 150 К [8].

Измерение деформации двумя экстензометрами (базовая длина 150 мм) на трубе подтверждает локальность скачков деформации. На рис. 7 видно, что показания двух экстензометров на разных сторонах трубы часто не совпадали.

Кроме того, на суб-образце (рис. 5) иногда не совпадали скачки деформации и температуры, т.е. размер разогретой области (> 10 К) составлял 15–20 мм.

Для трех суб-образцов (С + НТ) со швом (before qual.) после разрыва при температуре жидкого гелия деформация ϵ_{\max} стабильно превышала 20%. Однако в жидком гелии, как и в жидком азоте, разрыв трубы (С + НТ) с таким же швом (before qual.) произошел по шву при гораздо меньшей деформации $\epsilon_{\max} = 1.5\%$.

Для сварных швов (after qual.) максимальная деформация трубы (С + НТ) в жидком гелии между тем достигла $\epsilon_{\max} > 20\%$, т.е. того же значения, что и для трубы без сварного соединения.

На рис. 8 приведено сопоставление результатов испытаний в жидком гелии суб-образца (С + НТ) и двух труб (С + НТ) со сварными соединениями, сделанными до (before qual.) и после (after qual.) процедуры ква-

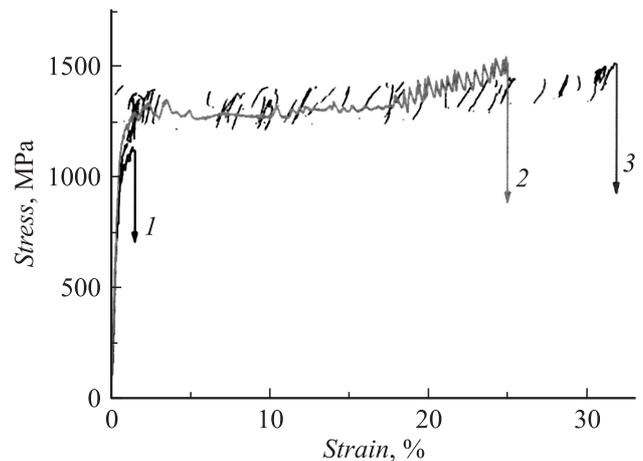


Рис. 8. Результаты испытаний труб и суб-образца со сварным швом до и после квалификации процедуры сварки в жидком гелии. 1) — С + НТ труба со швом before qual.; 2) — С + НТ труба со швом after qual.; 3) — С + НТ суб-образец со швом before qual.

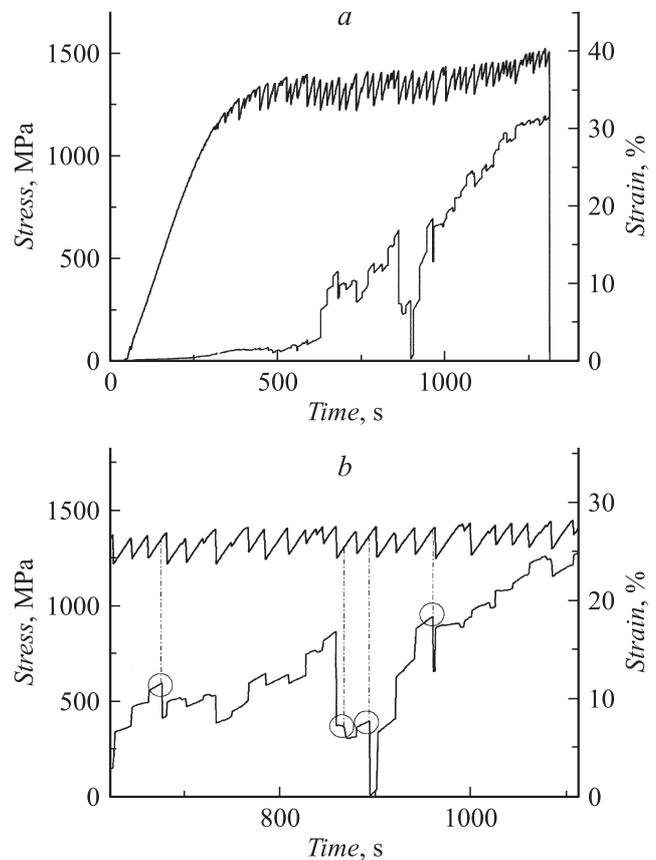


Рис. 9. *a* — Скачки деформации на сжатие, при испытаниях суб-образцов в жидком гелии (общий вид), *b* — детализация.

лификации сварки. Как видно, бóльшая деформация на суб-образце со сварным швом не гарантирует подобный результат на трубе с таким же сварным швом. Сравнение кривых проведено в координатах $\sigma - \epsilon$. Для суб-образца, когда экстензометр со штатным разрешением по времени 3 ms, график представляет собой отдельные куски несвязанных линий, т. е. время такой деформации было значительно меньше 3 ms.

Более того, в некоторых испытаниях суб-образцов с использованием экстензографа с базой 10 mm (рис. 1) наблюдались скачки деформации, не сопровождаемые скачками нагрузки (рис. 9, a). Этот эффект прежде всего проявлялся на компактированных и отожженных образцах и возле сварного соединения (левый суб-образец на рис. 4, c), причем место будущего разрыва находилось между ножами экстензографа. Скачки деформации на

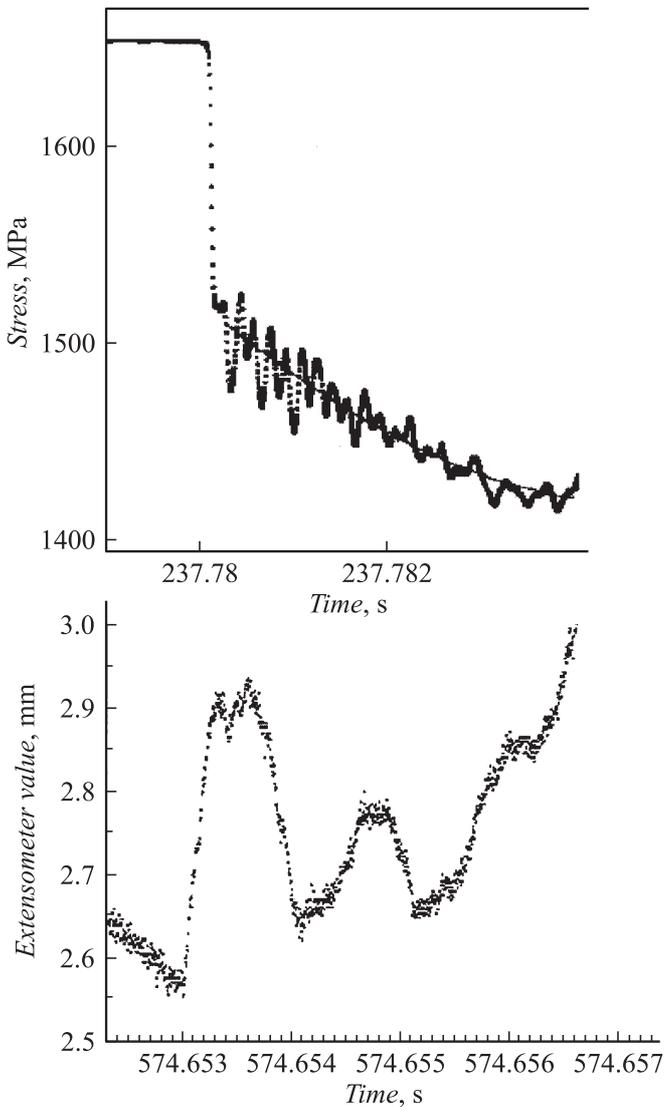


Рис. 10. Сравнение скачка нагрузки из работы [4] и показаний экстензографа в момент скачка в наших экспериментах, снятых с одинаковым временным разрешением — 5 μ s.

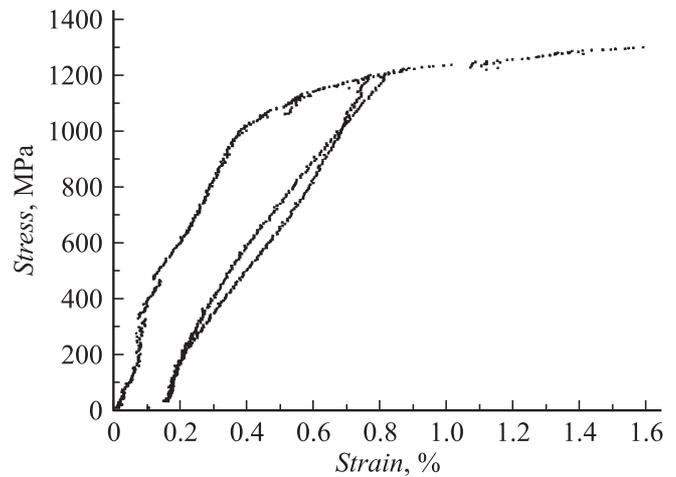


Рис. 11. Зависимость напряжения от деформации для суб-образца в жидком гелии в области упругости.

сжатие, как правило, происходили без скачков нагрузки (рис. 9, b). Динамика скачков деформации была такова, что показания экстензографа однозначно говорили о ее локализации [7]. Несмотря на большую величину деформации при отдельных скачках (до значений около 0.5 mm), суммарное удлинение экстензографа после разрыва хорошо совпадало с измерением по меткам под его креплениями на образце, т. е. их проскальзывания не происходит.

Для выяснения особенностей деформации были проведены испытания с высоким временным разрешением показаний экстензографа.

Снята зависимость показаний экстензографа при скачке с разрешением 5 μ s. На рис. 10 она сопоставлена с данными из работы [4]. Ее авторы, поместив датчик нагрузки в гелий вблизи образца и измерив скачок нагрузки, обнаружили, что развитие скачка происходит в две стадии. Время быстрого линейного спада нагрузки составляло по их измерениям около 150 μ s, а полная стабилизация механического напряжения происходила по экспоненциальному закону за время порядка 50 ms. Начальная линейная стадия деформации при этом длилась также около 200 μ s, а полная стабилизация деформации происходила за 25 ms.

Таким образом, измерения деформации с помощью экстензографа с высоким временным разрешением подтвердили наличие двух стадий развития скачка деформации.

Кроме того, была снята $\sigma - \epsilon$ -характеристика суб-образца при его циклических испытаниях в жидком гелии для точного определения $\sigma_{0.2}$. Она представлена на рис. 11. Видно, что на упругой части кривой деформации материал ведет себя достаточно традиционно и для того, чтобы образец полностью разгрузился до $\sigma = 0$, достаточно спада деформации на экстензографе (10 mm) менее чем на 1% (~ 0.1 mm).

Обсуждение результатов

Основным критерием оценки вязкости сварного соединения трубы из стали 316LN-IG по требованиям международной организации ИТЭР была величина максимального удлинения ($\epsilon_{\max} > 20\%$) при одноосном растяжении четырех труб (С + НТ) в жидком гелии. Сейчас эти трудновыполнимые требования смягчены и заменены на испытания двух суб-образцов (С + НС) со швами в жидком гелии ($\epsilon_{\max} > 20\%$) и испытания двух труб (VIR и С + НТ) со швами при комнатной температуре.

Сравнение результатов измерения деформаций труб со сварными соединениями в жидком азоте (рис. 3) и в жидком гелии (рис. 8) подтверждает предположение авторов, что даже испытания труб в жидком азоте более представительны (и поэтому более предпочтительны), чем испытания суб-образцов в жидком гелии и труб при комнатной температуре.

При низкой температуре деформации в стали 316LN-IG вызывают фазовый переход железа $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$ и образование мартенсита, т. е. материала с более высоким значением напряжения разрыва, но менее пластичного. Этот процесс подробно описан в работах [5,9,10]. Мартенсит является ферромагнетиком и легко идентифицируется, кроме того, он имеет другой тип и размер кристаллической решетки. Его образование приводит к снижению вязкости и, как следствие, снижению максимального удлинения при разрыве, провоцируя разрушение внутри зерен.

Проведенные измерения показали также, что намагниченность в нержавеющей стали 316LN-IG может возрастать даже без деформации, а только в результате ее охлаждения, особенно, если материал подвергался сварке и/или отжигу.

Подробный обзор работ по скачкообразной деформации при низкой температуре, а также теоретические гипотезы, ее объяснения приведены в обзоре [6].

Измерения скачкообразной деформации с использованием чувствительного экстензометра позволили получить новую информацию о кинетике скачков.

До сих пор нет однозначного мнения о причинах скачков при низких температурах, причем выводы различных авторов подчас противоположны. В работе [5] утверждается, что на абсолютно жесткой машине нагрузка при скачке упадет до нуля. В работе [9] говорится об отсутствии скачков в случае механических измерений на абсолютно жесткой машине. Информацию „с места событий“ дает измерение деформации, особенно локальное.

Датчик нагрузки, даже помещенный в гелий [4], невозможно расположить столь же близко к месту развития деформации, как экстензометр. Поэтому последний несомненно дает больше данных о кинетике скачка.

На рис 9, *a* и *b*) хорошо видно, что сжатие экстензометра (10 mm) на некоторых участках образца

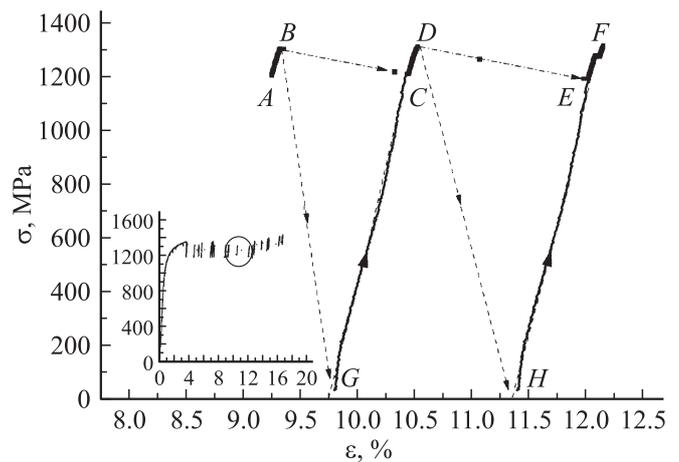


Рис. 12. $\sigma - \epsilon$ -диаграмма суб-образца в жидком гелии. Увеличенный фрагмент трех последовательных скачков, произошедших под экстензометром: $A-B-C-D-E-F$ — построенный по показаниям экстензометра, полученных с разрешением 3 ms; $A-B-G-C-D-H-E-F$ — построенный с учетом показаний экстензометра, полученных с разрешением 5 μ s.

около полосы скольжения, где развивается скачок, может достигать $\sim 1\%$. Это означает полную разгрузку этих участков, расположенных, вероятно, рядом с областью деформации. Скачки деформации на сжатие свыше 0.5 mm в рамках традиционной теории упругости объяснить не удается.

На рис. 12 проиллюстрировано, что деформации при каждом скачке может быть вполне достаточно, чтобы полностью разгрузить часть образца под экстензометром. На врезке к этому рисунку три последовательных скачка, произошедших в одном и том же месте, масштабированы и дополнены упругой разгрузочной характеристикой образца с рис. 11, которую можно рассматривать как градуировку экстензометра по силе.

Если кривая $A-B-C-D-E-F$ представляет собой запись скачкообразной деформации с датчика нагрузки, который расположен на раме установки Инстрон, то кривая $A-B-G-C-D-H-E-F$ является возможным вариантом поведения нагрузки около места развития скачков. Она построена по показаниям экстензометра. Поясним последнее утверждение.

Оценим, какая масса или длина Δl суб-образца может переместиться в результате первой стадии скачка при действии силы $F = 30$ kN со скоростью звука в металле $v = 6 \cdot 10^3$ m/s за время $\Delta t = 200$ μ s. Из уравнения

$$F = P/\Delta t, \quad (1)$$

где P — импульс, во время первой линейной части скачка, получим

$$\Delta l = F\Delta t/v\rho S, \quad (2)$$

где $\rho = 8 \cdot 10^3$ kg/m³, а $S = 2.5 \cdot 10^{-5}$ m².

После подстановки

$$\Delta l = \frac{3 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{ s}}{6 \cdot 10^3 \text{ m/s} \cdot 8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3 \cdot 2.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2} \\ = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0.5 \text{ mm}.$$

Абсолютной деформации на сжатие 0.5 mm вполне достаточно, чтобы полностью разгрузить суб-образец за время 150–200 μs вблизи плоскости, около которой происходит первая стадия скачка деформации. Затем за счет собственной накопленной упругой энергии установка, естественно, снова нагрузит образец, приведя в соответствие силу и деформацию в системе „образец–установка“ в целом, но уже за время 25–50 ms. Датчик нагрузки на раме фиксирует лишь „верхушки“ процессов, происходящих на второй стадии развития скачка.

Косвенным подтверждением сложного поведения деформаций внутри суб-образцов и появления скачков в сторону сжатия является характер разрушения одного из суб-образцов (среднего) из представленных на рис. 4, с. Разрыв на нем произошел в двух местах одновременно. Очевидно, что вырванная центральная часть этого суб-образца испытывала сжатие в процессе деформации.

Выводы

1. Для проведения механических испытаний на растяжение материала оболочки проводника тороидально-го поля для Международного экспериментального термоядерного реактора при температуре жидкого гелия были модифицированы и доработаны две испытательные машины. „Инстрон-1195“ была использована для испытаний суб-образцов оболочки с нагрузкой до 40 kN. Установка F-250 была использована для испытаний полноразмерных образцов труб-оболочек с нагрузкой до 0.45 MN. По своим возможностям эта установка является уникальной. Непростая проблема зажима образцов при столь больших усилиях решена при помощи сварки специальной геометрии. Обе машины отвечают требованиям стандартов ASME и ASTM.

2. Были измерены механические свойства как полноразмерных, так и суб-образцов труб-оболочек, изготовленных из нержавеющей стали 316LN-IG-модифицированная. Испытаны образцы со сварными соединениями и без них при комнатной, азотной и гелиевой температурах. Значения предельного удлинения для суб-образцов выше, чем для полноразмерных образцов. Это особенно заметно в случае образцов со сварным соединением. Поэтому, по нашему мнению, механические испытания сварных швов на полномасштабных трубах в жидком гелии (или, как более дешевый вариант, в жидком азоте) принципиально необходимы.

3. Было установлено, что предварительное растяжение при низких температурах (менее 190 K), а также отжиг (650°C, 200 h) и сварка материала оболочки вызывают усиление ферромагнитных свойств после его охлаждения, особенно вблизи сварных швов.

4. Измерение деформации с помощью экстензометра, работающего с временным разрешением 5 μs , подтвердило наличие двух стадий развития скачка деформации. Первая линейная стадия деформации занимает около 200 μs , а ее величины (0.5 mm) достаточно, чтобы разгрузить образец около плоскости деформации до $\sigma = 0$. Полная стабилизация деформации происходила за 25 ms, т.е. за время релаксации установки.

5. При температуре жидкого гелия наблюдались некоторые особенности скачкообразной деформации образцов. Например, экстензометр (базовая длина 10 mm), расположенный рядом со сварным соединением над местом будущего разрыва, фиксировал скачки деформации (0.2–0.5 mm) в сторону уменьшения, не сопровождавшиеся скачками нагрузки.

Авторы выражают благодарность ВНИИ кабельной промышленности за предоставленные образцы труб и сотруднику Курчатковского института А.В. Полякову за помощь в записи и обработке результатов испытаний и подготовке данной работы.

Список литературы

- [1] Alkseev A., John C., Mitchell N. // IPS Int. Conf. on Strength of Materials and Structures at Low Temperatures, Kiev, Ukraine, 2010. P. 1–2.
- [2] Anashkin O.P., Keilin V.E., Krivikh A.V. // Cryogenics. 1979. Vol. 19. N 1. P. 31–32.
- [3] Anashkin O.P. et al. // Cryogenics, 2005. Vol. 45. N 7. P. 469–471.
- [4] Obst B., Nyilas A. // Adv. in cryogenics engineering. 1998. Vol. 44 A. P. 331–339.
- [5] Obst B., Nyilas A. // Materials Science and Engineering, 1991. Vol. A-137. P. 141–150.
- [6] Пустовалов В.В. // Физика низких температур. 2008. Т. 34. Вып. 9. С. 871–913.
- [7] Николаев В.И., Шнейцман В.В. // ФТТ. 1997. Т. 39. Вып. 4. С. 647–651.
- [8] Долгин А.М., Бенгус В.З. // Физика низких температур. 1990. Т. 16. С. 254–260.
- [9] Стрижало В.А., Воробьев Е.В. // Проблемы прочности. 1993. Вып. 8. С. 37–46.
- [10] Малышев К.А., Сагарадзе В.В., Сорокин И.П., Земцова Н.Д., Теплов В.А., Уваров А.И. Фазовый наклеп аустенитных сплавов на железо-никелевой основе. М.: Наука, 1982. 260 с.