

## МЕТОД ПРОВЕДЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТОНКИХ ПРОВОЛОК

© 2023 г. О. И. Аксенов<sup>a,\*</sup>, А. А. Фукс<sup>a,b</sup>, Н. А. Волков<sup>a</sup>, А. С. Аронин<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт физики твердого тела РАН

Россия, 142432, Черноголовка Московской обл., ул. Академика Осипяна, 2

<sup>b</sup>Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”

Россия, 109028, Москва, Покровский бульвар, 11

\*e-mail: oleg\_aksenov@inbox.ru

Поступила в редакцию 01.09.2022 г.

После доработки 08.09.2022 г.

Принята к публикации 23.10.2022 г.

В рамках данной работы разработан новый метод усталостных испытаний на растяжение тонких микропроводов и проволок, соответствующий ГОСТ 25.502-79. Разработанный метод проверен на аморфных микропроводах состава  $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$  в стеклянной изоляции. Установлено, что режим деформирования в интервале напряжений от 0 до 700 МПа соответствует долговечному использованию исследованных микропроводов (миллионы циклов). Кроме того, изученные микропровода способны выдержать сотни тысяч циклов растяжения при напряжениях от 700 до 1100 МПа.

DOI: 10.31857/S0032816223020015, EDN: UXDSHZ

### ВВЕДЕНИЕ

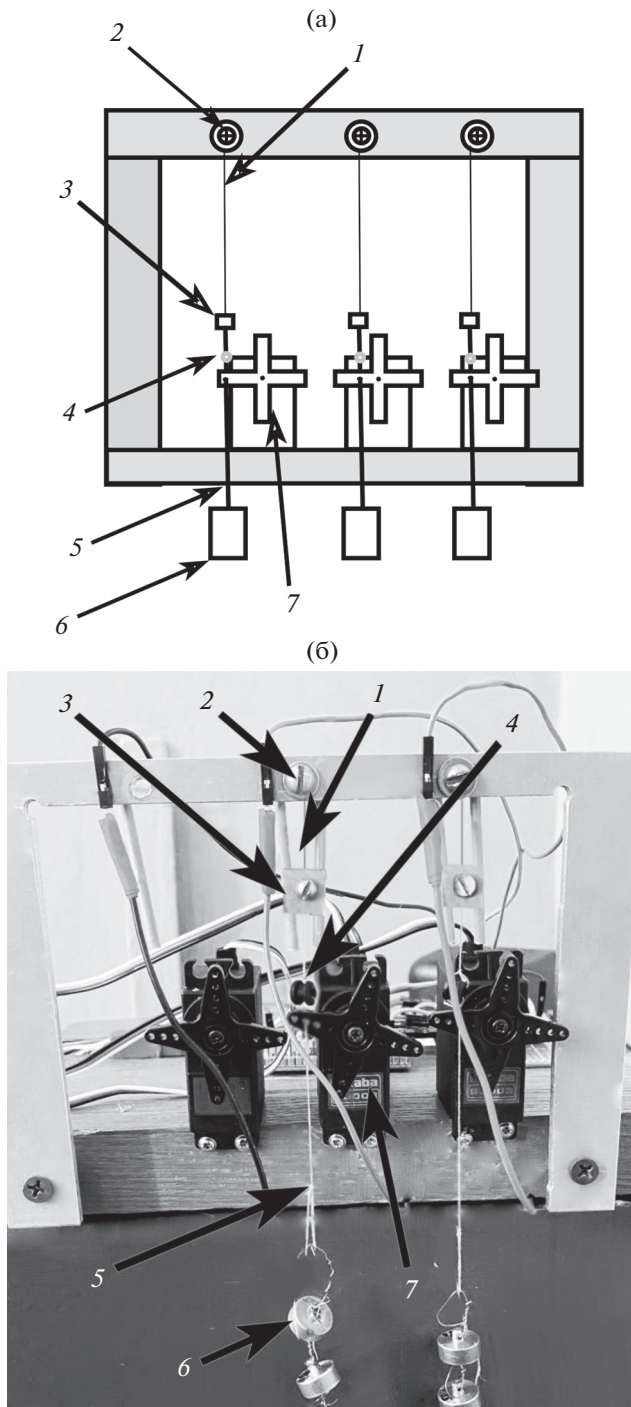
Тонкие аморфные микропровода являются перспективным материалом для проектирования на их основе датчиков деформации. Данные материалы проявляют прямую корреляцию магнитных свойств и доменной магнитной структуры с механическими напряжениями (как остаточными, возникающими в результате изготовления, так и внешними). Из литературы известно, что бистабильное перемагничивание, эффект гигантского магнитного импеданса и явление ферромагнитного резонанса в микропроводах строго коррелируют с их напряженно-деформированным состоянием [1–4]. Несмотря на широкие перспективы применения таких материалов в качестве датчиков деформации, практически отсутствует информация о прочности микропроводов при воздействии динамических нагрузок, что является критичным параметром таких устройств. Это может быть обусловлено как высокой прочностью аморфных материалов в целом (единицы гигапаскаль) [5], так и сложностью проведения усталостных испытаний тонких проволок. Большинство существующих методик усталостных испытаний таких объектов предусматривает исследование проволок диаметром порядка единиц и десятых долей миллиметра в соответствии с ГОСТ 25.502-79 [6]. Однако диаметр тонких аморфных микропроводов составляет единицы или десятки микрон. Кроме того, интерес пред-

ставляет проведение многоцикловых усталостных испытаний на растяжение микропроводов, покрытых стеклянной изоляцией. В таком виде, в частности, изготавливаются микропровода методом Улитовского–Тейлора, имеющие широкое распространение. По этим причинам многие существующие методики усталостных испытаний [7] могут быть применены лишь с модификациями, учитывающими малый диаметр исследуемых объектов.

Целью данной работы являлась разработка простого и эффективного метода усталостных испытаний тонких микропроводов в стеклянной изоляции с учетом ГОСТ 25.502-79.

### ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ

Циклические испытания на растяжение/сжатие были выполнены в соответствии с ГОСТ 25.502-79 и проводились на пяти уровнях нагрузки, начиная с напряжения, соответствующего 0.95 предела прочности материала. Предел прочности материала определялся путем приложения статической растягивающей нагрузки, при которой исследуемый образец разрушался. Определенные пределы прочности осуществлялось на пяти одинаковых образцах с дальнейшим усреднением результата. Испытания проводились с частотой 1 Гц на трех образцах на точку для каждого деформированного состояния. База испытаний составляла  $10^7$  циклов. В качестве тестовых образцов ис-



**Рис. 1.** Установка для циклической деформации микропроводов: **а** – схема установки; **б** – общий вид тестовой сборки установки в процессе работы. 1 – микропровод; 2 – винтовой фиксатор; 3 – нижний винтовой фиксатор; 4 – ограничитель; 5 – нить; 6 – груз; 7 – сервопривод.

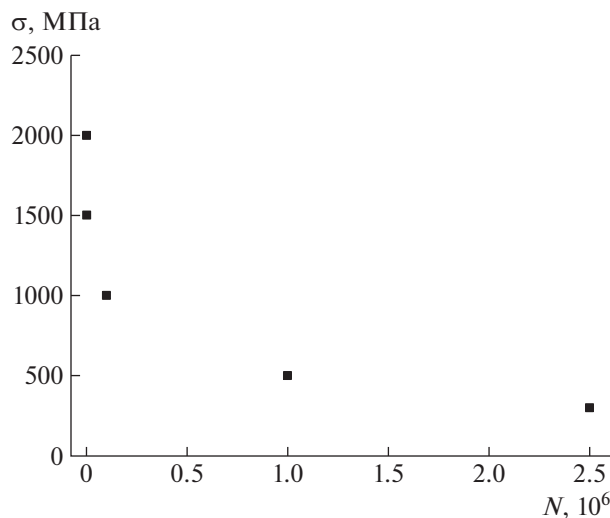
пользовали микропровода состава  $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$  диаметром 16.5 мкм, покрытые стеклянной оболочкой толщиной 3.2 мкм. Длина микропровода составляла 4 см.

Для проведения усталостных испытаний была разработана экспериментальная установка, схема и общий вид которой представлены на рис. 1.

Согласно рис. 1, микропровод крепится между двумя винтовыми фиксаторами в подвешенном состоянии. Каждый фиксатор включает в себя винт, гайку и круглую шайбу. Микропровод зажимается между шайбой и металлической рамой установки. Внутренние части шайбы и рамы покрыты ПВХ пленкой для минимизации повреждения микропровода при зажиме. Масса нижнего фиксатора пренебрежимо мала в сравнении с пределом прочности исследуемых микропроводов и соответствует нагрузке 40 МПа (предел прочности микропроводов находился на уровне 2.1–2.2 ГПа). Согласно рис. 1б, ниже всех верхних фиксаторов размещены направляющие, препятствующие колебанию исследуемого образца в горизонтальном направлении и его кручению. К нижнему фиксатору крепится капроновая нить, пропущенная через отверстие в крестообразной насадке сервопривода. К другому концу капроновой нити крепится груз как добавочная нагрузка к массе фиксатора.

При вращении вала сервопривода по часовой стрелке из положения 180° в положение 135° ограничитель снимает нагрузку с микропровода. Заметим, что в текущей конфигурации установки, даже в момент снятия растягивающей нагрузки, на микропровод действует напряжение 40 МПа, вызванное силой тяжести от нижнего фиксатора. Использование более жесткой нити 5 (см. рис. 1а) может обеспечить полное снятие нагрузки с микропровода за счет подъема нижнего фиксатора и жесткости самой нити. Дальнейшее движение сервопривода против часовой стрелки приводит к повторному приложению нагрузки. В момент, когда нагрузка прикладывается к микропроводу, оси нити и микропровода совпадают.

При снятии нагрузки наблюдалось незначительное отклонение оси нити (на 1°–2°), ось микропровода оставалась неподвижной. Микроконтроллер осуществлял счет каждого акта приложения и снятия нагрузки и выводил количество циклов нагрузки/разгрузки на lcd-дисплей. На рис. 1б также видны пары проводов с разъемом (“female”) и штекером (“male”), закрепленные слева от винтовых фиксаторов. В случае обрыва микропровода между верхним и нижним фиксаторами нижний фиксатор оказывался в свободном состоянии и размыкал контакт между проводами. Это приводило к прекращению счета числа циклов нагрузки на разрушенном микропроводе и остановке соответствующего сервопривода. Значение числа циклов для разрушенного микропровода сохранялось на lcd-дисплее. Частоту и базу испытаний можно при необходимости ва-



**Рис. 2.** Зависимость растягивающих напряжений от числа циклов нагрузки/разгрузки до разрушения. Величина ошибок измерения меньше размера точки на графике по любой из осей.

рыровать программно. Общее время проведения усталостных испытаний составляло 2.5 месяца.

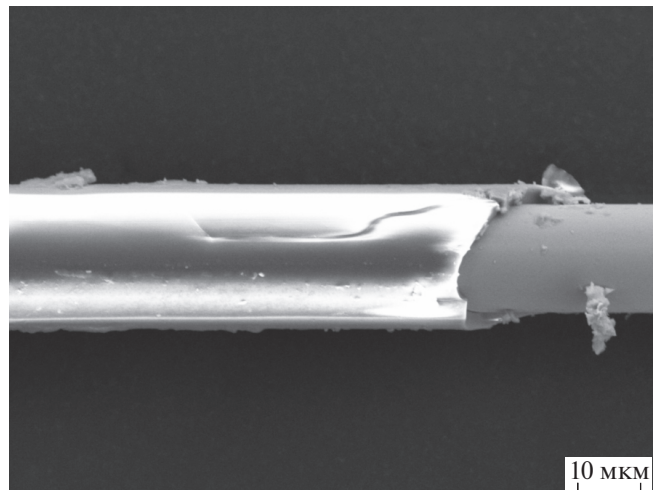
В силу того что испытанию подвергались микропровода в стеклянной оболочке, величина напряжений, приходящихся на металлическую часть провода, оценивалась в соответствии с [8]:

$$\sigma_{\text{ж}} = mg / (S_{\text{ж}} + S_{\text{ст}} E_{\text{ст}} / E_{\text{ж}}), \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{ж}}$  – напряжения в металлической части провода;  $m$  – масса груза;  $g$  – ускорение свободного падения;  $S_{\text{ж}}$  – площадь поперечного сечения металлической части провода;  $S_{\text{ст}}$  – площадь поперечного сечения стеклянной оболочки;  $E_{\text{ст}}$  и  $E_{\text{ж}}$  – модули Юнга стеклянной и металлической частей провода соответственно. Модуль Юнга металлической части микропровода принят равным 154 ГПа. Модуль Юнга стеклянной оболочки состава Рухек составляет 64 ГПа [9].

На рис. 2 приведена зависимость растягивающих напряжений от числа циклов нагрузки/разгрузки до разрушения.

Согласно рис. 2, при приложении нагрузки до 700 МПа наблюдается значительная устойчивость микропроводов к многоциклового воздействию нагрузки/разгрузки (сотни тысяч и миллионы циклов). При приближении нагрузок к напряжению разрушения (около 2 ГПа) наблюдается порядка 1000 циклов нагрузки/разгрузки до наступления разрушения. Величина ошибки измерения напряжений в металлической части микропровода составляет не более 50 МПа. Величина ошибки измерения числа циклов нагрузки/разгрузки составляет около 720.



**Рис. 3.** СЭМ-изображение места разрушения микропровода после 2.5 миллиона циклов нагрузки/разгрузки растягивающим напряжением 300 МПа.

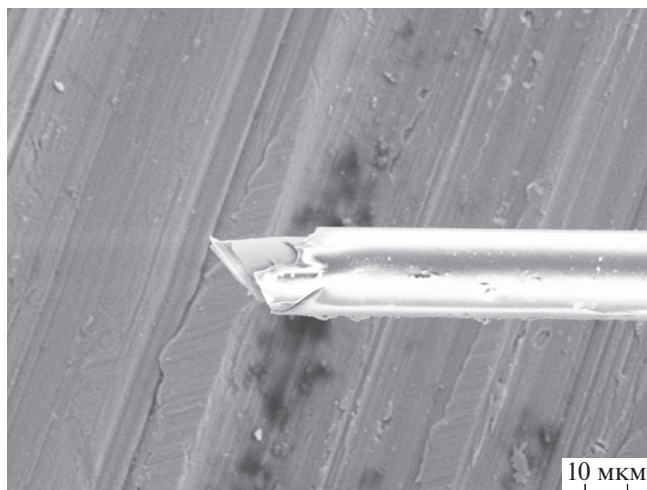
Микропровода, подвергнутые разрушению при многоциклового нагрузке/разгрузке, исследовались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Zeiss Supra 50VP. На рис. 3 представлено характерное СЭМ-изображение микропровода после разрушения.

На рис. 3 показано изображение той части микропровода, которая была зажата фиксатором в процессе нагружения. Стеклянная оболочка после разрушения микропровода оставалась целой и была удалена непосредственно перед съемкой изображения для определения диаметра провода и толщины оболочки. Изменение уровня растягивающих напряжений (от 40 до 2000 МПа) не приводило к разрушению стеклянной оболочки на проводе, закрепленном под фиксаторами. Во всех случаях разрушение происходило вблизи центральной части микропровода. На рис. 4 представлено характерное изображение места разрушения микропровода.

Согласно рис. 4, разрушение происходило под углом  $\approx 45^\circ$  к оси микропровода и приложенной растягивающей нагрузке. При этом стеклянная оболочка претерпевала разрушение лишь в области разрушения металлической части провода.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, если рассматривать микропровод в стеклянной изоляции в качестве чувствительного элемента датчика деформации, то устойчивым режимом циклического приложения/снятия растягивающей нагрузки можно считать интервал напряжений от 0 до 700 МПа. Важно отметить, что такой режим деформирования микропровода соответствует его долговечному



**Рис. 4.** СЭМ-изображения торца микропровода после разрушения растягивающей нагрузкой.

использованию. В диапазоне от 700 до 1100 МПа исследованный в рамках данной работы микропровод может выдержать сотни тысяч циклов нагружения/разгрузки, прежде чем будет разрушен.

Разработанный в рамках данной работы метод циклического деформирования микропроводов может быть использован не только для тонких аморфных проволок, но и кристаллических проволок, а также для проволок большего диаметра. Реализованный метод прост в исполнении и легко масштабируется для одновременного испытания трех и более проволок, что позволяет ускорить получение результатов многоциклового деформации.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vazquez M., Gomez-Polo C., Chen D.-X., Hernando A.* // IEEE Transactions on Magnetism. 1994. V. 30. P. 907. <https://doi.org/10.1109/20.312442>
2. *Churyukanova M., Kaloshkin S., Shuvaeva E., Stepashkin A., Zhdanova M., Aronin A., Aksenov O., Arakelov P., Zhukova V., Zhukov A.* / Journal of Alloys and Compounds. 2018. V. 748. P. 199. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.02.342>
3. *Vazquez M., Andenote-Engelvin A.-L.* // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2009. V. 321. P. 2066. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.10.040>
4. *Aksenov O.I., Abrosimova G.E., Aronin A.S., Orlova N.N., Churyukanova M.N., Zhukova V.A., Zhukov A.P.* // Journal of Applied Physics. 2017. V. 122. P. 235103. <https://doi.org/10.1063/1.5008957>
5. *Luborsky F.* Amorphous Metallic Alloys. London: Butterworths, 1983.
6. ГОСТ 25.502-79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М. Стандартинформ, 2005.
7. *Костин П.П.* Физико-механические испытания металлов, сплавов интерметаллических материалов. М.: Машиностроение, 1990.
8. *Аксенов О.И., Орлова Н.Н., Аронин А.С.* // ПТЭ. 2019. № 5. С. 135. <https://doi.org/10.1134/S0032816219050136>
9. *Bansal N.P., Doremus R.H.* Handbook of Glass Properties. Amsterdam: Elsevier LTD, 1986.