Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22. № 1. С. 21-30
Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS)). 2025; 1(22): 21–30

Научная статья
1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)
УДК 538.951
doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.002

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ПРОВОДА ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

Виктор Геннадьевич Кульков[1*], Махсуд Мансурович Султанов[2], Валентина Викторовна Кулькова[3], Джонибек Шералиевич Норов[4], Мария Владимировна Нарыкова[5], Александр Алексеевич Левин[6]

[1, 2, 3, 4] Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический Институт», филиал в г. Волжском, 404110 Волжский, Россия
[5, 6] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия
[1] vikulkov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8449-026X
[2] sultanov@vfmei.ru, https://orcid.org/0000-0002-2920-5515
[3] vkulkova@vfmei.ru, https://orcid.org/0000-0002-9695-5690
[4] norov@vfmei.ru, https://orcid.org/0000-0003-1320-5702
[5] narykova_m@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6673-2392
[6] aleksandr.a.levin@mail.ioffe.ru, https://orcid.org/0000-0001-9258-3204

Аннотация. Исследовались механические свойства сталеалюминиевого провода АС50 воздушной линии электропередачи после 52 лет эксплуатации. Измерялись такие характеристики как модуль Юнга, декремент затухания, рентгеновская и интегральная массовые плотности алюминиевой и стальной проволок. Измеренные характеристики сравнивались с таковыми для нового провода, не подвергавшегося эксплуатации. Представлены зависимости этих величин от положения в пролете между соседними опорами. Показано, что зависимость модуля Юнга и интегральной массовой плотности от части длины пролета имеет Λ- и W- образный характер для стальной и алюминиевой проволоки соответственно. Зависимость декремента затухания для них имеет Λ и V- образный характер, а зависимость массовой плотности в приповерхностном слое М-образный характер. Указанные зависимости связываются с образованием микронесплошностей в материале провода при его деформациях в процессе эксплуатации на линии электропередачи под влиянием ветровых, гололедных и иных воздействий. Повышенная рабочая температура создает условия для возврата или рекристаллизации алюминиевой части провода. Изменение декремента затухания связывается с трансформацией границ зерен в процессе такой деформации. Изменение поверхностной массовой плотности объясняется образованием и залечиванием микропор и микротрещин, а также с изменением химического состава поверхностных слоев, в частности, образованием оксида алюминия.

Ключевые слова: модуль Юнга, декремент затухания, массовая плотность, алюминиевый и стальной провод, микропоры, границы зерен.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания РФ, грант № 0720-2020-0025 «Разработка методов и анализ способов достижения высокого уровня безопасности и конкурентоспособности объектов энергосистем на основе цифровых технологий» с использованием оборудования и программного обеспечения Центра совместного использования «Материаловедение и диагностика в перспективных технологиях» (Физико-технический институт РАН им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия).

Для цитирования: В.Г. Кульков, М.М. Султанов, В.В. Кулькова, Д.Ш. Норов, М.В. Нарыкова, А.А. Левин Изменение механических свойств материала провода после длительной эксплуатации на воздушных линиях передачи // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 1. С. 21-30 doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.002.

© В.Г. Кульков, М.М. Султанов, В.В. Кулькова, Д.Ш. Норов, М.В. Нарыкова, А.А. Левин, 2025

Original article

OPERATION ON OVERHEAD TRANSMISSION LINES

Viktor G. Kul'kov[1], Makhsud M. Sultanov[2], Valentina V. Kul'kova[3], Dzhonibek Sh. Norov[4], Mariya V. Narykova[5], Aleksandr A. Levin[6]

[1]Branch of «National Research University «MPEI», Volzhskiy, 404110, Russia
[2]Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021, Russia
[1] vikulkov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8449-026X
[2] sultanov@vfmei.ru, https://orcid.org/0000-0002-2920-5515
[3] vkulkova@vfmei.ru, https://orcid.org/0000-0002-9695-5690
[4] norov@vfmei.ru, https://orcid.org/0000-0003-1320-5702
[5] narykova_m@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6673-2392
[6] aleksandr.a.levin@mail.ioffe.ru, https://orcid.org/0000-0001-9258-3204

Abstract. The mechanical properties of the AC50 aluminum steel wire of an overhead power line after 52 years of operation were investigated. Characteristics such as Young's modulus, attenuation decrement, X-ray and integral mass densities of aluminum and steel wires were measured. The measured characteristics were compared with those for a new wire that had not been used. The dependences of these values on the position in the span between adjacent supports are presented. It is shown that the dependence of the Young's modulus and the integral mass density on a part of the span length has a Λ- and W-shaped character for steel and aluminum wire, respectively. The dependence of the attenuation decrement for them has a Λ and V-shaped character, and the dependence of the mass density in the near-surface layer is M-shaped. These dependencies are associated with the formation of micro-gaps in the wire material during its deformation during operation on a power line under the influence of wind, ice and other influences. The increased operating temperature creates conditions for the return or recrystallization of the aluminum part of the wire. The change in the attenuation decrement is associated with the transformation of grain boundaries in the process of such deformation. The change in surface mass density is explained by the formation and healing of micro-pores and microcracks, as well as with a change in the chemical composition of the surface layers, in particular, the formation of aluminum oxide.

Keywords: Young's modulus, attenuation decrement, mass density, aluminum and steel samples, micropores, grain boundaries.

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of the state task of the Russian Federation, grant No. 0720-2020-0025 “Development of methods and analysis of ways to achieve a high level of safety and competitiveness of energy system facilities based on digital technologies” using equipment and software of the Center for Shared Use “Materials science and diagnostics in advanced technologies” (Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia).

For citation: Kul'kov, V.G., Sultanov, M.M., Kul'kova, V.V., Norov, D.Sh., Narykova, M.V., Levin, A.A. (2025). Changes in the mechanical properties of the wire material after prolonged operation on overhead transmission lines. *Fundamental’nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(1), 21-30. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.002.

Введение

Воздушные линии электропередачи (ВЛЭП) испытывают воздействие многих природных факторов, снижающих их надежность [1]. К ним относятся воздушные потоки, колебания проводов различных частот, избыточная влажность окружающего воздуха, жизнедеятельность различных организмов, коррозия металла провода, избыточная масса вследствие гололедообразования и др. [2–4]. Такое воздействие приводит к медленно протекающим процессам, изменяющим физические свойства проводов. Серьезным фактором является изменение температурного режима работы провода вследствие выделяющегося джоулева тепла, особенно при обрыве одной или нескольких проволок в повиве из-за усталостных процессов [5].

Обтекание ветром цилиндрического провода приводит к образованию особых вихрей [6]. Их интенсивность изменяется с высотой, что приводит к дополнительной составляющей скорости ветра по вертикали [7]. Нерегулярное ветровое воздействие приводит к возникновению различных типов колебаний. Наибольшую опасность из них представляют низкочастотные колебания большой амплитуды, называемые

«пляской» проводов [8]. Они часто приводят к обрыву провода или отдельных проволок в скрутке. Часто имеет место вибрация провода, возникновение которой не связано с ветровым воздействием, например, рывок с последующей вибрацией при сбрасывании проводом ледяной оболочки. Также в аэродинамическом поведении кабелей воздушных линий электропередачи велика роль турбулентности воздушного потока [9].

В течение длительного времени эксплуатации изменяются механические свойства сталеалюминиевого провода. Знание закономерностей этих изменений необходимо для прогнозирования надежности эксплуатации таких проводов в воздушных линиях. Целью настоящей работы является исследование изменения механических свойств провода АС50 в разных частях пролета между опорами после 52 лет эксплуатации.

Образцы, методы и результаты измерений

Исследовались отдельные алюминиевые (W) и стальные (C) проволоки из проводов (кабелей) типа АС50, которые представляют собой скрутку (повив) из шести алюминиевых проволок вокруг стальной проволоки-сердечника. Диаметр всех проволок ≈ 3,2 мм. Измеренным образцам присвоены следующие обозначения. N0 – образцы нового, еще не используемого провода; N1 – образцы провода, снятые в непосредственной близости от места подвеса, т.е. в самом начале пролета между опорами; N2 – образцы, снятые на расстоянии 1/4 пролета от его начала, и N3 – снятые в середине пролета. N1 – N3 – образцы провода после 52 лет эксплуатации в ВЛЭП.

Измерение модуля Юнга E, декремента затухания δ проводились с использованием акустико-резонансного метода. Его сущность заключается в пьезокварцевом возбуждении стоячей продольной ультразвуковой волны в составном вибраторе, представляющем собой комбинацию пьезокварца и исследуемого образца. Для измерений использовались образцы с длиной $l \approx 25$ мм для алюминиевых проводов и $l \approx 27$ мм для стальных, что соответствует резонансной частоте около 100 кГц. Подробное описание метода представлено в [11].

Плотность образцов проволоки ρ измеряли путем гидростатического взвешивания при комнатной температуре с использованием аналитических весов Shimadzu AUW 120D (Shimadzu Corporation, Киото, Япония), оснащенных приставкой SMK-301. Для измерений использовались образцы проволок длиной ≈70 мм. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода. Зависимость плотности от температуры такой жидкости известна с необходимой точностью. Относительная погрешность определения массовой плотности составляла $2 \cdot 10^{-4}$. Далее в тексте плотность ρ образцов также называется интегральной массовой плотностью.

Кроме измерения интегральной плотности ρ образцов методом гидростатического взвешивания, для алюминиевых проводов вычислялась также массовая плотность из рентгенодифракционных данных, далее обозначаемая как ρ_X и именуемая рентгеновской массовой плотностью. Рентгеновская плотность ρ_X вычислялась из объема и массы кубической элементарной ячейки алюминиевого материала проводов. Параметр и объем элементарной ячейки определялись из величин проиндицированных рентгенодифракционных рефлексов. Детали методики и необходимые формулы приведены в [11]. Для рентгенодифракционных измерений использовались те же образцы, что и для акустических. Измерялись рентгенодифракционные картины от сторон образцов, контактировавших со стальным сердечником (сторона W-C) и с воздушной атмосферой (W-A). Из-за использования для измерений настольного порошкового рентгеновского дифрактометра (D2 Phaser (Bruker AXS, Карлсруэ, Германия)), температура в камере образца держалась равной T = 314±1 К. Измеренные рентгенодифракционные картины образцов приводятся в [12]. Согласно оценке проникающей глубины использованного Cu-K_α излучения, рентгеновская плотность ρ_X характеризует не весь образец, а только приповерхностный слой толщиной ≈36 мкм.

Акустические измерения были проведены при комнатной температуре в диапазоне амплитуд колебательной деформации ε от ~10^{-6} до $3 \cdot 10^{-4}$ и $(0{,}25–2) \cdot 10^{-4}$ для алюминиевой и стальной проволоки соответственно. Этот диапазон включает в себя как независимые от амплитуды, так и зависимые (при больших ε) области. Отметим, что измерения были выполнены при умеренных амплитудах, т.е. дислокационная структура материала не изменялась. В качестве примера на рис. 1 приведены зависимости де-

кремента от амплитуды колебательной деформации δ(ε), измеренные для W и C образцов N0 и N1. Численные характеристики упругопластических свойств для всех образцов приведены в таблице 1. Измерения показали, что модуль Юнга *E* практически не зависит от амплитуды колебательной деформации ε в широком диапазоне от $\varepsilon \approx 2 \cdot 10^{-6}$ до $\varepsilon \approx 2 \cdot 10^{-4}$. При рассмотрении упругих свойств объема в этом диапазоне можно обозначать его как постоянный параметр *E*. Это постоянное значение *E* указано в таблице 1. Как видно из таблицы 1, после 52 лет эксплуатации в ВЛЭП величина *E* стального сердечника C по сравнению с новым проводом N0 (*E* = 211,67 ГПа) уменьшается во всех секциях пролета, причем наиболее сильно в начале пролета (N1, *E* = 205,80 ГПа). Для алюминиевых образцов W некоторое уменьшение *E* по сравнению с N0 (*E* = 71,40 ГПа) наблюдается только на четверти пролета (N2, *E* = 71,19 ГПа), а в других секциях пролета величина модуля Юнга показывает обратную тенденцию увеличения (*E* = 71,43 ГПа и 71,71 ГПа для образцов N1 и N3 соответственно).

Что касается декремента δ, то его величина остается почти не зависящей от амплитуды до ее значений $\varepsilon \approx 1 \cdot 10^{-4}$ для алюминиевой проволоки и $\varepsilon \approx 2 \cdot 10^{-4}$ для стальной (это значение δ также приведено в таблице 1).

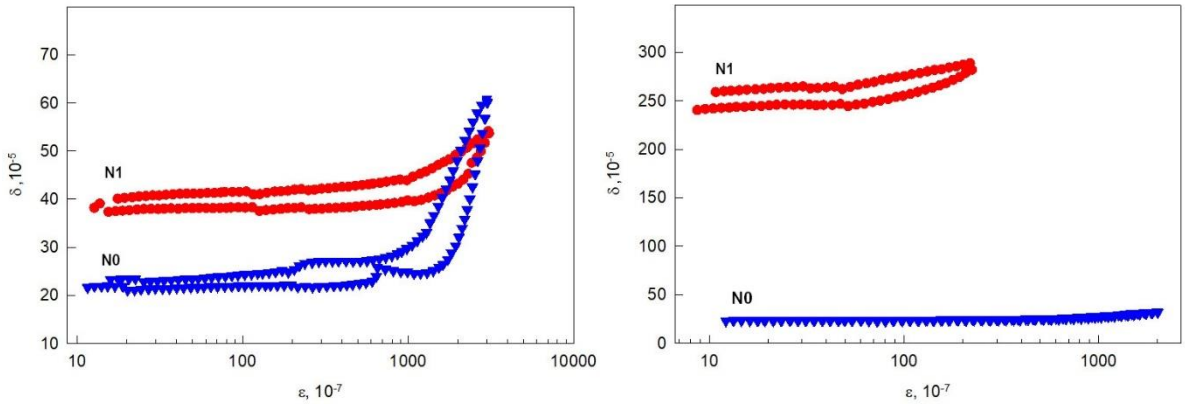

Рис. 1. Зависимость декремента затухания δ от амплитуды деформации ε алюминиевой (a) и стальной (b) проволок для образцов N0 (новый провод) N1 (у начала пролета).

Fig.1. The dependence of the attenuation decrement δ on the deformation amplitude ε of aluminum (a) and steel (b) wires for samples N0 (new wire) N1 (at the beginning of the span).

При бóльших величинах деформации декремент алюминиевой проволоки становится существенно зависящим от амплитуды. Образцы стальной проволоки, снятые вблизи начала пролета (N1), имеют декремент δ, зависящий от амплитуды, при значениях деформации, начиная с $\varepsilon \approx 1 \cdot 10^{-5}$.

Таблица 1. Модуль Юнга *E* и амплитудно-независимый декремент упругих колебаний δ образцов алюминия (W) и стали (C) в зависимости от доли пролета в кабеле.

Table 1. Young's modulus E and the amplitude-independent decrement of elastic vibrations δ of aluminum (W) and steel (C) samples, depending on the proportion of span in the cable.

Образец	Часть пролета	*E*, ГПа	$\delta \cdot 10^5$
Al (W) N0	–1	71,40	21,6
Al (W) N1	0/1	71,43	37,3
Al (W) N2	1/4	71,19	46,5
Al (W) N3	1/2	71,71	54,2
Сталь (C) N0	–1	211,67	218
Сталь (C) N1	0/1	205,80	240
Сталь (C) N2	1/4	206,53	76,2
Сталь (C) N3	1/2	207,05	34,3

После 52 лет использования в ВЛЭП, независимый декремент δ алюминиевых образцов W заметно возрос во всем пролете по сравнению с новым проводом N0 ($\delta = 21{,}6 \cdot 10^{-5}$), последовательно возрастая в секциях от $\delta = 37{,}3 \cdot 10^{-5}$ в начале пролета (N1) до $\delta = 54{,}2 \cdot 10^{-5}$ в середине пролета (N3). Для стального сердеч-

ника C, независимый декремент δ показывает разную тенденцию изменения после 52 лет эксплуатации в ВЛЭП по сравнению с новым проводом N0 ($\delta = 211{,}67 \cdot 10^{-5}$), возрастая до $\delta = 240 \cdot 10^{-5}$ в начале пролета (N1) и, затем, падая в других секциях пролета до минимума $\delta = 34{,}3 \cdot 10^{-5}$ на половине пролета (N3).

На рис. 2 показаны значения модуля Юнга $E = E_i$ и декремента δ, не зависящие от амплитуды колебательной деформации ε, для образцов в зависимости от относительного расположения на пролете кабеля. С учетом симметрии, образцам N1, N2 и N3 на рис. 3 соответствуют значения начала (0/1) и конца (1/1) пролета, 1/4 и 3/4 его длины, а также его середины (1/2) соответственно. Данные для новых образцов N0 со сроком службы 0 лет показаны на дальнейших рисунках в положении части пролета, обозначенной как "–1".

На рис. 3 показаны результаты измерения массовой плотности проводов на разных участках пролета. На рис. 3*a* приведена рентгеновская массовая плотность ρ_X в приповерхностном слое алюминиевых проводов, контактирующих либо с сердечником стальной проволоки (W-C), либо с атмосферой (W-A). Интегральная массовая плотность ρ приводится на рис. 3*b*.

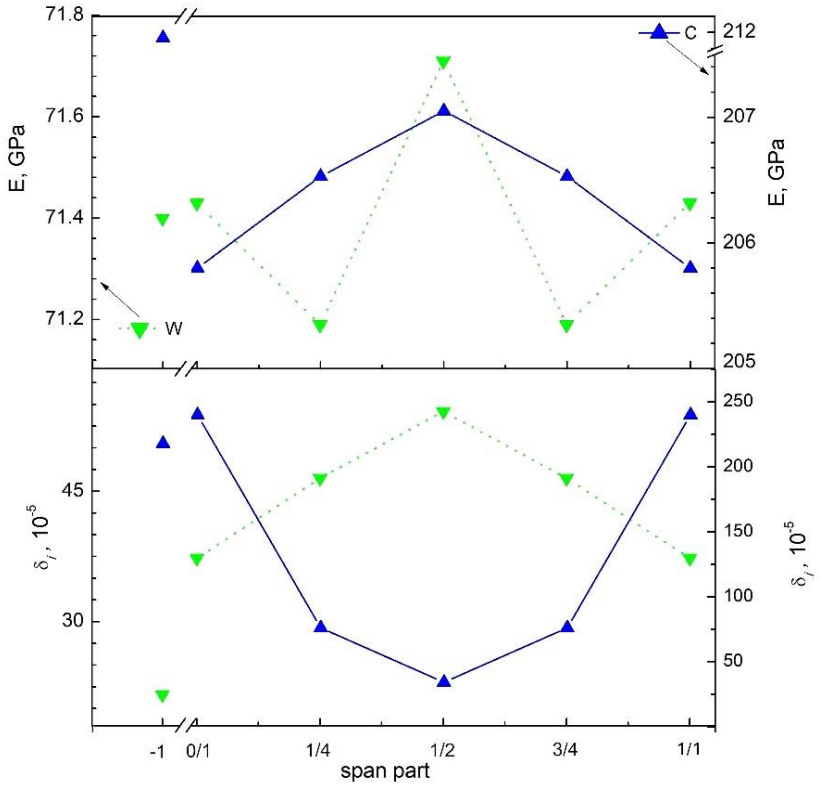

Рис. 2. Зависимости Модуля Юнга *E* и декремента δ для алюминиевой (W) и стальной (C) проволок в зависимости от части пролета, из которой они вырезаны.

Fig. 2. The dependences of the Young's modulus E and the decrement δ for aluminum (W) and steel (C) wires, depending on the part of the span from which they are cut.

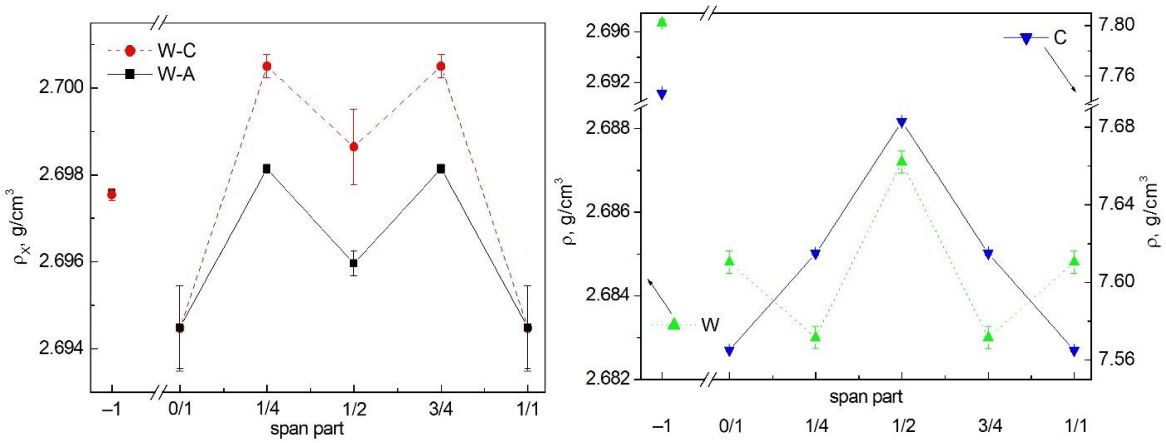

Рис. 3. Массовая плотность ρ_X (a) в приповерхностном слое алюминиевых проводов и интегральная плотность ρ (b) алюминиевых (W) и стальных (C) проволок.

Fig. 3. The mass density ρ_X (a) in the near-surface layer of aluminum wires and the integral density p (b) of aluminum (W) and steel (C) wires.

Наиболее сильно по сравнению с новой проволокой интегральная плотность ρ алюминиевого провода уменьшается на четверти пролета (ρ = 2,6830(3) г/см^3 в сравнении с ρ = 2,6957(3) г/см^3 для образцов N2 и N0 соответственно), немного меньше в начале пролета вблизи зажимов (ρ = 2,6846(3) г/см^3 для N1) и минимально она уменьшается на половине пролета (ρ = 2,6872(3) г/см^3 для N3).

Интегральная массовая плотность ρ проводов Al систематически меньше, чем рентгеновская массовая плотность ρ_X на ≈0,32–0,64 % в разных частях пролета. То есть массовая плотность, усредненная по объему вместе с поверхностным слоем (интегральная плотность ρ), меньше, чем массовая плотность только в приповерхностном слое (рентгеновская плотность ρ_X). Направление изменения ρ вдоль пролета является обратным направлению изменения ρ_X, а именно, в местах увеличения рентгеновской плотности ρ_X уменьшается интегральная плотность ρ, и наоборот (см. для сравнения рис. 3*a* и рис. 3*b*).

Снижение интегральной плотности массы ρ наиболее сильно для стальной проволоки C вблизи зажимов и постепенно уменьшается к половине пролета (ρ = 7,5650(8) г/см^3, 7,6150(8) г/см^3, 7,6828(8) г/см^3 в сравнении с ρ = 7,7462(8) г/см^3 для образцов N1, N2, N3 и N0 соответственно). Как и в случае алюминиевой проволоки, интегральная массовая плотность стальной проволоки в середине пролета становится максимально близкой к значению ρ нового образца N0.

Обсуждение результатов

Наиболее интенсивная деформация алюминиевого провода происходит вблизи мест его крепления или подвески, на концах пролета, поскольку здесь имеются максимальные неоднородные деформации [13]. При интенсивной пластической деформации активизируются внутризеренные сдвиги по одной или нескольким системам скольжения. Эти сдвиги могут проходить через границу зерен, образуя на ней локализованные или растянутые ступени или наклонные сегменты [14]. Такого рода фрагментация границ может осуществляться не только при изначально неоднородной деформации. Однородная пластическая деформация отдельного зерна, как и монокристалла, в определенных условиях становится неустойчивой. Это приводит к образованию бездефектных каналов [15], внутри которых пластическая деформация отсутствует. Прохождение таких неоднородных сдвигов через границу образует на ней повернутые участки. Кроме того, такой вид деформации приводит к возникновению в зернах большого количества дислокаций.

В процессе эксплуатации проводов ВЛЭП их температура повышается до значений 90–130 ºC в результате приложения высокого напряжения. Этого достаточно, чтобы в алюминиевом проводе происходили процессы возврата или рекристаллизации. Первый из них не

затрагивает изменение конфигурации границ зерен. При этом сами зерна избавляются от различных структурных дефектов, таких как дислокации и микронесплошности. Вероятно, этим объясняется большая величина интегральной плотности ρ алюминиевой проволоки около зажимов (рис. 3*b*).

Таким образом, форма границ зерен вдоль пролета изменяется. От сильно извилистой или фасетированной в начале она принимает более плавную форму в середине пролета. Внутреннее трение помимо дислокационной имеет также значительную долю зернограничной составляющей. Главным механизмом последней является межзеренное проскальзывание [16]. Такой процесс, происходящий по извилистым границам, имеет неконсервативный характер с участием вакансионных диффузионных потоков между соседними сегментами, различно ориентированными по отношению к среднему сдвиговому напряжению вдоль границы [17, 18]. Одни из них являются источниками, а другие стоками вакансий. Скорость проскальзывания определяется величиной диффузионных потоков между смежными сегментами. Скорость проскальзывания в этих условиях имеет значительно меньшую величину, чем по границам в середине пролета, где они более гладкие, а процесс имеет в значительной степени консервативный характер. На таких границах межзеренное проскальзывание обусловлено локальными атомными перегруппировками, что дает значительно меньшую величину времени релаксации [19]. Поэтому внутреннее трение или декремент затухания, имеющие зернограничную природу, принимает меньшую величину на концах пролета. Этим объясняется Λ-образный характер его изменения вдоль пролета для алюминиевой проволоки (рис. 3).

Из рисунка 3*b* видно, что интегральная плотность стального провода изменяется вдоль пролета значительно больше, чем алюминиевого. В частности, это связано с наличием в стальном проводе существенного количества микропор, образующихся при эксплуатации. Вблизи концов пролета их больше вследствие большей степени деформации. Температура начала процессов возврата и рекристаллизации в стали значительно выше, чем в алюминии. Поэтому дефектная структура (по крайней мере, распределение микронесплошностей) в стальном проводе при температурах эксплуатации изменяется незначительно, и достаточно большое количество микропор остается. Внутреннее трение в пористом материале выше, чем в беспористом [20]. Поэтому зависимость декремента затухания для стальной проволоки вдоль пролета имеет V-образный характер, противоположный зависимости в алюминиевом проводе (рис. 2).

Модуль Юнга *E* ведет себя подобно интегральной плотности ρ для проволок обоих типов (см. рис. 2 и 3*b* для сравнения). Влияние микронесплошностей и пор на обе эти величины имеет одинаковый характер. В областях с повышенной концентрацией пор плотность ρ и модуль Юнга *E* имеют меньшую величину, особенно если поры располагаются на границах зерен, где чаще всего и зарождаются при деформации [21]. Область контакта соседних зерен становится более рыхлой и менее прочной.

Интегральная плотность ρ проволоки Al характеризуется W-образным ходом вдоль пролета с увеличенным максимумом в его середине (рис. 3b) в отличие от рентгеновской плотности ρ_X, которая соответствует массовой плотности приповерхностного слоя толщиной ~36 мкм и показывает M-образное изменение значения ρ_X вдоль пролета (рис. 3*a*). Повышенная плотность ρ_X алюминиевой проволоки в приповерхностном слое, большая, чем интегральная плотность ρ проволоки, вероятно, связана с рядом причин. Во-первых, возможно этот эффект возникает из-за залечивания микропор, дислокаций и других структурных дефектов в приповерхностном слое алюминиевой проволоки в результате процессов возврата и рекристаллизации при рабочих температурах ВЛЭП 90–130 ºС, как обсуждалось выше. Во-вторых, рентгенодифракционные измерения алюминиевых проволок после 52 лет эксплуатации в ВЛЭП детектировали образованием в этом слое оксидов алюминия Al_2O_3 [12], оказывающих разнонаправленное воздействие. С одной стороны, в результате большей массовой плотности этих оксидов (~3,7 г/см^3 в сравнении с ~2,7 г/см^3 для Al), интегральная плотность ρ должна увеличиваться. С другой стороны, в результате существенно большей (более, чем в 3 раза) твердости этих оксидов, чем Al, оксиды алюминия действуют как абразив для мягкого алюминиевого материла [22], образуя пустотные дефекты в приповерхностном слое в результате фреттинга, что ведет к снижению интегральной плотности ρ всей проволоки по сравнению с плотностью ρ_X приповерхностного

слоя. Кроме того, формирующиеся кристаллиты оксидов алюминия сжимают кристаллическую решетку соседних кристаллитов Al в приповерхностном слое (при достаточном их количестве), что приводит к повышению рентгеновской массовой плотности ρ_X.

После длительной эксплуатации провода имеются и другие изменения химического состава в поверхностных слоях, контактирующих с атмосферой или со стальным сердечником [12].

Выводы

После 52 лет эксплуатации сталеалюминиевого провода АС50 имеются изменения механических характеристик как алюминиевой части, так и стального сердечника. Вдоль пролета между соседними опорами изменяются значения их модуля Юнга, декремента затухания и массовой плотности в зависимости от положения исследованных образцов в пролете. Величина изменений объясняется уровнем накопленной пластической деформации и изменением химического состава приповерхностного слоя соответствующего материала провода.

Список литературы

1. Малафеев С.И. Надежность электроснабжения. СПб.: Изд. Лань, 2018. 368 с.

2. Кесельман Л.М. Основы механики воздушных линий электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 1992. 352 с.

3. Brettschneider S., Fofana I. Evolution of countermeasures against atmospheric icing of power lines over the past four decades and their applications into field operations // Energies. 2021. V. 14, N 19. P. 6291.

4. Lu J., Hu J., Fang Z., Qiao X., Zhang Z. Electric field distribution and AC breakdown characteristics of polluted novel lightning protection insulator under icing conditions // Energies. 2021. V. 14, N 22. P. 7493.

5. Cimini C.A., Fonseca B.Q. Temperature profile of progressive damaged overhead electrical conductors // International journal of electrical power & energy systems. 2013. V. 49. P. 280–286.

6. Karabay S., Feyzullahoğlu E. Determination of early failure sources and mechanisms for Al 99.7% and Al–Mg–Si alloy bare conductors used in aerial transmission line // Engineering failure analysis. 2014. V.38, N 1. P.1–15.

7. Lin W.E., Savory E., McIntyre R.P., Vandelaar C.S., King J.P.C. The response of an overhead electrical power transmission line to two types of wind forcing // Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. 2012. V. 100, N 1. P. 58–69.

8. Hung P., Yamaguchi H., Isozaki M., J. Gull Large amplitude vibrations of long-span transmission lines with bundled conductors in gusty wind // Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. 2014. V. 126. P. 48–59.

9. Loredo-Souza A.M., Davenport A.G. The effects of high winds on transmission lines // Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. 1998. V. 74–76. P. 987–994.

10. Никаноров С.П., Кардашев Б.К. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. М.: Наука, 1985. 256 с.

11. Narykova M.V., Levin A.A., Prasolov N.D., Lihachev A.I., Kardashev B.K., Kadomtsev A.G., Panfilov A.G., Sokolov R.V., Brunkov P.N., Sultanov M.M., Kuryanov V.N., Tyshkevich V. N. The structure of the near-surface layer of the AAAC overhead power line wires after operation and its effect on their elastic, microplastic, and electroresistance properties // Crystals. 2022. V. 12, N 2. P.166.

12. Levin A.A., Panfilov A.G., Lihachev A.I., Narykova M.V., Kardashev B.K., Kadomtsev A.G., Prasolov N.D., Sokolov R.V., Brunkov P.N., Sultanov M.M., Kul'kov V.G., Boldyrev I.A., Norov D.Sh. Characteristics of wires of the long-operated aluminum-steel cable at different places on an overhead power line span // Crystals. 2023. V. 13, N 8. P. 1253.

13. Кульков В.Г., Курьянов В.Н., Султанов М.М., Тышкевич В.Н., Норов Дж. Ш., Соколов Р.В. Оценка технического состояния и остаточного ресурса проводов и грозотросов воздушных линий электропередачи // Электроэнергия. Передача и распределение. 2022. № 5. С. 86–91.

14. Глейтер Г., Чалмерс Б. Большеугловые границы зерен. / Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 375 с.

15. Малыгин Г.А. Эстафетный механизм формирования бездислокационных и бездефектных каналов при пластической деформации кристаллов // Физика твердого тела. 1991. Т. 33, вып 6. С. 1855–1859.

16. Чувильдеев В.Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения. М.: Физматлит, 2004. 304 с.

17. Кульков В.Г., Цирульников П.П., Сыщиков А.А. Зернограничный фон внутреннего

трения с неконсервативным скольжением // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2018. Т. 15, №3. С. 397–402.

18. Кульков В.Г. Диффузионная модель внутреннего трения в нанокристаллическом материале // Журнал технической физики. 2007. Т. 77, № 3. С. 43–48.

19. Даринский Б.М., Сайко Д.С., Федоров Ю.А. Скольжение по границе, образующей несоизмеримую структуру // Изв. Вузов. Физика. 1987. № 9. С. 53-57.

20. Кульков В.Г., Сыщиков А.А. Вклад пористых границ зерен в высокотемпературный фон внутреннего трения // Деформация и разрушение материалов. 2019. № 12. С. 2–6.

21. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2003. 254 с.

22. Azevedo C. R. F., Cescon T. Failure analysis of aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Paraná River // Engineering failure analysis. 2002. V. 9, N 6. P. 645–664.

Информация об авторах

В.Г. Кульков – доктор физико-математических наук, профессор, профессор волжского филиала Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», +79876569236

М.М. Султанов – доктор технических наук, доцент, директор волжского филиала Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», +79608750006

В.В. Кулькова - кандидат физико-математических наук, доцент волжского филиала Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», +79176408627

Д.Ш. Норов – старший преподаватель волжского филиала Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», +79047707475

М.В. Нарыкова - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, +79046436210

А.А. Левин - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, +79062594291

References

1. Malafeev, S.I. (2018). Reliability of power supply. St. Petersburg: Lan' P. 368. (In Russ.)

2. Kesel'man, L.M. (1992). Basic mechanics of overhead power lines. M.: Ehnergoatomizdat. P. 352. (In Russ.)

3. Brettschneider, S. & Fofana, I. (2021). Evolution of countermeasures against atmospheric icing of power lines over the past four decades and their applications into field operations. Energies, 14(19), 6291.

4. Lu, J., Hu, J., Fang, Z., Qiao, X. & Zhang Z. (2021). Electric field distribution and AC breakdown characteristics of polluted novel lightning protection insulator under icing conditions. Energies, 14(22), 7493.

5. Cimini, C.A. & Fonseca, B.Q. (2013). Temperature profile of progressive damaged overhead electrical conductors. International journal of electrical power & energy systems, 49, 280–286.

6. Karabay, S. & Feyzullahoğlu, E. (2014). Determination of early failure sources and mechanisms for Al 99.7% and Al–Mg–Si alloy bare conductors used in aerial transmission line. Engineering failure analysis, 38(1), 1–15.

7. Lin, W.E., Savory, E., McIntyre, R.P., Vandelaar, C.S. & King, J.P.C. (2012). The response of an over-head electrical power transmission line to two types of wind forcing. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 100(1), 58–69.

8. Hung, P., Yamaguchi, H., Isozaki, M. & Gull, J. (2014). Large amplitude vibrations of long-span transmission lines with bundled conductors in gusty wind. Journal of wind engineering and industrial aero-dynamics, 126, 48–59.

9. Loredo-Souza, A.M. & Davenport, A.G. (1998). The effects of high winds on transmission lines. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 74–76, 987–994.

10. Nikanorov, S.P. & Kardashev, B.K. (1985). Elasticity and dislocation inelasticity of crystals. M.: Nauka. P. 256. (In Russ.)

11. Narykova, M.V., Levin, A.A., Prasolov, N.D., Lihachev, A.I. & Kardashev, B.K. et al. (2022). The structure of the near-surface layer of the AAAC overhead power line wires after operation and its effect on their elastic, microplastic, and electroresistance properties. Crystals, 12(2), 166.

12. Levin, A.A., Panfilov, A.G., Lihachev,

A.I., Narykova, M.V. & Kardashev, B.K. et al. (2023). Characteristics of wires of the long-operated aluminum-steel cable at different places on an overhead power line span. Crystals, 13(8), 1253.

13. Kul'kov, V.G., Kur'yanov, V.N., Sultanov, M.M., Tyshkevich, V.N., Norov, Dzh. SH. & Sokolov, R.V. (2022). Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa provodov i grozotrosov vozdushnykh linii ehlektroperedachi. Ehlektroehnergiya. Peredacha i raspredelenie, (5), 86–91.

14. Gleiter, H. & Chalmers, B. (1972). High-angle grain boundaries. Oxford, New York : Pergamon Pres. P. 274.

15. Malygin, G.A. (1991). Ehstafetnyi mekhanizm formirovaniya bezdislokatsionnykh i bezdefektnykh kanalov pri plasticheskoi deformatsii kristallov. Fizika tverdogo tela, 33(6), P. 1855–1859. (In Russ.)

16. Chuvil'deev V.N. (2004). Nonequilibrium grain boundaries in metals. Theory and applications. M.: Fizmatlit. P. 304. (In Russ.)

17. Kul'kov, V.G., Tsirul'nikov, P.P. & Syshchikov, A.A. (2018). Zernogranichnyi fon vnutrennego treniya s nekonservativnym skol'zheniem. Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya, 15(3), P. 397–402. (In Russ.)

18. Kul'kov V.G. (2007). Diffuzionnaya model' vnutrennego treniya v nanokristallicheskom material. Zhurnal tekhnicheskoi fiziki, 77(3), P 43–48. (In Russ.)

19. Darinskii, B.M., Saiko, D.S. & Fedorov, YU.A. (1987). Skol'zhenie po granitse, obrazuyushchei nesoizmerimuyu strukturu. Izv. Vuzov. Fi-zika, 9, P. 53-57. (In Russ.)

20. Kul'kov, V.G. & Syshchikov, A.A. 2019. Vklad poristykh granits zeren v vysokotemperaturnyi fon vnutrennego treniya. Deformatsiya i razrushenie materialov, 12, P. 2–6. (In Russ.)

21. Terent'ev V.F. (2003) Fatigue of metal materials. M.: Nauka. P. 254. (In Russ.)

22. Azevedo, C.R.F. & Cescon, T. (2002). Failure analysis of aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Paraná River. Engineering failure analysis, 9(6), 645–664.

Information about the authors

V.G. Kul'kov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the National Research University "Moscow Power Energy Institute" volzhskii branch, 79876569236

M.M. Sultanov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the National Research University "Moscow Power Energy Institute" volzhskii branch, +79608750006

V.V. Kul'kova - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the National Research University "Moscow Power Energy Institute" volzhskii branch, +79176408627

D.Sh. Norov – senior lecturer at the National Research University "Moscow Power Energy Institute" volzhskii branch, +79047707475

M.V. Narykova - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher at the A.F. Ioffe Institute of Physics and Technology Russian Academy of Sciences, +79046436210

A.A. Levin - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher at the A.F. Ioffe Institute of Physics and Technology Russian Academy of Sciences, +79062594291

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 09.09.2024; одобрена после рецензирования 17.01.2025; принята к публикации 03.02.2025.

The article was received by the editorial board on 09 Sep. 2024; approved after reviewing 17 Jan. 2025; accepted for publication 03 Feb. 2025.