

Научная статья

УДК 538.9

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29108>



*А.И. Лихачев<sup>1</sup>, М.В. Нарыкова<sup>1</sup>, А.А. Левин<sup>1</sup>, Н.Д. Прасолов<sup>1</sup> ✉, Р.В. Соколов<sup>1</sup>, Б.К. Кардашев<sup>1</sup>, А.Г. Кадомцев<sup>1</sup>, П.Н. Брунков<sup>1</sup>, М.М. Султанов<sup>2</sup>, А.В. Стрижиченко<sup>2</sup>, И.А. Болдырев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
в г. Волжском, г. Волжский, Россия

✉ [nikpras@mail.ioffe.ru](mailto:nikpras@mail.ioffe.ru)

## **ВЛИЯНИЕ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ НА МИКРОСТРУКТУРНЫЕ И УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕАЛЮМИНИЕВОГО ПРОВОДА АС120/19 ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

*Аннотация.* В данной работе представлены результаты исследований влияния срока эксплуатации на микроструктурные и упруго-пластические свойства отдельных алюминиевых и стальных проволок в зависимости от их расположения по сечению сталеалюминиевого провода АС120/19. Было установлено, что алюминиевые проволоки, находящиеся во внешнем повиве, после длительной эксплуатации показывают интегральную плотность, существенно меньшую, чем во внутреннем повиве, что связывается со значительным влиянием атмосферных условий на деградацию поверхности одиночных проводов. В новых неиспользовавшихся проводах все алюминиевые проволоки характеризуются большей интегральной плотностью, одинаковой для всех повивов. Интегральная плотность проволок из стального сердечника, контактирующих с алюминиевыми проволоками, после длительной эксплуатации показывает величины, меньшие, чем плотность центральной проволоки стального сердечника, не имеющей контакта с алюминиевыми проволоками.

*Ключевые слова:* упруго-пластические свойства, микроструктура, сталеалюминиевые провода, высоковольтные линии электропередач.

*Благодарности:* Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания РФ № FSWF-2020-0025 «Разработка методики и анализ методов обеспечения безопасности и конкурентоспособности объектов энергосистемы на основе цифровых технологий» с использованием оборудования и программного обеспечения Центра коллективного пользования «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург).

*Для цитирования:*

Лихачев А.И., Нарыкова М.В., Левин А.А. и др. Влияние срока эксплуатации на микроструктурные и упруго-пластические свойства сталеалюминиевого провода АС120/19 воздушных линий электропередачи // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 1. С. 139–156. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29108>



A.I. Lihachev<sup>1</sup>, M.V. Narykova<sup>1</sup>, A.A. Levin<sup>1</sup>, N.D. Prasolov<sup>1</sup> ✉, R.V. Sokolov<sup>1</sup>, B.K. Kardashev<sup>1</sup>, A.G. Kadomtsev<sup>1</sup>, P.N. Brunkov<sup>1</sup>, M.M. Sultanov<sup>2</sup>, A.V. Strizhichenko<sup>2</sup>, I.A. Boldyrev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Volzhsky, Russia

✉ [nikpras@mail.ioffe.ru](mailto:nikpras@mail.ioffe.ru)

## INFLUENCE OF SERVICE LIFE ON THE MICROSTRUCTURE AND ELASTIC-PLASTIC PROPERTIES OF STEEL-ALUMINUM WIRE AC120/19 OVERHEAD POWER LINES

*Abstract.* The paper studies the influence of the service life on the microstructural and elastic-plastic properties of individual aluminum and steel wires depending on their location along the cross section of the AC120/19 steel-aluminum wire. It was found that aluminum wires in the outer layer, after long-term operation of 33 years, show integral density significantly lower than in the inner layer, which is associated with a significant effect of atmospheric conditions on the degradation of the surface of single wires. In new unused wires, all aluminum wires are characterized by a higher integral density, the same for all layers. The integral density of steel core wires in contact with aluminum wires, after long-term operation, shows values that are lower than the density of the central wire of the steel core that does not have contact with aluminum wires. In contrast to aluminum wires from the inner layer, aluminum wires from the outer layer in contact with the surrounding atmosphere have reduced values of Young’s modulus compared to a new unused cable. In comparison with the new cable, a decrease in Young’s modulus and an increase in amplitude-independent decrement values were found for steel wires from the cable core.

*Keywords:* EBSD, elastic-plastic properties, microstructure, steel-aluminum wires, high-voltage power lines.

*Acknowledgements:* The work was financially supported by the state task of the Russian Federation No. FSWF-2020-0025 “Development of a methodology and analysis of methods for ensuring the safety and competitiveness of power system facilities based on digital technologies” using equipment and software of the Center for Collective Use “Materials Science and Diagnostics in Advanced Technologies” (Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg).

*Citation:*

A.I. Lihachev, M.V. Narykova, A.A. Levin, etc., Influence of service life on the microstructure and elastic-plastic properties of steel-aluminum wire AC120/19 overhead power lines, *Global Energy*, 29 (01) (2023) 139–156, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29108>

**Введение.** Электроэнергетика является основой промышленности, транспорта и безопасности страны, а также основных систем жизнеобеспечения населения. Независимо от способа производства, доставка электроэнергии до потребителя осуществляется, преимущественно, с помощью воздушных линий электропередач (ЛЭП) переменного тока. Обеспечение стабильности энергосистемы является стратегической задачей, для выполнения которой требуется своевременно обновлять провода ЛЭП по мере выработки ресурса. Для этого необходимо описать процесс старения провода и выявить его характерные свойства, мониторинг которых позволит оперативно оценивать его остаточный ресурс и прогнозировать разрывы.

В процессе эксплуатации ЛЭП происходит деградация параметров проводов, что приводит к их разрушению и последующему разрыву. ЛЭП реализуются с использованием многожильных проводов, скрученных концентрическими повивами (слоями), и используются на открытом воздухе. В ЛЭП провода прикреплены на кронштейнах с изоляторами к высотным опорам, расположенными на значительном расстоянии друг от друга (до нескольких сотен метров). В связи с этим провода подвержены воздействию атмосферных явлений таких как ветер, атмосферные осадки, значительные перепады температур и т.д.

Ранее, для изучения процессов, протекающих в ходе эксплуатации провода, с целью характеристики микроструктуры металла проводов, её изменение под внешним механическим воздействием, а также при химическом взаимодействии с внешней средой, исследовались как провода после эксплуатации в воздушных ЛЭП [1–9], так и после усталостных испытаний [10–21], имитирующих «старение» (изменение микроструктурных, структурных и прочих свойств) проводов в реальных условиях эксплуатации, или после тепловой обработки [22–24]. Исследовались как полностью алюминиевые [7–9, 11, 13, 15, 17–21, 24], так и сталеалюминиевые [1–6, 9, 10, 12–14, 16] провода (или проволоки из этих проводов (кабелей)).

В многожильном полностью алюминиевом (Al) проводе проволоки из алюминия или алюминиевого сплава в один или несколько слоев (повивов) накручены вокруг центральной проволоки из того же металла. Многожильные сталеалюминиевые провода – это аналоги полностью алюминиевых многожильных проводов, но со стальным сердечником из одной стальной проволоки или нескольких стальных проволок, накрученных вокруг центральной стальной проволоки. Алюминиевые проволоки во всех типах проводов изначально покрыты слоем аморфного оксида алюминия, который защищает их от коррозии. Все стальные проволоки сердечника сталеалюминиевых проводов гальванизированы тонким Zn покрытием (от 20 мкм до 70 мкм [6, 22]) для предотвращения быстрой коррозии. Кроме того для предотвращения коррозии используется специальная смазка [6], которой покрываются все внутренние проволоки при количестве повивов больше одного либо, при одном повиве, только сердечник. Все провода в воздушных ЛЭП используются, как правило, без дополнительной изоляции.

В англоязычной научной литературе для многожильных полностью алюминиевых проводов используется обозначение All Aluminum Alloy Conductor (AAAC) [7–9, 15, 17, 18, 20, 21, 24], а многожильные провода со стальным сердечником носят название Aluminum Conductor (или Cable или Clad) Steel Reinforced (ACSR) [1–6, 9, 10, 12–14, 16].

Известные в литературе исследования различных повивов проволок в AAAC [18, 20] и ACSR [1–4, 6, 10, 12] проводах, имеющих более чем один слой алюминиевых проволок, носят преимущественно качественный характер методами оптической микроскопии (ОМ), растровой электронной микроскопии (РЭМ), рентгеновского энергодисперсионного анализа (ЭДР) и рентгеновской дифракции (РД) при фрактографическом, металлографическом и рентгенофазовом анализе проволок [1–4, 10, 12, 18, 20] и не дают количественных оценок состояния отдельных проволок, в зависимости от их положения в повиве провода. Кроме качественного описания наблюдающихся кристаллических фаз, химических элементов и классификации типа поверхности разрушения для разорвавшихся проволок, приводится лишь статистика по количеству разорвавшихся проволок и типу их поверхности разрушения в зависимости от положения проволоки в повивах. Некоторое исключение представляет только [6], где проводится количественное сравнение механических свойств и твердости проволок из различных слоев ACSR провода, нового и после 60 лет эксплуатации в воздушной ЛЭП.

Ранее, в наших работах [7–9] были исследованы структура, микроструктура и микропластические свойства отдельных алюминиевых проволок из проводов AAAC типа марки A50 и ACSR типа марки AC50/8, сроком службы до 20 лет для AC50/8 и 62 года – для A50 (сроки службы отсчитываются от 2021 года назад). Провода марки A50 состояли из одного повива Al прово-

лок вокруг центральной Al проволоки общей площадью поперечного сечения провода  $\approx 50 \text{ мм}^2$ . AC50/8 провода содержали один повив Al проволоки вокруг центральной стальной проволоки, гальванизированной цинковым покрытием, с площадями  $\approx 50 \text{ мм}^2$  алюминиевой и  $\approx 8 \text{ мм}^2$  стальной частей поперечного сечения провода. Исследовавшиеся провода марок A50 и AC50/8 использовались в воздушных ЛЭП Волгоградской области России под напряжениями 0,4 кВ и 10 кВ соответственно. Чтобы детектировать изменения в количественных характеристиках микроструктурных, структурных и упруго-микрoplastических свойств Al проволок после их эксплуатации в проводах воздушных ЛЭП, были использованы методы денситометрии, ЭДР, РЭМ, дифракции обратно рассеянных электронов (ДОРЭ), РД и акустических измерений. Такие же методы исследования были успешно применены также для проволок (из проводов A50 типа) после усталостных испытаний на растяжение [21]. Дополнительно, было изучено электросопротивление этих проволок после усталостных испытаний [19].

Представляет интерес применение таких же количественных методов для изучения разницы в свойствах проволок из ACSR провода с несколькими повивами алюминиевых проволок вокруг стального сердечника. Целью настоящей работы является исследование влияния срока эксплуатации на микроструктурные и упруго-микрoplastические свойства ACSR провода марки AC120/19 воздушных ЛЭП, с учётом положения отдельных проволок в сечении провода. Приводятся первые результаты, полученные методами денситометрии, ДОРЭ и акустическим методом составного резонатора.

### Методы и материалы

**Исследуемые образцы.** Исследовался провод марки AC120/19. Согласно ГОСТ 839-2019, эта марка неизолированного сталеалюминиевый (ACSR в международной классификации) провода состоит из двух повивов алюминиевых проволок диаметром 2,40 мм по 13 штук в повиве и сердечника, выполненного из одного повива стальных проволок диаметром 1,85 мм (6 штук) вокруг одной центральной стальной проволоки. В поперечном сечении провода, площадь алюминиевой части составляет  $117,62 \text{ мм}^2$ , площадь стальной части  $18,81 \text{ мм}^2$ , отсюда и название AC120/19. В изготовлении используются нержавеющая сталь для стальных проволок и алюминий для алюминиевых. Стальные проволоки покрыты тонкой гальванической цинковой плёнкой. Согласно ГОСТ 839-2019, массовая плотность материала алюминиевых и оцинкованных стальных проволок равна  $2,70 \text{ г/см}^3$  и  $7,80 \text{ г/см}^3$ .

На рис. 1 приведена схема расположения образцов (отдельных проволок) в сечении проводов.

Исследовались образцы Al и стальных проволок из нового провода AC120/19 из провода AC120/19 после 33 лет эксплуатации при 110 кВ в воздушной ЛЭП в Волгоградской области России. Проволоки, вырезанные из провода, перед исследованиями очищались в ацетоновой ультразвуковой ванне, чтобы удалить смазку и органические загрязнения с поверхности.

**Методика.** Массовая плотность образцов проволок, вырезанных из проводов, измерялась методом гидростатического взвешивания. Применялись аналитические весы Shimadzu AUW 120D (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan) с приставкой SMK-301 для гидростатического взвешивания. В методе гидростатического взвешивания образец взвешивается на воздухе и в рабочей жидкости с известной заранее измеренной плотностью при данной температуре. Массовая плотность  $\rho$ , получаемая данным методом, называемая денситометрической массовой плотностью, является интегральной характеристикой образца. Она вычисляется программным

обеспечением приставки гидростатического взвешивания SMK-301 как  $\rho = \frac{W_a}{W_a - W_{liq}} \rho_{liq}$  (здесь

$W_a$  и  $W_{liq}$  — вес образца на воздухе и в рабочей жидкости,  $\rho_{liq}$  — массовая плотность рабочей жидкости). Для прецизионного определения плотности с относительной погрешностью определения плотности, не превышающей  $2 \cdot 10^{-4}$ , использовались образцы алюминиевых и сталь-

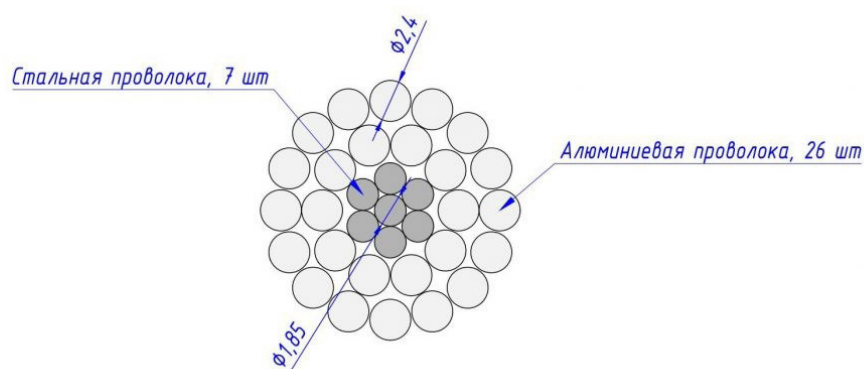


Рис. 1. Схема поперечного сечения провода

Fig. 1. Cross-sectional diagram of wire

ных проволок длиной 80 мм. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, зависимость плотности  $\rho_{liq}$  от температуры которой известна с необходимой точностью.

Для исследования микрокристаллической структуры алюминиевых и стальных проволок использовался метод ДОРЭ (Electron Backscatter Diffraction (EBSD)). Метод релизован на базе растрового электронного микроскопа JSM 7001F (JEOL, Tokio, Japan), оснащённого детектором HKL Nordlys (Oxford Instruments, Abingdon-on-Thames, England). Для исследования карт ДОРЭ, были приготовлены полированные поперечные сечения образцов алюминиевых и стальных проволок. Полировка поперечных сечений выполнялась путём механической шлифовки с последовательным уменьшением абразивного зерна на установке MultiPrep8 (Allied, San Francisco, CA, USA). Финальная полировка поверхности сечения проводилась широким пучком ионов аргона на установке 1061 SEM Mill (Fischione, Export, PA, USA). Регистрация карт ДОРЭ выполнялась в трёх точках: на краю сечения проволоки на расстоянии около 150 мкм от края в области контакта с другой проволокой (точка 1), в центре поперечного сечения проволоки (точка 2), на краю сечения проволоки на расстоянии около 150 мкм от края в области, не контактирующей с другой проволокой (точка 3).

Для определения характеристик упругой и обратимой микропластической деформации, связанным с колебательным движением дислокаций [25], проводили акустические измерения резонансным методом составного пьезоэлектрического вибратора. В этом методе продольные колебания стержнеобразных образцов проволок осуществлялись в широком диапазоне амплитуд колебательной деформации  $\varepsilon$ , включая амплитудно-независимую (линейную) и микропластическую (нелинейную) области. Образцы для акустических измерений представляли собой цилиндры (стержни) с диаметрами оснований  $\approx 2,40$  мм и  $\approx 1,85$  мм для алюминиевых и стальных проволок соответственно. Длина алюминиевых проволок для акустических измерений составляла  $l \approx 25$  мм, а стальных  $l \approx 27$  мм. Образцы проволок такой длины были вырезаны из исследовавшихся проводов, чтобы обеспечить резонансную частоту  $f$  их продольных колебаний около 100 кГц.

К характеристикам упругой деформации относятся модуль Юнга  $E$ , который также носит название модуля упругости, а также декремент упругих колебаний  $\delta$ . Величина  $\delta$  является измеряемой величиной (отношение двух последовательных амплитуд колебаний образца, разделенных периодом колебаний). Модуль упругости стержнеобразного образца с длиной  $l$  определяется [25] как  $E = 4\rho \cdot (l \cdot f)^2$ , где  $f$  – это измеряемая величина собственных продольных колебаний образца, а  $\rho$  – его массовая плотность, в качестве которой бралась интегральная плотность, измеренная методом денситометрии. Относительная погрешность определения собственной

частоты  $f$  образца методом составного вибратора  $\sim 10^{-3}$ , что даёт относительную погрешность определения модуля Юнга не более  $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ .

Характеристикой обратимой микропластической деформации, изучаемой в акустических измерениях, является напряжение микропластического течения  $\sigma$ , которое определяется из модуля Юнга  $E$  и амплитуды колебательной деформации  $\varepsilon$  согласно закону Гука (Hook) как  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ . Эти свойства представляются на графиках в привычных для механических испытаний координатах «напряжение  $\sigma$  – неупругая деформация  $\varepsilon_d$ ». По оси ординат графиков  $\sigma(\varepsilon_d)$  откладывается значение амплитуд колебательных напряжений  $\sigma$ , а по оси абсцисс – нелинейная неупругая деформация  $\varepsilon_d = \varepsilon \cdot \left( \frac{\Delta E}{E} \right)_h = \varepsilon \cdot \frac{E - E_i}{E}$ , где  $E_i$  – модуль Юнга в амплитудно-независимой области.

Следует отметить, что проведение акустических измерений упругих и микропластических характеристик образцов позволяет контролировать качество материалов любого типа (моно- или поликристаллических, керамических или металлических и других материалов), а также детектировать микропроцессы в образцах, подвергшихся внешней нагрузке, нагреванию, охлаждению или любому виду обработки. Важной особенностью акустических измерений является тот факт, что при умеренных амплитудах колебательной деформации  $\varepsilon$  дислокационная структура исследуемого образца не меняется и после акустического воздействия плотность дислокаций сохраняется.

### Результаты и обсуждение

**Исследование плотности.** Согласно полученным данным, в пределах экспериментальной погрешности величина интегральной массовой плотности для всех исследованных образцов алюминиевых и стальных проволок провода АС120/19, не бывшего в эксплуатации, не зависит от положения проволоки в сечении провода, совпадает для внутренних и внешних повивов и составляет  $\rho(\text{Al}) = 2,697 \text{ г/см}^3$  и  $\rho(\text{стальн.}) = 7,723 \text{ г/см}^3$ , соответственно. Плотность алюминиевых проволок, не бывших в эксплуатации, измеренная методом денситометрии, практически совпадает с приведённой в ГОСТ 839-2019 ( $2,70 \text{ г/см}^3$ ). Стальные же проволоки характеризуются плотностью, меньшей, чем даётся в ГОСТ 839-2019 ( $7,80 \text{ г/см}^3$ ). Возможно, пониженная плотность стальных проволок обусловлена вариацией примесных элементов в исследованном проводе. Также следует принять во внимание, что данная проволока использовалась для изготовления АС120/19 провода, в результате чего вероятно нарушение целостности её защитного цинкового покрытия и образование, вследствие этого, оксидов железа, характеризующихся, как известно заметно меньшей массовой плотностью.

Плотность алюминиевых и стальных проволок провода АС120/19 после 33 лет эксплуатации определялась на образцах проволок, отмеченных на рис. 2 индексами W1-W10 и C1-C4. Результаты определения плотности  $\rho$  этих проволок приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, плотность алюминиевых образцов, расположенных во внешнем повиве провода W1, W4, W6, W7 и W10, в большинстве случаев меньше, чем во внутреннем повиве W2, W3, W5, W8 и W9 (соответственно  $\rho = 2,680 \text{ г/см}^2 - 2,686 \text{ г/см}^2$  в сравнении с  $\rho = 2,685 \text{ г/см}^2 - 2,687 \text{ г/см}^2$ ). При этом алюминиевые проволоки из нового неиспользовавшегося провода АС120/19 характеризуются большей интегральной плотностью ( $\rho = 2,697 \text{ г/см}^2$ ), одинаковой для обоих повивов, как указывалось выше. Также наблюдается закономерность, что чем хуже визуально поверхность проволоки, тем меньше плотность образцов. Так, на поверхности образцов W1 и W4 в заметном количестве видны микротрещины и другие поверхностные дефекты. Для этих же образцов W1 и W4, согласно данным табл. 1, плотность имеет минимальное значение из всех изученных ( $\rho = 2,680 \text{ г/см}^2 - 2,681 \text{ г/см}^2$ ). Уменьшение интегральной плотности Al проволок после эксплуатации провода в ЛЭП может быть связано с возникновением дефектов пустотной природы, причём в большем количестве во внешнем повиве.

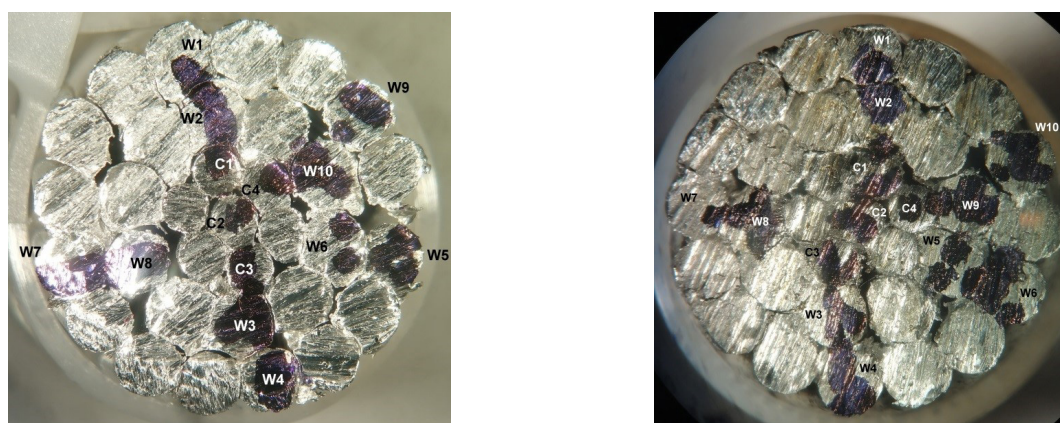


Рис. 2. Схема расположения проводов в сечении провода: нового (слева) и после 33 лет эксплуатации (справа)

Fig. 2. The layout of the wires in the cross section of the cable: new (left) and after 33 years of operation (right)

Таблица 1

**Результаты определения параметров алюминиевых  
и стальных проволок провода после 33 лет эксплуатации**

Table 1

**The results of determining the parameters of aluminum and steel wires after 33 years of operation**

Образец	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	C1	C2	C3	C4
$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,680	2,686	2,687	2,681	2,685	2,686	2,683	2,686	2,686	2,684	7,729	7,741	7,725	7,723

Из табл. 1 видно, что разные проволоки из стального сердечника провода АС120/19 после использования в ЛЭП показывают интегральную плотность большую ( $\rho = 7,741$  г/см<sup>2</sup>) или практически равную ( $\rho = 7,723$  г/см<sup>2</sup> –  $7,729$  г/см<sup>2</sup>) плотности проволок из сердечника неиспользовавшегося провода ( $\rho = 7,723$  г/см<sup>2</sup>). Причём большую плотность показывает стальная проволока С2, которая находится в центре сечения сердечника и контактирует только со стальными проволоками (рис. 2).

Вообще, проволоки, находящиеся на внутренних повивах многожильного провода, в частности, стальные проволоки, очевидно, подвержены меньшему воздействию атмосферных условий по сравнению с проволоками из внешнего Al слоя. Однако, существенное влияние на деградацию параметров проволок внутренних повивов может оказать их механическое взаимодействие между собой и с проволоками внешнего повива в процессе эксплуатации (явление фреттинга – трения проволок друг о друга из-за низкочастотных осцилляций проводов под действием ветра [17, 18]).

Можно предположить, что в начальном состоянии до начала эксплуатации провода в ЛЭП, стальные проволоки сердечника, как и для исследованного неиспользовавшегося провода, характеризовались одной и той же величиной массовой плотности  $\rho$ (стальн.) (одинаковой в пределах погрешности измерения). Однако, из-за меньшего содержания примесных элементов и/или меньшего количества оксидов железа из-за лучшей сохранности защитного цинкового слоя, плотность неиспользовавшихся стальных проволок была выше и лежала в диапазоне, по крайней мере,  $\rho$ (стальн.) =  $7,741$  г/см<sup>2</sup> –  $7,80$  г/см<sup>2</sup>. Тогда снижение массовой плотности стальных проволок можно объяснить образованием в них дефектов пустотной природы,

которые возникают в процессе эксплуатации проволок в проводах воздушных ЛЭП вследствие механического воздействия (фреттинга), а также образованием оксидов Fe, причём в большем количестве на стальных проволоках, контактирующих с алюминиевыми.

Для стальных проволок, контактирующих с алюминиевым, можно предположить и дополнительный механизм понижения массовой плотности, который заключается в следующем. Известно, что в равновесных условиях наблюдается высокая растворимость Al (до 20 ат. % при комнатной температуре [26]) в  $\alpha$ -Fe. Напротив,  $\alpha$ -Fe практически не растворяется (только до 0,04 ат. % при комнатной температуре [26]) в Al. Предположительно, после длительной эксплуатации, вследствие явления фреттинга нарушается целостность гальванического цинкового покрытия стальных проволок и аморфного алюминиооксидного покрытия алюминиевых проволок. В результате материалы алюминиевых и стальных проволок контактируют напрямую, и Al входит в структуру Fe, являющегося одним из основных материалов стальных проволок, что приводит к падению плотности стальных проволок, находящихся в контакте с алюминиевыми.

Для стальной проволоки же, которая контактирует только со стальными проволоками, этой диффузии Al и встраивания его в структуру Fe не происходит. В результате плотность этой проволоки выше, чем у проволок, контактирующих с алюминиевыми проволоками.

#### **Исследование методом дифракции обратно рассеянных электронов**

Был исследован образец алюминиевого провода N3-2 марки AC-120, который находился в эксплуатации на протяжении 33-х лет. Измерения методом дифракции обратно рассеянных электронов [27] проводились в поперечном сечении жил провода. Схема расположения жил представлена на рис. 2.

В результате измерений были получены карты распределения углов Эйлера (карты ДОРЭ (EBSD), пример для образца W2 приведён на рис. 3) и построены гистограммы распределения зёрен по размерам (рис. 4). На рис. 4 данные, отвечающие центру поперечного сечения обозначены как 'Center', отвечающие же краю поперечного сечения в позиции без соприкосновения с другими проволоками (алюминиевыми или стальными) обозначены как 'Edge', а в позиции соприкосновения как 'Contact'.

На картах ДОРЭ тонкими сплошными линиями выделены границы зерен. В качестве зёрен рассматривались области с внутренней разориентацией кристаллической структуры менее чем на  $2^\circ$ . Ориентация зерна, т.е. ориентация кристаллической решетки в зерне, описывается комбинацией углов Эйлера [27], которые изображаются разными цветами, плавно меняющимися при плавном изменении углов Эйлера (см. легенду углов Эйлера на рис. 3). Если ориентация кристаллической решетки соседних зерен сильно отличается, то зёрна будут иметь очень разные цвета, и карта ДОРЭ будет иметь пестрый вид. Однако, если есть скопления зерен с похожей ориентацией, то на карте ДОРЭ появляются области с похожими цветами, и можно говорить о тенденции выравнивания зерен в одном направлении. Таким образом, простой визуальный вид карты ДОРЭ позволяет сделать качественные выводы об ориентации зерен в образце, а также об их размере и форме.

Визуальный анализ карт ДОРЭ показывает, что скопления зёрен близкого цвета наблюдается сильнее на краю поперечных сечений проволок (см. рис. 3в как пример), что предполагает стремление зёрен к выравниванию ориентации вдоль одного общего направления, более ярко выраженное на краях. Ранее [7–9] подобная тенденция к выравниванию ориентации зерен, более выраженная на краях поперечных сечений проволоки, чем в центрах, отмечалась после эксплуатации в воздушных ЛЭП для Al проволок из AAAC проводов типа A50 и ACSR проводов модификации AC50 (менее выражено, чем для A50). Для поперечных сечений алюминиевых и стальных проволок форма зёрен неправильная и в первом приближении близка к квадратной и не меняется в центре и на краях, подобно тому, как это наблюдалось для Al проволок из AAAC A50 и ACSR AC50 проводов [7–9].



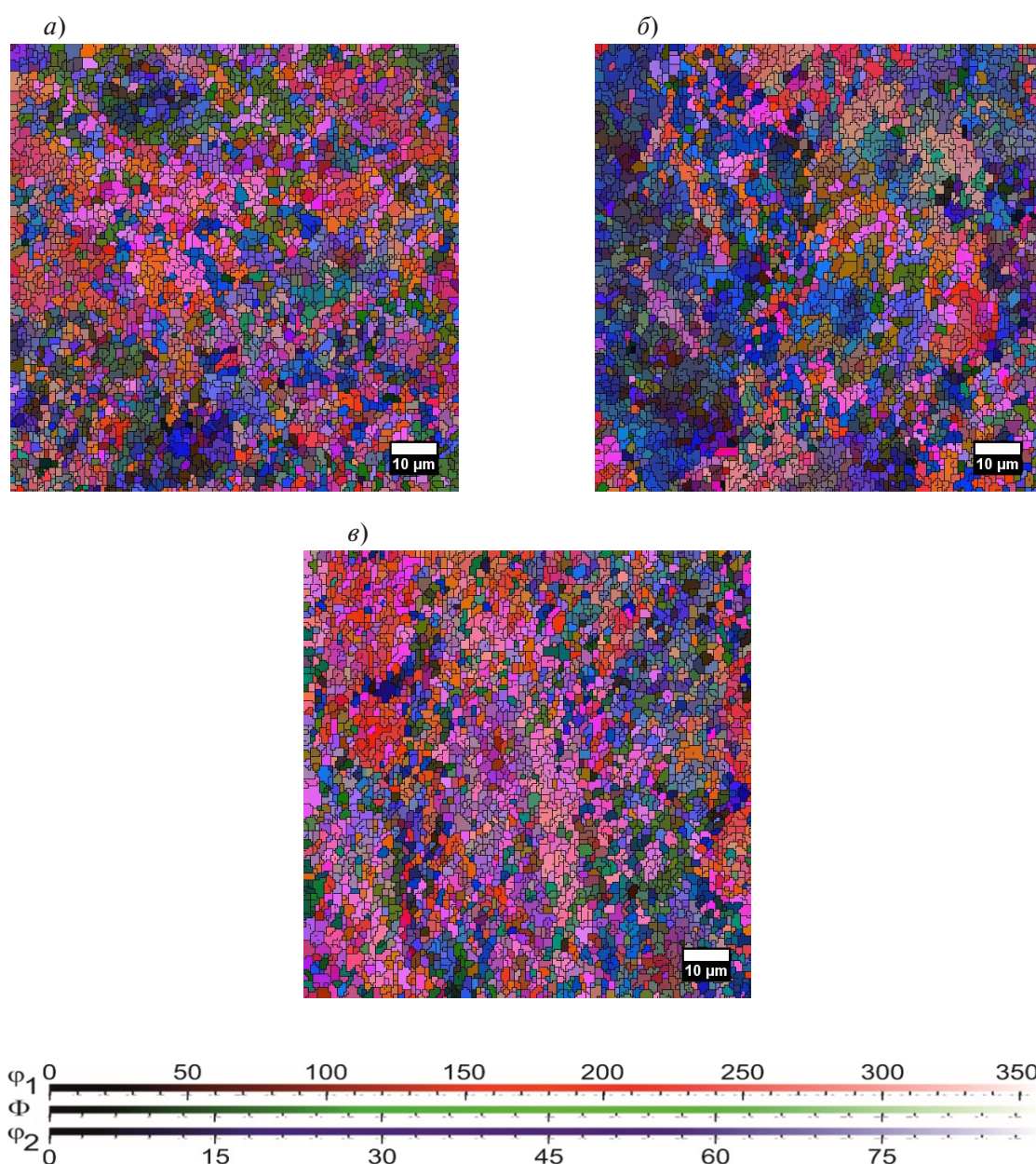


Рис. 3. Карты распределения углов Эйлера на примере образца W2:

*a* – в области контакта, *б* – в центре, *в* – с краю

Fig. 3. Euler angle distribution maps for sample W2: *a* – in the contact area, *б* – in the center, *в* – at the edge

Из анализа рис. 3 и 4 видно, что большинство зёрен во всех алюминиевых и стальных проволоках имеют размер 1 – 3 мкм. Характер зависимости сохраняется по площади поперечного сечения образца. Однако, для алюминиевой проволоки, во внешнем слое провода наблюдается увеличение числа крупных зёрен (3 – 4 мкм) по сравнению с внутренним алюминиевым слоем, в то время как для стального сердечника данного эффекта не наблюдается.

#### Упругие и микропластические свойства

Измерения модуля Юнга  $E$  и декремента упругих колебаний  $\delta$  проведены в диапазоне амплитуд колебательной деформации  $\epsilon$  от  $\sim 10^{-6}$  до  $3 \cdot 10^{-4}$ . Этот диапазон включает в себя как амплитудно-независимую, так и зависимую (при больших  $\epsilon$ ) области. По данным изучения  $E(\epsilon)$

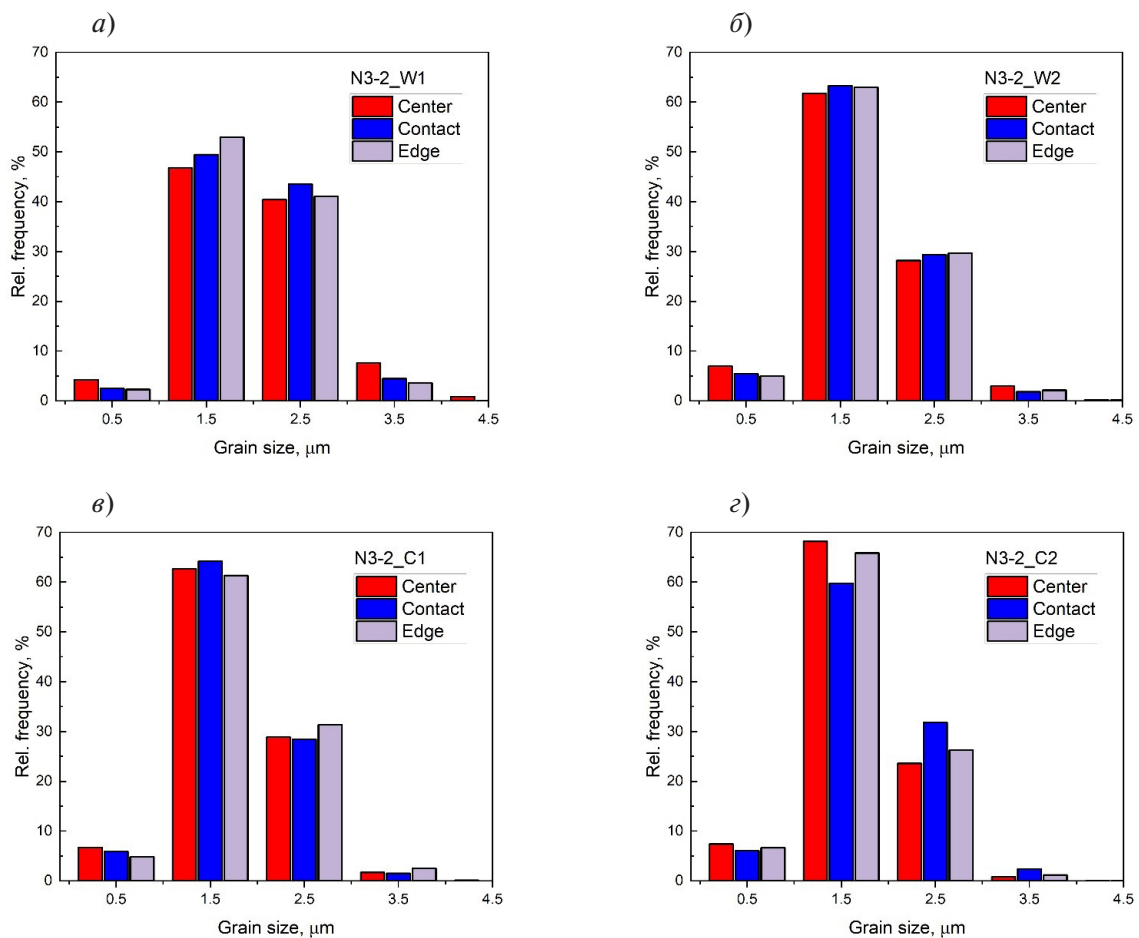


Рис. 4. Гистограммы распределения зёрен по размерам для образцов *a* – W1, *б* – W2, *в* – C1, *з* – C2  
 Fig. 4. Grain size distribution histograms for samples *a* – in the contact area, *б* – in the center, *в* – at the edge

строились диаграммы микропластического деформирования  $\sigma(\epsilon_d)$ . Измерения выполнены при комнатной температуре. Образцы для исследований вырезались из различных мест поперечного сечения провода (рис. 2).

На рис. 5 – 7 приводятся зависимости модуля Юнга  $E$ , амплитудно-независимого декремента  $\delta_i$  (т.е. декремента  $\delta$ , измеренного в том диапазоне  $\epsilon$ , где его значение ещё не зависит от  $\epsilon$ ) и напряжения  $\sigma_s$  (измеренного при фиксированной неупругой деформации  $\epsilon_d$ ) для образцов алюминия и стали в зависимости от местоположения (номера провода) в проводе и срока эксплуатации.

Проанализируем данные, представленные для стальной части провода (рис. 5). Образцы после 33 лет эксплуатации демонстрируют преимущественно более низкие значения модуля Юнга в сравнении с новыми проволоками. Известно, что одним из факторов уменьшения модуля упругости, является понижение плотности [28]. В сталеалюминиевых проводах стальной сердечник применяют для повышения прочности и надежности конструкции проводов, поэтому основная нагрузка сосредоточена именно на стальной части провода. Механическое воздействие при эксплуатации проводов приводит к деградации структуры, в том числе, к образованию пор и микротрещин, то есть дефектов пустотной природы. Такое изменение структуры и может приводить к уменьшению модуля. Поведение амплитудно-независимого декремента  $\delta_i$  и напряжения  $\sigma_s$  (при фиксированной неупругой деформации  $\epsilon_d$ ) для стального образца С3 (рис. 5), а именно самое высокое значение декремента и самое низкое значение напряжения, можно объяснить более высокой плотностью дефектов (дислокаций) для данного образца.

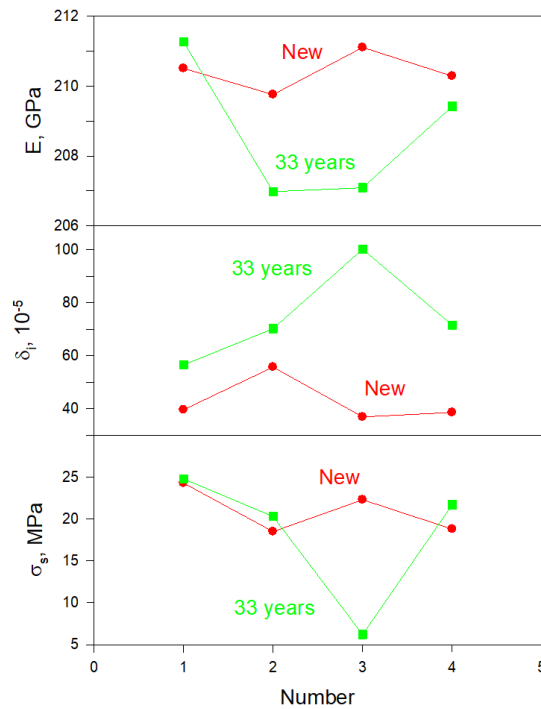


Рис. 5. Модуль Юнга  $E$ , декремент  $\delta_i$  и напряжение  $\sigma_s$  (при неупругой деформации  $\varepsilon_d = 1 \cdot 10^{-8}$ ) для стальных образцов в зависимости от номера проволоки в проводе

Fig. 5. Young's modulus  $E$ , decrement  $\delta_i$  and stress  $\sigma_s$  (with inelastic deformation  $\varepsilon_d = 1 \cdot 10^{-8}$ ) for steel samples depending on the wire number in the cable

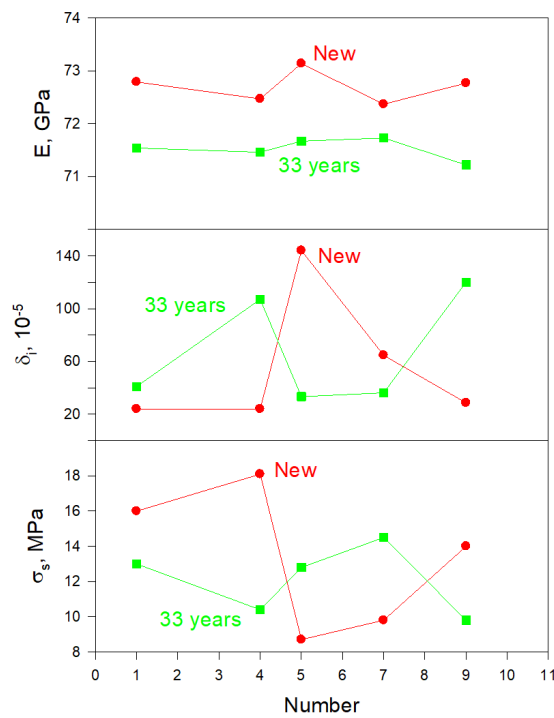


Рис. 6. Модуль Юнга  $E$ , декремент  $\delta_i$  и напряжение  $\sigma_s$  (при неупругой деформации  $\varepsilon_d = 4 \cdot 10^{-8}$ ) для образцов алюминия в зависимости от номера проволоки во внешнем слое провода

Fig. 6. Young's modulus  $E$ , decrement  $\delta_i$  and stress  $\sigma_s$  (with inelastic deformation  $\varepsilon_d = 4 \cdot 10^{-8}$ ) for aluminum samples depending on the wire number in the outer layer of the cable

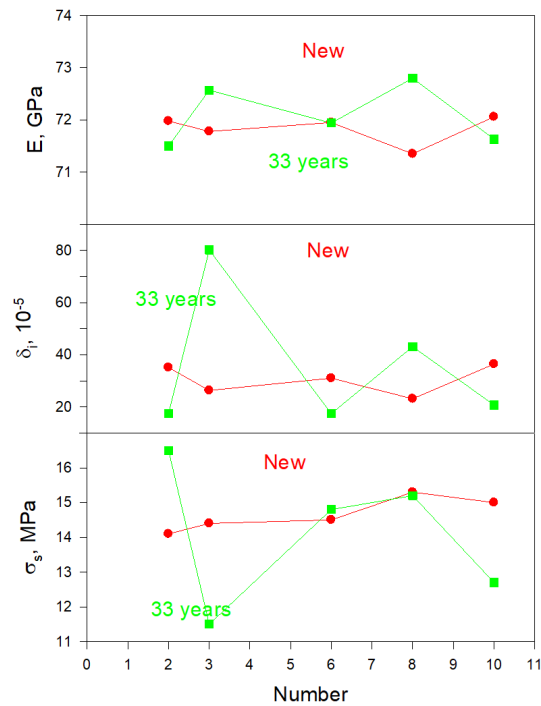


Рис. 7. Модуль Юнга  $E$ , декремент  $\delta_i$  и напряжение  $\sigma_s$  (при неупругой деформации  $\varepsilon_d = 4 \cdot 10^{-8}$ ) для образцов алюминия в зависимости от проволоки во внутреннем слое провода

Fig. 7. Young's modulus  $E$ , decrement  $\delta_i$  and stress  $\sigma_s$  (with inelastic deformation  $\varepsilon_d = 4 \cdot 10^{-8}$ ) for aluminum samples depending on the wire number in the outer layer of the cable

В образцах Al проволок из внешнего сечения провода после 33 лет службы (рис. 6) наблюдается понижение модуля Юнга  $E$  по сравнению с новым проводом. Аналогичный эффект уменьшения модуля Юнга  $E$  наблюдался для внешних Al проволок из полностью алюминиевого провода А50 типа после длительных сроков службы от 10 до 62 лет [7] и из сталеалюминиевого провода АС50/8 со сроками службы от 8 до 20 лет [9].

Что касается остальных данных, видно, что наблюдается значительный разброс для  $\delta_i$  и  $\sigma_s$ . Как было показано в [7, 8], этот разброс может быть связан как с различной деформационной предысторией разных участков проводов при изготовлении провода, так и со временем его эксплуатации. Этот разброс, вероятно, определяется в основном наличием дефектов и микропластическими свойствами того или иного образца. Отметим, что модуль Юнга алюминиевой части провода после 33 лет службы (внутренний повив, рис. 7) не обнаруживает тенденцию к заметному изменению относительно нового состояния, что может быть связано с заметно меньшим негативным влиянием внешней среды. И, как показывают данные в табл. 1, плотности алюминиевых проволок внутреннего повива также очень близки по значениям и находятся в пределах  $\rho = 2,685 - 2,687 \text{ г/см}^3$ .

### Заключение

Анализ полученных результатов показал, что наибольшая деградация структуры наблюдается во внешнем повиве алюминиевой проволоки и стальном сердечнике. Для указанных образцов выявлено уменьшение плотности образцов после 33 лет эксплуатации в сравнении с новым проводом. Для алюминиевой части провода уменьшение плотности обусловлено, в первую очередь, негативным влиянием окружающей среды и, в некоторой степени, механическими нагрузками (вибрации, взаимодействие с другими проволоками и т.д.). Для стальной части

провода (сердечника) уменьшение плотности наиболее вероятно связано с формированием дефектов пустотной природы под действием растягивающих постоянных и переменных (усталостное нагружение) нагрузок.

Структурные изменения при эксплуатации провода повлияли на упругие и микропластические свойства отдельных проволок. Заметное уменьшение модуля Юнга  $E$  обнаружено для внешнего повива алюминиевой проволоки и отдельных проволок стального сердечника. Можно полагать, что преимущественным фактором уменьшения модуля в данном исследовании является уменьшение плотности исследуемых образцов. Разброс значений для амплитудно-независимого декремента  $\delta_i$  и напряжения  $\sigma_s$  для всех образцов можно объяснить в основном различной деформационной предысторией (при изготовлении либо эксплуатации проводов), концентрацией дефектов (дислокаций) и микропластическими свойствами того или иного образца.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Azevedo C.R.F., Cescon T.** Failure analysis of aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Paranar River // *Engineering Failure Analysis*. 2002. V. 9. P. 645–664.
- [2] **Chen G., Wang X., Wang J., Liu J., Zhang T., Tang W.** Damage investigation of the aged aluminium cable steel reinforced (ACSR) conductors in a high-voltage transmission line // *Engineering Failure Analysis*. 2012. V. 19. P. 13–21.
- [3] **Kreislova K., Jaglova M., Turek L., Koukalova A.** Evaluation of corrosion of long-term exposed aluminium conductor // *Koroze a ochrana materiálu*. 2013. V. 57. No. 1. P. 25–34.
- [4] **Deng Y., Yu J., Xia K., Yang L.** Corrosion Conditions Analysis of In-service ACSR Overhead Lines // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. V. 446–447. P. 753–758.
- [5] **Achiriloaiei D., Medeleanu M.** Studies on the Effects of Environmental Pollution on ACSR Conductors // *Revista de Chimie (Bucharest)*. 2019. V. 70. No. 11. P. 3984–3986.
- [6] **Lequien F., Auzoux Q., Moine G., Rousseau M., Pasquier-Tilliette S., Holande A., Ammi S., Heurtault S., Prieur P.** Characterization of an aluminum conductor steel reinforced (ACSR) after 60 2023s of operation // *Engineering Failure Analysis*. 2021. V. 120. P. 105039.
- [7] **Levin A.A., Narykova M.V., Lihachev A.I., Kardashev B.K., Kadomtsev A.G., Brunkov P.N., Panfilov A.G., Prasolov N.D., Sultanov M.M., Kuryanov V.N., Tyshkevich V.N.** Modification of the structural, microstructural, and elastoplastic properties of aluminum wires after operation // *Metals*. 2021. V. 11. No. 12. P. 1955.
- [8] **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. No. 2. P. 166.
- [9] **Levin A.A., Narykova M.V., Lihachev A.I., Kardashev B.K., Kadomtsev A.G., Prasolov N.D., Panfilov A.G., Sokolov R.V., Brunkov P.N., Sultanov M.M., Strizhichenko A.V., Boldyrev I.A.** Comparison of structural, microstructural, elastic, and microplastic properties of the AAAC (A50) and ACSR (AC50/8) cables after various operation periods in power transmission line // *Crystals*. 2022. V. 12. No. 9. P. 1267.
- [10] **Fadel A.A., Rosa D., Mur a L.B., Ferreira J.L.A., Araújo J.A.** Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an Ibis steel reinforced aluminium conductor // *International Journal of Fatigue*. 2012. V. 42. P. 24–34.
- [11] **Badibanga R., Miranda T., Rocha P., Ferreira J., da Silva C., Araújo J.** The effect of mean stress on the fatigue behaviour of overhead conductor function of the H/w parameter // *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 165. P. 11001.
- [12] **Azevedo C.R.F., Henriques A.M.D., Pulino Filho A.R., Ferreira J.L.A., Araújo J.A.** Fretting fatigue in overhead conductors: Rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminium cable steel reinforced conductor. *Engineering Failure Analysis*. 2009. V. 16. P. 136–151.

- [13] **Kalombo R.B., Martínez J.M.G., Ferreira J.L.A., da Silva C.R.M., Araújo J.A.** Comparative fatigue resistance of overhead conductors made of aluminium and aluminium alloy: Test and analysis // *Procedia Engineering*. 2015. V. 133. P. 223–232.
- [14] **Ma X., Gao L., Zhang J., Zhang L.-C.** Fretting Wear Behaviors of Aluminum Cable Steel Reinforced (ACSR) Conductors in High-Voltage Transmission Line // *Metals*. 2017. V. 7. No. 9. P. 373.
- [15] **Kalombo R.B., Reinke G., Miranda T.B., Ferreira J.L.A., da Silva C.R.M., Araújo J.A.** Experimental Study of the Fatigue Performance of Overhead Pure Aluminium Cables // *Procedia Structural Integrity*. 2019. V. 19. P. 688–697.
- [16] **Said J., Garcin S., Fouvry S., Cailletaud G., Yang C., Hafid F.** A multi-scale strategy to predict fretting-fatigue endurance of overhead conductors // *Tribology International*. 2020. V. 143. P. 106053.
- [17] **Matos I.M., Rocha P.H.C., Kalombo R.B., Veloso L.A.C.M., Araújo J.A., Castro F.C.** Fretting fatigue of 6201 aluminum alloy wires of overhead conductors // *International Journal of Fatigue*. 2020. V. 141. P. 105884.
- [18] **Miranda T., Badibanga R., Araújo J.A., Silva C., Ferreira J.** Fatigue Evaluation of All Aluminium Alloy Conductors Fitted With Elastomeric and Metallic Suspension Clamps // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2022. V. 37. P. 539–546.
- [19] **Кульков В.Г., Тышкевич В.Н., Курьянов В.Н., Султанов М.М., Норов Д.Ш., Нарыкова М.В., Кадомцев А.Г., Прасолов Н.Д., Брунков П.Н., Лихачев А.И., Соколов Р.В., Левин А.А.** Экспериментальные исследования усталостной прочности и поверхностного электросопротивления алюминиевого провода воздушных линий электропередач // *Надёжность и безопасность энергетики*. 2021. Т.14. № 4. С. 189–195.
- [20] **Rocha P.H.C., Langlois S., Lalonde S., Araújo J.A., Castro F.C.** A general life estimation method for overhead conductors based on fretting fatigue behavior of wires // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2022. V. 121. P. 103443.
- [21] **Levin A.A., Narykova M.V., Lihachev A.I., Kardashev B.K., Kadomtsev A.G., Panfilov A.G., Prasolov N.D., Sokolov R.V., Brunkov P.N., Sultanov M.M., Strizhichenko A.V., Boldyrev I.A.** Structural, Microstructural, Elastic, and Microplastic Properties of Aluminum Wires (from AAAC (A50) Cables) after Fatigue Tests // *Metals*. 2023. V.13. No. 2. P. 298.
- [22] **Kim S.-D., Morcos M.M.** Mechanical Deterioration of ACSR Conductors Due to Forest Fires // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2003. V. 18. No. 1. P. 271–276.
- [23] **Smyrak B., Jurkiewicz B., Zasadzińska M., Gnielczyk M., Jalowy P.** The Effect of Al-Mg-Si Wire Rod Heat Treatment on Its Electrical Conductivity and Strength // *Metals*. 2020. V. 10. No. 8. P. 1027.
- [24] **Alshwawreh N., Alhamarneh B., Altwarah Q., Quandour S., Barghout S., Ayasrah O.** Electrical Resistivity and Tensile Strength Relationship in Heat-Treated All Aluminum Alloy Wire Conductors // *Materials*. 2021. V. 14. No. 19. P. 5738.
- [25] **Никаноров С.П., Кардашев Б.К.** Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. М.: Наука, 1985. 253 с.
- [26] **Massalski T.B., Okamoto H. (eds.)** Binary Alloy Phase Diagrams. 2<sup>nd</sup> ed., ASM International. Vol. 1. 1990.
- [27] **Schwartz A.I., Kumar M., Adams B.L., Field D.P. (eds.)** Electron Backscatter Diffraction in Material Science, 2<sup>nd</sup> ed., Springer: Boston, MA, USA, 2009.
- [28] **Zhu K., Li C., Zhu Z., Liu C.S.** Measurement of the dynamic Young's modulus of porous titanium and Ti6Al4V // *Journal of Materials Sciences*. 2007. V. 42. No. 17. P. 7348–7353.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**ЛИХАЧЕВ Алексей Игоревич** – младший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, без степени.

E-mail: lihachev@mail.ioffe.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3671-2600>

**НАРЫКОВА Мария Владимировна** – старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, канд. физ.-мат. наук.

E-mail: maria.narykova@mail.ioffe.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6673-2392>

**ЛЕВИН Александр Алексеевич** – старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, канд. физ.-мат. наук.

E-mail: aleksandr.a.levin@mail.ioffe.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9258-3204>

**ПРАСОЛОВ Никита Дмитриевич** – научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, канд. физ.-мат. наук.

E-mail: nikpras@mail.ioffe.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7519-9208>

**СОКОЛОВ Роман Викторович** – научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, без степени.

E-mail: sokolovr@mail.ioffe.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3495-3200>

**КАРДАШЕВ Борис Константинович** – ведущий научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, д-р физ.-мат. наук.

E-mail: B.Kardashev@mail.ioffe.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4500-8244>

**КАДОМЦЕВ Андрей Георгиевич** – заведующий лабораторией физики прочности-главный научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, д-р физ.-мат. наук.

E-mail: andrej.kadomtsev@mail.ioffe.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3451-6091>

**БРУНКОВ Павел Николаевич** – главный научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, д-р физ.-мат. наук.

E-mail: brunkov@mail.ioffe.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3400-4654>

**СУЛТАНОВ Махсуд Мансурович** – доцент-заведующий научно-исследовательской лаборатории, Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Волжском, канд. техн. наук.

E-mail: vfmei@vfmei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2920-5515>

**СТРИЖИЧЕНКО Александр Васильевич** – старший научный сотрудник, Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Волжском, канд. техн. наук.

E-mail: strijichenko@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6574-4655>

**БОЛДЫРЕВ Илья Анатольевич** – доцент-ведущий научный сотрудник, Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Волжском, канд. техн. наук.

E-mail: boldyrev@vfmei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3792-0874>

## REFERENCES

- [1] **C.R.F. Azevedo, T. Cescon**, Failure analysis of aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Paranar River // *Engineering Failure Analysis*. 2002. V. 9. P. 645–664.
- [2] **G. Chen, X. Wang, J. Wang, J. Liu, T. Zhang, W. Tang**, Damage investigation of the aged aluminium cable steel reinforced (ACSR) conductors in a high-voltage transmission line // *Engineering Failure Analysis*. 2012. V. 19. P. 13–21.
- [3] **K. Kreislova, M. Jaglova, L. Turek, A. Koukalova**, Evaluation of corrosion of long-term exposed aluminium conductor // *Koroze a ochrana materiálu*. 2013. V. 57. No. 1. P. 25–34.
- [4] **Y. Deng, J. Yu, K. Xia, L. Yang**, Corrosion Conditions Analysis of In-service ACSR Overhead Lines // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. V. 446-447. P. 753–758.
- [5] **D. Achiriloaiei, M. Medeleanu**, Studies on the Effects of Environmental Pollution on ACSR Conductors // *Revista de Chimie (Bucharest)*. 2019. V. 70. No. 11. P. 3984–3986.
- [6] **F. Lequien, Q. Auzoux, G. Moine, M. Rousseau, S. Pasquier-Tilliette, A. Holande, S. Ammi, S. Heurtault, P. Prieur**, Characterization of an aluminum conductor steel reinforced (ACSR) after 60 years of operation // *Engineering Failure Analysis*. 2021. V. 120. P. 105039.
- [7] **A.A. Levin, M.V. Narykova, A.I. Lihachev, B.K. Kardashev, A.G. Kadomtsev, P.N. Brunkov, A.G. Panfilov, N.D. Prasolov, M.M. Sultanov, V.N. Kuryanov, V.N. Tyshkevich**, Modification of the structural, microstructural, and elastoplastic properties of aluminum wires after operation // *Metals*. 2021. V. 11. No. 12. P. 1955.
- [8] **M.V. Narykova, A.A. Levin, N.D. Prasolov, A.I. Lihachev, B.K. Kardashev, A.G. Kadomtsev, A.G. Panfilov, R.V. Sokolov, P.N. Brunkov, M.M. Sultanov, V.N. Kuryanov, V.N. Tyshkevich**, 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. No. 2. P. 166.
- [9] **A.A. Levin, M.V. Narykova, A.I. Lihachev, B.K. Kardashev, A.G. Kadomtsev, N.D. Prasolov, A.G. Panfilov, R.V. Sokolov, P.N. Brunkov, M.M. Sultanov, A.V. Strizhichenko, I.A. Boldyrev**, Comparison of structural, microstructural, elastic, and microplastic properties of the AAAC (A50) and ACSR (AC50/8) cables after various operation periods in power transmission line // *Crystals*. 2022. V. 12. No. 9. P. 1267.
- [10] **A.A. Fadel, D. Rosa, L.B. Murça, J.L.A. Ferreira, J.A. Araújo**, Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an Ibis steel reinforced aluminium conductor // *International Journal of Fatigue*. 2012. V. 42. P. 24–34.
- [11] **R. Badibanga, T. Miranda, P. Rocha, J. Ferreira, C. da Silva, J. Araújo**, The effect of mean stress on the fatigue behaviour of overhead conductor function of the H/w parameter // *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 165. P. 11001.
- [12] **C.R.F. Azevedo, A.M.D. Henriques, A.R. Pulino Filho, J.L.A. Ferreira, J.A. Araújo**, Fretting fatigue in overhead conductors: Rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminium cable steel reinforced conductor. *Engineering Failure Analysis*. 2009. V. 16. P. 136–151.
- [13] **R.B. Kalombo, J.M.G. Martínez, J.L.A. Ferreira, C.R.M. da Silva, J.A. Araújo**, Comparative fatigue resistance of overhead conductors made of aluminium and aluminium alloy: Test and analysis // *Procedia Engineering*. 2015. V. 133. P. 223–232.
- [14] **X. Ma, L. Gao, J. Zhang, L.-C. Zhang**, Fretting Wear Behaviors of Aluminum Cable Steel Reinforced (ACSR) Conductors in High-Voltage Transmission Line // *Metals*. 2017. V. 7. No. 9. P. 373.



- [15] **R.B. Kalombo, G. Reinke, T.B. Miranda, J.L.A. Ferreira, C.R.M. da Silva, J.A. Araújo**, Experimental Study of the Fatigue Performance of Overhead Pure Aluminium Cables // *Procedia Structural Integrity*. 2019. V. 19. P. 688–697.
- [16] **J. Said, S. Garcin, S. Fouvry, G. Cailletaud, C. Yang, F. Hafid**, A multi-scale strategy to predict fretting-fatigue endurance of overhead conductors // *Tribology International*. 2020. V. 143. P. 106053.
- [17] **I.M. Matos, P.H.C. Rocha, R.B. Kalombo, L.A.C.M. Veloso, J.A. Araújo, F.C. Castro**, Fretting fatigue of 6201 aluminum alloy wires of overhead conductors // *International Journal of Fatigue*. 2020. V.141. P.105884.
- [18] **T. Miranda, R. Badibanga, J.A. Araújo, C. Silva, J. Ferreira**, Fatigue Evaluation of All Aluminium Alloy Conductors Fitted With Elastomeric and Metallic Suspension Clamps // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2022 V. 37. P. 539–546.
- [19] **V.G. Kulkov, V.N. Tyshkevich, V.N. Kuryanov, M.M. Sultanov, D.Sh. Norov, M.V. Narykova, A.G. Kadomtsev, N.D. Prasolov, P.N. Brunkov, A.I. Likhachev, R.V. Sokolov, A.A. Levin**, Eksperimentalnyye issledovaniya ustalostnoy prochnosti i poverkhnostnogo elektrosoprotivleniya alyuminiyevogo provoda vozduzhnykh liniy elektroperedach // *Nadezhnost i bezopasnost energetiki*. 2021. T. 14. № 4. S. 189–195.
- [20] **P.H.C. Rocha, S. Langlois, S. Lalonde, J.A. Araújo, F.C. Castro**, A general life estimation method for overhead conductors based on fretting fatigue behavior of wires // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2022. V. 121. P. 103443.
- [21] **A.A. Levin, M.V. Narykova, A.I. Likhachev, B.K. Kardashev, A.G. Kadomtsev, A.G. Panfilov, N.D. Prasolov, R.V. Sokolov, P.N. Brunkov, M.M. Sultanov, A.V. Strizhichenko, I.A. Boldyrev**, Structural, Microstructural, Elastic, and Microplastic Properties of Aluminum Wires (from AAAC (A50) Cables) after Fatigue Tests // *Metals*. 2023. V.13. No. 2. P. 298.
- [22] **S.-D. Kim, M.M. Morcos**, Mechanical Deterioration of ACSR Conductors Due to Forest Fires // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2003. V. 18. No. 1. P. 271–276.
- [23] **B. Smyrak, B. Jurkiewicz, M. Zasadzińska, M. Gnielczyk, P. Jałowcy**, The Effect of Al-Mg-Si Wire Rod Heat Treatment on Its Electrical Conductivity and Strength // *Metals*. 2020. V. 10. No. 8. P. 1027.
- [24] **N. Alshwawreh, B. Alhamarneh, Q. Altwarah, S. Quandour, S. Barghout, O. Ayasrah**, Electrical Resistivity and Tensile Strength Relationship in Heat-Treated All Aluminum Alloy Wire Conductors // *Materials*. 2021. V. 14. No. 19. P. 5738.
- [25] **S.P. Nikanorov, B.K. Kardashev**, Uprugost i dislokatsionnaya neuprugost kristallov, M.: Nauka, 1985. 253 s.
- [26] **T.B. Massalski, H. Okamoto**, (eds.) *Binary Alloy Phase Diagrams*. 2<sup>nd</sup> ed., ASM International. Vol. 1. 1990.
- [27] **A.I. Schwartz, M. Kumar, B.L. Adams, D.P. Field**, (eds.) *Electron Backscatter Diffraction in Material Science*, 2<sup>nd</sup> ed., Springer: Boston, MA, USA, 2009.
- [28] **K. Zhu, C. Li, Z. Zhu, C.S. Liu**, Measurement of the dynamic Young's modulus of porous titanium and Ti6Al4V // *Journal of Materials Sciences*. 2007. V. 42. No. 17. P. 7348–7353.

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Alexey I. LIHACHEV** – *Ioffe Institute*.

E-mail: lihachev@mail.ioffe.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3671-2600>

**Maria V. NARYKOVA** – *Ioffe Institute*.

E-mail: maria.narykova@mail.ioffe.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6673-2392>

**Aleksandr A. LEVIN** – *Ioffe Institute.*

E-mail: [aleksandr.a.levin@mail.ioffe.ru](mailto:aleksandr.a.levin@mail.ioffe.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9258-3204>

**Nikita D. PRASOLOV** – *Ioffe Institute.*

E-mail: [nikpras@mail.ioffe.ru](mailto:nikpras@mail.ioffe.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7519-9208>

**Roman V. SOKOLOV** – *Ioffe Institute.*

E-mail: [sokolovr@mail.ioffe.ru](mailto:sokolovr@mail.ioffe.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3495-3200>

**Boris K. KARDASHEV** – *Ioffe Institute.*

E-mail: [B.Kardashev@mail.ioffe.ru](mailto:B.Kardashev@mail.ioffe.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4500-8244>

**Andrej G. KADOMTSEV** – *Ioffe Institute.*

E-mail: [andrej.kadomtsev@mail.ioffe.ru](mailto:andrej.kadomtsev@mail.ioffe.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3451-6091>

**Pavel N. BRUNKOV** – *Ioffe Institute.*

E-mail: [brunkov@mail.ioffe.ru](mailto:brunkov@mail.ioffe.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3400-4654>

**Makhsud M. SULTANOV** – *National Research University “Moscow Power Engineering Institute”.*

E-mail: [vfmei@vfmei.ru](mailto:vfmei@vfmei.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2920-5515>

**Alexander V. STRIZHICHENKO** – *National Research University “Moscow Power Engineering Institute”.*

E-mail: [strijichenko@yandex.ru](mailto:strijichenko@yandex.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6574-4655>

**Ilia A. BOLDYREV** – *National Research University “Moscow Power Engineering Institute”.*

E-mail: [boldyrev@vfmei.ru](mailto:boldyrev@vfmei.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3792-0874>

Поступила: 29.12.2022; Одобрена: 09.02.2023; Принята: 10.02.2023.

Submitted: 29.12.2022; Approved: 09.02.2023; Accepted: 10.02.2023.