# Соотношение пластичности, способности к перегибам и навивам проволок из ультрамелкозернистых сплавов Al-0,5Fe и Al-0,5Fe-0,3Cu, полученных литьем в электромагнитный кристаллизатор

*Медведев Андрей Евгеньевич*<sup>\*1,3</sup>, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

*Жукова Ольга Олеговна*<sup>1,4</sup>, инженер-исследователь *Федотова Дарья Дмитриевна*<sup>1,5</sup>, магистр, оператор 4-го разряда

НИЛ «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях»

Хафизова Эльвира Динифовна<sup>1,6</sup>, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник *Мотков Михаил Михайлович*<sup>2,7</sup>, кандидат технических наук, старший научный сотрудник *Мурашкин Максим Юрьевич*<sup>1,8</sup>, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа (Россия)

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск (Россия)

\*E-mail: medvedevandreyrf@gmail.com

<sup>3</sup>ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0002-8616-0042</u> <sup>4</sup>ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0002-1879-9389</u> <sup>5</sup>ORCID: <u>https://orcid.org/0009-0000-7526-8309</u> <sup>6</sup>ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4618-412X <sup>7</sup>ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1272-3993 <sup>8</sup>ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9950-0336

Поступила в редакцию 20.03.2025

Пересмотрена 10.04.2025

Принята к публикации 28.04.2025

Аннотация: В исследованиях таких функциональных свойств сплавов Al-Fe и Al-Fe-Cu, как способность к перегибам и навивам, а также пластичность проводов из этих сплавов, имеет место значительная степень неопределенности. Способность к перегибам и навивам определяется промышленными стандартами, однако попыток изучить связь между ними и пластичностью проводов из алюминиевых сплавов не предпринималось. Еще меньше внимания уделено проводам с ультрамелкозернистой структурой на основе алюминия, полученным электромагнитным литьем и равноканальным угловым прессованием. В данном исследовании использовались сплавы с двумя различными химическими составами (Al-0,5 вес. % Fe и Al-0,5 вес. % Fe-0,3 вес. % Cu) и двумя различными способами литья (литье в электромагнитный кристаллизатор и непрерывное литье и прокатка). Часть проводов для исследования была изготовлена методом холодного волочения (ХВ), другая – комбинацией равноканального углового прессования по схеме «Конформ» и холодного волочения (РКУП-К+ХВ) для получения крупнозернистой и ультрамелкозернистой структур соответственно. Для оценки термической стабильности проволок проводили отжиг при температуре 230 °C в течение 1 ч. Показано, что соотношение между пластичностью (удлинением до разрушения), числом навивов и числом перегибов (как до первой трещины, так и до полного разрушения образца) может различаться в зависимости от схемы деформации, типа и количества легирующих элементов в сплаве, а также способности образовывать твердые растворы.

Ключевые слова: алюминиевый сплав; Al-Fe; Al-Fe-Cu; электромагнитное литье; непрерывное литье и прокатка; равноканальное угловое прессование; холодное волочение; удлинение до разрушения; пластичность; технологические перегибы; технологические навивы; фрактографический анализ.

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 20-79-10133, https://rscf.ru/project/20-79-10133/.

Исследовательская часть работы выполнена на оборудовании ЦКП «Нанотех» Уфимского университета науки и технологий.

Авторы выражают благодарность профессору В.Н. Тимофееву (Сибирский федеральный университет) за предоставленный материал исследования.

Для цитирования: Медведев А.Е., Жукова О.О., Федотова Д.Д., Хафизова Э.Д., Мотков М.М., Мурашкин М.Ю. Соотношение пластичности, способности к перегибам и навивам проволок из ультрамелкозернистых сплавов Al-0,5Fe и Al-0,5Fe-0,3Cu, полученных литьем в электромагнитный кристаллизатор // Frontier Materials & Technologies. 2025. № 2. C. 29-38. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-2-72-3.

## введение

Алюминий и алюминиевые сплавы являются одними из самых распространенных материалов в различных областях промышленности. Широкое использование алюминия и его сплавов обусловлено их растущей конкурентоспособностью по сравнению

© Медведев А.Е., Жукова О.О., Федотова Д.Д., Хафизова Э.Д., Мотков М.М., Мурашкин М.Ю., 2025

с медными сплавами. Низкая стоимость, высокая доступность, достаточная механическая прочность и электропроводность в сочетании с высокой пластичностью и коррозионной стойкостью обеспечивают растущую долю этих сплавов в различных областях промышленного комплекса [1].

Алюминий и его сплавы обладают рядом свойств, приемлемые уровни которых зависят от области применения сплавов. Для электрических проводов и кабелей наиболее важны электропроводность, механическая прочность и пластичность [2]. Для электрического провода наиболее важным свойством является электропроводность, поскольку она определяет способность передавать электрический ток. Механическая прочность важна в областях применения, которые предполагают повышенные механические нагрузки проводов или кабелей, например в воздушных линиях электропередач. Пластичность определяет уровень деформации, который провод или кабель может выдержать до растрескивания или разрушения, определяя простоту монтажа таких изделий и срок их службы.

Чаще всего в научных работах приводится только пластичность, что недостаточно для комплексной оценки функциональных свойств материала. Провода и кабели, используемые в электротехнической промышленности, в большинстве случаев подвергаются статическим нагрузкам, поэтому испытания на растяжение являются самым быстрым способом получения экспериментальных данных, достаточных для большинства областей применения. Однако иногда в практике использования проводов и кабелей особое значение имеют такие параметры, как усталость [3], количество перегибов [4], способность к навивам [5] и сопротивление фреттингу [6]. С точки зрения практического применения следует оценивать каждый значимый параметр, поскольку прямой корреляции между различными свойствами нет.

Для воздушных линий электропередач и других применений, подвергающихся циклическим нагрузкам, требуется проведение испытаний на усталость. Испытания на усталость являются дорогостоящими и трудоемкими, поэтому они не проводятся в случаях, когда провод или кабель испытывает только статические нагрузки или деформируется только один раз (например, во время монтажа). В таких случаях большее значение имеет способность выдерживать изгиб и намотку [7].

Исследования способности к технологическим перегибам и навивам изделий из токопроводящих алюминиевых сплавов весьма скудны. Значения этих параметров чаще всего определяются стандартами, такими как ISO 7801:1984 «Проволока. Метод испытания на перегиб» или ISO 7802:2013 «Металлические материалы. Проволока. Испытание на навивы». Эти стандарты определяют минимальное количество перегибов и навивов, которые должен выдержать материал, без учета пластичности материала. Однако, как упоминалось выше, взаимосвязь между этими параметрами не установлена.

Особый интерес представляют металлы и сплавы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, сформированной в токопроводящих материалах методами интенсивной пластической деформации. Такие материалы обычно демонстрируют наиболее оптимальное сочетание и прочности и электропроводности, но их пластичность не всегда превосходит аналоги, полученные традиционными методами [8]. В связи с этим изучение поведения проволок с УМЗ-структурой, обладающих высокой прочностью и хорошей электропроводностью, а также приемлемыми уровнями количества навивов и перегибов, имеет большое значение для оценки возможности их дальнейшего использования, а также пригодности таких проводов для монтажа. Согласно результатам недавних исследований, алюминиевые сплавы системы Al-Fe с УМЗ-структурой демонстрируют сочетание прочности, электропроводности и термостабильности, недоступное алюминиевым сплавам других систем легирования, например Al-Mg-Si и Al-Zr, широко применяемым в кабельной промышленности [9].

Цель исследования – установление связи (или ее отсутствия) между пластичностью (относительным удлинением до разрушения) и способностью к технологическим навивам и перегибам токопроводящих проволок из алюминиевых сплавов Al–Fe и Al–Fe–Cu как в крупнозернистом, так и в ультрамелкозернистом состоянии.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования были выбраны два сплава – Al-0,5 вес. % Fe и Al-0,5 вес. % Fe-0,3 вес. % Сu. Эти сплавы имеют химический состав, аналогичный составу коммерческих сплавов 8176 [10] и 8030 [11] соответственно. Сплавы были получены методом литья в электромагнитный кристаллизатор (электромагнитная кристаллизация, ЭМК) с целью точного контроля химического состава и условий литья. Реферативный сплав состава Al-0,5 вес. % Fe был получен методом непрерывного литья и прокатки (НЛиП), традиционно используемым для алюминиевых сплавов. Химический состав сплавов представлен в таблице 1. Сплав НЛиП был выбран в качестве сплава для сравнения, так как он производится традиционным способом, в отличие от сплавов Al-0,5Fe (ЭМК) и Al-0,5Fe-0,3Cu (ЭМКМ), производимых относительно новым методом литья в электромагнитный кристаллизатор. Как установили авторы в ходе своих предыдущих исследований, добавка 0,3 % Си хотя и придает сплаву повышенную механическую прочность и термическую стабильность, но требует тщательного подхода с точки зрения получения и обработки, поэтому к нему был применен только метод ЭМК [12].

Таблица 1. Химический состав сплавов системы Al-Fe, вес	. %
Table 1. Chemical composition of alloys of the Al–Fe system, with	. %

Сплав	Обозначение	Si	Fe	Cu	$\Sigma(Mg, Zn, V)$	Al
Al–0,5Fe	ЭМК	ЭМК 0,04 0,50 0,01 <0,01		<0,01	Ост.	
Al-0,5Fe	НЛиП	0,06	0,48	0,01	<0,20	Ост.
Al-0,5Fe-0,3Cu	ЭМКМ	0,02	0,50	0,30	<0,01	Ост.

Образцы исследуемых сплавов подвергались двум различным деформационным обработкам: холодному волочению (XB) и комбинации равноканального углового прессования (по схеме «Конформ» [13]) и холодного волочения. РКУП по схеме Конформ (РКУП-К) заключается в помещении катанки диаметром 11 мм в канал, состоящий из вращающейся круговой матрицы с давлением, направленным вдоль рабочих поверхностей. Сопротивление трения заставляет катанку, выходящую из вращающейся круговой матрицы, попадать в канал матрицы, собранной по схеме РКУП, сопряженный под определенным углом у с вращающейся круговой матрицей. Сдвиговая деформация происходит в месте пересечения каналов (зона деформации). Угол пересечения каналов у составил 120° при четырех циклах обработки. Обрабатываемая заготовка поворачивалась вокруг продольной оси на +90° после каждого цикла РКУП-К (маршрут В<sub>с</sub>) при комнатной температуре. В результате обработки РКУП-К были получены образцы с сечением 10×10 мм и длиной не менее 100 мм.

В процессе XB образцы подвергались холодной деформации на лабораторной волочильной машине с коэффициентом вытяжки 13,5 (относительное обжатие ~75 %). В результате XB были получены образцы проволоки диаметром 3 мм. Образцы исходного прутка также подвергались XB в аналогичных условиях.

Отжиг при 230 °С в течение 1 ч проводили в атмосферной печи Nabertherm В180 (Германия) в соответствии с IEC 62641:2023.

Для проведения сканирующей электронной микроскопии использовали растровый электронный микроскоп JEOL JSM 6940LV (Япония). Для получения информации о поведении сплава ЭМКМ при разрушении был проведен дополнительный фрактографический анализ.

Для получения статистически достоверных результатов испытания на растяжение проводились на трех образцах для каждого состояния на универсальной разрывной машине Instron 5982 (США) при комнатной температуре. Скорость деформации составила 100 мм/мин (для образцов проволоки после XB по ASTM A931-96). По результатам испытаний определялись значения удлинения до разрушения ( $\delta$ ). Испытания на растяжение проводились на образцах после холодного волочения (XB), после РКУП-К и холодного волочения (РКУП-К+XB), а также после отжига.

Испытания на перегибы проводились согласно ISO 7801:1984. Для каждого состояния испытывалось не

менее 3 образцов. Каждый образец испытывался на специальном испытательном стенде, фиксировалось количество изгибов до первой трещины (Т) и до полного разрушения (Р).

Испытания на навивы проводились по ISO 7802-2013, также учитывались требования ГОСТ 10447-93. Для каждого состояния испытывали не менее одного образца. Образцы проволоки диаметром 3 мм плотно обматывали вокруг стального стержня диаметром 3 мм со скоростью не более 1 с<sup>-1</sup>. Для прохождения испытания каждый образец должен был выдержать не менее 5 оборотов, где 1 оборот эквивалентен накручиванию проволоки на 360°. Разные стандарты имеют разные нормы допустимого количества оборотов: от 5 (согласно ГОСТ 10447-93) до 16 (согласно ISO 7802:2013). Был сделан вывод, что в случае 5 успешных оборотов дальнейшая намотка проходит беспрепятственно, пока не будет представлен какой-либо крупный микродефект или у экспериментатора не закончится испытательный материал. В данном исследовании авторы руководствовались требованиями ГОСТ 10447-93.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### Тесты на навивы, перегибы и растяжение

На рис. 1 представлен вид образцов после испытаний на перегиб и навивы. Можно отметить, что разрушение образца при изгибе происходит не в непосредственной области перегиба, а на ее периферии. Поверхность образцов после обоих видов испытаний не содержит видимых дефектов.

В таблице 2 приведены результаты испытаний на растяжение, перегибы и навивы всех исследованных материалов: ЭМК, НЛиП и ЭМКМ. Холодное волочение обеспечивает пластичность (удлинение до разрушения) около 5 % в среднем у образцов всех исследуемых сплавов, за исключением сплава ЭМКМ, где ее уровень составляет в среднем 2 %. Согласно IEC 62641:2023 минимальное удлинение до разрушения алюминиевых проводов составляет 1,7 % для холоднодеформированного состояния и 3,5 % для отожженного состояния. Таким образом, все исследуемые состояния характеризуются удлинением до разрушения более 2 %, а некоторые из сплавов даже превосходят требования к отожженным проводам.



С. Г. Бнешний вио образца после испытании на перегибы (a) и навивы (b). Оба образца изготовлены из проволоки диаметром 3 мм Fig. 1. Samples after bending (a) and wrapping (b) tests. Both samples are made of wire of 3 mm diameter

Сплав	Состояние	Навивы			Количество перегибов		Пластич- ность
		Коли- чество	Соответствует требованиям ГОСТ 10447-93	Соответствует требованиям ISO 7802:2013	До первой трещины, Т	До полного разруше- ния, Р	Удлинение до разру- шения, %
ЭМК	XB	>16	да	да	8–9	11–13	4,9±0,4
	XB+230 °C	>16	да	да	7–8	12–13	3,8±0,7
	РКУП-К+ХВ	>16	да	да	9	12	2,8±0,2
	РКУП-К+ХВ+230 °С	>16	да	да	7	10–11	2,5±0,3
НЛиП	XB	>16	да	да	8-11	9–15	5,6±0,4
	XB+230 °C	>16	да	да	6–11	14–16	3,2±0,5
	РКУП-К+ХВ	>16	да	да	9–10	12–14	2,7±0,2
	РКУП-К+ХВ+230 °С	>16	да	да	8	11–14	2,2±0,7
ЭМКМ	XB	>16	да	да	6–9	7–10	2,3±0,4
	XB+230 °C	>16	да	да	9	11–13	3,1±0,3
	РКУП-К+ХВ	0	нет	нет	1	1	2,7±0,5
	РКУП-К+ХВ+230 °С	>16	да	да	10–12	14–30	7,2±3,7

**Таблица 2.** Результаты испытаний на навивы, перегибы и растяжение **Table 2.** Results of the wrapping, bending and tensile tests

Комбинированная обработка РКУП-К+ХВ в сплавах с низким содержанием железа, таких как ЭМК и НЛиП, приводит к снижению уровня пластичности по сравнению с состоянием после ХВ. Поскольку эти сплавы можно рассматривать как технически чистый алюминий, они могут быть рассмотрены как аналогичные, и увеличение значения деформации в них приводит к аналогичным результатам.

Наиболее заметное различие между ХВ и РКУП-К+ХВ наблюдается в образце ЭМКМ. Введение стадии РКУП-К значительно увеличивает величину удлинения до разрушения, однако это увеличение находится в пределах значения погрешности. Общее удлинение до разрушения образцов ЭМКМ превышает 2 %, что считается достаточным для практического применения согласно IEC 62641:2023. В сплавах ЭМК и НЛиП, в отличие от ЭМКМ, отжиг при 230 °С после ХВ и РКУП-К+ХВ приводит к небольшому, но заметному снижению пластичности.

В таблице 2, помимо данных пластичности, приведены результаты испытаний исследуемых сплавов на навивы. Единственное исключение по успешному прохождению испытаний на навивы (минимальное количество витков – 5 по ГОСТ 10447-93) продемонстрировал сплав ЭМКМ в состоянии РКУП-К+ХВ. Ни одного витка сделать не удалось, так как проволока разрушалась уже на первом навиве. Однако в состоянии ХВ проволока из сплава ЭМКМ показала способность сформировать достаточное количество навивов. Хотя удлинение до разрушения образца сплава ЭМКМ в состоянии РКУП-К+ХВ относительно высокое, оно не имеет прямой корреляции со способностью к навивам. Сплав ЭМКМ в состоянии РКУП-К+ХВ после отжига успешно прошел тест на навивы, однако первые навивы частично треснули (без разрушения проволоки), и только после нескольких витков испытание продолжилось без дефектов/разрушения.

В таблице 2 показано количество перегибов до первой трещины (Т) и до полного разрушения (Р). Оценивать способность проволоки к перегибам разумнее по числу перегибов Т, а не Р – если разброс значений Т незначителен, то разброс параметра Р может достигать нескольких десятков единиц, особенно в отожженном состоянии. Большинство образцов проволок в исследованных состояниях удовлетворяют этому критерию, за исключением сплава ЭМКМ в состоянии РКУП-К+ХВ – проволока в этом состоянии настолько хрупкая, что разрушается уже при первом перегибе каждого из исследованных образцов.

С ростом параметров Т и Р в большинстве случаев увеличивается и параметр  $\delta$  (пластичность), особенно в отожженных состояниях. Однако эта корреляция не является одинаковой для всех состояний. Наиболее яркой иллюстрацией является состояние РКУП-К+ХВ сплава ЭМКМ – несмотря на приемлемый уровень пластичности в 2,7±0,5 %, проволока в этом состоянии не выдерживает даже одного перегиба. При этом провод ЭМКМ в состоянии XB, характеризующийся близкими значениями пластичности (2,3±0,4 %), не только превосходит состояние РКУП-К+ХВ по параметрам Т и Р, но и удовлетворяет требованиям ISO 7801:1984 и IEC 62641:2023.

#### Фрактографический анализ сплавов ЭМК и ЭМКМ

Поверхность разрушения сплава ЭМК в состоянии XB (рис. 2) имеет выраженно вязкий характер. Поверхность имеет линию разрыва по диаметру поверхности разрушения (рис. 2 a, b). С одной стороны от линии разрыва имеются круглые ямки, характерные для вязкого разрушения (рис. 2 с), с другой – ламеллярные узоры (рис. 2 d). Эти узоры образовались в результате сжатия частей образца в ходе последних циклов испытания на перегиб, когда трещина уже образовалась и развилась и части образца свободно перемещались относительно друг друга, сминая неровности рельефа. Поверхности разрушения сплава ЭМКМ в состоянии XB, а также сплава ЭМК в состоянии РКУП-К+ХВ имеют аналогичный вид (что ожидаемо, учитывая, что эти состояния имеют схожее значение Р (таблица 2), поэтому они не представлены в исследовании. Однако изгибаемый образец сплава ЭМКМ после РКУП-К и XB имеет иное поведение разрушения (рис. 3). Образец едва выдержал один перегиб (таблица 2), растрескавшись во время него и полностью разрушившись при втором перегибе. Три области поверхности разрушения (рис. 3 а) соответствуют первой трещине (1), области разрушения (2) и области отрыва (3). Судя по малому количеству перегибов, можно было бы ожидать хрупкого характера разрушения, но анализ разрушения показывает обратное – поверхность разрушения состоит из ямок (рис. 3 с, d), хотя они намного мельче, чем у других образцов (рис. 2). Процесс, аналогичный таковому в холоднотянутом образце сплава ЭМК (рис. 2 d), происходит в зоне разрушения – две части образца сжимаются друг относительно друга, сминаясь и сглаживая ямочную поверхность (рис. 3 d).



**Рис. 2.** Поверхность излома образца из сплава ЭМК в состоянии ХВ после испытаний на перегибы, СЭМ: **a** – обзор поверхности излома;

**b** – граница между последней и предпоследней зонами излома;

с – увеличенное изображение фактической поверхности излома, видны ямки;

d – увеличенное изображение предпоследней поверхности излома, ямки сглажены за счет сминания частей образца

Fig. 2. Fracture surface of the bending tests sample of the EMC alloy in the CD state, SEM:

a – overview of the fracture surface;

 $\boldsymbol{b}$  – the border between the last and second-to-last fracture areas;

c – magnified image of the actual fracture surface, dimples are visible;

*d* – magnified image of the second-to-last fracture surface, dimples are smoothened by the smashing of the parts of the bending sample



**Рис. 3.** Поверхность излома образца сплава ЭМКМ в состоянии РКУП-К+ХВ после испытаний на перегибы, СЭМ: **a** – общий вид поверхности разрушения, где 1 – зона первой трещины, 2 – зона разрушения, 3 – зона отрыва; **b** – граница между зонами 1 и 2;

c – увеличенный участок зоны 1, а также еще более увеличенное изображение поверхности,

иллюстрирующее вязкий характер разрушения;

*d* – увеличенный участок зоны 2, на нем видны меньшие относительно зоны 1 размеры ямок

Fig. 3. Fracture surface of the bending tests sample of the EMCM alloy in the ECAP-C+CD state, SEM:

a – fracture surface overview, where 1 – first crack zone, 2 – fracture area zone, 3 – break area zone;

b – border between zones 1 and 2;

c - the enlarged section of zone 1, as well as even further magnified image of the surface, illustrating the ductile nature of the fracture; d - the enlarged section of the zone 2, it demonstrates smaller, relatively to zone 1, size of the fracture dimples

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Научная литература по этой теме очень скудна, что делает данное исследование в некоторой степени уникальным. Общие требования к проводам приведеныв стандартах ISO 7801:1984, IEC 62641:2023, ISO 7802-2013, ГОСТ 10447-93, но они действуют независимо, не имея связи друг с другом. Вследствие этого было бы полезно выяснить, существует ли корреляция между пластичностью и способностью к навивам и перегибам, поскольку это позволило бы нам с большей точностью предсказать поведение алюминиевых материалов. Таким образом, дальнейшее обсуждение будет основано на вышеупомянутых стандартах. Результаты испытаний (таблица 2) были визуализированы на точечных диаграммах, представленных на рис. 4.

На рис. 4 показана заметная корреляция между испытаниями на перегибы (и навивы) и растяжение. Значение Т (рис. 4 а) демонстрирует определенную тенденцию к увеличению с увеличением пластичности образца. Повышенная пластичность образца дает возможность материалу накапливать большее количество деформации, тем самым увеличивая деформацию, которую образец может выдержать до первой трещины. Однако в области относительно низкой пластичности (ниже 3 %) значения Т исследуемых сплавов практически не различаются. Следует отметить, что значение Р в большинстве случаев имеет более высокое значение погрешности, показывая, что накопление деформации во время испытаний на изгиб происходит неравномерно (рис. 4 b). Это также означает, что поверхностные дефекты играют большую роль в значении Р по сравнению



Рис. 4. Соотношение количества перегибов и величины удлинения до разрушения:

**а** – до первой трещины, Т; **b** – до полного разрушения, Р.

Красные маркеры – состояние ЭМК, желтые маркеры – состояние НЛиП, зеленые маркеры – состояние ЭМКМ.

Круглые маркеры – сплавы в состоянии XB, треугольные маркеры – сплавы в состоянии XB после отжига при 230 °C в течение 1 ч, квадратные маркеры – сплавы в состоянии РКУП-К+ХВ,

в течение 1 ч, квиоритные мирлеры – стливы в состоянии 1 К 31- К  $+ \lambda D$ ,

ромбовидные маркеры – сплавы в состоянии РКУП-К+ХВ после отжига при 230 °С в течение 1 ч

[Планки погрешностей показывают значения в нескольких образцах в пределах одного состояния. Серые пунктирные линии показывают пороговые значения согласно IEC 62641:2023 и ISO 7801-1984]

**Fig. 4.** Number-of-bends and to elongation-to-failure plot:

**1g. 4.** Number-of-benus und to etonguiton-to-jutture pic

a – until the first crack, C; b – until complete failure, F.

Red markers – EMC state, yellow markers – CCR state, green markers – EMCM state.

Circle markers - alloys in CD state, triangle markers - alloys in CD and annealing at 230 °C for 1 h state,

square markers – alloys in ECAP-C+CD state, diamond markers – alloys in ECAP-C+CD and annealing at 230 °C for 1 h state

[The error bars show the error values in multiple samples within one state. Gray dotted lines show the thresholds according

to IEC 62641:2023 and ISO 7801-1984]

со значением Т. Зависимость значения Р от пластичности (в отличие от Т) заметна в области более низкой пластичности (ниже 3 %), где увеличение удлинения до разрушения коррелирует с увеличением значения Р. Однако в области более высокой пластичности такой корреляции не наблюдается.

Испытания, применяемые к исследуемым материалам, представляют три типа статических напряжений,

которым могут подвергаться материалы: растяжение, сжатие и сдвиг. Испытания на растяжение включают только растягивающее напряжение, в то время как испытания на изгиб включают как растягивающее, так и сжимающее напряжение, одновременно возникающее в противоположных областях образца [14]. Во время испытаний на изгиб и обмотку разрушение обычно происходит из-за превышения предела прочности на растяжение внешних областей образца. Это приводит к сколу или первой трещине, в которой происходит разрыв, а не к скольжению по определенным кристаллографическим плоскостям [15].

Таким образом, существует разница в схемах нагружения (простая против комплексной) и даже типе нагружения (динамический против статического) при испытаниях на изгиб (и навивы) и испытаниях на растяжение. Это радикальное различие не позволяет аналитически оценить взаимосвязь между ними, а это означает, что для комплексной оценки поведения проводов необходимо провести все три испытания, что делает установленную корреляцию строго экспериментальной.

Несмотря на отмеченную корреляцию, была обнаружена определенная аномалия, а именно поведение сплава ЭМКМ. Можно отметить, что большинство образцов соответствуют требованию минимального количества изгибов, равного 7 (согласно ISO 7801:1984) (рис. 4), за одним исключением, представляющим собой сплав ЭМКМ в состоянии РКУП-К+ХВ. Интересно, что ни один из образцов ЭМК или НЛиП не продемонстрировал столь низких значений Т и Р даже в состоянии РКУП-К+ХВ (таблица 2). Следует отметить, что образец ЭМКМ в состоянии РКУП-К+ХВ также не соответствовал требованиям на количество навивов (таблица 2).

Похоже, что сплав ЭМКМ в состоянии УМЗ (обеспечиваемом комбинированной обработкой РКУП-К и XB) накапливает деформацию гораздо быстрее, чем другие исследованные материалы и состояния. Поскольку излом образца ЭМКМ не является хрупким, причина, по которой образцы сплава ЭМКМ накапливают значительно большее количество структурных дефектов, кроется в их химическом составе: сплав ЭМКМ содержит медь, способную образовывать твердый раствор, кластеры, интерметаллидные частицы и сегрегации по границам зерен. Ионы Си в сплаве ЭМКМ попадают в твердый раствор и/или сегрегацию по границам зерен (подобно той, которая наблюдается в алюминиевом сплаве, содержащем Си, при аналогичной обработке) во время деформации. В [16] было показано, что подобная деформационная обработка может заставить атомы Си попасть в границы зерен, что приводит к образованию наноразмерных выделений Al<sub>x</sub>Cu<sub>v</sub> и значительному снижению пластических свойств материала. Подобный эффект также наблюдался в сплавах Al с нерастворимыми легирующими элементами, такими как Fe [17]. Хотя природа этого явления точно не установлена, оно наблюдается регулярно. В [9] было показано, что комбинированная обработка РКУП-К+ХВ формирует в сплаве ЭМКМ структурные особенности, которые не присутствуют в том же сплаве в состоянии ХВ. Таким образом, выявленное несоответствие между количеством перегибов и уровнем пластичности образцов проволоки из сплава ЭМКМ системы Al-Fe, дополнительно легированного медью, при испытаниях на растяжение, вероятнее всего, обусловлено миграцией ионов Си в зернограничные области. Этим эффектом можно объяснить и характерную неспособность проволоки из сплава ЭМКМ в состоянии РКУП-К+ХВ выдерживать навивы.

### выводы

В данной работе проведен анализ пластичности, способности к перегибам и способности к навивам проволок из сплавов систем Al–Fe и Al–Fe–Cu в состояниях XB и РКУП-К+XB.

1. Впервые исследованы проволоки из алюминиевых сплавов Al-0,5 вес. % Fe и Al-0,5 вес. % Fe-0,3 вес. % Cu, полученные методами интенсивной пластической деформации и подвергнутые испытаниям на перегибы и навивы. Установлено соответствие пластичности и способности к перегибам/навивам.

2. Показано, что пластичность низколегированных алюминиевых сплавов, таких как Al–0,5Fe, будет коррелировать со значением деформации. В сплавах с более высокой концентрацией легирующих элементов химический состав будет играть основную роль в определении пластических свойств. Сплавы с растворимыми элементами, такими как Cu, будут демонстрировать снижение пластичности и максимального количества перегибов и навивов при увеличении значения деформации.

3. Изученные образцы продемонстрировали корреляцию между увеличением удлинения до разрушения и максимальным количеством перегибов (до первой трещины в области высокой пластичности и до полного разрушения в области низкой пластичности), поэтому важно изучать каждую характеристику материала отдельно, учитывая потенциальную область применения получаемых проводов.

4. Наличие Си в сплавах Аl–Fe ускоряет накопление деформации, вызывая ускоренное разрушение образцов при испытаниях на перегибы и навивы, особенно после деформационной обработки, включающей РКУП-К. Однако термическая обработка позволяет уменьшить этот эффект.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Verma R.P., Kumar L.M. A short review on aluminium alloys and welding in structural applications // Materials Today Proceeding. 2021. Vol. 46. Part 20. P. 10687– 10691. DOI: <u>10.1016/j.matpr.2021.01.447</u>.
- Shuai Guoliang, Li Zhen, Zhang Diantao, Elhefnawey M., Li Li. On rough set theory on achieving high quality cable material production by green low carbon technology // Ecological Chemistry and Engineering S. 2021. Vol. 28. № 1. P. 49–59. DOI: <u>10.2478/eccs-2021-0005</u>.
- Wang Shuo, Hou Jiapeng, Li Chenghui et al. Dynamic fatigue damage behaviors and mechanisms of overhead transmission Al wires at elevated temperatures // International Journal of Fatigue. 2024. Vol. 188. Article number 108515. DOI: <u>10.1016/j.ijfatigue.2024.108515</u>.
- Kikuchi S., Matsuoka S., Yoshimura T., Ijiri M. Effect of natural aging by multifunction cavitation on plane bending fatigue behaviour of heat-treatable Al-Si7Mg aluminum alloys and its fatigue strength estimation // International Journal of Fatigue. 2024. Vol. 185. Article number 108352. DOI: 10.1016/J.IJFATIGUE.2024.108352.
- Hergul A.S., Yuce M., Ayaz M., Mese E. Investigation on aluminum alloys as winding materials for alternators in wind turbines // Emerging Materials Research. 2020. Vol. 9. № 3. P. 789–795. DOI: <u>10.1680/JEMMR.20.00096</u>.
- Said J., Garcin S., Fouvry S., Cailletaud G., Yang C., Hafid F. A multi-scale strategy to predict frettingfatigue endurance of overhead conductors // Tribology International. 2020. Vol. 143. Article number 106053. DOI: <u>10.1016/j.triboint.2019.106053</u>.

- 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. Vol. 19. P. 688–697. DOI: <u>10.1016/j.prostr.2019.12.075</u>.
- Yi Huang, Langdon T.G. Advances in ultrafine-grained materials // Materials Today. 2013. Vol. 16. № 3. P. 85– 93. DOI: <u>10.1016/J.MATTOD.2013.03.004</u>.
- Medvedev A.E., Zhukova O.O., Kazykhanov V.U., Shaikhulova A.F., Motkov M.M., Timofeev V.N., Enikeev N.A., Murashkin M.Yu. Unique properties of the Al-0.5Fe-0.3Cu alloy, obtained by casting into an electromagnetic crystallizer, after equal-channel angular pressing and cold drawing // Materials Physics and Mechanics. 2024. Vol. 52. № 3. P. 58–72. DOI: <u>10.18149/MPM.5232024 6</u>.
- 10. Jiang Hongxiang, Li Shixin, Zhang Lili, He Jie, Zheng Qiuji, Song Yan, Li Yanqiang, Zhao Jiuzhou. The influence of rare earth element lanthanum on the microstructures and properties of as-cast 8176 (A1-0.5Fe) aluminum alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2021. Vol. 859. Article number 157804. DOI: <u>10.1016/J.JALLCOM.2020.157804</u>.
- Chen Peng, Fan Xiangze, Yang Qingbo, Zhang Zhiqing, Jia Zhihong, Liu Qing. Creep behavior and microstructural evolution of 8030 aluminum alloys compressed at intermediate temperature // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 12. P. 1755– 1761. DOI: <u>10.1016/J.JMRT.2021.03.052</u>.
- 12. Жукова О.О., Медведев А.Е., Кирьянова К.Э., Медведев Е.Б., Мотков М.М. Свойства биметаллической проволоки с медной оболочкой и сердечником из сплава Al-0,5Fe-0,3Cu, полученного литьем в электромагнитный кристаллизатор // Materials. Technologies. Design. 2024. Т. 6. № 3. С. 27–33. DOI: 10.54708/26587572 2024 631827.
- Murashkin M., Medvedev A., Kazykhanov V., Krokhin A., Raab G., Enikeev N., Valiev R.Z. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafinegrained Al 6101 alloy processed via ECAP-conform // Metals (Basel). 2015. Vol. 5. № 4. P. 2148–2164. DOI: 10.3390/met5042148.
- 14. Hou Jia-Peng, Wang Qiang, Yang Hua-Jie, Wu Xi-Mao, Li Chun-He, Zhang Zhe-Feng, Li Xiao-Wu. Fatigue and Fracture behavior of a Cold-Drawn Commercially pure aluminum wire // Materials. 2016. Vol. 9. № 9. Article number 764. DOI: <u>10.3390/ma9090764</u>.
- Kuokkala V.T., Hokka M., Isakov M. Dynamic plasticity of metals // Dynamic Behavior of Materials: Fundamentals, Material Models, and Microstructure Effects. 2024. P. 15– 49. DOI: <u>10.1016/B978-0-323-99153-7.00005-0</u>.
- 16. Shuai Linfei, Huang Tianlin, Yu Tianbo, Wu Guilin, Hansen N., Huang Xiaoxu. Segregation and precipitation stabilizing an ultrafine lamellar-structured Al– 0.3%Cu alloy // Acta Materialia. 2021. Vol. 206. Article number 116595. DOI: <u>10.1016/j.actamat.2020.116595</u>.
- Медведев А.Е., Жукова О.О., Федотова Д.Д., Мурашкин М.Ю. Механические свойства, электропроводность и термостабильность проволоки из сплавов системы Аl–Fe, полученных литьем в электромагнитный кристаллизатор // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 3-1. С. 96–105. DOI: <u>10.18323/2782-4039-2022-3-1-96-105</u>.

## REFERENCES

- Verma R.P., Kumar L.M. A short review on aluminium alloys and welding in structural applications. *Materials Today Proceeding*, 2021, vol. 46, part 20, pp. 10687– 10691. DOI: <u>10.1016/j.matpr.2021.01.447</u>.
- Shuai Guoliang, Li Zhen, Zhang Diantao, Elhefnawey M., Li Li. On rough set theory on achieving high quality cable material production by green low carbon technology. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2021, vol. 28, no. 1, pp. 49–59. DOI: <u>10.2478/eccs-2021-0005</u>.
- Wang Shuo, Hou Jiapeng, Li Chenghui et al. Dynamic fatigue damage behaviors and mechanisms of overhead transmission Al wires at elevated temperatures. *International Journal of Fatigue*, 2024, vol. 188, article number 108515. DOI: <u>10.1016/j.ijfatigue.2024.108515</u>.
- Kikuchi S., Matsuoka S., Yoshimura T., Ijiri M. Effect of natural aging by multifunction cavitation on plane bending fatigue behaviour of heat-treatable Al-Si7Mg aluminum alloys and its fatigue strength estimation. *International Journal of Fatigue*, 2024, vol. 185, article number 108352. DOI: <u>10.1016/J.IJFATIGUE.2024.108352</u>.
- Hergul A.S., Yuce M., Ayaz M., Mese E. Investigation on aluminum alloys as winding materials for alternators in wind turbines. *Emerging Materials Research*, 2020, vol. 9, no. 3, pp. 789–795. DOI: <u>10.1680/JEMMR.20.00096</u>.
- Said J., Garcin S., Fouvry S., Cailletaud G., Yang C., Hafid F. A multi-scale strategy to predict frettingfatigue endurance of overhead conductors. *Tribology International*, 2020, vol. 143, article number 106053. DOI: <u>10.1016/j.triboint.2019.106053</u>.
- 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, vol. 19, pp. 688–697. DOI: <u>10.1016/j.prostr.2019.12.075</u>.
- Yi Huang, Langdon T.G. Advances in ultrafine-grained materials. *Materials Today*, 2013, vol. 16, no. 3, pp. 85– 93. DOI: <u>10.1016/J.MATTOD.2013.03.004</u>.
- Medvedev A.E., Zhukova O.O., Kazykhanov V.U., Shaikhulova A.F., Motkov M.M., Timofeev V.N., Enikeev N.A., Murashkin M.Yu. Unique properties of the Al-0.5Fe-0.3Cu alloy, obtained by casting into an electromagnetic crystallizer, after equal-channel angular pressing and cold drawing. *Materials Physics and Mechanics*, 2024, vol. 52, no. 3, pp. 58–72. DOI: <u>10.18149/MPM.5232024\_6</u>.
- 10. Jiang Hongxiang, Li Shixin, Zhang Lili, He Jie, Zheng Qiuji, Song Yan, Li Yanqiang, Zhao Jiuzhou. The influence of rare earth element lanthanum on the microstructures and properties of as-cast 8176 (A1-0.5Fe) aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 859, article number 157804. DOI: <u>10.1016/J.JALLCOM.2020.157804</u>.
- 11. Chen Peng, Fan Xiangze, Yang Qingbo, Zhang Zhiqing, Jia Zhihong, Liu Qing. Creep behavior and microstructural evolution of 8030 aluminum alloys compressed at intermediate temperature. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 12, pp. 1755–1761. DOI: <u>10.1016/J.JMRT.2021.03.052</u>.
- 12. Zhukova O.O., Medvedev A.E., Kiryanova K.E., Medvedev E.B., Motkov M.M. Properties of bimetallic wire with copper sheath and Al-0.5Fe-0.3Cu alloy core

obtained by casting in an electromagnetic crystallizer. *Materials. Technologies. Design*, 2024, vol. 6, no. 3, pp. 27–33. DOI: <u>10.54708/26587572\_2024\_631827</u>.

- Murashkin M., Medvedev A., Kazykhanov V., Krokhin A., Raab G., Enikeev N., Valiev R.Z. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafinegrained Al 6101 alloy processed via ECAP-conform. *Metals (Basel)*, 2015, vol. 5, no. 4, pp. 2148–2164. DOI: <u>10.3390/met5042148</u>.
- 14. Hou Jia-Peng, Wang Qiang, Yang Hua-Jie, Wu Xi-Mao, Li Chun-He, Zhang Zhe-Feng, Li Xiao-Wu. Fatigue and Fracture behavior of a Cold-Drawn Commercially pure aluminum wire. *Materials*, 2016, vol. 9, no. 9, article number 764. DOI: <u>10.3390/ma9090764</u>.
- Kuokkala V.T., Hokka M., Isakov M. Dynamic plasticity of metals. *Dynamic Behavior of Materials: Fundamentals, Material Models, and Microstructure Effects*, 2024, pp. 15–49. DOI: <u>10.1016/B978-0-323-99153-7.00005-0</u>.
- Shuai Linfei, Huang Tianlin, Yu Tianbo, Wu Guilin, Hansen N., Huang Xiaoxu. Segregation and precipitation stabilizing an ultrafine lamellar-structured Al– 0.3%Cu alloy. *Acta Materialia*, 2021, vol. 206, article number 116595. DOI: <u>10.1016/j.actamat.2020.116595</u>.
- Medvedev A.E., Zhukova O.O., Fedotova D.D., Murashkin M.Yu. The mechanical properties, electrical conductivity, and thermal stability of a wire made of Al–Fe alloys produced by casting into an electromagnetic crystallizer. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 3-1, pp. 96–105. DOI: <u>10.18323/2782-4039-2022-3-1-96-105</u>.

## Ductility, bending and wrapping ability relationship in wires made of electromagnetically cast ultrafine grained Al-0.5Fe and Al-0.5Fe-0.3Cu alloys

Andrey E. Medvedev\*<sup>1,3</sup>, PhD (Physics and Mathematics), senior researcher

Olga O. Zhukova<sup>1,4</sup>, engineer-researcher

Darya D. Fedotova<sup>1,5</sup>, master, 4th category operator

of the Research Laboratory "Metals and Alloys under Extreme Conditions"

Elvira D. Khafizova<sup>1,6</sup>, PhD<sub>27</sub> (Physics and Mathematics), senior researcher

Mikhail M. Motkov<sup>2,7</sup>, PhD (Engineering), senior researcher

Maxim Yu. Murashkin<sup>1,8</sup>, PhD (Engineering), senior researcher

<sup>1</sup>Ufa University of Science and Technology, Ufa (Russia) <sup>2</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk (Russia)

\*E-mail: medvedevandreyrf@gmail.com

<sup>3</sup>ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0002-8616-0042</u> <sup>4</sup>ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0002-1879-9389</u> <sup>5</sup>ORCID: <u>https://orcid.org/0009-0000-7526-8309</u> <sup>6</sup>ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0002-4618-412X</u> <sup>7</sup>ORCID: <u>https://orcid.org/0009-0007-1272-3993</u> <sup>8</sup>ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0001-9950-0336</u>

Received 20.03.2025

### Revised 10.04.2025

Accepted 28.04.2025

*Abstract:* The research status on such functional properties, as bending capability, wrapping capability and ductility of conductive Al–Fe and Al–Fe–Cu alloys wires is uncertain. Bending and wrapping capability is determined by the industrial standards while no attempts were made to study the relation between them and ductility of the Al alloys wires, paying even less attention to the ultrafine-grained Al-based wires, produced by electromagnetic casting and equal-channel angular pressing. In this study alloys with two different chemical compositions (Al–0.5 wt. % Fe and Al–0.5 wt. % Fe–0.3 wt. % Cu) and two different casting methods (casting into electromagnetic mold and continuous casting and rolling) were used. Part of the wires for the study was prepared by cold drawing (CD), the other part – by the combination of the equal-channel angular pressing by the Conform scheme and cold drawing (ECAP-C+CD) to obtain coarse grained (CG) and ultrafine grained (UFG) structures, respectively. Annealing at 230 °C for 1 h was carried out to evaluate the thermal stability of the wires. It was shown that the correlation between ductility (elongation to failure), number of wraps and number of bends (both before the first crack and before complete failure of the specimen) may differ depending on the deformation value, deformation scheme, and amount of alloying elements of the alloy wire, as well as ability to form solid solutions.

*Keywords:* Al alloy; Al–Fe; Al–Fe–Cu; electromagnetic casting; continuous casting and rolling; equal-channel angular pressing; cold drawing; elongation to failure; ductility; wire bending; wire wrapping; fracture analysis.

Acknowledgments: The work was supported by the Russian Science Foundation, grant number 20-79-10133, https://rscf.ru/project/20-79-10133/.

The research part of the work was carried out on the equipment of the Core Facility Centre "Nanotech" of Ufa University of Science and Technology.

The authors express their gratitude to Professor V.N. Timofeev (Siberian Federal University) for providing the research material.

*For citation:* Medvedev A.E., Zhukova O.O., Fedotova D.D., Khafizova E.D., Motkov M.M., Murashkin M.Yu. Ductility, bending and wrapping ability relationship in wires made of electromagnetically cast ultrafine grained Al–0.5Fe and Al–0.5Fe–0.3Cu alloys. *Frontier Materials & Technologies*, 2025, no. 2, pp. 29–38. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-2-72-3.