



ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРСПЕКТИВНОГО ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ПРОВОДНИКА ИЗ НАНОСТРУКТУРНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

STRENGTH ESTIMATION OF A PROSPECTIVE TWO-COMPONENT CONDUCTOR MADE OF NANOSTRUCTURAL ALUMINUM ALLOYS BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Е.А.Климов¹, магистр, (ORCID: 0000-0002-9559-0191), М.Ю.Мурашкин^{1,2}, к.т.н., ст. науч. сотр.,
(ORCID: 0000-0001-9950-0336) / k1e2a3@mail.ru
E.A.Klimov¹, Master, M.Yu.Murashkin^{1,2}, Cand. of Sci. (Technical), Senior Researcher

DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.2.150.158

Получено: 30.11.2020 г.

В работе методом конечных элементов проведена оценка рациональной конструкции перспективного двухкомпонентного проводника, выполненного изnanoструктурных алюминиевых сплавов для обеспечения необходимого уровня прочности.

In this paper the finite element method is used to assess the rational design of a prospective two-component conductor made of nanostructured aluminum alloys to ensure the required level of strength.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминий является вторым после меди техническим проводником по значению электропроводности. Поэтому закономерно, что использование алюминия и сплавов на его основе в качестве электрических проводников в последнее десятилетие значительно расширяется, уже составляя более 10% в общей структуре потребления алюминия в мире [1, 2]. Благодаря сочетанию малого веса, хорошей электропроводности и технологической пластичности, а также высокой стойкости к атмосферной коррозии, алюминий и ряд сплавов на его основе находят все большее применение в энергосистемах и электрических сетях, в том числе в наземном и воздушном транспорте [1–5], вытесняя более тяжелые и дорогие медные проводниковые материалы. Для прогресса в этом направлении

необходимо решить сложную проблему создания новых проводниковых материалов на основе алюминия, обладающих прочностными характеристиками, сопоставимыми с их медными аналогами, а также электропроводностью, близкой к чистому алюминию.

В настоящее время активно проводятся изыскания, направленные на создание высокопрочных проводников за счет разработки новых сплавов и композитов на основе алюминия, а также методов их обработки [6–10].

Исследования последних лет показали, что весьма эффективным подходом, позволяющим кардинально улучшить свойства проводниковых алюминиевых сплавов, является формирование в них регламентированных nanoструктурных состояний, используя методы интенсивной пластической

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет / Ufa State Aviation Technical University.

² Санкт-Петербургский государственный университет / Saint Petersburg State University.



деформации (ИПД) [11–13]. С целью дальнейшего улучшения комплекса свойств наноструктурных сплавов в настоящее время проводятся исследования по созданию на их основе двухкомпонентных проводников, например, таких как Al/Al, Al/Fe или Cu/Al, при обработке которых используют такой метод ИПД, как равноканальное угловое прессование (РКУП) [14–16]. Однако подбор в таких проводниках оптимального соотношения, токопроводящего и армирующего материалов, осуществляется в ходе выполнения натурных экспериментов, является весьма длительной, технически сложной и затратной процедурой. В данной работе представлен пример использования цифровых технологий – моделирования методом конечных элементов (КЭ), для определения рациональной конструкции двухкомпонентного проводника, выполненного из наноструктурных алюминиевых сплавов, для обеспечения необходимого уровня прочности.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материалов исследования использовали сплав 6101 стандартного химического состава (0,59Mg, 0,54Si, 0,07Fe, примесей не более 0,01 мас. %, ост. Al), а также алюминий электротехнического назначения марки 1350 (99,5 мас. %Al), полученные традиционным методом совмещенного литья и прокатки в виде длинномерных прутков (катанки) диаметром 12 мм.

Формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры с заданными наноразмерными параметрами в проволоке из выбранных сплавов осуществляли методом РКУП по схеме Конформ (РКУП-К) и последующим холодным волочением (ХВ) [12, 13].

Механические испытания проволоки на растяжение осуществляли в соответствии

с требованиями ГОСТ 10446-80 на испытательной машине Shimadzu AG-XD. Определение удельного электрического сопротивления производили по ГОСТ 7229-76 с использованием микроомметра БС3-010-2.

Исследования микроструктуры методом просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе фирмы Jeol JEM-2100 с ускоряющим напряжением 200 кВ

Для определения предела прочности (s_b) двухкомпонентных образцов применяли симуляцию испытаний на растяжение методом конечных элементов (КЭ) с помощью программного комплекса Computer-Aided Engineering (CAE).

При проведении моделирования оценки величины s_b методом КЭ использовали:

- модель – твердое тело, материал сердечника – сплав 1350, материал обоймы – сплав 6101 системы Al-Mg-Si;
- временной инкремент – автошаг;
- сетку на твердом теле: точки Якобиана – 4 с максимальным 1-мм и минимальным 0,2-мм размером элемента.

Моделирование испытания на растяжение проводили для цилиндрических заготовок двухкомпонентного образца из алюминиевых сплавов: сердечник диаметром от 4 до 1 мм, обойма с внешним диаметром 5 мм, длина рабочей части – 150 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате обработки методом РКУП-К в катанке сплавов 1350 и 6101 формируется однородная УМЗ-структура со средним размером зерен 1200 и 670 нм, соответственно, имеющих форму, близкую к равновесной. В процесс ИПД образование УМЗ-зерен

INTRODUCTION

Aluminum is the second conductor after copper in terms of electrical conductivity. Therefore, it is natural that the use of aluminum and aluminum-based alloys as electrical conductors in the last decade has expanded significantly, already accounting for more than 10% of the total consumption of aluminum in the world [1, 2]. Due to a combination of low weight, good electrical conductivity and technological plasticity, as well as high resistance

to atmospheric corrosion, aluminum and a number of aluminum-based alloys are increasingly used in power systems and electrical networks, including land and air transport [1–5], displacing heavier and more expensive copper conductor materials. To move forward in this direction, it is necessary to solve a complicated problem of creating new conductive materials based on aluminum, which have strength characteristics comparable to their copper counterparts, as well as

electrical conductivity close to pure aluminum.

Nowadays, intensive research is underway to develop high-strength conductors by creating new alloys and composites based on aluminum, as well as methods of their processing [6–10].

Recent studies have shown that a very effective approach, which allows to dramatically improve properties of conductive aluminum alloys, is the formation of regulated nanostructural states in them using

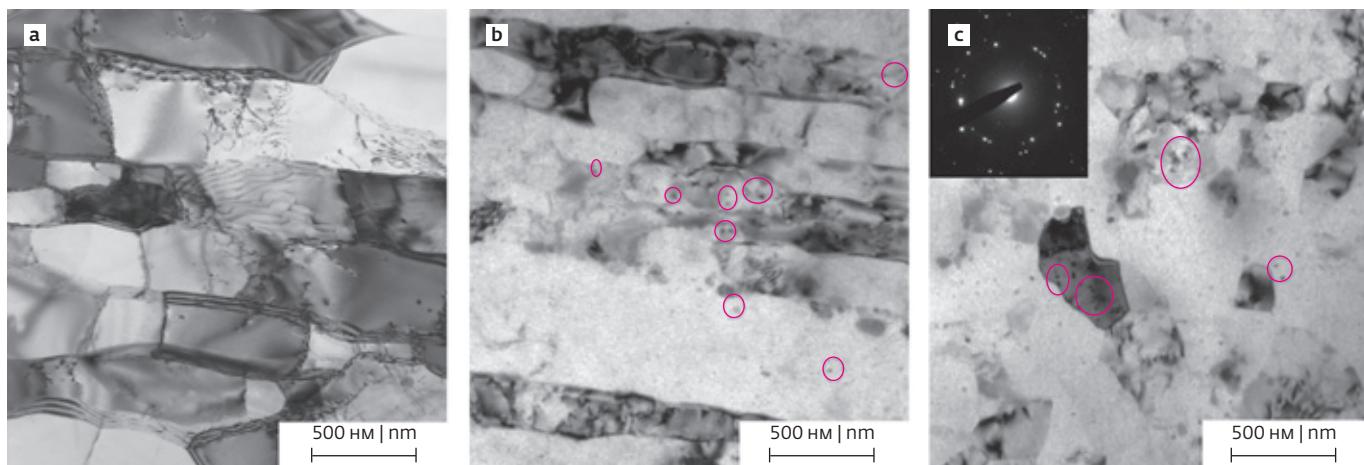


Рис.1. УМЗ-структура, сформированная в образцах проволоки в результате обработки, включающей ИПД: сплава 1350 и 6101 в продольном сечении (а, б) и сплава 6101 в поперечном сечении (с)

Fig.1. UFG structure formed in wire samples as a result of processing including SPD: 1350 and 6101 alloys in the longitudinal section (a, b) and 6101 alloy in the cross section (c)

в сплаве 6101 сопровождается выделением из алюминиевого твердого раствора наноразмерных частиц упрочняющей фазы Mg_2Si вследствие деформационного старения. Данные изменения микроструктуры характерны для алюминиевых сплавов, подвергнутых ИПД [11–13]. Последующее ХВ приводит к образованию вытянутых вдоль оси волочения зерен (рис.1а, б). Их ширина в проволоке сплавов 1350 и 6101 составляет 350...600 нм и 150...300 нм соответственно. В поперечном же сечении холоднотянутой проволоки наблюдаются равноосные зерна того же диапазона размеров (рис.1с).

В результате ХВ наноразмерные частицы Mg_2Si фазы не претерпевают сколь либо заметных изменений формы и размеров, располагаются вдоль оси волочения (рис.1б), преимущественно вдоль сформированных в процессе ИПД границ зерен. Вид картины электронной дифракции (рис.1с) свидетельствует о том, что сформированные в проволоке материалы исследования в результате обработки РКУП-К- и ХВ-микроструктуры с наноразмерными выделениями частиц упрочняющей фазы относятся к структуре зеренного типа, образованной сеткой преимущественно высокоглавых границ.

the methods of severe plastic deformation (SPD) [11–13]. In order to further improve the complex of properties of nanostructured alloys, studies are currently underway to create two-component conductors on their basis, for example, such as Al/Al, Al/Fe or Cu/Al, in the processing of which such SPD methods are used as equal channel angular pressing (ECAP) [14–16]. However, the selection of the optimal ratio of conductive and reinforcing materials in such conductors, carried out in the course of full-scale experiments, is a very long, technically complex and costly procedure. This paper presents an example of the use of digital

technologies – finite element modeling (FEM) to determine the rational design of a two-component conductor made of nanostructured aluminum alloys to ensure the required level of strength.

RESEARCH METHODS

The materials used in this research were alloy 6101 of standard chemical composition (0.59Mg, 0.54Si, 0.07Fe, impurities not exceeding 0.01 wt%, rest Al) as well as aluminum for electrical purposes, grade 1350 (99.5 wt% Al), obtained by the traditional method of combined casting and rolling in the form of 12 mm dia. long rods (wire rod).

Formation of an ultrafine-grained (UFG) structure with specified nanoscale parameters in a wire made of the selected alloys was carried out by the ECAP method according to the Conform scheme (ECAP-K) followed by cold drawing (CD) [12, 13].

Mechanical tensile tests of the wire were carried out on a Shimadzu AG-XD testing machine in accordance with the requirements of GOST 10446-80. Specific electrical resistance was measured by a BSZ-010-2 microohmmeter according to GOST 7229-76.

Microstructure studies were accomplished by transmission electron microscopy on a Jeol

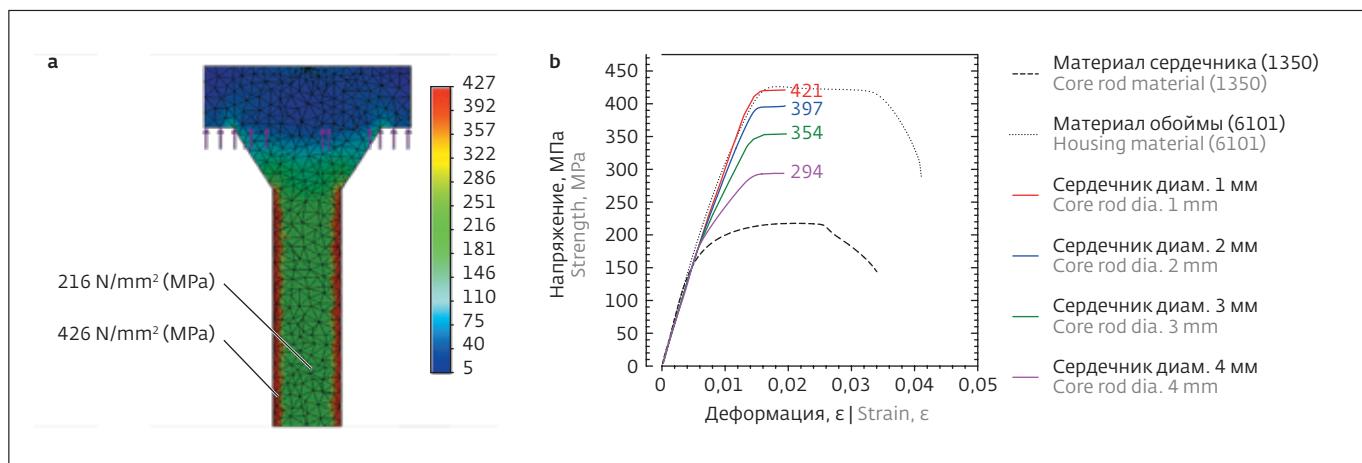


Рис.2. Эпюра напряжений с отображением разреза сетки конечных элементов (а); диаграмма растяжения, полученная в результате симуляции испытаний (б) двухкомпонентного проводника

Fig.2. Stress diagram displaying a section of the mesh of finite elements (a); tensile diagram obtained from a simulation test (b) of a two-component conductor

В результате формирования описанной выше микроструктуры предел прочности проволоки сплава 1350 и 6101 составил 218 ± 4 и 426 ± 5 МПа (рис.2а). При этом проволока демонстрировала достаточно высокую пластичность ($\geq 4\%$). Электропроводность проволоки сплавов 1350 и 6101 составила 61,1 и 51,2% IACS соответственно.

Анализ полученных экспериментально результатов показал, что формирование УМЗ-структуры с наноразмерными частицами позволило достичь в проволоке алюминиевого сплава 6101 значений прочности, превышающих

соответствующие значения проволоки, выполненной из медных сплавов [11]. Однако уровень электропроводности высокопрочной проволоки недостаточен.

Как было отмечено выше, одним из путей, позволяющих эффективно управлять комплексом свойств, в том числе электропроводностью, является создание двухкомпонентных проводников, в которых подбор содержания компонентов, обеспечивающих прочность или электропроводность, производится в результате физического эксперимента [15, 16].

JEM-2100 microscope with an accelerating voltage of 200 kV.

The ultimate strength (s_B) of two-component samples was determined by simulating tensile tests with the aid of the finite element method (FEM) and Computer-Aided Engineering (CAE) software package.

When modeling the s_B value by the FEM use was made of:

- model - solid, core material - alloy 1350, cage material - alloy 6101 of the Al-Mg-Si system;
- time increment - auto-step;
- mesh on a solid: four Jacobian points with a maximum (1 mm)

and a minimum (0.2 mm) element size;

The tensile test was simulated on cylindrical billets of a two-component sample made of aluminum alloys: a core diameter of 4 to 1 mm, a 5 mm outer diameter holder and a 150 mm long working section.

RESULTS

As a result of processing by the ECAP-K method, a uniform UFG structure is formed in the wire rod of 1350 and 6101 alloys with an average grain size of 1200 and 670 nm respectively, having a shape close to equiaxial. During SPD a formation

of UFG grains in 6101 alloy is accompanied by precipitation of nanosized particles of the Mg_2Si phase strengthening from the aluminum solid solution due to strain aging. These changes in the microstructure are characteristic of the aluminum alloys subjected to SPD [11-13]. Subsequent cold drawing (CD) leads to formation of the grains elongated along the drawing axis (Fig.1a, b). Their width in the wire of 1350 and 6101 alloys is 350...600 nm and 150...300 nm, respectively. In the cold-drawn wire cross section the equiaxed grains of the same size range are observed (Fig.1c).

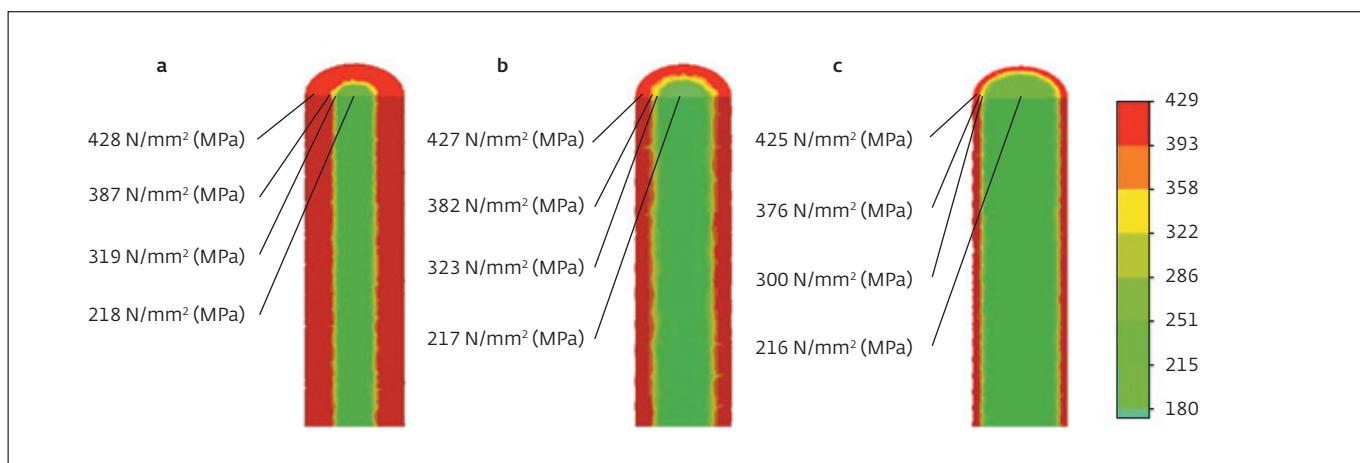


Рис.3. Эпюра напряжения двухкомпонентного проводника, продольно-поперечное сечение, с диаметром сердечника: 1 (а); 3 (б) и 4 (с) мм

Fig.3. Stress diagram of a two-component conductor, a longitudinal-cross section with a core diameter: 1 (a); 3 (b) and 4 (c) mm

Для создания проводника на основе алюминия, обладающего прочностью, сопоставимой с их медными аналогами (≥ 400 МПа), были проведены симуляции испытаний на растяжение двухкомпонентной алюминиевой проволоки методом КЭ, по результатам которых определяли значения s_B в зависимости от соотношения площадей сердечника, выполненного из сплава 1350 с высокой электропроводностью и высокопрочной обоймы из сплава 6101. Перед началом симуляции были установлены все необходимые свойства сплавов, требуемые для соответствующего анализа, в том числе кривые напряжения-деформации для каждого из них, а также подобран

оптимальный размер сетки для проведения анализа (рис.2а).

Для описания поведения материала использована модель Мизеса. Критерий текучести представлен в виде:

$$F = \sqrt{3\sigma - \sigma_y} = 0, \quad (1)$$

где σ – эффективное напряжение; σ_y – напряжение текучести из испытаний. Свойства материала, в частности модуль упругости, предел текучести и пр., получены, из диаграммы напряжения-деформации. Симуляция испытания на растяжения

As a result of CD, the nano-sized particles of the Mg₂Si phase do not undergo any noticeable changes in shape and size; they are located along the drawing axis (Fig.1b), mainly along the grain boundaries formed by SPD. The appearance of the electron diffraction pattern (Fig.1c) indicates that the microstructures formed in the wire of the studied materials as a result of ECAP-K and CD treatment with nano-sized precipitates of particles of the hardening phase belong to a grain-type structure formed, predominantly, by a mesh of high-angle boundaries.

As a result of the described above microstructure formation, the ultimate strength of the 1350 and 6101 alloys wire was 218±4 MPa and 426±5 MPa (Fig.2a). In this case, the wire showed a fairly high plasticity ($\geq 4\%$). The electrical conductivity of the wire in 1350 and 6101 alloys was equal to 61.1 and 51.2% IACS, respectively.

An analysis of the experimental results has proved that formation of an UFG structure with nanosized particles made it possible to achieve strength values in a wire of an aluminum 6101 alloy that exceeds the corresponding values of a wire made of copper alloys [11]. However,

the conductivity level of high-strength wire is not high enough.

As noted above, one of the ways to effectively control a set of properties, including electrical conductivity, is to create two-component conductors wherein the content of components providing strength or electrical conductivity is selected by results of a physical experiment [15, 16].

To create an aluminum-based conductor with a strength comparable to their copper counterparts (≥ 400 MPa), simulations of tensile tests of a two-component aluminum wire by the FEM were carried out and their results were used to



композитного образца рассматривалась как нелинейная задача. Методом управления анализа является приращение нагрузки по алгоритму Ньютона – Рафсона. В качестве схемы окончания анализа применяется сходимость силы:

$$|\mathbf{t}+\Delta t[\mathbf{R}] - \mathbf{t}+\Delta t[\mathbf{F}]^{(i)}| < \epsilon_f |\mathbf{t}+\Delta t[\mathbf{R}] - \mathbf{t}[\mathbf{F}]|, \quad (2)$$

где $\mathbf{t}+\Delta t[\mathbf{R}]$ – вектор внешних приложенных узловых нагрузок; $\mathbf{t}+\Delta t[\mathbf{F}]$ – вектор внутренних образующихся в узлах сил; Δt – временной шаг.

На рис.3 представлены эпюры напряжений при симуляции растяжения двухкомпонентных алюминиевых образцов с разным соотношением диаметров обоймы и сердечника. Диаметр обоймы составил 5 мм, диаметр сердечника варьировался от 1 до 4 мм. По результатам моделирования установлены пределы прочности двухкомпонентной наноструктурной проволоки, которые варьировались от 294 до 421 МПа в зависимости от диаметра сердечника (рис.2б).

ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что формирование УМЗ-структур, содержащей наноразмерные частицы упрочняющей фазы Mg₂Si в образцах проволоки сплава 6101 системы Al-Mg-Si, позволяет реализовать в ней высокопрочное состояние ($s_B = 426$ МПа). Достигнутый уровень прочности превосходит прочность ряда проводников, выполненных из материалов на основе меди [11]. Измельчение микроструктуры также позволило достичь хорошей прочности

($s_B = 218$ МПа) в алюминии марки 1350, сохранив электропроводность на высоком уровне (61,1% IACS). Экспериментально полученные результаты свидетельствуют, что микроструктурный дизайн электротехнических материалов, широко используемых в различных отраслях электротехники, реализованный путем их обработки, сочетающей метод ИПД и традиционные операции обработки металлов давлением – ХВ, может привести к значительному улучшению свойств, например прочности.

Дальнейшее улучшение баланса физико-механических свойств возможно при исследовании двухкомпонентного проводника на базе изученных материалов.

Моделирование процесса растяжения двухкомпонентного проводника позволило установить зависимость предела прочности от диаметра сердечника (рис.4), согласно которому для создания двухкомпонентных проводников диаметром 5 мм, обеспечивающих прочность около 400 МПа на уровне, сопоставимом с медными сплавами, диаметр сердечника должен быть 1–2 мм.

На основании результатов расчета s_B методом КЭ двухкомпонентного образца, состоящего из сердечника и обоймы, была получена следующая эмпирическая зависимость:

$$\sigma_B(\text{пр}) = \sigma_B(\text{об}) \times \frac{S(\text{об})}{S(\text{пр})} + \sigma(\text{серд}) \times \frac{S(\text{серд})}{S(\text{пр})}, \quad (3)$$

где $\sigma_B^{(\text{об})} > \sigma_B^{(\text{серд})}$ и $\delta_p^{(\text{об})} \geq \delta_p^{(\text{серд})}$.

determine the values of s_B depending on the ratio of the areas of the core made of 1350 alloy with high electrical conductivity and high-strength 6101 alloy. Before simulation, all necessary alloys properties required for the corresponding analysis were established, including the stress-strain curves for each of them and selection of the optimal mesh size for the analysis (Fig.2a).

The Mises model is used to describe the behavior of the material. The yield criterion is presented as:

$$F = \sqrt{3\sigma - \sigma_y} = 0, \quad (1)$$

where σ is the effective stress and σ_y is the yield stress obtained in the tests. Material properties, in particular, modulus of elasticity, yield stress, etc. were obtained from the stress-strain diagram. Simulation of a tensile test on a composite specimen was considered as a non-linear problem. The analysis control method is the load increment according to the Newton-Raphson algorithm. The convergence of the force is used as a scheme for finishing the analysis:

$$|\mathbf{t}+\Delta t[\mathbf{R}] - \mathbf{t}+\Delta t[\mathbf{F}]^{(i)}| < \epsilon_f |\mathbf{t}+\Delta t[\mathbf{R}] - \mathbf{t}[\mathbf{F}]|, \quad (2)$$

here $\mathbf{t}+\Delta t[\mathbf{R}]$ is the vector of external applied nodal loads, $\mathbf{t}+\Delta t[\mathbf{F}]$ is the vector of internal forces generated at the nodes, Δt is the time step.

Figure 3 illustrates the stress plots for simulation of tension of two-component aluminum specimens with different ratios of the yoke and core diameters. The ferrule diameter was 5 mm, the core diameter varied from 1 to 4 mm. Based on the simulation results, the strength limits of a two-component nanostructured wire were established, which varied from 294 to 421 MPa depending on the core diameter (Fig.2b).

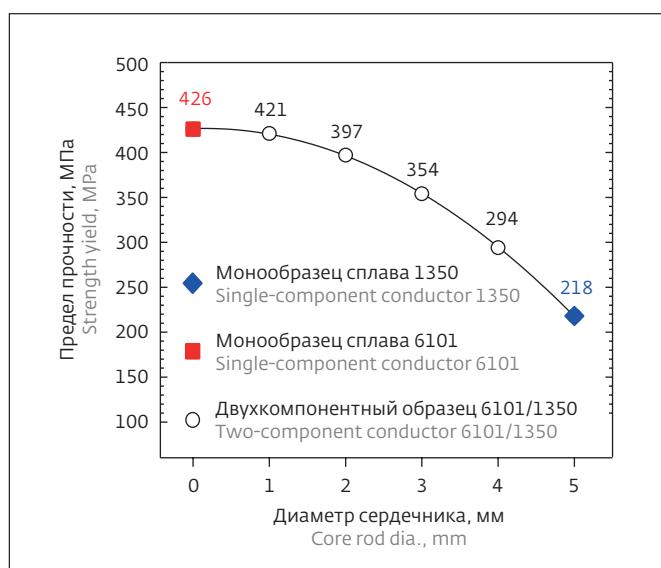


Рис.4. Зависимость предела прочности от диаметра сердечника двухкомпонентного проводника диаметром 5 мм
Fig.4. Dependence of the ultimate strength on the core diameter of a two-component 5 mm dia. conductor

Если $\delta_p^{(об)} < \delta_p^{(серд)}$, то $\sigma_B^{(об)}$ необходимо интерполировать по диаграмме растяжения, полученной экспериментально, где $\delta_p = \Delta l/l$ – равномерная деформация при растяжении; S – площадь сечения; σ_B – предел прочности материала.

ВЫВОДЫ

В работе с помощью симуляции испытаний на растяжение методом конечных элементов

DISCUSSION

It is shown that the formation of an UFG structure containing nanosized particles of the strengthening phase Mg₂Si in the wire samples of the 6101 alloy of the Al-Mg-Si system makes it possible to realize a high-strength state in it ($s_B = 426$ MPa). The achieved level of strength exceeds the strength of a number of conductors made of copper-based materials [11]. Microstructure refinement also made it possible to achieve good strength ($s_B = 218$ MPa) in 1350 aluminum, while maintaining the electrical conductivity

at a high level (61.1% IACS). The experimentally obtained results indicate that the microstructural design of electrical materials, widely used in various branches of electrical engineering, implemented by processing them and combining the SPD method and CD traditional metal forming can lead to a significant improvement of its properties, for example, strength.

Further improvement of the physical and mechanical properties balance is possible by a study of the two-component conductor on the basis of the research materials.

проведена оценка рациональной конструкции двухкомпонентного проводника в виде проволоки, выполненной из наноструктурного высокопрочного сплава 6101 и алюминия электротехнического алюминия марки 1350.

По результатам проведенного анализа методом КЭ установлено, что для создания двухкомпонентного проводника, состоящего из высокопрочной оболочки (сплав 6101) и сердечника (сплав 1350) с повышенной электропроводностью, обеспечивающих прочность ≥ 400 МПа на уровне, сопоставимом с медными сплавами, необходимо выполнение условия $S_{(серд)}/S_{(пр)} \leq 0,16$.

Произведенные расчеты по результатам симуляции испытаний позволили вывести эмпирическую зависимость для расчета предела прочности двухкомпонентного проводника, которая может применяться и для других двухкомпонентных систем, выполненных из металлов и сплавов как электротехнического, так и конструкционного назначения.

БЛАГОДАРНОСТИ

М.Ю.Мурашкин благодарит РНФ за финансовую поддержку проекта №17-19-01311.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Aluminium Alloys – New Trends in Fabrication and Application. Z. Ahmad (Ed.) Intech, 2012, p. 359.
2. Белый Д.И. Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий // Кабели и провода. 2012. № 1(332). С. 8-14.

Modeling the tensile process of a two-component conductor made it possible to establish a dependence of the ultimate strength on the core diameter (see Fig.4) which defines that the core diameter should be 1-2 mm in order to create 5 mm dia. two-component conductors providing for a strength of about 400 MPa at a level comparable to copper alloys.

Based on the results of s_B calculation, by means of the FEM, of a two-component sample consisting of a core and a cage, the following empirical dependence was obtained:



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Головин Д.Ю., Тюрин А.И.,
Самодуров А.А., Дивин А.Г.,
Головин Ю.И.

Динамические термографические методы неразрушающего экспресс-контроля

Под общей редакцией Ю.И. Головина

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 214 с.
ISBN 978-5-94836-580-0

Цена 636 руб.

В книге кратко описано современное состояние тепловой технической диагностики и неразрушающего контроля материалов и крупногабаритных изделий по данным как отечественных, так и зарубежных (преимущественно) публикаций. Более подробно рассмотрен ряд новых инфракрасных бесконтактных методов экспресс-контроля качества материалов и изделий, не требующих вырезки и специальной подготовки образцов из материала или изделия.

Описаны наиболее развитые методы динамического лазерного нагрева и инфракрасной термографии (как хорошо известные и внесенные в стандарты РФ и зарубежных стран, так и новейшие, реализуемые с помощью высокоразрешающих тепловизоров и оригинального программного обеспечения).

Особое внимание уделено неразрушающим экспресс-методам определения теплофизических характеристик и диагностики состояния крупногабаритных объектов, позволяющим использовать их в производственных и полевых условиях.

Приведен ряд оригинальных результатов измерения температуропроводности широкого спектра материалов (пластиков, композитов, керамики, монокристаллов, прозрачных элементов силовой оптики, металлов и сплавов), а также теплового неразрушающего контроля объектов с модельными трещинами, расслоениями, дефектами покрытий в условиях одностороннего доступа к объекту контроля.

Книга написана коллективом авторов, представляющих три организации – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина и Тамбовский государственный технический университет, имеющие опыт и компетенции в физике твердого тела, материаловедении и приборостроении.

Книга будет интересна инженерам-разработчикам, производственникам, студентам, обучающимся по специальностям: 03.04.01. – Прикладные математика и физика; 04.04.02. – Химия, физика и механика материалов; 12.04.03. – Фотоника и оптоинформатика; 13.04.01. – Теплоэнергетика и теплотехника; 14.04.01. – Ядерная энергетика и теплофизика; 16.04.01. – Техническая физика; 22.04.02. – Металлургия.

Экспериментальная часть работы и математическое моделирование динамических тепловых процессов выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 15-19-00181, с привлечением оборудования Центра коллективного пользования и Наноцентра Тамбовского государственного университета имени Г.Р. Державина.

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosphera.ru
sales@ technosphera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphera.ru

3. Miller W.S., Zhuang L., Bottema J. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry // Materials Science and Engineering A. 2000. V. 280. PP. 37-49.
4. Матвеев Ю.А., Гаврилова В.П., Баранов В.В. Легкие проводниковые материалы для авиа-проводов // Кабели и провода. 2006. № 5(300). С. 22-23.
5. Cui X., Wu Y., Zhang G. Study on the improvement of electrical conductivity and mechanical properties of low alloying electrical aluminum alloys // Composites Part B. 2017. V. 110. PP. 381-387.
6. Fadayomi O., Clark R., Thole V. Investigation of Al-Zn-Zr and Al-Zn-Ni alloys for high electrical conductivity and strength application // Materials Science & Engineering A. 2019. V. 743. PP. 785-797.
7. Belov N.A., Korotkova N.O., Akopyan T.K., Pesin A.M. Phase composition and mechanical properties of Al-1.5%Cu-1.5%-Mn-0.35%Zr(Fe,Si) wire alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2019. V. 782. PP. 735-746.
8. Tian L., Russell A., Riedemann T. A deformation-processed Al-matrix/Ca-nanofilamentary composite with low density, high strength, and high conductivity // Materials Science & Engineering A. 2017. V. 690. PP. 348-354.
9. Zhukov I.A., Kozulin A.A., Khrustalyov A.P. The Impact of Particle Reinforcement with Al_2O_3 , TiB_2 , and TiC and Severe Plastic Deformation Treatment on the Combination of Strength and Electrical Conductivity of Pure Aluminum // Metals. 2019. V. 9. (1). P. 65.
10. Hou J.P., Wang Q., Zhang Z.J. Nano-scale precipitates: The key to high strength and high conductivity in Al alloy wire // Materials and Design. 2017. V. 132. PP. 148-157.
11. Murashkin M.Yu., Sabirov I., Sauvage X., Valiev R.Z. Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity // Journal of Materials Science. 2016. V. 51. PP. 33-49.
12. Medvedev A., Arutyunyan A., Lomakin I., Bondarenko A., Kazykhanov V., Enikeev N., Raab G., Murashkin M. Fatigue Properties of Ultra-Fine Grained Al-Mg-Si Wires with Enhanced Mechanical Strength and Electrical Conductivity // Metals. 2018. V. 8. (12). P. 1034.
13. Meagher R.C., Hayne M.L., DuClos J. Increasing the strength and electrical conductivity of AA6101 aluminum by nanostructuring // Light Metals. 2019. PP. 1507-1513.
14. Yang C., Masquellier N. Gadiolle G., Sauvage X. Multifunctional properties of composition graded Al wires // Scripta Materialia. 2020. V. 189. PP. 21-24.
15. Qi Y., Lapovok R., Estrin Y. Microstructure and electrical conductivity of aluminium/steel bimetallic rods processed by severe plastic deformation // J Mater Sci. 2016. V. 51. PP. 6860-6875.
16. Lapovok R., Popov V.V., Qi Y. Architectured hybrid conductors: Aluminium with embedded copper helix // Materials & Design. 2020. V. 187. № 108398.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

$$\sigma_{\text{в}}(\text{пр}) = \sigma_{\text{в}}(\text{об}) \times \frac{S(\text{об})}{S(\text{пр})} + \sigma(\text{серд}) \times \frac{S(\text{серд})}{S(\text{пр})}, \quad (3)$$

here $\sigma_{\text{в}}^{(\text{об})} > \sigma_{\text{в}}^{(\text{серд})}$ и $\delta_p^{(\text{об})} \geq \delta_p^{(\text{серд})}$.

If $\delta_p^{(\text{об})} < \delta_p^{(\text{серд})}$, then $\sigma_{\text{в}}^{(\text{об})}$ must be interpolated according to the tension diagram obtained experimentally, where $\delta_p = \Delta l/l$ – uniform deformation in tension; S – cross-sectional area; $\sigma_{\text{в}}$ is the ultimate strength of the material.

CONCLUSIONS

This work has analysed the rational design of a two-component conductor in the form of a wire made of

6101 nanostructured high-strength alloy and aluminum of 1350 electrical aluminum grade by simulating tensile tests with the aid of the finite element method.

Based on the results of the analysis performed by the FE method it was found that to create a two-component conductor consisting of a high-strength shell (alloy 6101) and a core (alloy 1350) with increased electrical conductivity providing strength ≥ 400 MPa at a level comparable to copper alloys, it is necessary to meet the condition $S_{(\text{серд})}/S_{(\text{пр})} \leq 0.16$.

Calculations performed on the simulation test results made it

possible to derive an empirical dependence for calculating the ultimate strength of a two-component conductor which can be used for other two-component systems made of metals and alloys for both electrical and structural purposes. ■

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the Russian Science Foundation for financial support of the project No. 17-19-01311.

Declaration of competing interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

ARMY 2021

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ



* ФРЕГАТ «АДМИРАЛ ФЛОТА СОВЕТСКОГО СОЮЗА ГОРШКОВ»

**22–28 АВГУСТА
ПАТРИОТ ЭКСПО**

WWW.RUSARMYEXPO.RU

ОРГАНИЗATOR



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ
ОПЕРАТОР



МЕЖДУНАРОДНЫЕ
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

**100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ**



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.su



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ!

www.technosphera.ru



Стоимость 1056 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.su



Стоимость 1287 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1716 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.su