

УДК 621.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗУПРОЧНЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Е. Б. МЕДВЕДЕВ¹, О. С. ПЕТРОВА²

¹ medvedev.ufa@mail.ru, ² petrova.olesya@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ)

Аннотация. Статья посвящена исследованию вопроса поверхностного разупрочнения электротехнических проводниковых материалов, в частности, электрических проводов, изготовленных из алюминиевого сплава 6201. Рассмотрены режимы разупрочняющей термической обработки холоднодеформированного прутка из указанного сплава, обеспечивающие разупрочнение поверхностного слоя прутка и, как следствие этого, повышение его электропроводности.

Ключевые слова: электрический проводник, электропроводность, скин-эффект, термическая обработка, разупрочнение, прочность.

ВВЕДЕНИЕ

Электротехнические материалы в современной электротехнике играют очень большую роль. Хорошо известно, что надежность работы электрических машин, аппаратов и электрических установок в основном зависит от качества и правильного выбора соответствующих электротехнических материалов.

При протекании тока в электротехнических материалах образуется так называемый скин-эффект – эффект уменьшения амплитуды электромагнитных колебаний в зависимости от степени их проникновения внутрь среды проводника [1]. При протекании переменного тока электрические заряды под действием электромагнитных явлений внутри проводника вытесняются к его поверхности, и тогда в центральной части проводника плотность зарядов оказывается меньше, чем на периферии. Глубина проникновения тока (глубина скин-слоя) тем меньше, чем больше частота колебаний тока [2]. Таким образом, в результате этого эффекта переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению проводника, а преимущественно сосредотачивается в его поверхностном слое. Из этого следует, что для увеличения электропроводности электротехнического материала достаточно разупрочнить только его поверхностный слой, не изменяя свойств сердцевины, что позволяет, в свою очередь, сохранить на достаточно высоком уровне прочность холоднодеформированного проводника.

При комнатной температуре разупрочнение наклепанного металла протекает довольно медленно или даже отсутствует (особенно у тугоплавких металлов), однако даже при незначительном нагреве, сообщаемом дислокациям и отдельным атомам необходимую подвижность, разупрочнение протекает в полной мере. При этом даже незначительные перемещения атомов могут снять искажения кристаллической решетки. Например, для устранения искажений кристаллической решетки железа достаточно произвести его нагрев до 200...300 градусов, и после этого его механические свойства восстанавливаются такими, какими они были до пластической деформации. Скорость разупрочнения в значительной степени определяется температурой нагрева металла и степенью его упрочнения.

К электротехническим материалам предъявляются высокие требования относительно их прочности. Поэтому прочность проводниковых материалов должна быть достаточно высокой и при проведении поверхностного разупрочнения следует сохранить прочность сердцевины неизменной, а еще лучше – увеличить ее.

Поверхностное разупрочнение электротехнических материалов является актуальной задачей, так как позволяет увеличить электропроводность материала за счет разупрочнения поверхностного слоя, при этом сохраняя начальную прочность сердцевины.

Поверхностное разупрочнение материала может быть достигнуто путем протекания рекристаллизационных процессов в поверхностном слое. Рекристаллизация – процесс образования и роста (или только роста) одних кристаллических зёрен (кристаллитов) поликристалла за счёт других. Скорость рекристаллизации резко (экспоненциально) возрастает с повышением температуры. Рекристаллизация протекает особенно интенсивно в пластически деформированных материалах. Рекристаллизация устраняет структурные дефекты (в первую очередь уменьшает на несколько порядков плотность дислокаций), изменяет размеры зёрен и может изменить их кристаллографическую ориентацию (текстуру). Для протекания процесса рекристаллизации в поверхностном слое образца необходимо нагреть его поверхность до температуры рекристаллизации. Для этого можно применить следующие способы нагрева образца, обеспечив строго определенное время выдержки с целью нагрева только поверхностного слоя образца

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является повышение электропроводности электротехнического алюминиевого сплава 6201 путем разупрочнения его поверхностного слоя.

Для достижения указанной цели в работе были решены следующие задачи:

1. Изготовлены цилиндрические образцы из алюминиевого сплава 6201.
2. Проведена термическая обработка полученных образцов.
3. Исследована микротвердость полученных образцов.
4. Исследована электропроводность образцов.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования были использованы заготовки из катанки диаметром 12 мм алюминиевого сплава 6201, химический состав и механические свойства которого представлен в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Состав сплава (масс. %)

Материал	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Сплав 6201	0,2...0,6	0,50	0,10	0,10	0,45...0,9	0,10	0,20	0,15	97,65...99,35

Таблица 2

Механические характеристики

σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
240	200	17	70

Алюминиевый сплав 6201 упрочняется в одном температурном режиме, который представляет собой нагрев до 530°C для закалки. Выдерживается металл около 12 часов. Кроме закалки используется искусственное старение в течение 12 часов при температуре 170°C.

Сплав 6201 входит в группу сплавов алюминия-магния-кремния (такая система называется авиаль). Обладает высокой пластичностью, а при упрочнении – твердостью. Сплав 6201 содержит небольшую долю легирующих элементов и примесей, за счет своей чистоты имеет хорошие показатели электро- и теплопроводности.

В последнее время все активнее данный материал применяется при изготовлении кабелей связи, а также воздушных кабелей. Это стало возможным благодаря тому, что он обладает большим запасом прочности, чем медь, которая использовалась до этого. Применение сплава 6201 привело к тому, что появилась возможность увеличить размер пролета, а также снизить количество повреждений во время монтажа линий, которые возникали достаточно часто. Что касается электропроводности, то материал занял второе место сразу после меди, но при этом его стоимость примерно в 1,5 раза ниже. К тому же алюминий гораздо легче, что играет важную роль при сборке компактных изделий, которые должны содержать большое количество элементов, проводящих ток.

Испытания осуществляли на установке Buehler «Micromet 5101». В качестве индентора использовали закаленную алмазную пирамиду. При стандартном измерении микротвердости (ГОСТ 9450–76) нагрузка составляла 100 гр., время выдержки – 10 секунд. Образец устанавливался на опорном столике. После снятия нагрузки к образцу автоматически подводился микроскоп, и вручную измерялись диагонали отпечатка. Значение микротвердости выдавалось автоматически на дисплей микротвердомера.

Удельную электрическую проводимость (ω) образцов катанки сплава 6201 определяли по ГОСТ 27333–87 и методике, используя измеритель удельной электропроводности цветных металлов и сплавов вихретоковый ВЭ–27 НЦ с относительной погрешностью $\pm 2\%$.

Термическая обработка – процесс обработки изделий из металлов и сплавов путем температурного воздействия и последующего охлаждения с определенной скоростью с целью изменения их структуры и свойств в заданном направлении.

Для разупрочнения поверхностного слоя катанки алюминиевого сплава 6201 была проведена термическая обработка. Исходный пруток был нарезан на десять частей, девять из которых были подвергнуты нагреву при температуре 900°C и последующему охлаждению в воде. Время выдержки составило от 10 С до 90 С с интервалом в 10 С. Один образец был взят в качестве исходного и термической обработке не подвергался. Для получения достоверных результатов и выявления закономерности эксперимент был проведен повторно для новой серии из девяти образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценка разупрочнения проведена по результатам измерения микротвердости двух комплектов из девяти образцов, прошедших термическую обработку, и одного исходного. Измерение микротвердости производилось от периферии образца к центру с шагом 0,4 мм. График микротвердости строился из среднего значения двух измерений для каждого образца. Результаты представлены на рис. 1.

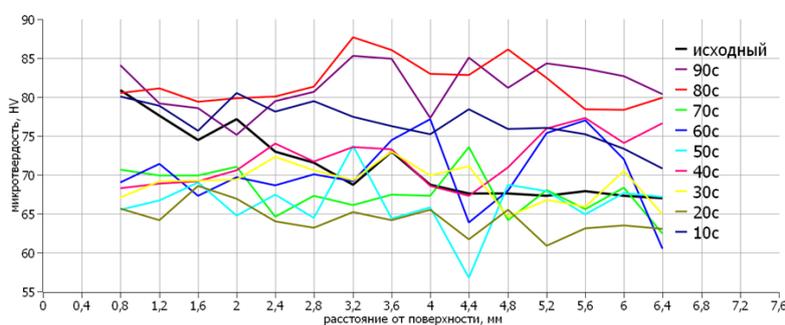


Рис. 1. График изменения микротвердости образцов

На рис. 2 представлен этот же график изменения микротвердости в виде линий тренда.

Из рис. 2 видно, что поверхностного разупрочнения удалось достигнуть при времени выдержки от 20 с до 70 с. Образцы, находившиеся в печи 10 С, 80 С и 90 С не показали поверх-

ностного разупрочнения, но продемонстрировали значительное увеличение твердости сердцевины образца по сравнению с исходным образцом. Причиной этому может быть закалка, произошедшая в образце.

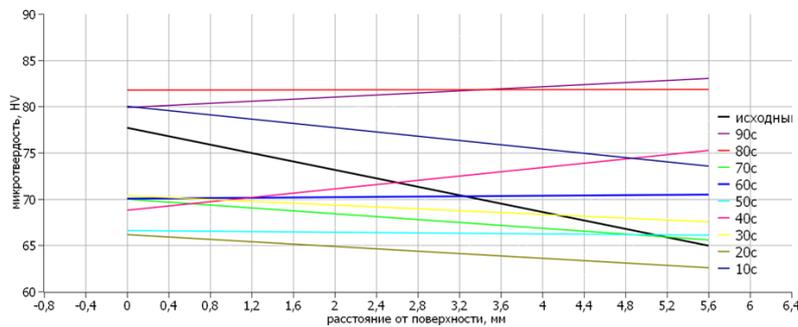


Рис. 2. График изменения микротвердости в виде линий тренда

Результаты измерения микротвердости образца после 40 секунд показаны на рис. 3. Данный вариант может быть предложен для практического применения, так как он обеспечивает наилучший комплекс свойств проводника по сравнению с исходным образцом, а именно: достаточно эффективное разупрочнение поверхностного слоя (глубиной 2,5 мм) и повышение прочности сердцевины.

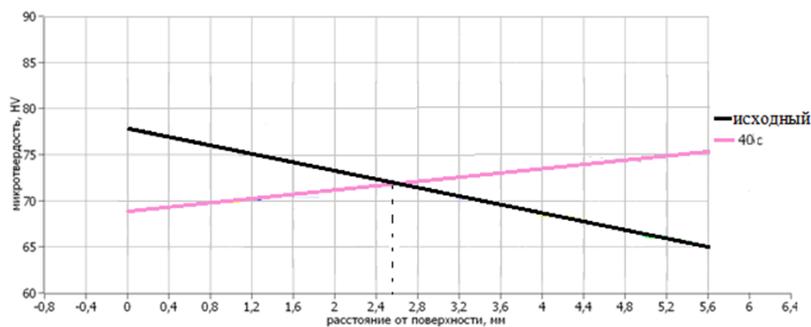


Рис. 3. График изменения микротвердости образца после термообработки с продолжительностью выдержки 40 с.

Для выявления влияния поверхностного разупрочнения на электрические свойства материала была измерена удельная электропроводность двух комплектов из девяти образцов, ранее подвергнутых термической обработке, и исходного образца. Диаграмма, представленная на рис. 4, строилась по средним значениям измерений двух образцов.

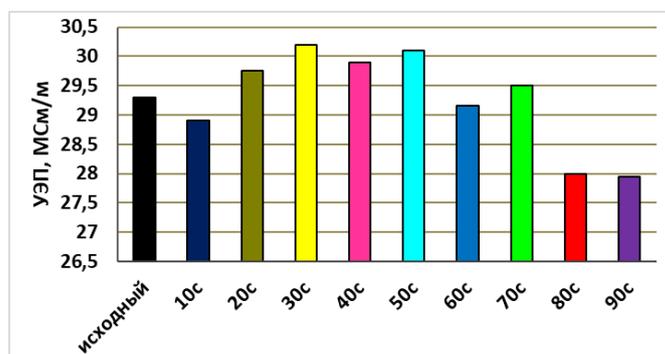


Рис. 4. Диаграмма электропроводности образцов

По результатам измерения удельной электропроводности можно сделать вывод, что у образцов с разупрочненным поверхностным слоем (а именно, у образцов со временем выдержки

от 20 С до 70 С) электропроводность выше, что говорит об эффективности поверхностного разупрочнения электротехнических материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам измерения микротвердости было выявлено, что поверхностному разупрочнению подверглись образцы со временем выдержки в печи от 20 С до 70 С.

Результаты измерения удельной электропроводности подтверждают наличие поверхностного разупрочнения и его влияния на электрические свойства материала.

Режимы со временем выдержки 30 С, 40 С и 50 С показали наилучшие результаты по микротвердости и электропроводности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Матвеев А. Н.** Электричество и магнетизм: учеб. пособие / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.
2. **Власов А. А.** Макроскопическая электродинамика: учеб. пособие / А.А. Власов. – 2-е изд. – М.: Наука, 2005. – 232 с.

ОБ АВТОРАХ

Медведев Евгений Борисович, доцент каф. МиФМ.

Петрова Олеся Сергеевна, студентка каф. МиФМ.

METADATA

Title: Research of the effect of surface softening of electrical materials.

Author: E. B. Medvedev¹, O. S. Petrova²

Affiliation:

^{1,2} Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ medvedev.ufa@mail.ru, ² petrova.olesya@mail.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 1 (30), pp. 76-80, 2024. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract The article is devoted to the study of the issue of surface softening of electrical conductive materials, in particular, electrical wires made of aluminum alloy 6201. The softening heat treatment modes of cold-formed rods made of the specified alloy are considered, providing softening of the surface layer of the rod and, as a consequence, an increase in its electrical conductivity.

Key words: electrical conductor, electrical conductivity, skin effect, heat treatment, softening, strength.

About authors:

Medvedev Evgeny Borisovich, Assistants professor, Dept. of MATERIALS SCIENCE AND PHYSICS OF METALS (UUST).

Petrova Olesya Sergeevna, student, Dept. of MATERIALS SCIENCE AND PHYSICS OF METALS (UUST).