

**Веселовська Н.Р.**

д.т.н., професор

Богатюк М.О.

аспірант

*Вінницький національний
аграрний університет***Veselovska N.**

Doctor of Engineering, Professor

Bohatiuk M.

postgraduate student

*Vinnitsya National Agrarian
University***УДК 620.7.011****DOI: 10.37128/2306-8744-2022-3-7****ВПЛИВ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА
ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ТА
МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
НЕЩОДАВНО ВИГОТОВЛЕНИХ
СПЛАВІВ НА ОСНОВІ AL,
ОТРИМАНИХ ТРАДИЦІЙНИМ
ПРОЦЕСОМ ЛИТТЯ**

Дане дослідження присвячене комплексному вивченню виробництва сплавів на основі алюмінію з введенням різних легуючих елементів та їх впливу на його електропровідність та механічні властивості. Відливання чистого алюмінію з різною концентрацією та комбінаціями легуючих добавок, таких як мідь (Cu), магній (Mg) та срібло (Ag), здійснювали з використанням графітового тигля. Мікроструктуру відлиття модифікували шляхом гарячої прокатки з наступними різними умовами термічної обробки, а саме відпалом, нормалізацією, загартуванням та старінням. Механічні властивості та електропровідність виготовлених листів термічно оброблених сплавів за різних умов обробки проводили за допомогою випробувань на розтяг, твердості та питомого електроопору. Встановлено, що при збільшенні вмісту легуючих елементів результати межі текучості значно підвищилися, більш ніж на 250% та 500% прокату та 8-годинного сплаву Al-Cu-Mg відповідно. З іншого боку, електропровідність дещо зменшується з -14,6 % та -16,57% прокату та 8 год для того самого сплаву Al-Cu-Mg відповідно.

За останні чотири десятиліття, через збільшення попиту на лінії електропередач, мідь замінюється на Al через її малу вагу та відносно низьку вартість. Крім того, серед інженерних провідникових матеріалів алюміній має дуже хорошу електропровідність за рахунок меншої питомої ваги (майже на другому місці після міді). У всьому світі зростає заміна міді на алюміній для передачі електроенергії по повітряних лініях електропередачі (алюмінієві провідники, армовані сталі), силові кабелі тощо. Крім того, заміна міді алюмінієм також має місце в країнах, які мають достатньо ресурсів з міді, оскільки вона демонструє хорошу економічну перевагу як серйозний конкурент міді. [1, с. 15]

Практично, додаючи легуючі елементи до чистого алюмінію, міцність алюмінію можна значно підвищити. Однак, з іншого боку, велике зниження електропровідності відбувається за рахунок атомів розчиненої речовини та домішок, утворених заміщенням легуючих елементів. Іншим процесом, який впливає на електропровідність алюмінію, є процес термічної обробки, оскільки елементи у фазі твердого розчину мають більший опір, ніж нерозчинені елементи. Тому дуже важко грати з міцністю чистого алюмінію таким чином, щоб зниження його



електропровідності все ще було прийнятним і дійсним для вибраного застосування.

Ключові слова: легування, термічна обробка, корозійна стійкість, механічна міцність, деформація, електропровідність, вакуумна піч, дифузія, відпал, перекристалізація, дислокації у кристалічній структурі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Легують елементи, такі як мідь, магній і срібло, забезпечуючи чудову механічну роботу та властивості сплаву при більш високих значеннях температури. Додаткові переваги мідних добавок включають підвищення твердості та міцності алюмінієвих ливарних сплавів при всіх рівнях температури та всіх умовах термічної обробки, що призводить до покращення оброблюваності виготовлених сплавів [3]. Однак, як негативний ефект для додавання міді як легуючих елементів, низька корозійна стійкість алюмінієво-мідних сплавів підвищує сприйнятливість до корозії під напругою в деяких сплавах і при певних температурах.

Інші легуючі елементи, такі як магній (Mg), мають потенціал для покращення характеристик твердості алюмінієвих сплавів за допомогою істотних механізмів зміцнення. Таким чином, зварюваність, стійкість до корозії та висока механічна міцність легко досягається за допомогою добавок Mg.

Відомо про ефект використання срібла в алюмінієвих сплавах, але все ще досить мало наукових статей у цій галузі. Механічні властивості та мікроструктура сплавів Al–Mg–Cu–Ag дуже чутливі до параметрів термічної обробки та умов деформації [4, 5]. Відповідно, останні дослідження та дослідницька діяльність намагалися зосередитися на розробці високоміцних алюмінієвих сплавів з високими властивостями електропровідності за допомогою нових шляхів обробки та виготовлення [6].

Мета та завдання дослідження. Метою даної роботи є обґрунтування, розробка і реалізація методів поліпшення як механічних, так і електричних властивостей

алюмінію для його використання в широкому діапазоні застосувань.

Викладення основного матеріалу. Покращених властивостей можна досягти багатьма методами, такими як холодна обробка, термічна обробка та додавання легуючих елементів до алюмінієвої матриці. Додаванням легуючих елементів, включаючи другорядні елементи, основні елементи та мікроструктурні домішки, можна контролювати необхідну міцність та електропровідність сплаву. Для порівняння цих розглянутих сплавів з іншими сплавами алюмінієвої серії помічено, що вони мають дуже низьку міцність, яку вчені намагаються покращити. Основними властивостями, які враховуються при виборі цих сплавів для конструкційного застосування, є їх більші механічні властивості та електропровідність. При написанні даних тез було взято результати досліджень Хані С. Абдо, Асіфула Х. Сейха, Джабаїра Алі Мохаммеда і Махмуда С. Солімана в сфері виготовлених сплавів з Al [7].

За основу взято експериментальну роботу проведено на чистому Al і чотирьох різних сплавах Al (табл 1), виготовлені методом прямого кокільного лиття в лабораторії, щоб вибрати з них найкращий варіант. Комерційно доступні алюміній, мідь, срібло та магній зважували, додавали до чистого порошку Al, а потім нагрівали в графітовому тиглі при 730 °C протягом 3 год доотримати потрібний сплав Al. Хімічний склад сплавів Al (мас.%) наведено в табл 1. Після нагрівання розплавлений метал заливають у попередньо нагріті форми, щоб отримати твердий зразок 5x10 см². Відлиті зразки потім гомогенізували у вакуумній печі при 540 °C протягом 24 год.

Alloy	Al	Cu	Mg	Ag
1	100	-	-	-
2	Bal	2 wt.%	-	-
3	Bal	2 wt.%	-	0.5 wt.%
4	Bal	2 wt.%	0.5 wt.%	-
5	Bal	2 wt.%	0.5 wt.%	0.5 wt.%

Таблиця 1. Чистий Al і чотири різних алюмінієвих сплави.



Для вивчення поведінки сплавів і сприяння легуючим елементам, які відокремлювалися від алюмінію під час охолодження від алюмінію, використовувалися різні термічні обробки, фази плавлення під час лиття для отримання дифузійної та однорідної твердої дифузії легуючих елементів.

Другим етапом після термічної обробки є відпал, при якому може статися ефект перекристалізації та зняття внутрішніх напружень. Отримані властивості сплаву визначаються його хімічним складом, товщиною поперечного перерізу та застосованою швидкістю охолодження.

З закону Ома $R = V/I$, де V — напруга, прикладена до зразка, I — струм, що проходить в A , опір зразка потоку електричного струму (R) можна обчислити в Ом (Ом). Оберненим питомим опором є електропровідність (σ), яка визначається як $\sigma = 1/\rho$. У той час як питомий опір (ρ в Ом) можна отримати за допомогою рівняння:

$\rho = (R \times A)/L$, де R — опір зразка проти потоку електроенергії, A — площа поперечного перерізу зразка в m^2 , а L — довжина зразка в метрах.

Прокатані та термооброблені квадратні зразки перед вимірюванням електропровідності необхідно дзеркально полірувати. Провідність вимірюється за допомогою 4-точкового датчика, який є комбінованим цифровим вольтметр і джерелом постійного струму. Комбінація чотирьохточкового датчика здатна забезпечити джерело постійного струму для вимірювання питомого опору або опору листа та результуючої напруги.

Помічено, що найбільші межі текучості та межі міцності на розрив мають зразки в стані лиття (прокату), потім зразки, зміцнені віком, загартовані зразки, нормовані і на останньому місці, відпалені зразки. Наявність дислокацій у кристалічній структурі внаслідок процесу гарячої прокатки в литій (прокатній) структурі дозволяє їй отримати найвищу міцність і твердість серед усіх зразків, завдяки ефекту крихкості, отриманому при утворенні дислокацій в алюмінієвому сплаві. Зміна розміру зерна після процесу термічної обробки для решти зразків є основною причиною спостережуваної тенденції низької міцності та твердості. Подрібнення зерна та твердий розчин можуть суттєво сприяти зміцненню алюмінієво-магнієвого сплаву, також виявлено, що великі зернисті матеріали мають менші межі зерен, і навпаки; дрібнозернисті матеріали мають набагато більше меж зерен, тому вони міцніші та

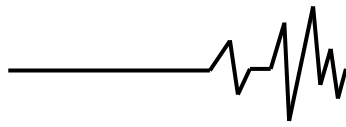
твердіші, ніж великі зернисті матеріали [8]. Іншою причиною вищих значень твердості та в'язкості зразків, загартованих, нормалізованих і відпалених зразків, є рух дислокації під час деформації, оскільки вони мають більше меж зерен [8].

Висновки. Чотири різні марки алюмінієвих сплавів були виготовлені шляхом зміни складу легуючих елементів, а саме: Cu , Ag і Mg . Відлиті сплави потім піддавали гарячому прокату з наступною термообробкою в різних умовах, таких як відпал, нормалізація, загартовування та зміцнення старіння в різних часових поясах. Встановлено, що міцність і твердість зразків у литому стані (прокату) є вищими, за ними слідують зразки, загартовані за віком, за винятком загартованого зразка, який показав значне збільшення значення твердості. Це стан у литих (прокатаних) зразках обумовлений наявністю дислокаційних дефектів у кристалічній структурі алюмінієвих сплавів, що зумовлює крихкість зразків. З іншого боку, наявність більших меж зерен або зростання зерен після термічної обробки є причиною низької міцності та твердості в термічно оброблених зразках. Щоб узагальнити вплив додавання легуючих елементів на механічні властивості та електропровідність за конкретними значеннями, було виявлено, що при збільшенні вмісту легуючих елементів результати межі текучості значно підвищилися більш ніж на 250% і 500% для прокату і сплави $Al-Cu-Mg$, витримані 8 годин, відповідно. У той час як електропровідність дещо зменшується на 14,6% і 16,57% для того ж сплаву $Al-Cu-Mg$, витриманого в прокаті та 8 год, відповідно [9].

Виявилось, що для того самого сплаву електропровідність загартованого зразка була більшою, ніж у інших обробок. Підвищена електропровідність у затверділих зразках може бути пов'язана зі змінами температури та дисоціацією зерен. В результаті загартовані віком зразки демонструють більшу міцність і провідність. Для досягнення високих властивостей електропровідності з використанням інноваційних технологій обробки та регулювання мікроструктурних домішок у сплаві необхідні додаткові дослідження в цій області.

Список використаних джерел:

1. Valiev R. Z. A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity. *Scripta Materialia*. 2013. № 76. С. 13–16.
2. Polmear I.J. Light Alloys—Metallurgy of the Light Metals; *Arnold*: London. 1995. №1021. С. 22–35.



3. Abdo H.S., Khalil K.A., El-Rayes M.M., Marzouk W.W., Hashem A.M., Abdel-Jaber G.T., Ceramic nanofibers versus carbon nanofibers as a reinforcement for magnesium metal matrix to improve the mechanical properties. *J. King Saud Univ. Eng. Sci.* 2020. №32. С. 346–350.

4. Сивак Р. І. Оцінка пластичності металу та дослідження механіки процесів обробки тиском при комплексному навантаженні. *Східно-Європейський журнал підприємницьких технологій*. Харків. 2017. № 6/7 (90). С. 34–41.

5. Meshchanov G.I., Peshkov I.B. Innovative approaches in domestic cable engineering. *Electr. Eng.* 2010. № 81. С. 1–8.

6. Teleshov V.V., Andreev D.A., Golovleva A.P. Effect of chemical composition on the strength of alloy of the Al-Cu-Mg-Ag system after heating at 180–210 °C. *Met. Sci. Heat Treat.* 2006. №48. С. 104–112.

7. Hany S. A., Asiful H. S., Jabair A.M., Mahmoud S.S. Alloying Elements Effects on Electrical Conductivity and Mechanical Properties of Newly Fabricated Al Based Alloys Produced by Conventional Casting Process. *Materials*. 2021 № 14. С. 3971.

8. Almotairy S.M., Alharthi N.H., Alharbi H.F., Abdo H.S. Superior Mechanical Performance of Inductively Sintered Al/SiC Nanocomposites Processed by Novel Milling Route. *Sci. Rep.* 2020. №10. С. 10368.

9. Fouly A., Almotairy S.M., Aijaz M.O., Alharbi H.F., Abdo H.S. Balanced Mechanical and Tribological Performance of High-Frequency-Sintered Al-SiC Achieved via Innovative Milling Route—Experimental and Theoretical Study. *Crystals*. 2021. №11. С. 700.

References

1. Valiev R. Z. (2013). A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity. *Scripta Materialia*. Vol. 76. P. 13–16.

2. Polmear I.J. (1995). Light Alloys—Metallurgy of the Light Metals; *Arnold*: London. Vol. 1021. P. 22–35.

3. Abdo H.S., Khalil K.A., El-Rayes M.M., Marzouk W.W., Hashem A.M., Abdel-Jaber G.T. (2020). Ceramic nanofibers versus carbon nanofibers as a reinforcement for magnesium metal matrix to improve the mechanical properties. *J. King Saud Univ. Eng. Sci.* Vol. 32. P. 346–350.

4. Sivak R. I. (2017). Assessment of metal plasticity and study of the mechanics of pressure treatment processes under complex loading. *East European Journal of Entrepreneurial Technologies*. Kharkiv. № 6/7 (90). P. 34–41.

5. Meshchanov G.I., Peshkov I.B. (2010). Innovative approaches in domestic cable engineering. *Electr. Eng.* Vol. 81. P. 1–8.

6. Teleshov V.V., Andreev D.A., Golovleva A.P. (2006). Effect of chemical composition on the strength of alloy of the Al-Cu-Mg-Ag system after heating at 180–210 °C. *Met. Sci. Heat Treat.* Vol. 48. P. 104–112.

7. Hany S. A., Asiful H. S., Jabair A.M., Mahmoud S.S. (2021). Alloying Elements Effects on Electrical Conductivity and Mechanical Properties of Newly Fabricated Al Based Alloys Produced by Conventional Casting Process. *Materials*. Vol. 14. P. 3971.

8. Almotairy S.M., Alharthi N.H., Alharbi H.F., Abdo H.S. (2020). Superior Mechanical Performance of Inductively Sintered Al/SiC Nanocomposites Processed by Novel Milling Route. *Sci. Rep.* Vol. 10. P. 10368.

9. Fouly A., Almotairy S.M., Aijaz M.O., Alharbi H.F., Abdo H.S. (2021). Balanced Mechanical and Tribological Performance of High-Frequency-Sintered Al-SiC Achieved via Innovative Milling Route—Experimental and Theoretical Study. *Crystals*. Vol. 11. P. 700.

ALLOYING ELEMENTS EFFECTS ON ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF NEWLY FABRICATED AL BASED ALLOYS PRODUCED BY CONVENTIONAL CASTING PROCESS

The present investigation deals with a comprehensive study on the production of aluminum based alloys with the incorporation of different alloying elements and their effect on its electrical conductivity and mechanical properties. Casting of pure aluminum with different concentration and combinations of alloying additives such as copper (Cu), magnesium (Mg) and silver (Ag) were carried out using a graphite crucible. The as-cast microstructure was modified by hot rolling followed by different heat-treated conditions viz., annealing, normalizing, quenching, and age hardening. The mechanical properties and electrical conductivity of the produced heat-treated alloys sheets under various processing conditions were carried out using tensile testing, hardness, and electrical resistivity measurements. It was found that by increasing the alloying elements content, yield strength results increased significantly by more than 250% and 500% for the as rolled and 8 h aged Al-Cu-Mg alloy, respectively. On the other hand, the electrical conductivity reduces slightly with –14.6% and –16.57% for the as rolled and 8 h aged of the same Al-Cu-Mg alloy, respectively.



From the last four decades, due to the increase in demand from the electricity transmission lines, copper is being replaced by Al because of its light weight and relatively low cost. In addition, among the engineering conductor materials, aluminum has a very good electrical conductivity due to lower specific gravity (almost in the second rank after copper). The replacing of copper by aluminum for electricity transmission by overhead ACSR (aluminum conductor steel-reinforced) conductors, power cables, etc. has increased all over the world. Moreover, substitution of copper by aluminum also takes place in countries which have enough resources from copper, since it shows a good economical advantage as serious competitor against copper.

Practically, by adding alloying elements to pure aluminum, aluminum's strength can be

significantly improved. However, on the other hand a great reduction in the electrical conductivity takes place due to the solute atoms and impurities generated by substitution of alloying elements. Another process affecting the electrical conductivity of aluminum is the heat treatment process, since elements in the solid solution phase represent a higher resistance than non-dissolved elements. That is why it is a great challenge to play with the strength of the pure aluminum in such a way that the decrease in its electrical conductivity will be still acceptable and valid for the selected application.

Keywords: alloying, heat treatment, corrosion resistance, mechanical strength, deformation, electrical conductivity, vacuum furnace, diffusion, annealing, recrystallization, dislocations in the crystal structure.

Відомості про авторів

Веселовська Наталія Ростиславівна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: wnatalia@ukr.net).

Богатюк Максим Олегович – аспірант кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: bogatyuk1998@gmail.com).

Veselovska Nataliia Rostyslavivna – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Machines and Equipment of Agricultural Production of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: wnatalia@ukr.net).

Bohatiuk Maksym Olegovich – graduate student of the Department "Machinery and Equipment of Agricultural Production" of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna Street, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: bogatyuk1998@gmail.com).