insensitivity zones under the conditions of possible interferences for the defects of short-circuit/slackening of movement in relation to the normal section of the laminated magnetic circuit are determined; the manifestation of artificially introduced typical superficial and deep defects of the core are researched according to the results of local diagnostics.

Keywords: *synchronous machine, laminated core, local diagnostics, probability, information content*

Стаття прийнята 05.01.2021 р.

УДК 621.791.75 **doi.org/10.31498/2522-9990242021248963**

Зусін В. Я., Зусін А. М.

ОПТИМІЗАЦІЯ МОДУЛЯ КРІОЛІТА ПРИ АВТОМАТИЧНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТОВСТОЛИСТОВОГО АЛЮМІНІЮ ЗАКРИТОЮ ДУГОЮ

При зварюванні алюмінію широко використовуються високоактивні флюс, що складаються з хлоридів і фторидів лужних і лужноземельних металів. Основою цих флюсів є штучний кріоліт, зі збільшенням вмісту якого у флюсі зростає його рафінуюча здатність. Заводи виготовляють технічний кріоліт з різним модулем (молярним співвідношенням NaF/AlF_3), що призводить до зміни фізико-хімічних властивостей флюсів (температури плавлення, густини, електропровідності, в'язкості). Це впливає на стабільність процесу зварювання, формування шва і на властивості зварних з'єднань. З метою оптимізації модуля кріолітаа при зварюванні алюмінію закритою дугою проведені дослідження модуля штучного кріоліту на деякі фізико-хімічні властивості флюсу. Для проведення експериментів були виготовлені вісім партій флюсів однакового складу, але при цьому використовувався кріоліт з модулем від М = 1,52 до М = 2,13. При збільшенні модуля кріоліта понад М = 1,65 відбувається зростання температури плавлення флюсу, яка наближається до температури плавлення зварюваного металу при модулі кріоліта *М = 1,75. При модулі кріоліта М = 2,13 значно перевищує її і становить майже 1000 °С. Так само зростає електропровідність флюсу. Збільшення модуля кріоліта призводить до зростання щільності флюсу, при збільшенні модуля кріоліта на 0,1 щільність флюсу зростає на 0,04-0,06 г/см^3,проте отримані значення щільності флюсу не перевищують щільності розплавленого металу, що зварюється. З перевищенням температури щільність флюсу знижується лінійно. Зменшення модуля кріоліта тягне за собою збільшення* рідиннотекучості *флюсу, що пояснюється підвищенням змісту комплексних аніонів AlF^{3-}_6. Зі збільшенням температури вологотекучість всіх флюсів зростає. При зварці алюмінію закритою дугою флюс повинен володіти температурою плавлення і щільністю нижче ніж у зварюється, певною* рідиннотекучістю *і незначною електропровідністю забезпечує стійкий дугового процес зварювання. За результатами досліджень фізико-хімічних властивостей флюсів з різним модулем кріоліта найбільш повно цим вимогам відповідають флюси, виготовлені на кріоліті з модулем 1,55-1,70.*

Ключові слова: *алюміній, модуль кріоліту, зварювання, флюс, пористість, мікроструктура, режими зварювання, температура плавлення, електропровідність,ізотерми.*

Постановка проблеми. Однією з основних труднощів, що виникають при зварюванні алюмінію та його сплавів, є видалення тугоплавкої оксидної плівки [1, 2]. Найбільш повно цей процес здійснюється при використанні високоактивних флюсів, що складаються з хлоридів та фторидів лужних та лужноземельних металів [3]. Основою цих флюсів є штучний кріоліт, зі збільшенням вмісту якого у флюсі зростає його рафінуюча здатність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Заводи випускають кріоліт з різним модулем (модуль кріоліта, або кріолітове співвідношення, вважають молярне співвідношення NaF/AlF_3). Використання для виготовлення зварювальних флюсів кріоліта різного складу призводить до зміни фізико-хімічних властивості флюсів (температури плавлення, густини, електропровідності, в'язкості), що в свою чергу впливає на формування шва та властивості зварних з'єднань.

Мета дослідження. З метою оптимізації модуля кріоліта було проведено дослідження вплив модуля штучного кріоліту на деякі фізико-хімічні властивості флюсу для зварювання алюмінію закритою дугою.

Основний матеріал дослідження. Флюс для зварювання алюмінію закритою дугою містить хлористий калій, хлористий натрій та кріоліт, концентрація якого становить 44 % від загальної ваги. Використання різного складу кріоліту для виготовлення зварювальних флюсів призводить до зміни якості флюсів (температури плавлення, густини, електропровідності, в'язкості), що впливає на формування шва і властивості зварного з'єднання.

Згідно діаграми стану $NaF\text{-}AlF_3$, кріоліт з модулем рівним 3 має температуру плавлення 1000 °С. Подальше збільшення вмісту AlF_3 (зменшення модуля криолита) призводить до зниження температури плавлення розплаву, яка становить 725 °С при модулі рівному 1,15 утворює евтектику з температурою плавлення 658 °С. Подальше збільшення вмісту AlF_3 призводить до зростання температури плавлення розплаву до 731 °С. Модуль утворюється хімічної сполуки еквімолекулярного складу $NaAlF_4$ дорівнює 1 [4].

Щільність розплавів подвійної системи $NaF – AlF_3$ характеризується максимумом, який трохи зсунутий в сторону фтористого натрію від ординати кріоліта Na_3AlF_6 [4]. Зі збільшенням вмісту AlF_3 щільність розплаву знижується.

Згідно з результатами виміру електропровідності системи $NaF – AlF_3$ [4], добавки фтористого натрію до кріоліту збільшують, а фтористого алюмінію - зменшують питому електропровідність розплавів. Характерною для кріоліта точки на ізотермах питомої електропровідності при цьому не спостерігалося.

Дослідження в'язкості системи $NaF – AlF_3$ показує на наявність максимуму в'язкості розплаву, відповідного складу кріоліту. Зі збільшенням вмісту AlF_3 в'язкість розплаву знижується.

Для оптимізації модуля кріоліта при автоматичному зварюванні товстолистового алюмінію закритою дугою виготовлялися вісім партій флюсів однакового складу (табл. 1.), в яких використовувався кріоліт з модулем від 1,52 до 2,13.

Таблиця 1 – Склад експериментального флюсу

Найменування матеріалу	Марка матеріалу	Зміст, вага %
Кріоліт	К1	44
Хлористий калій	1^{й} сорт	38
Хлористий натрій	1^{й} сорт	15
Кварцовий пісок	Електродний	3
10 %^{й} водяний розчин карбоксиметилцелюлози	NaКМЦ	14-16 % до ваги сухої шихти

Виготовлені флюси піддавалися дослідженню - визначалися електропровідність, температура плавлення, щільність і вологотекучість.

Для визначення питомої електропровідності розплавлених флюсів використовувалася коаксіальна осередок з платини, що представляє собою порожній циліндр діаметром 30 мм і висотою 10 мм. В якості другого електрода застосовувався платиновий стрижень діаметром 1 мм, розташований до центру циліндра.

Залежність питомої електропровідності флюсів в інтервалі температур від 800 до 950 °С від модуля кріоліта представлена на рисунку 1.

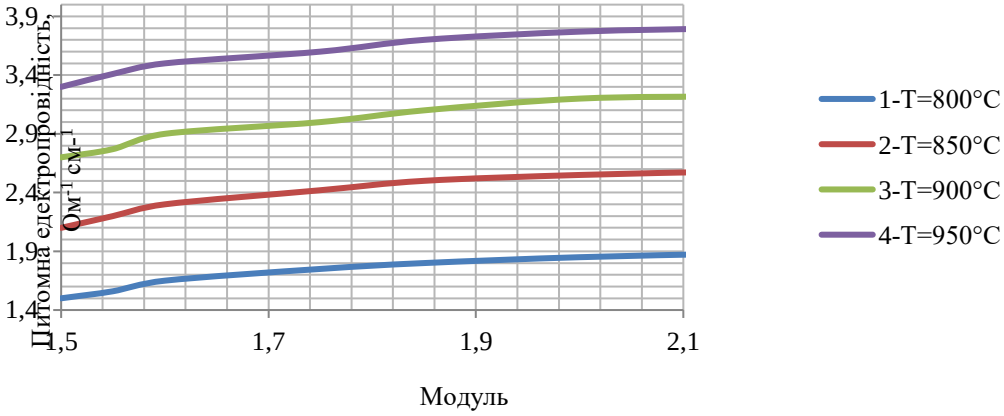

Рисунок 1 – Ізотерми питомої електропровідності з різним модулем кріоліта: 1-Т=800 °С; 2-Т=850 °С; 3-Т=900 °С; 4-Т=950 °С

Зі збільшенням модуля кріоліта електропровідність флюсу зростає, так як при цьому збільшується концентрація легкоподвіжних катіонів Na^+ та знижується кількість комплексних аніонів AlF_3^6 які практично не беруть участь в перенесенні струму. При збільшенні модуля кріоліта на 0,1 питома електропровідність флюсу збільшується на 0,06 – 0,07 $Ом^{-1}$. $см^{-1}$.

Температура плавлення досліджуваних флюсів замірялась платина-платинородієвою термопарою і чутливим милівольтметром візуально-політермічним методом.

Температура плавлення досліджуваних флюсів в залежності від модуля кріоліта представлена на рисунку 2.

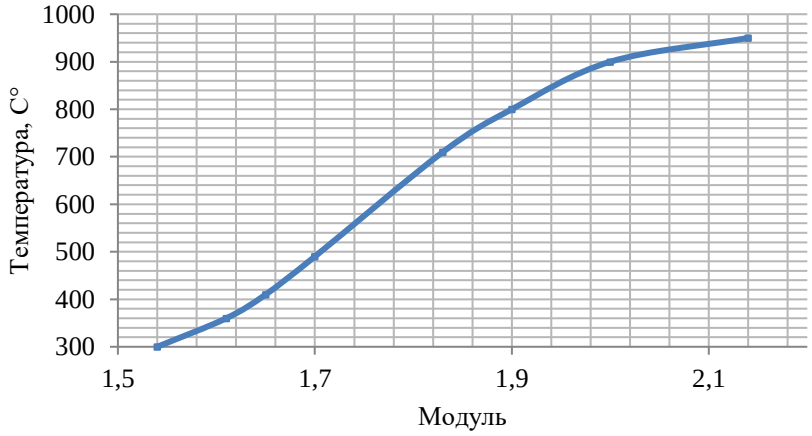

Рисунок 2 – Залежність температури плавлення флюсу від модуля кріоліта

При зміні модуля кріоліта від 1,52 до 165 температура плавлення флюсів змінюється незначно і становить 615 – 630 °С. При збільшенні модуля кріоліта понад 1,65проісходіт зростання температури плавлення флюсу. При модулі кріоліта рівному 1,75, температура плавлення флюсу близька до температури плавлення зварюваного металу, а при модулі кріоліта рівному 2,13 - значно перевершує її і становить 730 °С.

Збільшення модуля кріоліта призводить до зростання щільності флюсу. При збільшенні модуля на 0,1 щільність флюсу зростає на 0,04 - 0,06 г / $см^3$, проте отримані значення щільності

флюсу не перевищують щільності розплавленого металу, що зварюється. З підвищенням температури щільність флюсу знижується лінійно.

Зменшення модуля кріоліта тягне за собою збільшення рідиннотекучості флюсу, що пояснюється підвищенням змісту комплексних іонів AlF^{3}_{-6}, що має шарувату структуру. Зі збільшенням температури рідиннотекучості всіх флюсів зростає.

При зварці алюмінію закритою дугою флюс повинен володіти температурою плавлення і щільністю нижче, ніж у металу, що зварюється, визначеної рідиннотекучості і незначною електропровідністю, що забезпечує стійкий дугового процес зварювання. За результатами досліджень фізико-хімічних властивостей флюсу з різним модулем кріоліта найбільш повно цим вимогам відповідають флюси, виготовлені на кріоліті з модулем 1,55-1,70.

Для визначення впливу модуля кріоліта на формування шва, механічні та корозійні властивості зварних з'єднань проводилася однопрохідне одностороння зварювання пластин встик на алюмінії А5 розміром 1000х400 х12 мм під флюсом, виготовленому на кріоліту з різним модулем. Формування зворотного боку шва здійснювалося сталевою планкою з вифрезеруваною канавкою глибиною 4 мм. Зварювання проводилося розщепленим електродом. Режим зварювання наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Режим зварювання

Товщина металу, мм	$U_д$, В	$V_{св}$, м/ч	V подачі проволоки, м/ч	Діаметр проволоки, мм	$I_{св}$, А	Насипна висота флюсу, мм
12	28-32	13	245	2,4-2,5	550-600	50-60

З зварених пластин проводилася вирізка макрошліфів для визначення геометричних параметрів шва і зразків для механічних та корозійних випробувань.

При дослідженні флюсів на основі кріоліту з модулем від 1,52 до 1,65 істотних змін з формою шва не відбулося. При подальшому збільшенні модуля кріоліта висота зовнішнього посилення шва зростає, а площа перерізу посилення зворотного боку шва зменшуються.

Подальше збільшення модуля кріоліта призводить до зменшення зворотного посилення шва, а при М = 2,13 зворотна сторона шва практично формується врівень з основним металом. При цьому в зоні сплаву зустрічаються підрізи глибиною 1 - 1,5 мм (рис. 3).

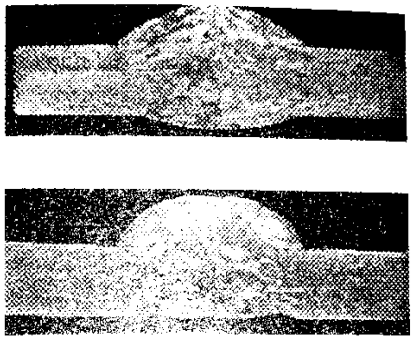

Рисунок 3 – Макрошліфи зварних з'єднанні, отриманих при зварюванні під флюсом на основі кріоліту з модулем 1,65 (а) та 2,13 (б)

Проведені випробування показали, що незалежно від модуля кріоліта міцності і корозійні характеристики зварних з'єднань задовольняють вимогам, які пред'являються до алюмінієвих конструкцій, що працюють в агресивних середовищах [5].

Виконані дослідження дозволили визначити модуль кріоліта М = 1,52 - 1,65, який забезпечує оптимальні фізико-хімічні властивості флюсу і необхідні експлуатаційні характеристики зварних з'єднань при автоматичному зварюванні товстолистового алюмінію закритою дугою.

ВИСНОВКИ

Досліджено вплив модуля кріоліта на фізико-хімічні властивості флюсу для зварювання алюмінію закритою дугою.

Запропоновано оптимальний склад керамічного флюсу з модулем кріоліта М = 1,52 - 1,65, що забезпечує високі експлуатаційні характеристики зварних з'єднань.

Список використаних джерел:

1. *Ищенко, А. Я.* Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях / *А. Я. Ищенко, Т. М. Лабур, В. Н. Бернадский*. – К. : Экотехнология, 2006. – 112 с.

2. *Никифоров, Г. Д.* Сварка плавлением алюминиевых и магниевых сплавов / *Г. Д. Никифоров*. – М. : НТО Машпром, 1960. – 312 с.

3. *Радин, А. Я.* О механизме действия флюса при плавке алюминия / *А. Я. Радин* // Вопросы технологии литейного производства : тр. ин-та МАТИ. – М., 1963. – Вып. 56. – С. 45–70.

4. *Беляев, А. И.* Металлургия легких металлов / *А. И. Беляев*. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.

5. *Роянов, В. О.* Дефекти та якість при зварювані і споріднених процесах / *В. О. Роянов, В. Я. Зусін, С. С. Самотугін*. – Маріуполь : Рената, 2010. – 224 с.

Зусин В. Я., Зусин А. М.

ОПТИМИЗАЦИЯ МОДУЛЯ КРІОЛІТА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ТОЛСТОЛИСТОВОГО АЛЮМИНИЯ ЗАКРЫТОЙ ДУГОЙ

При сварке алюминия широко используются высокоактивные флюс, состоящие из хлоридов и фторидов щелочных и щелочноземельных металлов. Основой этих флюсов является искусственный криолит, с увеличением содержания которого во флюсе возрастает его рафинирующая способность. Заводы изготавливают технический криолит с различным модулем (молярным соотношением NaF/AlF_3), что приводит к изменению физико-химических свойств флюсов (температуры плавления, плотности, электропроводности, вязкости). Это влияет на стабильность процесса сварки, формирование шва и на свойства сварных соединений. С целью оптимизации модуля криолита при сварке алюминия закрытой дугой проведены исследования модуля искусственного криолита на некоторые физико-химические свойства флюса. Для проведения экспериментов были изготовлены восемь партий флюсов одинакового состава, но при этом использовался криолит с модулем от М=1,52 до М=2,13. При увеличении модуля криолита свыше М=1,65 происходит рост температуры плавления флюса, которая приближается к температуре плавления свариваемого металла при модуле криолита М=1,75. При модуле криолита М=2,13 значительно превышает ее и составляет почти 1000 °С. Так же возрастает электропроводность флюса. Увеличение модуля криолита приводит к возрастанию плотности флюса, при увеличении модуля криолита на 0,1 плотность флюса возрастает на 0,04-0,06 г/см^3,однако полученные значения плотности флюса не превышают плотности расплавленного свариваемого металла. С превышением температуры плотность флюса

понижается линейно. Уменьшение модуля криолита влечет за собой увеличение жидкотекучести флюса, что объясняется повышением содержания комплексных анионов AlF^{3-}_6. С увеличением температуры жидкотекучесть всех флюсов растет. При электродуговой сварке алюминия закрытой дугой флюс должен обладать температурой плавления и плотностью ниже чем у свариваемого металла, определённой жидкотекучестью и незначительной электропроводностью обеспечивающей устойчивый дуговой процесс сварки. По результатам исследований физико-химических свойств флюсов с различным модулем криолита наиболее полно этим требованиям отвечают флюсы, изготовленные на криолите с модулем 1,55-1,70.

Ключевые слова: *алюминий, модуль криолита, сварки, флюс, пористость, микроструктура, режимы сварки, температура плавления, электропроводность, изотермы.*

Zusin V. Ya., Zusin A. M.

OPTIMIZATION OF THE CRYOLITE MODULE FOR AUTOMATIC WELDING OF THICK-SHEET ALUMINUM WITH A CLOSED ARC

When welding aluminum, highly active flux is widely used, consisting of chlorides and fluorides of alkali and alkaline earth metals. The basis of these fluxes is artificial cryolite, with an increase in the content of which in the flux, its refining ability increases. Plants produce technical cryolite with different modulus (molar ratio NaF / AlF_3), which leads to a change in the physicochemical properties of fluxes (melting point, density, electrical conductivity, viscosity). This affects the stability of the welding process, weld formation and the properties of welded joints. In order to optimize the cryolite module when welding aluminum with a closed arc, the artificial cryolite module was studied for some of the physicochemical properties of the flux. For the experiments, eight batches of fluxes of the same composition were made, but cryolite with a modulus from M = 1.52 to M = 2.13 was used. With an increase in the cryolite modulus above M = 1.65, the melting temperature of the flux increases, which approaches the melting temperature of the metal being welded at the cryolite modulus M = 1.75. With a cryolite modulus M = 2.13, it significantly exceeds it and is almost 1000 ° C. The electrical conductivity of the flux also increases. An increase in the cryolite modulus leads to an increase in the density of the flux; with an increase in the cryolite modulus by 0.1, the flux density increases by 0.04-0.06 g/cm^3, however, the obtained flux density values do not exceed the density of the molten welded metal. As the temperature rises, the flux density decreases linearly. A decrease in the cryolite modulus entails an increase in the fluidity of the flux, which is explained by an increase in the content of AlF^{3-}_6 complex anions. With increasing temperature, the fluidity of all fluxes increases. In electric arc welding of aluminum with a closed arc, the flux must have a melting point and density lower than that of the metal being welded, a certain fluidity and low electrical conductivity that ensures a stable arc welding process. According to the results of studies of the physicochemical properties of fluxes with different cryolite modulus, fluxes made on cryolite with a modulus of 1.55-1.70 meet most fully these requirements.

Keywords: *aluminum, cryolut module, welding, flux, porosity, microstructure, welding modes, melting temperature, electrical conductivity, isotherms.*

Стаття надійшла 05.05.2021 р.