

УДК 669.714

- Петрашов О. С. старший викладач кафедри «Композиційні матеріали, хімія та технології» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: 04rauchen11@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4880-2216
- Капустян О. Є. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: aek@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8979-8076
- Волчок І. П. д-р техн. наук, професор, професор кафедри «Композиційні матеріали, хімія та технології» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: vol-chok@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1580-0556
- Мітяєв О. А. д-р техн. наук, професор, зав. кафедри «Композиційні матеріали, хімія та технології» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: mityaev@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9034-1359
- Акімов І. В. канд. техн. наук, доцент, доцент «Композиційні матеріали, хімія та технології» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: kafedra_t_met@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6076-0149

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИЛУМІНУ АК7Ч

Мета роботи. Дослідження і вдосконалення розробленої в Національному університеті «Запорізька політехніка» технології підвищення якості вторинних силумінів. В зв'язку з відсутністю в Україні власного виробництва первинного алюмінію підвищення механічних і службових властивостей вторинних алюмінієвих сплавів, одержаних з брухту є актуальною задачею.

Методи дослідження. Об'єктом досліджень був вторинний алюмінієвий сплав АК7ч хімічного складу, %: 6,72 Si, 0,05 Cu, 0,08 Mn, 0,32 Mg, 0,02 Zn, 0,01 Ti, від 0,49 до 1,59 Fe (5 фракції), решта – Al. Для нейтралізації негативного впливу заліза та інших домішок на механічні властивості вторинного сплаву АК7ч використана комплексна технологія (сортування скрапу, рафінування та модифікування рідкого металу). Вміст комплексної модифікуючої присадки МК-1 становив 0,10%; 0,12%; 0,14%; 0,16% та 0,20% відповідно до зростання вмісту заліза. Межу міцності, відносно видовження та твердості визначали за стандартними методами при кімнатній температурі. Втомні випробування виконували на магніотрикіційній машині на частоті 18 кГц. Контроль частоти коливань проводили за допомогою частотоміру. Оцінювання впливу частоти навантаження на характеристики втоми сплаву виконували за кривими втоми до довговічності з обмеженою границею витривалості.

Отримані результати. Досягнуто підвищення механічних властивостей, в тому числі, опору руйнуванню при високих частотах навантаження.

Наукова новизна. Одержано нові дані щодо впливу заліза на втомну міцність алюмінієвого сплаву АК7ч.

Практична цінність. Одержані результати розширюють можливості використання вторинних алюмінієвих сплавів. Встановлені залежності можуть бути використані при оптимізації складу вторинних силумінів.

Ключові слова: алюмінієвий сплав АК7ч, модифікування, хімічний склад, механічні властивості.

Вступ

Численні деталі сучасних транспортних машин, літальних апаратів, енергетичних установок та інших механізмів піддаються як статистичним так і циклічним навантаженням в процесі експлуатації. Встановлено, що 70...90% аварій пов'язано з втомними руйнуваннями деталей внаслідок зародження та накопичення в них мікротріщин. У зв'язку з цим важливим критерієм надійності і довговічності механізмів і машин є втомна міцність матеріалів, з яких вони виготовлені.

Серед конструкційних матеріалів алюмінієві

сплави, завдяки малій щільності, високій корозійній стійкості та питомій міцності займають друге місце після сплавів на основі заліза. В даний час застосовують два процеси отримання алюмінію та його сплавів: 1) первинного з глинозему методом електролізу; 2) вторинного з лому та відходів виробництва методом переплаву.

Головною перевагою першого методу є висока якість металу, основним недоліком – високі витрати електроенергії (25...35% від собівартості) та вугільних анодів (близько 15 % від собівартості), а також значне забруднення навколишнього середовища. Безперечною перевагою другого процесу – рециклінгу, є до 20

разів менші енергетичні затрати на виробництво і навантаження на доквілля, основним недоліком – нижча якість металу внаслідок забруднення металевими та неметалевими домішками та газами.

Відомо, що основною проблемою вторинних силумінів є нижча якість порівняно зі сплавами, отриманими з первинного алюмінію. Пояснюється це тим що метал, який надходить на переробку, значною мірою забруднений сторонніми матеріалами – пластиком, мастилами, деталями з інших конструкційних матеріалів. У зв'язку з цим, вторинні сплави алюмінію містять велику кількість комплексних інтерметалідних фаз, в першу чергу, залізовмісних з пластинчастою морфологією неметалевих включень, розчинених газів, відрізняються гетерогенністю структури і тому значно поступаються службовими і механічними властивостями первинним.

Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз науково-технічної літератури та досвіду виробництва показує, що основними технологічними процесами, що забезпечують високу якість вторинних алюмінієвих сплавів, є:

- сортування скрапу, що забезпечує отримання необхідного складу при мінімумі небажаних домішок (заліза, магнію та ін.) в сплавах, що отримуються (як правило, у вигляді чушок);

- рафінування, легування та модифікування сплавів з метою зниження газоутримання та пористості, управління розмірами та формою структурних складових, підвищення щільності, механічних та службових властивостей.

На Запорізькому заводі кольорових сплавів було впроваджено «Класифікатор брухту алюмінієвих сплавів після переробки» [1], який, на відміну від чинного стандарту ДСТУ 3211:2009, передбачав більш детальну розбивку брухту на класи та підкласи. Це дозволило забезпечити отримання 100 % придатного металу за хімічним складом, зменшити у ньому вміст заліза з 0,7...1,2 до 0,6...0,9 % та інших небажаних домішок, знизити витрати на переплав [1–3]. Також були розроблені високоефективні та низьковитратні «Флюс для обробки алюмінієвих сплавів» [4] та «Модифікатор для алюмінієвих сплавів» [5], до складу яких увійшли KCl, Na₂CO₃, SiC, S, AlF₃. Хлориди K і Na і фторид Al забезпечували утворення на поверхні розплаву захисної плівки та його рафінування від газів та неметалевих включень. Флюс вдували в розплав за допомогою стисненого азоту. В розплаві сірка переходила в газоподібний стан та сприяла його рафінуванню за методом адсорбції. При цьому карбонат натрію Na₂CO₃ дисоціював та уповільнював швидкість окислення сірки, рафінував розплав за допомогою бульбашок CO₂, а також разом із газоподібною сіркою сприяв збільшенню контактної поверхні рідкий метал – шлак. Ультрадисперсний карбід кремнію (розміри частинок порядку 10 мкм) забезпечував достатню кількість центрів кристалізації, що призводило до зменшення довжини вісів

першого порядку дендритів в 3 рази, а також до збільшення їх кількості на площі шліфу в 1,8...2,0 рази.

У зв'язку з постійним зменшенням первинної сировини та невпинним зростанням кількості вторинної, в світі та в Україні в тому числі, проводяться науково-дослідні роботи, головною метою яких є підвищення якості вторинних алюмінієвих сплавів до рівня первинних. Однією з важливих задач в цьому плані є дослідження та підвищення втомної міцності вторинних сплавів.

Раніше випробування на витривалість в основному проводили при частотах навантаження 50...300 Гц на машинах типу МУІ-6000, МВП-10000 та ін. Ці відомі низькочастотні методи втомних випробувань вимагали значних матеріальних та часових витрат. У Білоруському державному технологічному університеті були розроблені та виготовлені дослідницькі стенди, що дозволяють проводити тестування на частотах 0,3; 2,8; 8,8; 18,0 і 44,0 кГц [6–11]. Для проведення дослідження на зазначених частотах використовували магніострикційні стенди, що працюють в автоколивальному режимі. Активними елементами цих установок, що перетворюють електричні коливання на механічні, виступали магніострикційні перетворювачі. Механічні коливання пакета виникають під впливом змінного магнітного поля, що збуджується високочастотними генераторами. Ефективна робота перетворювачів забезпечується оптимальним рівнем підмагнічування постійним магнітним полем. Використання високочастотного обладнання, наприклад 18 кГц, при якому легкі сплави мають ще несуттєве нагрівання (50...60 °С) в умовах знакозмінного вигину, дозволяє скоротити час випробувань в 18000:300 = 60 разів.

Мета роботи

Визначення шляхів підвищення якості широкозастосовуваного вторинного силуміну АК7ч (АЛ9) на підставі дослідження впливу вмісту заліза та модифікування комплексним модифікатором МК-1 [5] на механічні властивості (σ_b , δ , HRB і σ_{-1}).

Матеріал і методика досліджень

В якості шихти використовували відходи виробництва алюмінієвого сплаву АК7ч хімічного складу: 6,72 % Si, 0,05 % Cu, 0,08 % Mn, 0,32 % Mg, 0,02 % Zn, 0,01 % Ti, від 0,49 до 1,59 % Fe (5 фракцій), решта – Al. Експериментальні 5 фракцій сплаву виплавляли в печі опору в футерованому графітом чавунному тиглі. Зростаючий вміст заліза (0,49 %; 0,78 %; 0,96 %; 1,28 %; 1,59 %) в кожній плавці отримували в результаті відповідної присадки залізного порошку ПЖР2 в розплав при температурі 720±10° С. Після нагріву сплаву до температури 720...730° С його обробляли модифікатором МК-1 [5] за допомогою приспособи «дзвоник» і після витримки 3...5 хв заливали в кокіль. Вміст присадки МК-1 становив 0,10 %; 0,12 %; 0,14 %; 0,16 % та 0,20 % зі зростанням вмісту заліза. З нижньої частини злитків, після термічної обробки за режимом Т6, виготовляли зразки для механічних випробувань на розрив

та для втомних випробувань на частоті 18 кГц.

Результати досліджень

Зростання концентрації заліза значно впливало на рівень механічних властивостей сплаву АК7ч (рис. 1). Згідно з результатами випробувань пластичність сплаву знижувалася в 2,5 рази у досліджуваному інтервалі присадок заліза. Настільки суттєве зниження пластичності пояснюється [12] збільшенням в структурі сплаву кількості залізвмісних фаз Al_5SiFe , Al_7Cu_2Fe , Al_3Fe , які мають несприятливу форму та гальмують рух дислокацій. Залежності границі міцності та твердості від вмісту заліза мали вид кривих з максимумами при 1,0...1,2 % Fe. Згідно з результатами досліджень [13, 14] зі збільшенням у силумінах вмісту заліза до 1,0...1,5 % збільшується кількість інтерметалідних фаз, що виступають у ролі бар'єрів для рухомих дислокацій. Це сприяє незначному зміцненню металеві матриці сплаву. При більш високому вмісті заліза з інтерметалідних фаз формується сітка по межах зерен, що окрихчує сплав і викликає зниження границі міцності при деякому підвищенні твердості силуміну.

Як видно з рисунку 1, застосування заліза до певної концентрації позитивно позначилось на властивостях сплаву АК7ч. У зв'язку з цим наступний етап роботи полягав у дослідженні втомної міцності на частоті 18 кГц [6–11].

На рисунку 2 представлена принципова схема високочастотного випробувального стенду на 18 кГц, а на рисунку 3 – креслення зразка для випробувань.

Під дією зворотно-поступальних переміщень вгору-вниз перетворювача і концентратора зразок здійснює згинальні рухи з частотою 18 кГц. Реєстрація змін резонансної частоти коливань системи дозволяла контролювати ступінь втомного пошкодження матеріалу зразка. Зменшення жорсткості та зниження власної частоти моделей, що були досліджені, супроводжувалося розвитком субмікроскопічних, а потім мікроскопічних і макроскопічних тріщин втоми. Падіння частоти коливань призводило до підвищення напруги збудження, котра подається на підсилювач, що давало можливість за допомогою приладу ПСА встановлювати момент відключення системи при досягненні заданого ступеню пошкодження зразку.

Контроль частоти коливань проводили за допомогою частотоміру, що дозволяв визначати динаміку втомного пошкодження зразків. Оцінювання впливу частоти навантаження на характеристики втоми сплаву проводили за кривими втомної довговічності з обмеженою границею витривалості.

Розробниками високочастотних стендів встановлено, що характеристики втомної довговічності досліджених матеріалів, практично не залежать від частоти навантаження. Суттєво впливає лише величина циклічних напруг, тому з їх підвищенням дистанція між кривими втомної довговічності збільшується (рис. 4).

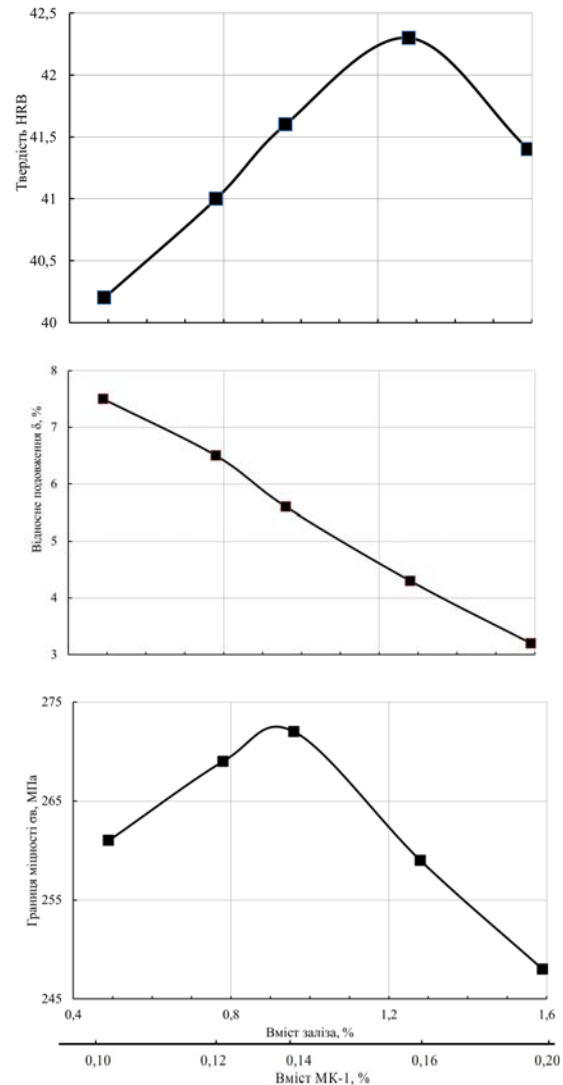


Рисунок 1. Вплив заліза на механічні властивості вторинного сплаву АК7ч

Обговорення

Результати експериментів демонструють, що форма кривих втоми зі збільшенням частоти навантаження не змінюється. Алюмінієві сплави не мають горизонтальної ділянки, як на низьких так і на високих частотах. Криві втоми для різних частот розташовуються практично еквідистантно. Для всіх досліджених матеріалів характерно монотонне підвищення втомної довговічності зі зростанням частоти навантаження, що спостерігається для різних баз випробувань в умовах знакозмінного вигину.

З метою визначення впливу заліза на опір втомному руйнуванню були проведені випробування п'яти фракцій АК7ч (див. рис. 1) при циклічному навантаженні із частотою 18 кГц. Результати досліджень представлені у виді кривих втоми в напівлогарифмічних координатах σ_a -lgN на рисунку 5.

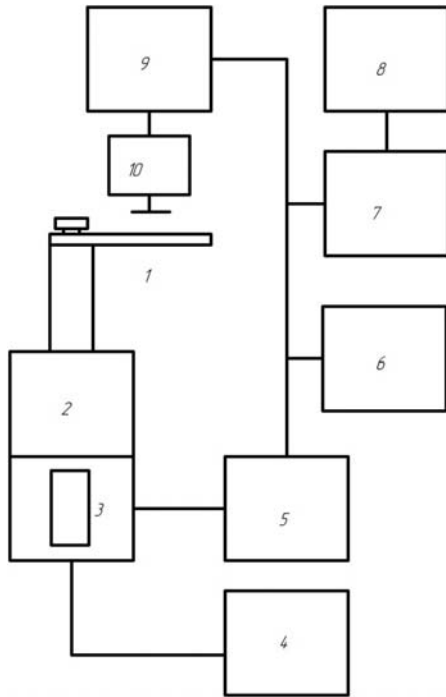


Рисунок 2. Принципова схема високочастотного випробувального стенду [6–11]:

1 – зразок; 2 – концентратор; 3 – перетворювач;
 4 – блок підмагнічування; 5 – підсилювач УПВ-5; 6 – осцилограф С1-64; 7 – частотомір ЧЗ-35; 8 – цифродрук Ф30;
 9 – прилад стабілізації амплітуди ПСА; 10 – вібрметр МРТІ

Аналіз графічного представлення результатів випробувань свідчить про незначне зменшення відстані між кривими у процесі збільшення числа циклів знакозмінного вигину. Зі збільшенням вмісту заліза в сплаві у всьому діапазоні баз випробувань мало місце зниження границі витривалості σ_{-1} (рис. 6).

При зростанні концентрації заліза з 0,49 % до 1,59 % зниження для баз випробувань 10^6 і 10^7 циклів було практично однаковим та становило 26...28 % (рис. 6).

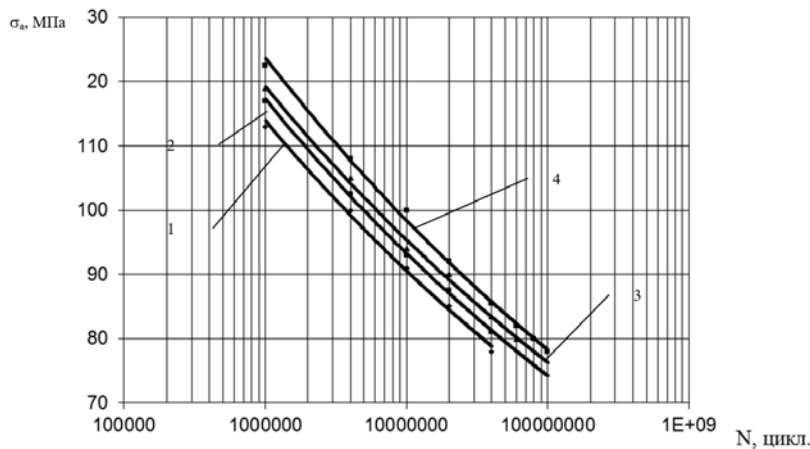


Рисунок 4. Втомні криві сплаву Д16 при знакозмінному вигині:

1 – частота випробувань 0,3 кГц; 2 – частота випробувань 3,0 Гц; 3 – частота випробувань 8,8 кГц;
 4 – частота випробувань 18,0 кГц

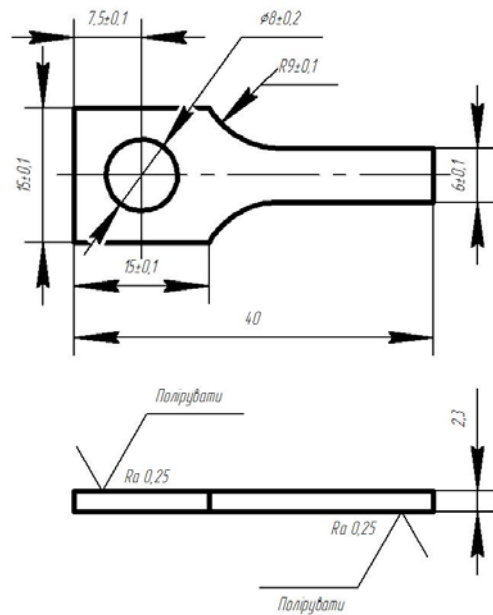


Рисунок 3. Креслення зразка для навантаження знакозмінним вигином з частотою 18 кГц

Висновки

1. Досліджено вплив вмісту заліза та комплексного модифікування на механічні властивості вторинного силуміну АК7ч (АЛ9).
2. Досліджено процеси втомного руйнування сплавів Д16 і АК7ч під дією циклічних навантажень із частотою 18 кГц.
3. Показано, що для досягнення вторинними силумінами рівня механічних властивостей, близького до рівня властивостей первинних сплавів, необхідно застосування комплексної технології, що включає якісне сортування брухту, рафінування та модифікування рідкого металу.

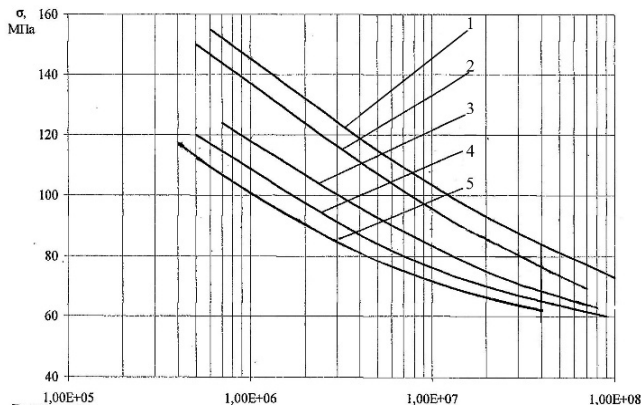


Рисунок 5. Результати втомних випробувань сплаву з різним вмістом заліза на частоті 18 кГц:
 1 – 0,49% Fe; 2 – 0,78% Fe; 3 – 0,96% Fe; 4 – 1,28% Fe;
 5 – 1,59% Fe

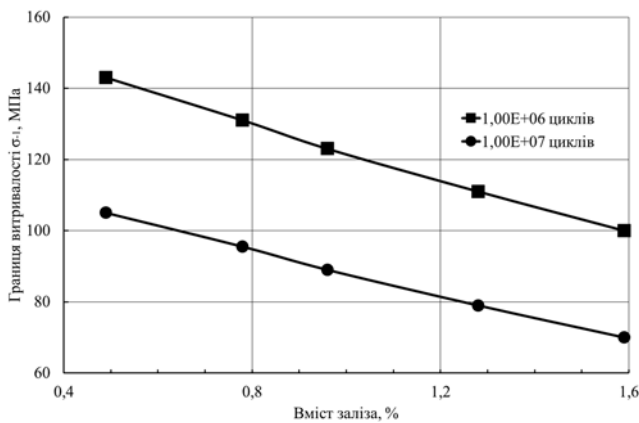


Рисунок 6. Вплив заліза на границю витривалості АК7ч (після термообробки за режимом Т6)

Список літератури

1. Мітяєв О. А. Науково-технологічні основи формування структури фізико-механічних і службових властивостей вторинних силумінів: дис. на здобуття ступеня доктора техн. наук: спец. 05.02.01 «Матеріалознавство» / О. А. Мітяєв. – Запоріжжя. – 2008. – 285 с.
2. Рязанов С. Г. Тенденции и проблемы использования вторичных алюминиевых сплавов / Рязанов С. Г., Митяев, А. А., Волчок, И. П. // *Nauka i Technologia: Труды VI конференции.* – Закарпатськ, 2003. – С. 99–102.
3. Рязанов С. Г. Пути повышения качества вторичных алюминиевых сплавов // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* – 2001. – № 1. – 70 с.

4. Пат. 58793А Україна, МКИ С22В21/06, С22В9/10. Флюс для обработки алюминиевых сплавов. [Текст] / Волчок И. П., Митяев О. А. Рязанов С. Г. заявник та патентоутримувач Запорізький нац. техн. ун-т. – №2002108362 : заявл. 22.10.2002 ; опубл. 15.08.2003. Бюл. № 8.

5. Пат. 57584А Україна, МКВ С22С 1/06. Модификатор для алюминиевых сплавов [Текст] / Волчок И. П., Митяев О. А. ; заявник та патентоутримувач Запорізький нац. техн. ун-т. – №2002108343: заявл. 21.10.2002 ; опубл. 16.06.2003, Бюл. №6.

6. Блохин А. В. Комплекс оборудования для усталостных испытаний элементов технологического оборудования / А. В. Блохин, Ф. Ф. Царук, Н. А. Гайдук // *Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообработ. пром-сть.* – 2002. – Вып. X. – С. 213–215.

7. Царук Ф. Ф. К методике исследования усталостных свойств конструкционных материалов / Ф. Ф. Царук, С. Е. Бельский, А. В. Блохин // *Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообработ. пром-сть.* – 2003. – Вып. XI. – С. 233–236.

8. Блохин А. В. Развитие комплекса оборудования для усталостных испытаний конструкционных материалов / А. В. Блохин // *Труды БГТУ. Сер. II. Лесная и деревообработ. пром-сть,* 2004. – Вып. XII. – С. 263–266.

9. О влиянии сил вязкости на движение дислокационного сегмента и распространение упругих колебаний в металлах / В. Р. Соболев, О. Н. Мазуренко, П. Н. Логвинович и др. // *Доклады национальной академии наук Беларуси.* 2007. – Т. 51. – № 3. – С. 121–124.

10. Температурные механизмы взаимодействия дислокаций с примесями в процессах передачи энергии упругих колебаний / В. Р. Соболев, П. Н. Логвинович, С. Е. Бельский, А. В. Блохин // *Инженерно-физический журнал.* 2007. Т. 80. № 4. – С. 193–199.

11. Блохин, А. В. Повышение усталостных характеристик литейных алюминиевых сплавов, полученных с использованием вторичного сырья методом термоциклической обработки / А. В. Блохин // *Литье и металлургия.* – 2009. – №4. С. 72–75.

12. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л. Ф. Мондольфо [пер. с англ.].— М. : Металлургия, 1979. – 640 с.

13. Лютова О. В. Повышение технологических и механических свойств доэвтектических вторичных силуминов: дис. на здобуття ступеня кандидата техн. наук : спец. 05.02.01 «Матеріалознавство» / О. В. Лютова. – Запоріжжя. – 2012. – 127 с.

14. Підвищення якості вторинних силумінів в умовах сучасного виробництва / І. П. Волчок, О. А. Мітяєв, Р. О. Фролов та ін. / *Вісник ХНАДУ,* вип. 91. – 2020. – С. 105–110.

Одержано 16.03.2023

RESEARCH AND IMPROVEMENT OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF SILUMIN AK7CH

- Petrashov O. Senior lecturer of the of the Department “Composite Materials, Chemistry and Technologies”, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: 04rauchen11@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4880-2216
- Kapustian O. Cand. Sc., Associate Professor of the Department “Integrated technologies of welding and modeling of structures”, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: aek@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8979-8076
- Volchok I. Dr. Sc., Professor, Professor of the Department “Composite Materials, Chemistry and Technologies”, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: volchok@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1580-0556
- Mityaev O. Dr. Sc., Professor, Head of the Department “Composite Materials, Chemistry and Technologies”, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: mityaev@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9034-1359
- Akimov I. Cand. Sc., Associate Professor of the Department “Composite Materials, Chemistry and Technologies”, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: kafedra_t_met@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6076-0149

Purpose. Research and improvement of the technology of improving the quality of secondary silumins developed by Zaporizhzhya Polytechnic National University. Due to the lack of own production of primary aluminum in Ukraine, improving the mechanical and service properties of secondary aluminum alloys obtained from scrap is an urgent task.

Research methods. The object of research was the secondary aluminum alloy AK7ч with chemical composition, %: 6.72 Si, 0.05 Cu, 0.08 Mn, 0.32 Mg, 0.02 Zn, 0.01 Ti, from 0.49 to 1.59 Fe (5 fractions), the rest – Al. To neutralize the negative effect of iron and other impurities on the mechanical properties of the secondary alloy AK7ч, a complex technology (sorting of scrap, refining and modification of liquid metal) was used. The content of the complex modifying additive MK-1 was 0.10%; 0.12%; 0.14%; 0.16% and 0.20%, respectively, with increasing iron content. Yield strength, elongation, and hardness were determined by standard methods at room temperature. Fatigue tests were performed on a magnetostriction machine at a frequency of 18 kHz. Control of the frequency of oscillations was carried out using a frequency meter. The influence of the load frequency on the fatigue characteristics of the alloy was evaluated using the fatigue life curves with a limited endurance limit.

Results. An increase in mechanical properties, including resistance to destruction at high load frequencies, has been achieved.

Scientific novelty. New data were obtained on the effect of iron on the fatigue strength of aluminum alloy AK7ч.

Practical value. The obtained results expand the possibilities of using secondary aluminum alloys. The established dependencies can be used in the optimization of the composition of secondary silumins.

Key words: aluminum alloy AK7ч, modification, chemical composition, mechanical properties.

References

- Mityaev, O. A. (2008). Naukovo-tehnolohichni osnovy formuvannia struktury fizyko-mekhanichnykh i sluzhbovykh vlastyvostei vtorynykh syluminiv [Scientific and technological basis of formation of the structure of physical-mechanical and service properties of secondary silumins]. Zaporizhzhia, 285.
- Ryazanov, S. G., Mityaev, A. A., Volchok, I. P. (2003). Trends and problems in the use of secondary aluminum alloys. Proceedings of the VI Conference Nauka i Technologia : Zakopane (Ukraine), 99–102.
- Ryazanov, S. G. (2001). Puti povysheniya kachestva vtorynykh alyuminiyevykh splavov [Ways to improve the quality of secondary aluminum alloys]. *New materials and technologies in metallurgy and machine building*, № 1, 70.
- Volchok, I. P., Mityaev, O. A., Ryazanov, S. G. (2003). Flux for processing aluminum alloys. Patent of Ukraine for useful model. C22B21/06, C22B9/10. № 58793A; declared 22.10.2002; published 15.08.2003, 8.
- Volchok, I. P., Mityaev, O. A. (2003). Modifier for aluminum alloys. Patent of Ukraine for useful model. C22S 1/06. № 57584A; declared 21.10.2002; published 16.06.2003, 6.
- Blokhin, A. V., Tsaruk, F. F., Gaiduk, N. A. (2002). Kompleks oborudovaniya dlya ustalostnykh ispytaniy elementov tehnologicheskogo oborudovaniya [Complex of equipment for fatigue testing of elements of technological equipment]. Proceedings of BSTU. Ser. II, Forestry and woodworking. prom., X, 213–215.
- Tsaruk, F.F., Belsky, S. E., and Blokhin, A. V. (2003). K metodike issledovaniya ustalostnykh svoystv konstruktsionnykh materialov [Towards a Method for Studying

the Fatigue Properties of Structural Materials]. Proceedings of BSTU. Ser. II, Forestry and woodworking. prom., XI, 233–236.

8. Blokhin, A. V. (2004). Razvitie kompleksa oborudovaniya dlya ustalostnyh ispytaniy konstruktsionnykh materialov [Development of a complex of equipment for fatigue testing of structural materials]. Proceedings of BSTU. Ser. II. Forestry and woodworking. Prom., XII, 263–266.

9. Sobol, V. R., Mazurenko, O. N., Logvinovich, P. N., Belsky, S. E., Blokhin, A. V. (2007). O vliyaniy sil vyazkosti na dvizhenie dislokatsionnogo segmenta i rasprostranenie uprugih kolebaniy v metallah [On the influence of viscosity forces on the motion of a dislocation segment and the propagation of elastic vibrations in metals]. Reports of the National Academy of Sciences of Belarus, 51 (3), 121–124.

10. Sobol, V. R., Logvinovich, P. N., Belsky, S. E., Blokhin, A. V. (2007). Temperaturnye mehanizmy vzaimodeystviya dislokatsiy s primesyami v processah peredachi energii uprugih kolebaniy [Temperature mechanisms of interaction of dislocations with impurities in the processes of energy transfer of elastic vibrations]. *Engineering Physics Journal*, 80 (4), 193–199.

11. Blokhin, A. V. (2009). Povyshenie ustalostnykh harakteristik litejnykh alyuminievykh splavov, poluchennykh s ispolzovaniem vtorichnogo syrya metodom termociklicheskoy obrabotki [Improving the fatigue characteristics of cast aluminum alloys obtained using secondary raw materials by thermal cycling]. *Casting and metallurgy*, 4, 72–75.

12. Mondolfo, L. F. (1979). Struktura i svoystva alyuminievykh splavov [Structure and properties of aluminum alloys] [transl. from English]. Moscow, Russia: Metallurgy, 640.

13. Lyutova, O. V. (2012). Povyshenie tehnologicheskikh i mehanicheskikh svoystv doevtekticheskikh vtorichnykh siluminov [Improving the technological and mechanical properties of hypoeutectic secondary silumins]. *Zaporozhye*, 127.

14. Volchok, I. P., Mityaev, O. A., Frolov, R. O. (2020). Pidvyshchennia yakosti vtorynnykh syluminiv v umovakh suchasnoho vyrobnytstva [Improving the quality of secondary silumins in the conditions of modern production]. *KHNADU Herald*, 91, 105–110.