

Кінетика розчинення модифікаторів в розплавах на основі алюмінію

Верховлюк А.М., доктор технічних наук, професор, завідувач відділу, anatoliiverkhovliuk@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2670-4052>

Железняк О.В., молодший науковий співробітник, alekszel43@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8495-8045>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна

У роботі досліджено кінетику розчинення чистих металів (Cu, Zr, Ti) та кристалічних модифікаторів систем Al–Zr і Al–Cu–Zr–Ni у розплаві високоміцного алюмінієвого сплаву В95. Актуальність дослідження зумовлена недостатньою вивченістю механізмів взаємодії багатокомпонентних лігатур з рідким алюмінієм, що обмежує можливості керування структурою та властивостями виливків. Метою роботи є встановлення закономірностей розчинення різних типів модифікаторів у розплаві з урахуванням впливу температури, часу витримки та фазового складу. Експериментальні дослідження проведено методом обертового диска, що забезпечує рівнодоступну поверхню контакту з розплавом. Зразки діаметром 10 мм з чистих металів (Cu, Zr, Ti) виготовляли на токарному верстаті, а кристалічні лігатури систем Al–Zr і Al–Cu–Zr–Ni заливали в спеціально виготовлені графітові обойми. Час контакту твердих зразків з розплавом на основі алюмінію складав від декількох секунд до години. Зміну маси зразка за рахунок угару або окислення визначали по зміні маси твердих зразків при холостих дослідженнях, де зразок проходив всі стадії експерименту, окрім розчинення. Визначено питомі швидкості розчинення компонентів та їх залежність від фізико-хімічних властивостей матеріалів. Встановлено, що мідь має найвищу швидкість розчинення серед досліджених чистих металів ($18,6 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$), тоді як цирконій і титан – на порядок нижчу. Показано, що кристалічні модифікатори розчиняються значно швидше, ніж відповідні чисті метали. Зокрема, маса зразків системи Al–Cu–Zr–Ni зменшується удвічі вже за 30 секунд контакту з розплавом при температурі 750°C , що свідчить про активну участь структурних чинників у процесі розчинення. Наукова новизна роботи полягає у кількісному порівнянні швидкостей розчинення чистих металів і багатокомпонентних лігатур, а також у виявленні ролі фазових перетворень та поверхневої активності в динаміці розчинення. Отримані результати доповнюють існуючі уявлення про механізми взаємодії модифікаторів з алюмінієвими розплавами та можуть бути використані для оптимізації режимів легування і модифікування алюмінієвих сплавів у промислових умовах.

Ключові слова: кінетика розчинення, модифікатор, розплави на основі алюмінію.

Відомо, що чим складнішою є багатокомпонентна система, тим складнішим стає механізм її розчинення. Розчинення чистих металів і комплексних модифікаторів у розплавах на основі алюмінію є складним процесом, що залежить від термодинамічних, структурних та гідродинамічних

чинників [1-12]. Особливості розчинення кристалічних лігатур систем Al–Zr та Al–Cu–Zr–Ni, що характеризуються неоднорідною структурою та високою пористістю, залишаються недостатньо вивченими, що ускладнює прогнозування їх поведінки в рідкому середовищі.

Таким чином метою дослідження є встановлення кінетичних закономірностей розчинення чистих металів (Cu, Zr, Ti) та кристалічних модифікаторів систем Al–Zr і Al–Cu–Zr–Ni у розплаві високоміцного алюмінієвого сплаву В95, з урахуванням впливу температури, часу витримки та складу модифікаторів.

Як відомо комплексні модифікатори мають високу пористість та неоднорідність за структурою, тому вони при розчиненні розподіляються в розплаві на окремі структурні елементи, тобто зерна, кристали, які розчиняються в об'ємі металу. Це обумовлює термодинамічну нерівноважність металевих розплавів. Для досягнення рівноваги необхідна тривала витримка при високих температурах. У зв'язку з цим, властивості виливків залежать від режимів плавки: температури та часу витримки, інтенсивності перемішування, порядку завантаження шихтових матеріалів. Для детальнішого дослідження необхідно проаналізувати процес розчинення модифікаторів різної структури.

Залежно від температури, взаємодія модифікатора з розплавом може відбуватися шляхом плавлення — коли температура розплаву дорівнює або перевищує температуру ліквідус компонентів модифікатора, — або шляхом розчинення, якщо температура розплаву є нижчою за температуру ліквідус твердого модифікатора.

У першому випадку, процес плавлення визначається теплофізичними характеристиками твердого тіла модифікатора, зокрема його температуропровідністю. У другому випадку, швидкість розчинення визначається швидкістю дифузії часток з твердого тіла в розплав і деяких компонентів з розплаву в тверде тіло.

Деякі дослідники процес розчинення модифікаторів пов'язують з дифузією компонентів з розплаву в поверхневий шар твердого тіла. Такий підхід до вирішення питання, щодо розчинення окремих металів і модифікаторів вимагає уточнення і додаткових досліджень, як в теоретичному, так і практичному плані.

Комплексні лігатури та модифікатори складаються з подвійних і багатокомпонентних систем, і тому їх розчинення можна розглядати як процес розчинення окремих компонентів. Оскільки він протікає на границі розподілу фаз, тому необхідно враховувати роль поверхневих властивостей рідкої фази та дифузійного шару [4-5, 9-12]. Ці чинники можуть, як прискорювати процес розчинення, так і уповільнювати його. Наприклад, розчинення алюмінідів заліза та цирконію в рідкому алюмінії [11-12]. В даному випадку, початок розчинення відбувається при умові, коли градієнтом концентрації є різниця між концентрацією заліза, цирконію в поверхневому шарі твердого алюмініду та їх концентрацією в адсорбованому шарі розплаву. Остання величина на початку розчинення близька до нуля і з часом мало змінюється.

Інша картина спостерігається в процесі розчинення бінарного сплаву в сплаві з нижчою температурою плавлення, який не є поверхнево-активним, наприклад, розчинення алюмінію заліза в рідкому залізі. В цьому випадку перші порції поверхнево-активного компонента в адсорбційному шарі повинні знижувати концентрацію легкоплавкого компонента і зменшувати швидкість розчинення.

Для дослідження кінетики розчинення чистих металів та кристалічних модифікаторів в розплаві на основі алюмінію застосовували метод обертового диску з рівнодоступною поверхнею [12-16]. Головною умовою для коректного проведення досліджень в цьому методі є ламінарне натікання рідкого потоку на диск. Досліди проводили на лабораторній установці, принципова схема якої зображена на рис. 1. Установка дозволяє досліджувати розчинення в

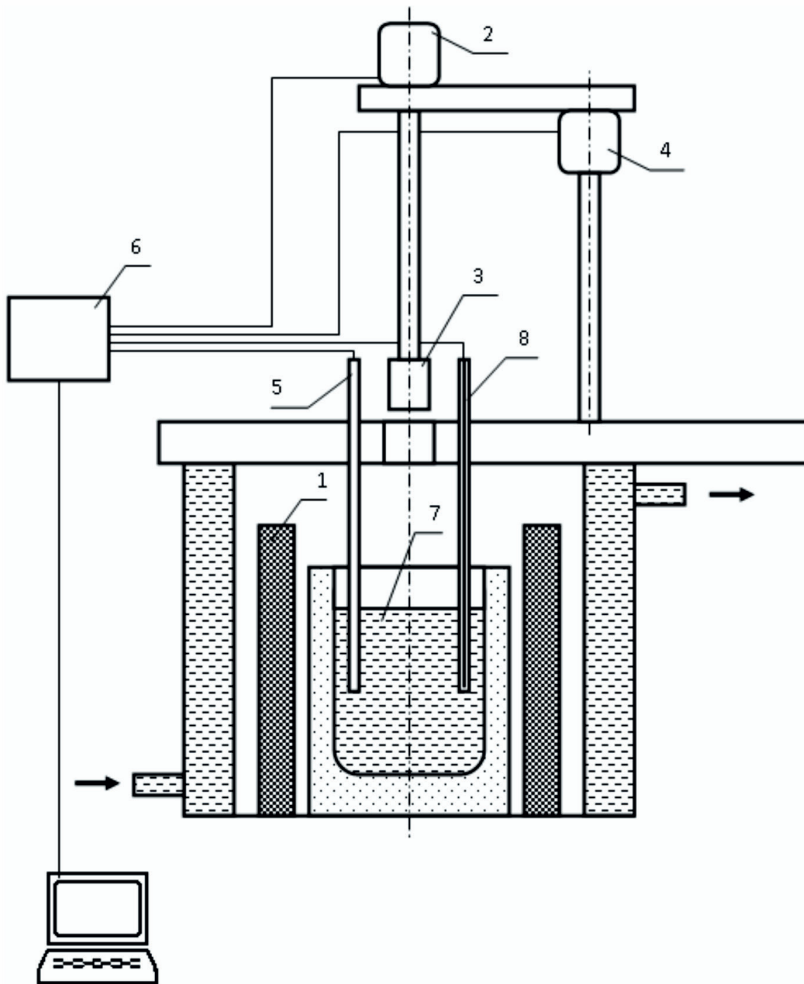


Рис. 1. Схема установки для дослідження розчинення твердих речовин у розплавах методом обертового диску з рівнодоступною поверхнею.

Fig. 1. Scheme of the setup for studying the dissolution of solids in melts using the rotating disk method with an equally accessible surface.

рідинах (до 1600 °C), в тому числі в металевих розплавах різного складу. Плавильний агрегат 1 складається з графітового нагрівача, струмопроводів, водоохолоджуваної сорочки, пічного трансформатора. Температура в печі регулюється через пічний трансформатор за допомогою регулятора ВРТ-2.

Двигун обертання 2 являє собою двигун постійного струму з плавним регульованим числом оборотів від 0 до 7000 об / хв. Через муфту обертання передається на вал, який виготовлений з ніобію і закріплений в підшипниках.

Зразок 3 вставляється, або заливається у графітову обойму та кріпиться на валу різьбовим з'єднанням. Двигун спуску-підйому 4 передає обертання на ходовий гвинт, за допомогою якого весь вузол обертання зразка опускається по спеціальних напрямних, подаючи зразок в шахту печі. Швидкість обертання зразка вимірюється на пристрої, що складається з фотодіода, підсилювача, диска з симетричними отворами, підсвічування, частоміра-хронометра Ф 5080. Температура вимірюється за допомогою термопари 5 (ВР 5/20) і реєструється блоком управління і вимірів 6. Піддув аргону контролюється ротаметром РС-ЗА. Час контакту зразка з розплавом 7 контролюється електромеханічним секундоміром типу ПВ-53Ш. Точність вимірювання часу становить 0,01 с. Секундомір включається шляхом подачі негативної напруги через спеціально сконструйовану електролітичну комірку 8, вміщену в досліджуваний розплав.

Зразки діаметром 10 мм з чистих металів (Cu, Zr, Ti) виготовляли на токарному верстаті, кристалічні лігатури систем Al-Zr і Al-Cu-Zr-Ni (таблиця) заливали в спеціально виготовлені графітові обойми. Зразки з чистих металів і лігатур поміщали в графітові обойми, які кріпилися на валу обертання. Час контакту твердих зразків з розплавом на основі алюмінію складав від декількох секунд до години.

Хімічний склад лігатур для алюмінієвих сплавів

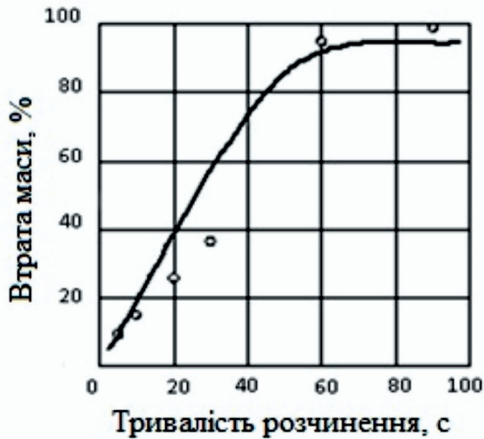
Chemical composition of master alloys for aluminum alloys

Система	Хімічний склад лігатури, % мас. час.			
	Al	Cu	Zr	Ni
Al-Zr	97,5	-	2,5	-
Al-Cu-Zr-Ni	47	40	10	3

Хімічний склад розплаву відповідав високоміцному сплаву В95, %, мас. част.: Al – 87,53, Zn – 6,73, Mg – 2,37, Cu – 1,86, Fe – 0,38, Si – 0,41, Mn – 0,43, Cr – 0,18, Ni – 0,08, Ti – 0,03. Склад розплаву контролювали методом відбору проб і подальшим їх аналізом. Після розчинення чистих металів на їх поверхні, що контактує з розплавом, залишалися краплі металу. Їх видаляли за рахунок збільшення швидкості обертання.

Зміна маси зразка за рахунок угару або окислення під час експерименту враховувалася введенням в розрахунки поправки. Вона визначалася по зміні маси твердих зразків при холостих дослідженнях, де зразок проходив всі стадії експерименту, окрім розчинення.

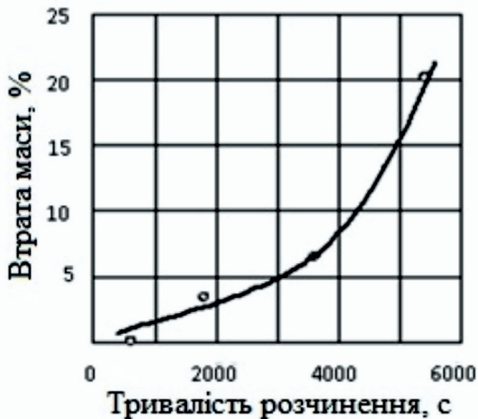
Дослідження кінетики розчинення міді в розплаві В95 показали, що вона досить швидко розчиняється при температурі 750 °С (рис. 2 а). Видно, що через 60 секунд, при швидкості обертання зразка 600 об/хв, зміна маси складає 94 %. Згідно з діаграмою стану при температурі 550 °С в алюмінієвому розплаві розчиняється близько 1 %, а при 660 °С – 33 % міді [19].



а



б



в

Рис. 2. Кінетика розчинення міді (а), цирконію (б) та титану (в) в розплаві на основі алюмінію при температурі 750 °С.

Fig. 2. Dissolution kinetics of copper (a), zirconium (б) and titanium (в) in an aluminum-based melt at 750 °C.

Розчинення цирконію в цьому ж розплаві, за тих самих умов, відбувається набагато повільніше. З рис. 2 б видно, що більш ніж півгодинна витримка не призводить до істотної зміни маси зразка – зміна маси не перевищує 1,5 %. Проте при подальшому збільшенні часу витримки (протягом години) збільшується швидкість розчинення матеріалу. При цьому зміна маси складає 50 %. Цирконій має низьку розчинність, як в твердому алюмінії, так і в його розплавах. Розчинність цирконію в алюмінії при температурі 660 °С складає 0,28% і зменшується приблизно в чотири рази при зниженні її до 350 °С. Характерним є те, що інтерметалід $AlZr_3$ утворюється при температурі вище температури плавлення алюмінію і тому його наявність на поверхні зразку істотно зменшує швидкість розчинення Zr.

Що стосується розчинення титану, то встановлено, що даний елемент ще гірше розчиняється в рідкому алюмінієвому сплаві. Годинна витримка зразка в розплаві за аналогічних умов призводить до зниження маси на 5 % (рис. 2 в). Поясненням цьому, як і у випадку з цирконієм, служить низька розчинність титану в алюмінії (0,26 % при 660 °C) [19]. Дослідження кінетики розчинення модифікаторів систем Al–Zr і Al–Cu–Zr–Ni показали, що вони розчиняються в розплаві В95 набагато швидше.

Встановлено, що зміна маси кристалічних зразків Al-2,5 % Zr при їх розчиненні в рідкому алюмінієвому сплаві при температурі 750 °C і швидкості обертання 600 об/хв протягом 30 секунд змінюється від 1 % до 20 % (рис. 3 а). Що стосується розчинення системи Al–Cu–Zr–Ni, встановлено, що витримка протягом тридцяти секунд виготовлених з нього зразків при вищезгаданих умовах в розплаві алюмінію призводить до того, що їх маса зменшується удвічі (рис. 3 б).

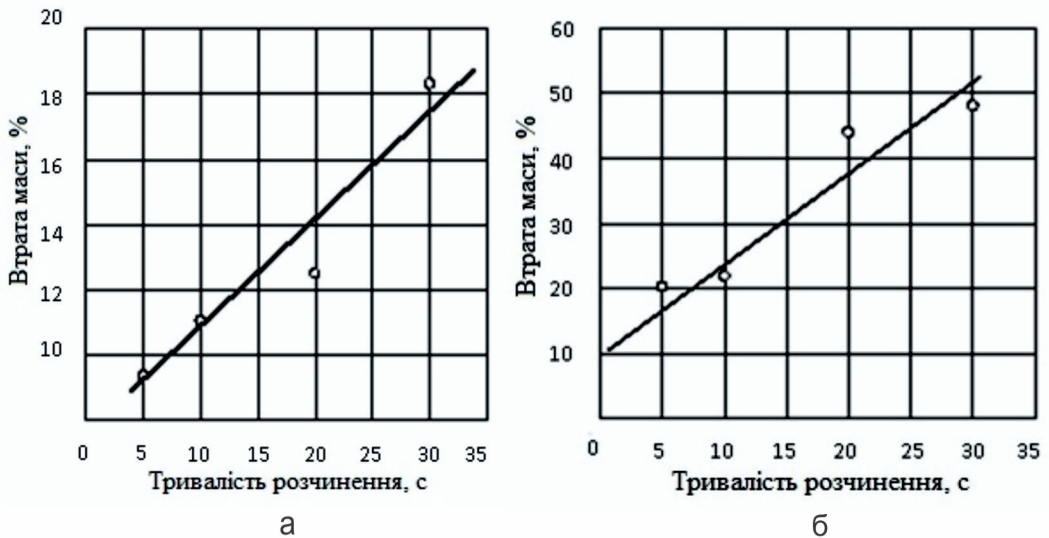


Рис. 3. Кінетика розчинення кристалічних лігатур Al – 2,5 % Zr (а), та Al – 40 % Cu – 10 % Zr – 3 % Ni (б) в розплаві на основі алюмінію при температурі 750 °C.

Fig. 3. Dissolution kinetics of the crystalline master alloys Al – 2,5 % Zr (a) and Al – 40 % Cu – 10 % Zr – 3 % Ni (b) in aluminum-based melt at 750 °C.

Таким чином досліджено питому швидкість розчинення кристалічних лігатур Al–Zr і Al–Cu–Zr–Ni в розплаві В95, яка наближається до швидкості розчинення чистої міді, незважаючи на складну фазову структуру багатокомпонентних систем модифікаторів.

Показано, що розчинення міді, цирконію та титану не є лінійним у часі, а залежить від утворення інтерметалідних фаз на поверхні, що істотно змінює динаміку процесу. Можливо структура модифікатора (пористість, багатокомпонентність) може компенсувати низьку термодинамічну розчинність окремих елементів, що має практичне значення для оптимізації режимів плавки.

Отримані результати доповнюють існуючі уявлення про механізми розчинення модифікаторів у алюмінієвих розплавах, зокрема щодо ролі фазового складу, поверхневої активності та гідродинамічних умов. Це створює основу для оптимізації режимів введення лігатур у промислових умовах. Таким чином, отримані результати не лише узгоджуються з теоретичними уявленнями, але й розширюють їх, дозволяючи краще прогнозувати поведінку модифікаторів у промислових умовах.

Висновки

Встановлено кінетичні закономірності розчинення чистих металів (Cu, Zr, Ti) та кристалічних модифікаторів систем Al–Zr і Al–Cu–Zr–Ni у розплаві високоміцного алюмінієвого сплаву В95 методом обертового диска з рівнодоступною поверхнею. Виявлено, що мідь має найвищу питому швидкість розчинення серед досліджених металів ($18,6 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$), тоді як цирконій і титан – приблизно на порядок нижчу, що узгоджується з їх низькою термодинамічною розчинністю в алюмінії. Встановлено, що утворення інтерметалідних фаз (наприклад, AlZr_3) на поверхні зразків може істотно уповільнювати процес розчинення, формуючи індукційний період, особливо для цирконію та титану. Показано, що кристалічні модифікатори розчиняються значно швидше, ніж відповідні чисті метали. Зокрема, маса зразків системи Al–Cu–Zr–Ni зменшується удвічі вже за 30 секунд контакту з розплавом, що свідчить про активну участь структурних чинників у процесі розчинення.

Література

1. Zhao J. F., Unavar Anselmi-Tamburini C., Munir Z. A. Kinetics of current-enhanced dissolution of nickel in liquid aluminum // *Acta Materialia*. – 2007. – Vol. 55. – P. 5592-5600.
2. Dybkov V. I. Interaction of iron-nickel alloys with liquid aluminium // *Journal of Materials Science*. – 1993. – Vol. 28. – P. 6371-6380.
3. Поленц И. В., Бродова И. Г., Башлыков Д. В., Гудов А. Г., Яблонских Т. И. Роль кинетики растворения интерметаллидов при легировании алюминиевых расплавов титаном // *Расплавы*. – 1995. – № 6. – С. 23-31.
4. Еременко В. Н., Натанзон Я. В., Титов В. П. Кинетика растворения и коэффициенты диффузии железа, кобальта и никеля в жидком алюминии // *Физико-химическая механика материалов*. – 1978. – № 6. – С. 3-10.
5. Еременко В. Н., Натанзон Я. В., Титов В. П. Кинетика растворения титана в жидком алюминии // *Известия АН СССР. Металлы*. – 1981. – № 3. – С. 25-29.
6. Кандалова Е. Г., Никитин К. В. Влияние структурных параметров лигатуры Al–Ti на свойства Al-сплавов // *Литейное производство*. – 2000. – № 10. – С. 21-22.
7. Никитин К. В. Наследственное влияние мелкокристаллических модификаторов на свойства алюминиевых сплавов // *Литейное производство*. – 2002. – № 10. – С. 16-18.

8. Ганиев И. Н., Махмадуллоев Х. А., Хакдодов М. М. и др. Модифицирование вторичных силуминов бариумом и сурьмой // *Литейщик России*. – 2002. – № 2. – С. 27-28.
9. Убайдуллоев Т. С., Ганиев И. Н., Бердиев А. Э., Ганиев Н. И. Механизм растворения иттрия и скандия в жидком алюминии // *Литейщик России*. – 2002. – № 2. – С. 28-29.
10. Перцов А. В. Квасисамопроизвольное диспергирование твердых тел // *Коллоидный журнал*. – 2005. – Т. 67, № 4. – С. 508-517.
11. Еременко В. Н., Натанзон Я. В., Титов В. П. Кинетика растворения соединения $ZrAl_3$ в жидком алюминии // *Известия АН СССР. Металлы*. – 1981. – № 6. – С. 211-215.
12. Еременко В. Н., Натанзон Я. В. Кинетика растворения алюминидов железа в жидком алюминии // В кн.: *Смачиваемость и поверхностные свойства*. – Киев : Наукова думка, 1972. – С. 108-111.
13. Левич В. П. *Физико-химическая гидродинамика*. – М. : Физико-математическая литература, 1959. – 699 с.
14. Верховлюк А. М. Полуавтоматическая установка для исследования кинетики растворения // *Адгезия расплавов и пайка материалов*. – 1985. – Вып. 15. – С. 43-48.
15. Дибров И. А., Билецкий А. К., Верховлюк А. М. К вопросу растворения модификаторов в жидком чугуна // *Литейное производство*. – 1993. – № 6. – С. 6-8.
16. Верховлюк А. М., Щерецкий А. А. Кинетика растворения сплавов на основе железа в расплавах алюминия // *Адгезия расплавов и пайка материалов*. – 1995. – Вып. 32. – С. 71-74.
17. Шумихин В. С., Верховлюк А. М., Лахненко В. Л. Кинетика растворения модификаторов в жидком чугуна // *Расплавы*. – 2001. – № 4. – С. 15-19.
18. Верховлюк А. М. Кинетические особенности растворения твердых материалов в расплавах на основе железа // *Процессы литья*. – 2004. – № 3. – С. 10-20.
19. *Диаграммы состояния двойных и металлических систем* / под ред. Н. П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 2000. – Т. 1. – 448 с.

References

1. Zhao, J. F., Unavar Anselmi-Tamburini, C., & Munir, Z. A. (2007). Kinetics of current-enhanced dissolution of nickel in liquid aluminum. *Acta Materialia*, 55, 5592-5600.
2. Dybkov, V. I. (1993). Interaction of iron-nickel alloys with liquid aluminium. *Journal of Materials Science*, 28, 6371-6380.
3. Polents, I. V., Brodova, I. G., Bashlykov, D. V., Gudov, A. G., & Yablonskikh, T. I. (1995). Rol' kinetiki rastvoreniya intermetallidov pri legirovanii alyuminievyykh rasplavov titanom [Role of intermetallic dissolution kinetics during aluminum melt alloying with titanium]. *Rasplavy*, (6), 23-31. [in Russian]
4. Eremenko, V. N., Natanzon, Ya. V., & Titov, V. P. (1978). Kinetika rastvoreniya i koeffitsienty diffuzii zheleza, kobal'ta i nikelya v zhidkom alyuminii [Dissolution kinetics and diffusion coefficients of Fe, Co, and Ni in liquid aluminum]. *Fiziko-khimicheskaya Mekhanika Materialov*, (6), 3-10. [in Russian]

5. Eremenko, V. N., Natanzon, Ya. V., & Titov, V. P. (1981). Kinetika rastvoreniya titana v zhidkom alyuminii [Dissolution kinetics of titanium in liquid aluminum]. *Izvestiya AN SSSR. Metally*, (3), 25-29. [in Russian]
6. Kandalova, E. G., & Nikitin, K. V. (2000). Vliyanie strukturnykh parametrov ligatury Al-Ti na svoystva Al-splavov [Effect of structural parameters of Al-Ti master alloy on properties of Al alloys]. *Liteynoe Proizvodstvo*, (10), 21-22. [in Russian]
7. Nikitin, K. V. (2002). Nasledstvennoe vliyanie melkokrystalliticheskikh modifikatorov na svoystva alyuminiyevykh splavov [Hereditary effect of fine-grain modifiers on aluminum alloy properties]. *Liteynoe Proizvodstvo*, (10), 16-18. [in Russian]
8. Ganiev, I. N., Makhmadulloev, Kh. A., Khakdodov, M. M., & others. (2002). Modifitsirovanie vtorichnykh siluminov bariem i sur'moy [Modification of secondary silumins with barium and antimony]. *Liteyshchik Rossii*, (2), 27-28. [in Russian]
9. Ubaydullov, T. S., Ganiev, I. N., Berdiev, A. E., & Ganiev, N. I. (2002). Mekhanizm rastvoreniya ittriya i skandiya v zhidkom alyuminii [Mechanism of yttrium and scandium dissolution in liquid aluminum]. *Liteyshchik Rossii*, (2), 28-29. [in Russian]
10. Pertsov, A. V. (2005). Kvazisamoproizvol'noe dispergirovanie tverdykh tel [Quasi-spontaneous dispersion of solids]. *Kolloidnyi Zhurnal*, 67(4), 508-517. [in Russian]
11. Eremenko, V. N., Natanzon, Ya. V., & Titov, V. P. (1981). Kinetika rastvoreniya soedineniya $ZrAl_3$ v zhidkom alyuminii [Dissolution kinetics of $ZrAl_3$ in liquid aluminum]. *Izvestiya AN SSSR. Metally*, (6), 211-215. [in Russian]
12. Eremenko, V. N., & Natanzon, Ya. V. (1972). Kinetika rastvoreniya alyuminidov zheleza v zhidkom alyuminii [Dissolution kinetics of iron aluminides in liquid aluminum]. In *Smachivaemost' i poverkhnostnye svoystva* (pp. 108-111). Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]
13. Levich, V. P. (1959). *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika* [Physicochemical hydrodynamics]. Moscow: Fiziko-matematicheskaya literatura. [in Russian]
14. Verkhovliuk, A. M. (1985). Poluavtomaticheskaya ustanovka dlya issledovaniya kinetiki rastvoreniya [Semi-automatic setup for studying dissolution kinetics]. *Adgeziya Rasplavov i Paika Materialov*, (15), 43-48. [in Russian]
15. Dibrov, I. A., Biletsky, A. K., & Verkhovliuk, A. M. (1993). K voprosu rastvoreniya modifikatorov v zhidkom chugune [On the issue of modifier dissolution in liquid cast iron]. *Liteynoe Proizvodstvo*, (6), 6-8. [in Russian]
16. Verkhovliuk, A. M., & Shcheretsky, A. A. (1995). Kinetika rastvoreniya splavov na osnove zheleza v rasplavakh alyuminiya [Dissolution kinetics of iron-based alloys in aluminum melts]. *Adgeziya Rasplavov i Paika Materialov*, (32), 71-74. [in Russian]
17. Shumikhin, V. S., Verkhovliuk, A. M., & Lakhnenko, V. L. (2001). Kinetika rastvoreniya modifikatorov v zhidkom chugune [Dissolution kinetics of modifiers in liquid cast iron]. *Rasplavy*, (4), 15-19. [in Russian]
18. Verkhovliuk, A. M. (2004). Kineticheskie osobennosti rastvoreniya tverdykh materialov v rasplavakh na osnove zheleza [Kinetic features of solid material dissolution in iron-based melts]. *Protsessy Liteya*, (3), 10-20. [in Russian]
19. Lyakishev, N. P. (Ed.). (2000). *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh i metallicheskiykh system* [Phase diagrams of binary and metallic systems] (Vol. 1). Moscow: Mashinostroenie. [in Russian]

Одержано 28.07.25

Kinetics of modifier dissolution in aluminum-based melts

Verkhovliuk A. M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, anatoliiverkhovliuk@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2670-4052>

Zhelezniak O. V., Junior Researcher; alekszel43@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8495-8045>

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Summary

This study investigates the dissolution kinetics of pure metals (Cu, Zr, Ti) and crystalline modifiers of the Al-Zr and Al-Cu-Zr-Ni systems in the melt of high-strength aluminum alloy B95. The relevance of the research stems from the limited understanding of the interaction mechanisms between multicomponent master alloys and liquid aluminum, which constrains the ability to control the structure and properties of cast products. The aim of the work is to establish the dissolution patterns of various types of modifiers in the melt, considering the effects of temperature, holding time, and phase composition. Experimental investigations were conducted using the rotating disk method, which ensures a uniformly accessible contact surface with the melt. The contact time between solid samples and the aluminum-based melt ranged from several seconds to one hour. Mass loss due to oxidation or evaporation was determined through control experiments, where samples underwent all stages except dissolution. Specific dissolution rates of the components were determined and correlated with the physicochemical properties of the materials. It was found that copper exhibits the highest dissolution rate among the pure metals studied ($18.6 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$), while zirconium and titanium dissolve approximately ten times slower. Crystalline modifiers dissolve significantly faster than their corresponding pure metals. In particular, samples of the Al-Cu-Zr-Ni system lose half their mass within 30 seconds of contact with the melt at 750°C , indicating a strong influence of structural factors on the dissolution process. The scientific novelty of the work lies in the quantitative comparison of dissolution rates between pure metals and multicomponent master alloys, as well as in identifying the role of phase transformations and surface activity in the dissolution dynamics. The results expand existing concepts of modifier – melt interaction mechanisms and can be applied to optimize alloying and modification regimes for aluminum alloys in industrial practice.

Keywords: dissolution kinetics, modifier, aluminum-based melts.