

Алгоритм оцінки ступеня модифікованості алюмінієвих ливарних сплавів з використанням комп'ютерного термічного аналізу

О. М. Доній, кандидат технічних наук
А. А. Кулініч, кандидат технічних наук
Г. О. Морозова

Національний технічний університет України "КПІ", Київ

На прикладі сплаву Al + (9,0 – 12,0) % Si, який модифіковано стронцієм, розроблено алгоритм оцінки ступеня модифікованості алюмінієвих ливарних сплавів з використанням комп'ютерного термічного аналізу.

Для отримання литих виробів гарантованої якості необхідно мати можливість безпосередньо у процесі підготовки розплаву до розливання визначити комплекс параметрів, які характеризують якість литва. Важливо мати своєчасні рекомендації щодо раціональної обробки розплаву (модифікування, рафінування) для оптимізації стану рідкого металу перед розливанням. В роботах [1 – 4] було показано, що для цього можна використовувати методику комп'ютерного термічного аналізу (КТА), тому що крива охолодження відображає динаміку процесу кристалізації, в ході якої формується структура і властивості.

Метою даної роботи була розробка алгоритму експрес-оцінки ступеня модифікованості ливарних алюмінієвих сплавів за допомогою (КТА).

Для цього було обрано силумін Al + (9,0 – 12,0) % Si, а в якості модифікатора використовували лігатуру Al – 3,5 % Sr. Модифікування здійснювали шляхом послідовного введення лігатури з таким розрахунком, аби вміст стронцію в розплаві змінювався від 0,01 % до 0,20 %. В процесі експерименту криву охолодження фіксували в пам'яті ЕОМ, а потім після цифрової фільтрації обчислювали її першу похідну (рис. 1), використовуючи для цього формули числового диференціювання [5]. Ділянки кривої охолодження на початку охолодження та після кристалізації пропорційні експоненціальній залежності, а між ними спостерігаються області температур, які відповідають формуванню твердого розчину та евтектики.

При введенні стронцію в сплав Al + (9,0 – 12,0) % Si змін на кривих охолодження та їх перших похідних в області кристалізації алюмінієвого твердого розчину практично не спостерігалось (рис. 1 та рис. 2 а, б). В області

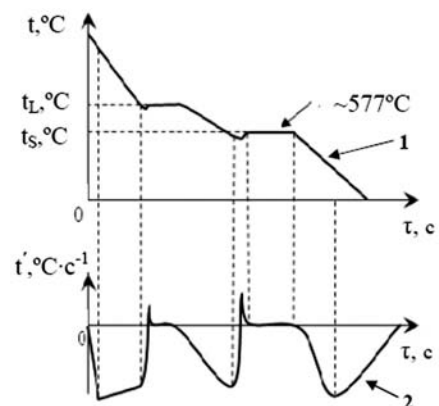


Рис. 1. Крива охолодження немодифікованого сплаву (1) Al + (9,0 – 12,0) % Si та її перша похідна (2).

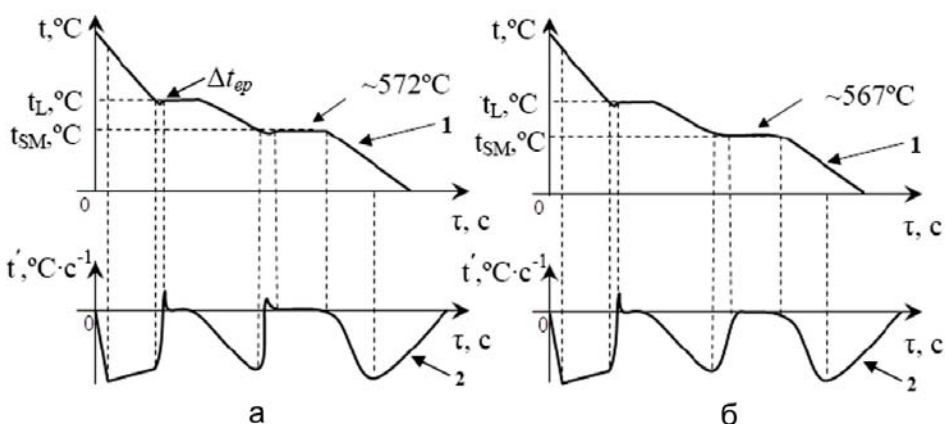


Рис. 2. Криві охолодження модифікованого сплаву (1) Al + (9,0 – 12,0) % Si та їх перші похідні (2). а – вміст Sr 0,1 %, б – вміст Sr 0,2 %.

кристалізації евтектики ($\alpha_{Al} + Si$) при поступовому збільшенні вмісту стронцію до 0,2 % відзначається зниження температури солідус приблизно на 10 градусів: від 850 К до 840 К (відповідно 577 °С до 567 °С). Більш контрастні зміни температури солідус в залежності від вмісту стронцію виявляються при реєстрації температурного інтервалу між її числовими значеннями температур солідус немодифікованого (t_s) і модифікованого (t_{sm}) розплавів $\Delta t_s = t_s - t_{sm}$ (рис. 1 та рис. 2). У цьому випадку інтервал Δt_s зростає від 0 до 9 – 10° при введенні стронцію до 0,20 %.

Паралельно на термограмі в області початку формування евтектики відбувається зменшення величини рекалісценції Δt_{ep} (рис. 2 а) від 5,0 – 6,5 °С при вмісті стронцію менше 0,05 % до її повного зникнення (рис. 2 б) при вмісті стронцію більше 0,15 %. Зміни на кривій охолодження призводять до змін їх перших похідних. Для немодифікованого металу в області кристалізації евтектики існує явно виражений другий пік першої похідної, максимум якого має позитивне значення, що свідчить про наявність рекалісценції. З підвищенням ступеня модифікованості розплаву величина цього максимуму зменшується до нуля, а потім і зовсім переходить в область від'ємних величин (рис. 2 а, б). Дані зміни на кривих охолодження та їх похідних підтверджуються металографічним аналізом структур сплавів.

В немодифікованому металі частинки кремнію, які входять до евтектики, мають голчасту форму. При вмісті стронцію до 0,05 % частинки кремнію змінюють свою морфологію з голчастої на пластинчасту. Збільшення вмісту стронцію до 0,20 % призводить до зміни морфології часток кремнію з пластинчастої на волокнисту [6].

Таким чином, є два параметри, які можна використовувати для оцінки рівня модифікованості сплаву Al + (9 – 12) % Si. Це температурний інтервал між числовими значеннями не модифікованого і модифікованого розплавів Δt_s і величина рекалісценції Δt_{ep} в області початку формування евтектики (чи величина другого піку першої похідної кривої охолодження, яка тісно корелює з Δt_{ep}). Числове значення Δt_s змінюється в межах від 0 до 9 – 10 °С, а числове значення Δt_{ep} – від 0 до 5 – 7 °С. Враховуючи бажану величину роздільної здатності вимірювального каналу підсистеми КТА [7] можна зробити наступні висновки.

В якості критеріального параметра в даному випадку припустимо вибрати як інтервал між числовими значеннями немодифікованого і модифікованого розплавів Δt_s , так і величину рекалісценції Δt_{ep} в області початку формування евтектики. Можна також враховувати їх значення одночасно.

Необхідно встановити 9 – 10 рівнів зміни критеріального параметра відповідно діапазону його зміни. В даному випадку він становить $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ і відповідає можливостям вимірювального каналу КТА. Тобто для кількісного визначення ступня ефекту модифікування з урахуванням його зниження з часом витримки розплаву представляється зручним виразити цей ступінь в умовних одиницях дії модифікатора (УОД). Одна умовна одиниця дії відповідає зміні значення критеріального параметра на $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На базі отриманих результатів створено алгоритм прогнозування структури литого металу при зміні ступеня його модифікування на прикладі сплаву $\text{Al} + (9 - 12)\% \text{Si}$. У самому простому випадку досить прийняти три градації структури: структура немодифікована, слабо модифікована і модифікована. Відповідно до цієї класифікації виділено діапазони модифікуючого ефекту стронцію в УОД: 1 – 3 УОД – вміст стронцію до $0,05\%$ – немодифікований метал, 4 – 6 УОД – вміст стронцію до $0,1\%$ – слабо модифікований метал, більше 6 УОД – вміст стронцію до $0,2\%$ – модифікований метал.

У результаті обробки експериментальних даних отримані регресійні рівняння зв'язку для залежності значень умовних одиниць дії стронцію від величини Δt_{ep} , яка має вигляд:

$$\text{УОД } \Delta t_{ep} = 7,881 - 3,036\Delta t_{ep} + 0,3365\Delta t_{ep}^2. \quad (1)$$

Для залежності значень умовних одиниць дії стронцію від температурного інтервалу Δt_s :

$$\text{УОД } \Delta t_s = 0,70093 + 1,0351\Delta t_s - 0,03267\Delta t_s^2. \quad (2)$$

Згідно (1) сплав можна вважати немодифікованим при значенні Δt_{ep} більше $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ і модифікованим при значенні цього параметра нижче $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ і до його відсутності. З рівняння (2), сплав можна вважати немодифікованим при значенні інтервалу Δt_s нижче $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ і модифікованим при значенні цього параметра більше $6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Значення критеріальних параметрів для слабо модифікованого металу лежать в середині зазначених меж.

Визначені таким способом граничні значення структурочутливих параметрів, які рееструються на термічних кривих охолодження та їх похідних першого порядку, лежать в основі загального алгоритму оцінки ступеню модифікування $\text{Al} - \text{Si}$ сплаву, блок-схема якого наведена на рис. 3.

Спочатку відбирається проба металу перед модифікуванням і отримана крива охолодження зберігається в пам'яті ЕОМ. Далі при необхідності оцінки ступеню модифікованості відбирається друга проба модифікованого розплаву. Ця крива охолодження також фіксується у пам'яті комп'ютера (блок 1). Далі (блок 2) на кривій охолодження за такою схемою визначаються характерні температурні точки (рис. 4) за методикою, яка описана в [7]. Спочатку розраховуються точки t_k та t_{mb} , які відповідають початку і кінцю кристалізації (потрібно зазначити, що кристалізується реальний розплав, який містить певну кількість домішок, тому температура кінця кристалізації ттв не співпадає із температурою солідус). Потім фіксують максимальні і мінімальні значення на першій похідній кривій охолодження. Для сплаву $\text{Al} + 11\% \text{Si}$ перша похідна кривій охолодження має два максимуми і один мінімум. Перший максимум похідної для області утворення α -фази визначає температурну точку t_2 , а другий максимум похідної для області утворення евтектики – температурну точку t_6 . Перший мінімум похідної відповідає температурі t_4 (температура початку утворення

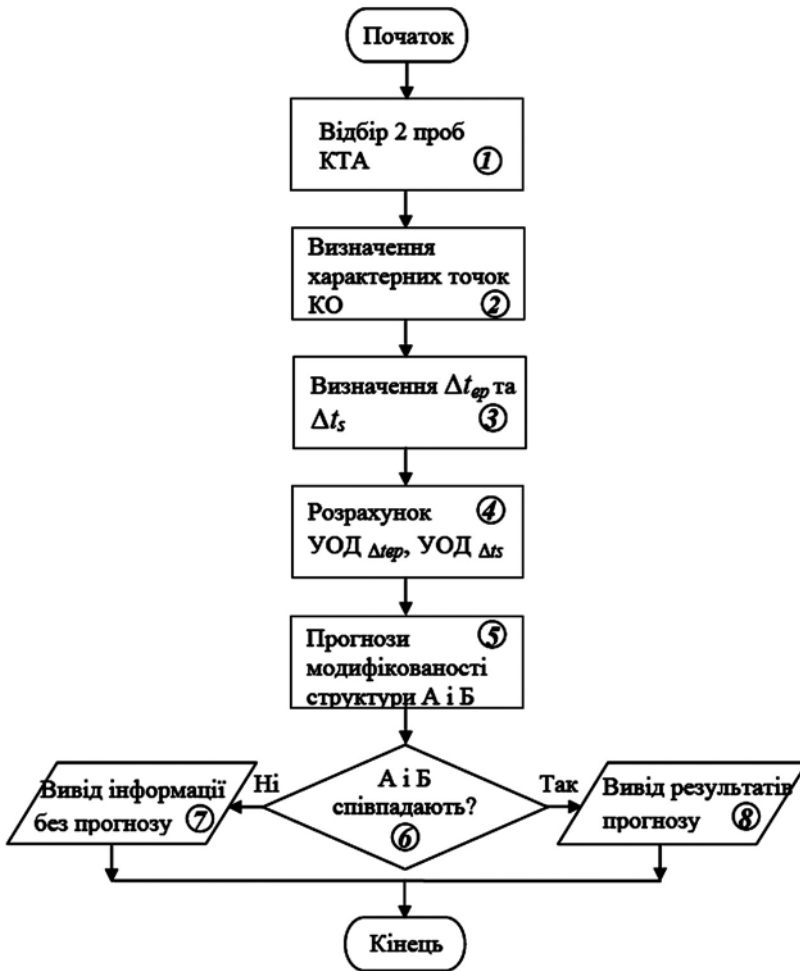


Рис. 3. Блок-схема загального алгоритму оцінки ступеня модифікованості сплаву Al + (9 – 12) % Si.

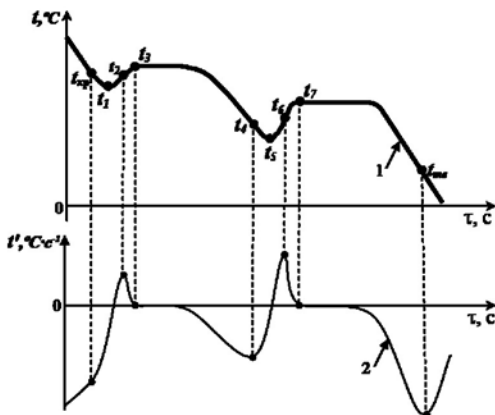


Рис.4. Умовна крива охолодження бінарного сплаву (1), її перша похідна (2) та температурні точки, що можна розглядати як характерні і включати в кореляційний аналіз.

евтектики). Точку t_1 знаходять як мінімальну температуру в діапазоні між $t_{кр}$ і t_2 (мінімальна температура ділянки кривої охолодження з рекалесценцією для α -фази), а точку t_3 (яка, фактично, відповідає ліквідусу) – як максимальну температуру в діапазоні між t_2 і t_4 . Точку t_5 знаходять як мінімальну температуру в діапазоні між t_4 і t_6 (мінімальна температура ділянки кривої охолодження з рекалесценцією для евтектики). Нарешті t_7 – максимальна температура в діапазоні між t_6 і t_{mb} (вона, фактично, відповідає солідусу).

У блоці 3 (рис. 3) визначаються Δt_{ep} і Δt_s як:

$$\Delta t_{ep} = t_7 - t_5, \quad (3)$$

$$\Delta t_s = t_3 - t_7. \quad (4)$$

Потім за формулами (1) і (2) визначають УОД Δt_{ep} та УОД Δt_s (блок 4). У блоці 5 відповідно до вище вказаної класифікації формують прогноз структури сплаву в твердому стані за трьома градаціями: немодифікована, слабо модифікована і модифікована, як по Δt_{ep} (прогноз А), так і по Δt_s (прогноз Б). Якщо прогнози збігаються, то система виводить їх результати (блок 8), а якщо співпадання немає, то система видає повідомлення про це (блок 7) і рішення про стан металу приймає персонал цеху з урахуванням передісторії його обробки.

Отже, на прикладі сплаву системи Al – Si розроблено алгоритм, який дозволяє здійснювати класифікацію ступеня модифікування сплаву в експресному режимі з використанням підсистеми КТА.

Література

1. Apelian D., Sigworth G.K., Whaler K.R. Assessment of grain refinement and modification of Al – Si foundry alloys by thermal analysis // Trans. Amer. Foundrymen's Soc. – 1984. – 92. – P. 297 – 307.
2. Argyropoulos S., Closset B., Gruzelski J. The quantitative control of modification in Al-Si foundry alloys using thermal analysis technique // Transact. Amer. Foundrymen's Soc. – 1983. – 91. – P. 351 – 358.
3. Бялик О. М., Доній О. М., Піковський В. С. Использование компьютерной системы контроля качества расплавов // Литейн. пр-во. – 1996. – № 2. – С. 28 – 30.
4. Sparkman D., Kearney A. Breakthrough in Aluminium Alloy Thermal Analysis Technology for Process Control. Submitted to AFS. – 1993. – 28 p.
5. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ. – М.: Мир, 1982. – 235 с.
6. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.
7. Бялик О. М., Доній О. М., Голуб Л. В. Прогнозування властивостей металів і сплавів методом комп'ютерного термічного аналізу. Препринт. – Київ: Політехніка, 2005. – 114 с.

Одержано 15.04.11

А. Н. Доний, А. А. Кулинич, А. О. Морозова

Алгоритм оценки степени модифицированности алюминиевых литейных сплавов с использованием комп'ютерного термического анализа

Резюме

На примере сплава Al + (9,0 – 12,0) % Si, который модифицирован стронцием, разработан алгоритм оценки степени модифицированности алюминиевых литейных сплавов с использованием компьютерного термического анализа.

O. M. Doniy, A. A. Kulinich, G. O. Morozova

The algorithm of the estimation of the modification of the aluminium cast alloys by computer thermal analysis

Summary

The algorithm of the estimation of modification of Al + (9.0 – 12.0) % Si alloy modified by Sr is developed using computer thermal analysis.