

УДК 661.74:669.14.046.554

Кулініч А. А., Тищенко Н. В., Чепурний П. В.

ВПЛИВ ПЕРЕМІШУВАННЯ РОЗПЛАВУ НА СТРУКТУРУ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Al-Mg

Перемішування металевого розплаву пришвидчує розчинення в ньому легуючих і мікролегуєчих компонентів, забезпечує вирівнювання хімічного складу та температури по всьому об'єму, інтенсифікує процес рафінування розплаву [1–7]. Для деяких груп сплавів може виявитись перспективним перемішування сплаву в рідко-твердому стані, тобто нижче температури початку кристалізації [8, 9]. Це буде залежати від особливостей кристалізації сплавів та від вибору температури і часу перемішування.

В даній роботі досліджено ефективність використання операції механічного перемішування розплаву на структуру ливарних сплавів системи Al-Mg: AMgбл, AMg10 та AMg11. Обробку розплаву робили при температурах перегріву до 150 °С, а також у прилягаючій до температури ліквідус зоні слабо перегрітого розплаву і в області двофазного стану металу.

Експерименти по дослідженню впливу накладення поля відцентрових сил при механічному перемішуванні розплаву на формування структури литого металу сплавів AMgбл, AMg10, AMg11 робили в наступній послідовності.

Порцію базового сплаву розплавляли в плавильній печі. Після розплавлення і перегріву рідкого металу до температури 690–700 °С робили рафінування розплаву флюсом у кількості 2 % від маси сплаву. Склад флюсу: 85 % карналіту (MgCl₂·KCl) та 15 % фтористого кальцію. Потім після витримки розплаву протягом 15–20 хв. видаляли шлаки з поверхні розплаву в плавильному тиглі і охолоджували (або нагрівали) метал у печі до температури, необхідної для перемішування розплаву. Перемішування розплаву досліджуваних сплавів проводили при температурах 750 °С, 730 °С, 710 °С, 690 °С, 670 °С, 650 °С, 630 °С, 610 °С і 600 °С (для сплаву AMgбл мінімальна температура перемішування розплаву обмежувалась на рівні 610 °С). При даних температурах змінювали час перемішування розплаву з 3 до 20 хв. Після перемішування розплаву досліджуваних сплавів при різних температурах і часі його заливали в дослідні форми, виготовлені з різних металів, для одержання зразків на яких досліджували структуру литого металу.

На рис. 1 наведено результати експериментальних досліджень по впливу температури перемішування розплаву на ступінь подрібнення зерна алюмінієвого твердого розчину

$$N = \frac{D_{\text{вихід}}}{D_{\text{оброб}}} \quad (\text{де } D_{\text{вихід}} - \text{розмір зерна вихідного сплаву, } D_{\text{оброб}} - \text{розмір зерна сплаву який в рідкому стані піддали механічному перемішуванню) ливарних сплавів системи Al-Mg.$$

В даному експерименті тривалість перемішування розплаву – 12 хв. Після перемішування розплаву досліджувані сплави охолоджували з постійною швидкістю – $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$.

З даних наведених на рис. 1 можна зробити висновок, що перемішування розплаву типових ливарних сплавів системи Al-Mg навіть в області високого перегріву розплаву (на 120–140 °С вище за температуру початку кристалізації сплавів, тобто при температурі 750 °С) впливає на зменшення середнього розміру зерна досліджуваних сплавів на 15–30 %. Зменшення температури перемішування розплаву суттєво збільшує ефект подрібнення зерна усіх трьох досліджуваних сплавів. Особливо сильно середній розмір зерна даних сплавів зменшується в двофазній зоні при температурах на 10–20 °С нижчих за температуру початку кристалізації сплавів (для сплаву AMgбл температура початку кристалізації – 628 °С, для сплавів AMg10 і AMg11 – 610 °С).

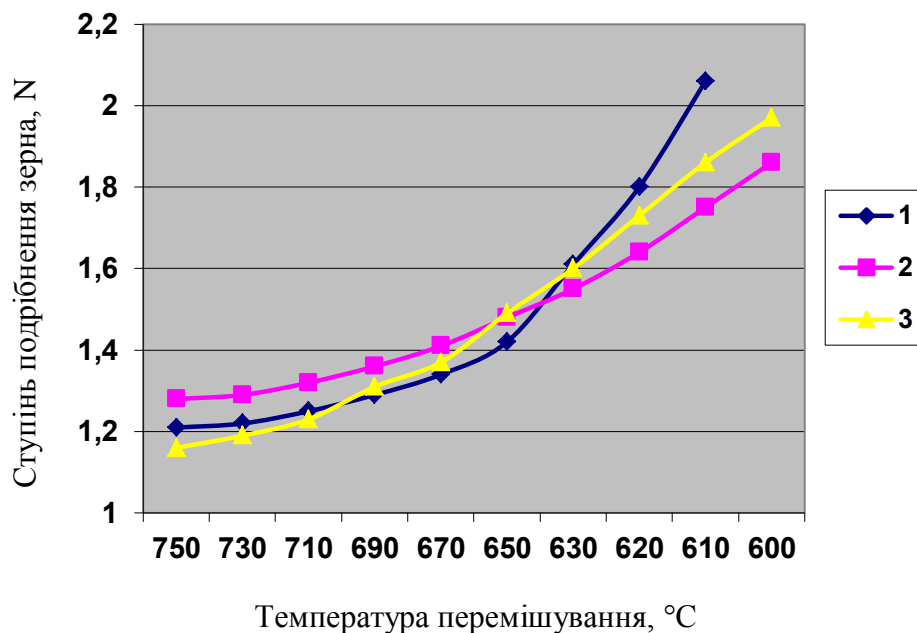


Рис. 1. Вплив температури перемішування розплаву на ступінь подрібнення зерна: 1 – сплав АМг6л; 2 – сплав АМг10; 3 – сплав АМг11

Так для сплаву АМг6л перемішування розплаву при температурі 610 °C (час перемішування 12 хв., подальше охолодження зі швидкістю $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$) впливає на зменшення середнього розміру зерна в 2 рази (с 218 мкм до 106 мкм).

Для сплаву АМг10 перемішування розплаву при температурі 600 °C (час перемішування 12 хв., подальше охолодження зі швидкістю $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$) впливає на зменшення середнього розміру зерна в 1,8 рази (с 252 мкм до 135 мкм). Для сплаву АМг11 перемішування розплаву при температурі 600 °C (час перемішування 12 хв., подальше охолодження зі швидкістю $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$) впливає на зменшення середнього розміру зерна в 1,9 рази (з 315 мкм до 159 мкм).

Разом з температурою важливим параметром перемішування розплаву є час перемішування. На рис. 2 наведено результати експериментальних досліджень по впливу часу перемішування розплаву на ступінь подрібнення зерна

$$N = \frac{D_{\text{вихід}}}{D_{\text{оброб}}}$$
 ливарних сплавів системи

Al–Mg.

Дані дослідження проводили при постійних температурах для кожного сплаву, які є на 10–20 °C нижчими за температуру початку кристалізації сплавів (температура перемішування розплаву: для сплаву АМг6л – 610 °C, для сплавів АМг10, АМг11 – 600 °C. $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$). Як було показано вище, при даних температурах ефект подрібнення розміру зерна від перемішування розплаву є максимальним.

Встановлено, що при збільшенні часу перемішування розплаву з 3 до 20 хв. зростає ступінь подрібнення зерна досліджуваних сплавів (рис. 2.). Для сплаву АМг6л збільшення часу перемішування з 3 до 20 хв. впливає на подрібнення середнього розміру зерна алюмінієвого твердого розчину з 1,4 до 3,0 раз (з 152 до 72 мкм). Для сплаву АМг10 збільшення часу перемішування з 3 до 20 хв. впливає на подрібнення зерна алюмінієвого твердого розчину з 1,5 до 2,6 раз (з 170 до 98 мкм). Для сплаву АМг11 збільшення часу перемішування з 3 до 20 хв. впливає на подрібнення зерна алюмінієвого твердого розчину з 1,3 до 2,7 раз (з 248 до 115 мкм).

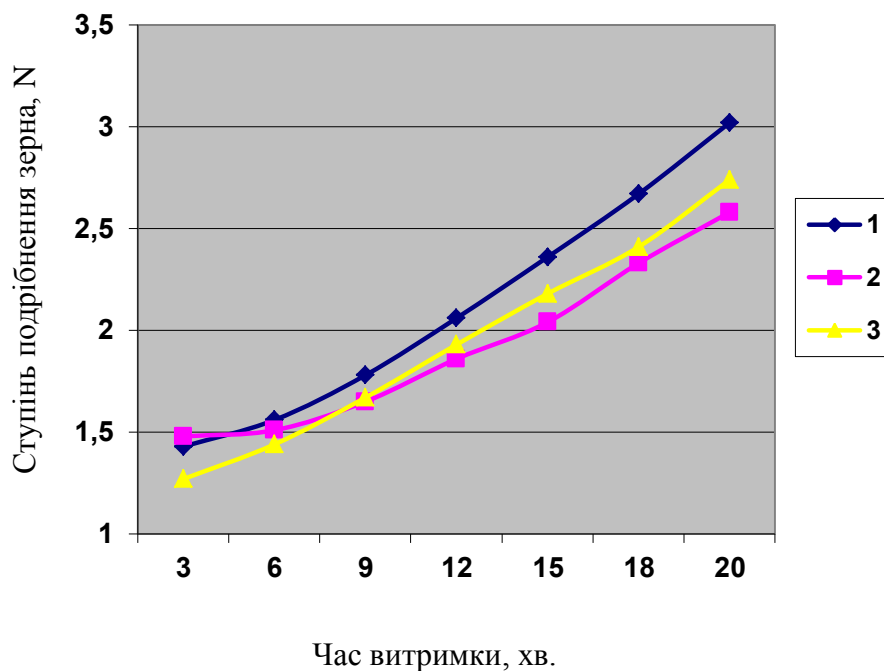


Рис. 2. Вплив часу перемішування розплаву на ступінь подрібнення зерна ливарних сплавів системи Al–Mg. Температура перемішування розплаву: для сплаву АМг6л – 610 °С; для сплаву АМг10, АМг11 – 600 °С. $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$:

1 – сплав АМг6л; 2 – сплав АМг10; 3 – сплав АМг11

Експериментально встановлено, що при збільшенні часу перемішування розплаву більше 15–20 хв. інтенсифікуються процеси вигорання магнію і окислення розплаву досліджуваних сплавів. Тому час перемішування розплаву досліджуваних сплавів потрібно обмежити до 10–15 хв.

На рис. 3 наведено результати експериментальних досліджень по впливу перемішування розплаву при різних швидкостях охолодження при кристалізації на ступінь подрібнення зерна $N = \frac{D_{\text{вихід}}}{D_{\text{оброб}}}$ (де $D_{\text{вихід}}$ – розмір зерна вихідного сплаву, $D_{\text{оброб}}$ – розмір зерна сплаву який в рідкому стані піддали механічному перемішуванню) ливарних сплавів системи Al–Mg.

Дані дослідження проводили при постійних температурах для кожного сплаву, які є на 10–20 °С нижчими за температуру початку кристалізації сплавів (температура перемішування розплаву: для сплаву АМг6л – 610 °С, для сплавів АМг10, АМг11 – 600 °С).

Як було показано вище, при даних температурах ефект подрібнення розміру зерна від перемішування розплаву є максимальним. Час перемішування був постійним – 12 хв. Встановлено, що при даному часі перемішування досягається високий ефект подрібнення зеренної структури досліджуваних сплавів і, в той же час, не відбувається суттєвого вигорання магнію.

Експериментально встановлено, що збільшення швидкості охолодження під час кристалізації ливарних сплавів системи Al–Mg підсилює модифікуючий вплив від перемішування розплаву досліджуваних сплавів. Так, при збільшенні швидкості охолодження з 0,5 °С/с до 4,5 °С/с, після перемішування розплаву за оптимальними температурно–часовими режимами, спостерігається зменшення розміру зерна алюмінієвого твердого розчину сплаву АМг6л з 2 до 4,5 раз (з 106 до 48 мкм.), сплаву АМг10 з 1,8 до 3,4 раз (з 135 до 72 мкм.), сплаву АМг11 з 1,9 до 4,2 раз (з 159 до 75 мкм.).

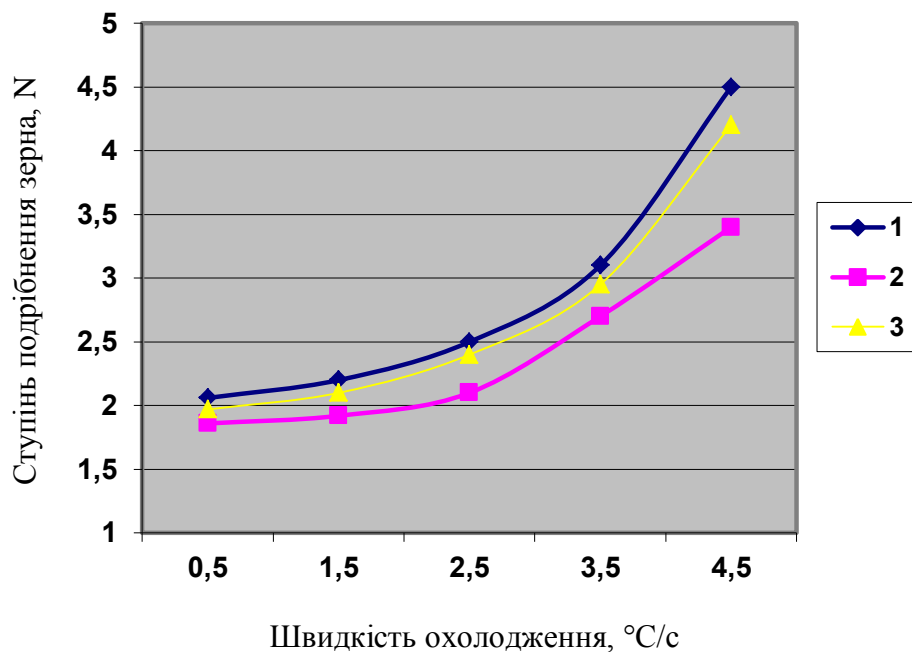


Рис. 3. Вплив швидкості охолодження на ефективність модифікуючої дії перемішування розплаву ливарних сплавів системи Al–Mg. Температура перемішування розплаву: для сплаву AMg6л – 610 °C, для сплавів AMg10, AMg11 – 600 °C. Час перемішування – 12 хв.

1 – сплав AMg6л; 2 – сплав AMg10; 3 – сплав AMg11

На другому етапі досліджень встановлено вплив перемішування розплаву на мікроструктуру сплавів. На рис. 4 наведено результати експериментальних досліджень по впливу температури перемішування розплаву на ступінь подрібнення середнього розміру дендритної

комірки $N = \frac{d_{\text{агд}^{\text{а}}}}{d_{\text{іадіа}}}$ (де $d_{\text{вихід}}$ – середній розмір дендритної комірки вихідного сплаву, $d_{\text{оброб}}$ –

середній розмір дендритної комірки сплаву який в рідкому стані піддали механічному перемішуванню) ливарних сплавів системи Al–Mg. В даному експерименті тривалість перемішування розплаву – 10 хв. Після перемішування розплаву досліджувані сплави охолоджували з постійною швидкістю – $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C/c}$.

З даних наведених на рис. 4 можна зробити висновки, що перемішування розплаву типових ливарних сплавів системи Al–Mg в температурному інтервалі 750 – 600 °C (для сплаву AMg6л нижній температурний поріг 610 °C) і часі витримки 10 хв. та при наступному охолодженні сплавів зі швидкістю охолодження $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C/c}$ суттєво не впливає на розмір дендритної комірки ливарних сплавів системи Al–Mg.

Зменшення температури перемішування розплаву дещо збільшує ефект подрібнення дендритної комірки усіх трьох досліджуваних сплавів (рис. 4).

Для сплаву AMg6л розмір дендритної комірки зменшується на 5 % (з 118 до 112 мкм) після перемішуванні при температурі 750 °C і на 15 % (з 118 до 103 мкм) після перемішуванні при температурі 610 °C. Для сплаву AMg10 розмір дендритної комірки зменшується на 3 % (з 127 до 123 мкм) після перемішуванні при температурі 750 °C і на 12 % (з 127 до 113 мкм) після перемішуванні при температурі 600 °C. Для сплаву AMg11 розмір дендритної комірки зменшується на 2 % (з 138 до 135 мкм) після перемішуванні при температурі 750 °C і на 14 % (з 138 до 121 мкм)) після перемішуванні при температурі 600 °C.

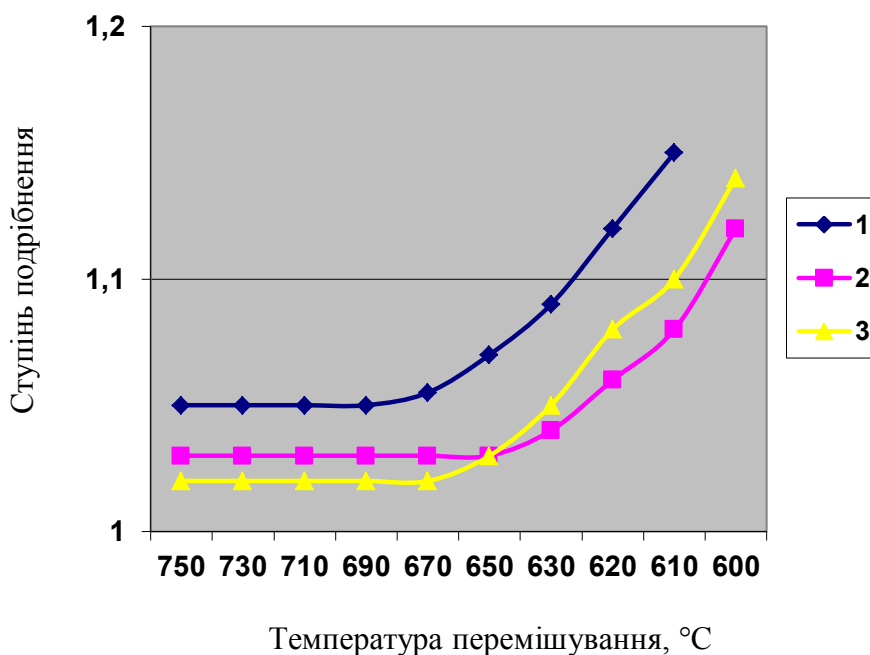


Рис. 4. Вплив температури перемішування розплаву на ступінь подрібнення дендритної комірки ливарних сплавів системи Al-Mg. Тривалість перемішування 10 хв. $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$:

1 – сплав AMg6л; 2 – сплав AMg10; 3 – сплав AMg11

На рис. 5 наведено результати експериментальних досліджень по впливу часу перемішування розплаву на ступінь подрібнення дендритної комірки $N = \frac{d_{\text{вихід}}}{d_{\text{оброб}}}$ ливарних сплавів системи Al-Mg.

Встановлено, що збільшення часу перемішування розплаву при встановлених оптимальних температурах перемішування та при наступному охолодженні сплавів зі швидкістю охолодження $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ суттєво не впливає на зменшення розміру дендритних комірок ливарних сплавів системи Al-Mg. Оптимальний часовий інтервал перемішування для досліджуваних сплавів – (10 – 15) хв.

Перемішування розплаву при 610 °C і часі витримки (10 – 15) хв. та при наступному охолодженні сплавів зі швидкістю охолодження $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ розмір дендритної комірки сплаву AMg6л зменшується на 15 % (з 118 до 103 мкм).

Перемішування розплаву при 600 °C і часі витримки (10 – 15) хв. та при наступному охолодженні сплавів зі швидкістю охолодження $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ розмір дендритної комірки сплаву AMg10 зменшується на 12 % (з 127 до 113 мкм).

Перемішування розплаву при 600 °C і часі витримки (10 – 15) хв. та при наступному охолодженні сплавів зі швидкістю охолодження $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ розмір дендритної комірки сплаву AMg11 зменшується на 14 % (з 138 до 121 мкм).

На рис. 6 наведено результати експериментальних досліджень по впливу перемішування розплаву при різних швидкостях охолодження при кристалізації на ступінь подрібнення розміру дендритної комірки досліджуваних сплавів.

Експериментально встановлено, що збільшення швидкості охолодження під час кристалізації ливарних сплавів системи Al-Mg суттєво підсилює модифікуючий вплив від перемішування розплаву досліджуваних сплавів.

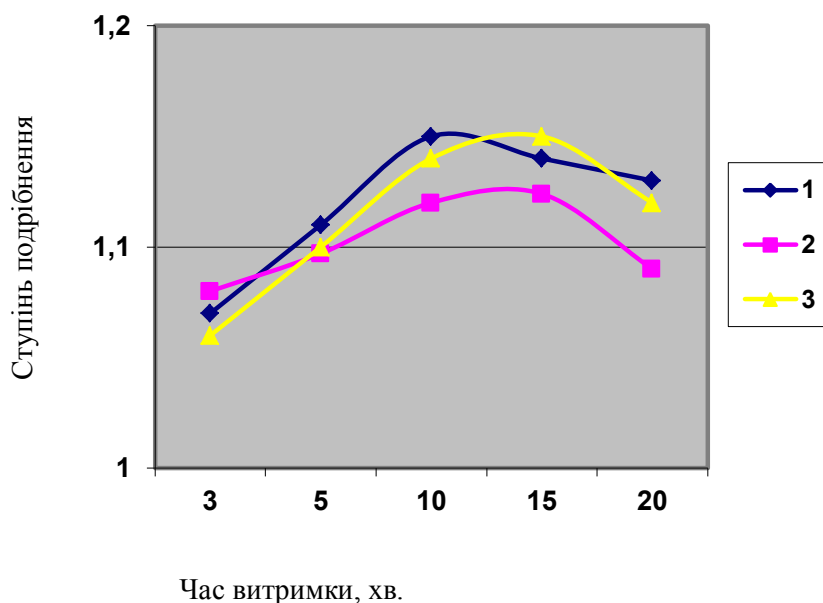


Рис. 5. Вплив часу перемішування розплаву на ступінь подрібнення дендритної комірки ливарних сплавів системи Al–Mg. Температура перемішування розплаву: для сплаву АМг6л – 610 °С, для сплавів АМг10, АМг11 – 600 °С. $V_{охл.} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$:
 1 – сплав АМг6л; 2 – сплав АМг10; 3 – сплав АМг11

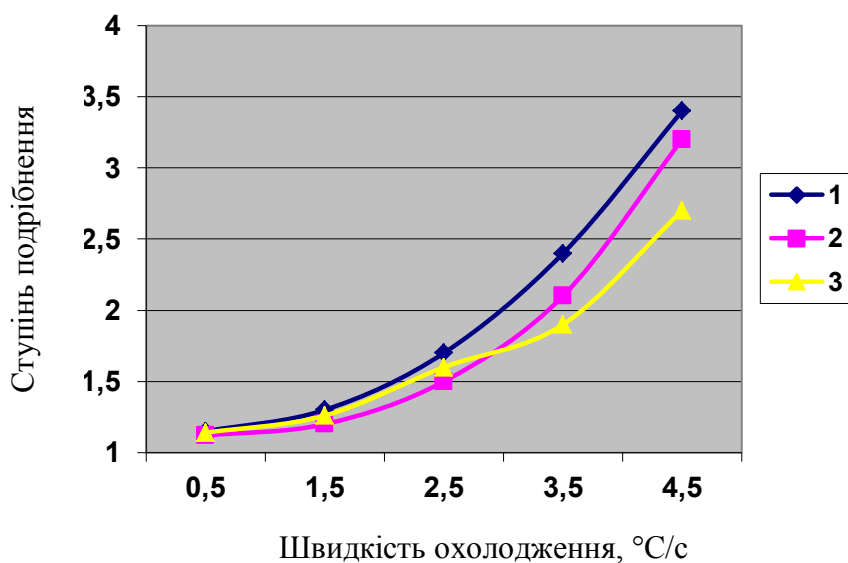


Рис. 6. Вплив швидкості охолодження на ефективність подрібнення дендритної комірки під час перемішування розплаву ливарних сплавів системи Al–Mg. Температура перемішування розплаву: для сплаву АМг6л – 610 °С, для сплавів АМг10, АМг11 – 600 °С. Час перемішування 10 хв.
 1 – сплав АМг6л; 2 – сплав АМг10; 3 – сплав АМг11

Так, при збільшенні швидкості охолодження з 0,5 °С/с до 4,5 °С/с, після перемішування розплаву за оптимальними температурно–часовими режимами, спостерігається зменшення розміру дендритної комірки сплаву АМг6л з 1,15 до 3,4 раз (з 103 до 35 мкм.), сплаву АМг10 з 1,12 до 3,2 раз (з 113 до 40 мкм.), сплаву АМг11 з 1,14 до 2,7 раз (з 121 до 51 мкм.).

ВИСНОВКИ

На прикладі сплавів АМгбл, АМг10 та АМг11 встановлено вплив механічного перемішування розплаву на середній розмір зерна алюмінієвого твердого розчину та дендритної комірки ливарних сплавів системи Al–Mg.

Зменшення температури перемішування розплаву суттєво збільшує ефект подрібнення зерна та дендритної комірки усіх трьох досліджуваних сплавів. Особливо сильно розміри макро- і мікроструктури даних сплавів зменшується в двофазній зоні при температурах на 10–20 °С нижчих за температуру початку кристалізації сплавів.

Оптимальний часовий інтервал перемішування для досліджуваних сплавів – (10 – 15) хв.

Перемішування розплаву більш суттєво впливає на розмір зерна алюмінієвого твердого розчину, ніж на розмір дендритної комірки.

Так, для сплаву АМгбл перемішування розплаву при температурі 610 °С (час перемішування 12 хв., подальше охолодження зі швидкістю $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$) впливає на зменшення середнього розміру зерна в 2 рази (з 218 мкм до 106 мкм). Для сплаву АМг10 перемішування розплаву при температурі 600 °С (час перемішування 12 хв., подальше охолодження зі швидкістю $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$) впливає на зменшення середнього розміру зерна в 1,8 рази (з 252 мкм до 135 мкм). Для сплаву АМг11 перемішування розплаву при температурі 600 °С (час перемішування 12 хв., подальше охолодження зі швидкістю $V_{\text{охл.}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$) впливає на зменшення середнього розміру зерна в 1,9 рази (з 315 мкм до 159 мкм).

Для сплаву АМгбл розмір дендритної комірки зменшується на 5 % (з 118 до 112 мкм) після перемішуванні при температурі 750 °С і на 15 % (з 118 до 103 мкм) після перемішування при температурі 610 °С. Для сплаву АМг10 розмір дендритної комірки зменшується на 3 % (з 127 до 123 мкм) після перемішуванні при температурі 750 °С і на 12 % (з 127 до 113 мкм) після перемішування при температурі 600 °С. Для сплаву АМг11 розмір дендритної комірки зменшується на 2 % (з 138 до 135 мкм) після перемішування при температурі 750 °С і на 14 % (з 138 до 121 мкм)) після перемішування при температурі 600 °С.

Підвищення швидкості охолодження при кристалізації посилює модифікуючий ефект від перемішування розплаву для усіх досліджуваних сплавів.

При збільшенні швидкості охолодження з 0,5 °С/с до 4,5 °С/с, після перемішування розплаву за оптимальними температурно-часовими режимами, спостерігається зменшення розміру зерна алюмінієвого твердого розчину сплаву АМгбл з 2 до 4,5 раз (з 106 до 48 мкм.), сплаву АМг10 з 1,8 до 3,4 раз (з 135 до 72 мкм.), сплаву АМг11 з 1,9 до 4,2 раз (з 159 до 75 мкм).

Також спостерігається зменшення розміру дендритної комірки сплаву АМгбл з 1,15 до 3,4 раз (з 103 до 35 мкм.), сплаву АМг10 з 1,12 до 3,2 раз (з 113 до 40 мкм.), сплаву АМг11 з 1,14 до 2,7 раз (з 121 до 51 мкм).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Баум Б. А. Жидкая сталь / Б. А. Баум, Г. А. Хасин, Г. В. Тягунов. – М.: Металлургия, 1984. – 208 с.
2. Баландин Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливок. Кристаллизация в литейной форме / Г. Ф. Баландин. – М.: Машиностроение, 1973. – 288 с.
3. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов / Б. Б. Гуляев. – Л.: Машигиз, 1976. – 216 с.
4. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали / В. А. Ефимов. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
5. Макаров Г. С. Рафинирование алюминиевых сплавов газами / Г. С. Макаров. – М.: Металлургия, 1983. – 120 с.
6. Гохштейн М. Б. Рафинирование первичного алюминия от окисных включений и газов / М. Б. Гохштейн, Я. И. Морозов. – М.: Металлургия, 1979. – 78 с.
7. Перспективы механического модифицирования алюминиевых сплавов / Г. П. Борисов, А. Т. Вернидуб, А. И. Семенченко [и др.] // Международная научно-практическая конференция: «Прогрессивные литейные технологии», посвященная 70-летию кафедры ТЛП. – Москва. – МГИСиС, 24-26 октября 2000 г. – С. 95–98.
8. Флемингс М. Литье полутвердого металла / М. Флемингс, Р. Мехрабиан // 40-й международный конгресс литейщиков. – М.: НИИМАШ, 1973. – С. 31–45.
9. Белоусов Н. Н. Влияние условий затвердевания на структуру и свойства отливок из алюминиевых сплавов / Н. Н. Белоусов, Л. Я. Кашиевник // Тепловые процессы в отливках и формах. – М.: Наука, 1972. – С. 60–71.