

Це демонструє зразок з кількістю модифікатора 0,1%, щільність якого на 1,6 % більша в порівнянні зі зразком без модифікатора. З підвищенням кількості карбиду кремнію з 0,2% до 0,3% щільність зростає. У зразках, які були відлиті в піщано-глинисту форму зі збільшенням кількості SiC зміна щільності сплаву майже не відбувається.

Порівняльний аналіз показників щільності металу виливків, залитих в кокіль та піщано-глинисту форму, показав, що теплофізичні умови затвердіння також мають свій вплив. В металевій формі швидкість затвердіння сплаву вища і структура стає більш щільною (щільність зразків виливків, що отримані в ПГФ, на 2,7% менша в порівнянні з виливками, що отримані в кокілі).

### Список літератури

1. Куцова В.З. Модифікування алюмінієвих сплавів / В.З. Куцова, О.В. Швець, Т.А. Аюпова // «МОМ». – 2001. – № 1-2. – С. 99-109.

2. Ямшинський М.М., Селівьорстов В.Ю., Лук'яненко І.В., Кивгило Б.В. Вплив модифікування високодисперсним карбідом кремнію на ливарні властивості вторинного сплаву системи Al-Si // Метал та лиття України №1 (30). – Київ, 2022. – С. 77 – 83.

УДК 669.018.29:66.046.5:543.226

**Р. А. Сергієнко, А. М. Верховлюк, О. А. Щерецький,**

**В. О. Щерецький, О. В. Железняк**

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України

*e-mail: [rsruslan17@gmail.com](mailto:rsruslan17@gmail.com)*

## **ОСОБЛИВОСТІ ОДЕРЖАННЯ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЛАВКИ**

Методи отримання високоентропійних сплавів в основному такі самі, як і звичайних сплавів, а їх форма та об'єм є важливими факторами для вибору шляхів виробництва [1, 2]. Методи отримання можна в основному розділити на лиття рідкого металу та за допомогою порошкової металургії. Наприклад, дугове і індукційне плавлення та механічне легування зазвичай використовуються для приготування об'ємних зразків із високоентропійних сплавів. Під час процесу плавлення тверді чисті метали розплав-

ляються і змішуються один з одним. Використання індукційного нагрівання є ефективним і швидким для плавлення металів, оскільки метали зазвичай демонструють добру провідність. У той же час, завдяки ефекту перемішування індукційного електромагнітного поля сплав гомогенізується в рідкому стані. Порівняно з дуговим плавленням індукційний нагрів дає можливість приготувати зливки більшого розміру, вага яких може перевищувати 1 кг [3, 4].

Високоентропійний сплав системи FeNiCoCrMn було виплавлено у вакуумній печі з індукційним нагрівом у середовищі аргону в алундовому тиглі. Сплави систем FeNiCrCuAl та FeNiCrCuMn з домішками вуглецю та кремнію отримували на повітрі в індукційній печі під флюсом у тиглі з набивною нейтральною футерівкою із окидів алюмінію та магнію. В якості вихідних шихтових матеріалів використовували: залізо карбонільне особливої чистоти (99,99%, мас. част.); катодний нікель (99,99 %, мас. част.); хром електролітичний, марок ЭРХ1, Х99 (99,5%, мас. част.) у вигляді лусочок; порошок марганцю чистотою не менше 99,5%, мас. част.; кобальт електролітичний марки К0 (99,98%, мас. част.); електротехнічна мідь у вигляді прутків та дроту марки М0 (99,93 %, мас. част.); алюміній чушковий високої чистоти марки А95; та чавун складу %, мас. част.: С – 2,6, Ni – 17, Cu – 2,9, Cr – 2,5, Mn – 1,2, Si – 2,0, S – 0,02, P – 0,04.

При виплавці сплаву системи FeNiCoCrMn робочу камеру вакуумували ( $P = 2 \cdot 10^{-2}$  Па) та заповнювали високочистим аргонем до надлишкового тиску 15-20 кПа. Швидкість нагрівання складала 10-20 °С/хв., після приготування сплаву готовий зразок охолоджувався у тиглі зі швидкістю 50-100 °С/хв. Максимальна температура перегріву розплаву в інертному середовищі складала не вище 1550 °С. Після кожного переплаву в аргоні маса зразка із високоентропійного сплаву FeCoNiMnCr зменшувалася не більше ніж на 1%, мас. част.. Експерименти на синхронному термічному аналізаторі з марганцевмісними сплавами показали, що маса зразку зменшується на 0,3 %, а тигель забарвлюється у бурий колір.

При виплавці сплавів систем FeNiCrCuAl, FeNiCrCuMn на повітрі алюміній та марганець вводили у рідкий розплав у вигляді лігатур (70Cu-30Al, 65Cu-35Mn), які попередньо готували. Спочатку розплавляли чавун, а потім у рідкий сплав добавляли хром, нікель та лігатури Cu-Mn, Cu-Al. Максимальна температура перегріву розплаву на повітрі для системи FeNiCrCuAl була не вище 1550 °С, а для системи FeNiCrCuMn не перевищувала 1500 °С, а втрата на угар елементів в середньому була не вищою, ніж 9,5 %, мас. част. Після приготування сплавів на повітрі рідкий метал виливали по технології литва за моделями, що газифікуються у форми з дисперсним вогнетривким

наповнювачем. Визначення температури заливки ( $T_{\text{зал}}$ ) безпосередньо у ливарній формі, температури початку кристалізації ( $T_{\text{кр}}$ ), температури солідус ( $T_{\text{сол}}$ ) та швидкості охолодження ( $V_{\text{охол}}$ ) при литті по моделях, що газифікуються проводили за допомогою аналого-цифрового перетворювача WAD AIK BUS. Наприклад, для зразка у вигляді стовпчика діаметром 30 мм із сплаву системи FeNiCrCuMn були отримані наступні термічні параметри:  $T_{\text{зал}} = 1314$  °C,  $T_{\text{кр}} = 1261$  °C,  $T_{\text{сол}} = 1058$  °C, інтервал кристалізації  $\Delta T = 203$  °C,  $V_{\text{охол}} = 0,3$  °C/сек, рекалесценція  $3.3$  °C.

За допомогою синхронного термічного аналізу досліджували термофізичні властивості високоентропійних сплавів – температури солідус ( $T_{\text{с}}$ ), ліквідус ( $T_{\text{л}}$ ), інтервал кристалізації ( $\Delta T$ ) та площі піків теплопоглинання ( $\Delta H_{\text{погл}}$  при нагріві) і тепловиділення ( $\Delta H_{\text{вид}}$  при кристалізації). Для дослідних високоентропійних сплавів різних складів було визначено наступні термофізичні параметри: **Fe<sub>21</sub>Ni<sub>19</sub>Cr<sub>18</sub>Cu<sub>18</sub>Al<sub>18</sub>Mn<sub>0.15</sub>C<sub>2.85</sub>Si<sub>3</sub>** –  $T_{\text{с}} = 1232$  °C,  $T_{\text{л}} = 1284$  °C,  $\Delta T = 53$  °C,  $\Delta H_{1\text{погл}} = -146$  Дж/г,  $\Delta H_{2\text{погл}} = -7,4$  Дж/г,  $\Delta H_{\text{вид}} = 109$  Дж/г; **Fe<sub>24</sub>Ni<sub>18</sub>Cr<sub>20</sub>Cu<sub>17</sub>Mn<sub>15.5</sub>C<sub>3.7</sub>Si<sub>1.8</sub>** –  $T_{\text{с}} = 1005$  °C,  $T_{\text{л}} = 1264$  °C,  $\Delta T = 259$  °C,  $\Delta H_{1\text{погл}} = -13$  Дж/г,  $\Delta H_{2\text{погл}} = -131$  Дж/г,  $\Delta H_{1\text{вид}} = 127$  Дж/г,  $\Delta H_{2\text{вид}} = 19$  Дж/г; **Fe<sub>21.8</sub>Ni<sub>18.1</sub>Cr<sub>18.1</sub>Cu<sub>14</sub>Al<sub>24</sub>Mn<sub>0.2</sub>C<sub>2.3</sub>Si<sub>1.5</sub>** –  $T_{\text{с}} = 1262$  °C,  $T_{\text{л}} = 1296$  °C,  $\Delta T = 34$  °C,  $\Delta H_{1\text{погл}} = -194$  Дж/г,  $\Delta H_{1\text{вид}} = 134$  Дж/г; **Fe<sub>24</sub>Ni<sub>19.5</sub>Cr<sub>18</sub>Al<sub>12</sub>Cu<sub>21</sub>Mn<sub>0.3</sub>C<sub>3.2</sub>Si<sub>2</sub>** –  $T_{\text{с}} = 1115$  °C,  $T_{\text{л}} = 1275$  °C,  $\Delta T = 160$  °C,  $\Delta H_{1\text{погл}} = -4,6$  Дж/г,  $\Delta H_{2\text{погл}} = -120$  Дж/г,  $\Delta H_{1\text{вид}} = 68$  Дж/г,  $\Delta H_{2\text{вид}} = 0,45$  Дж/г,  $\Delta H_{3\text{вид}} = 16$  Дж/г; **Fe<sub>24.7</sub>Ni<sub>20</sub>Cr<sub>18</sub>Cu<sub>20</sub>Mn<sub>0.5</sub>Al<sub>12</sub>C<sub>2.8</sub>Si<sub>2</sub>** –  $T_{\text{с}} = 1109$  °C,  $T_{\text{л}} = 1276$  °C,  $\Delta T = 166$  °C,  $\Delta H_{1\text{погл}} = -6$  Дж/г,  $\Delta H_{2\text{погл}} = -0,4$  Дж/г,  $\Delta H_{3\text{погл}} = -68$  Дж/г,  $\Delta H_{4\text{погл}} = -10$  Дж/г,  $\Delta H_{1\text{вид}} = 59$  Дж/г,  $\Delta H_{2\text{вид}} = 14$  Дж/г. Також були виплавлені сплави з атомною долею марганцю у складі від 16 до 19 % – **Fe<sub>20.5</sub>Ni<sub>19.4</sub>Cr<sub>16.5</sub>Cu<sub>20</sub>Mn<sub>19</sub>C<sub>2.3</sub>Si<sub>2.3</sub>**, **Fe<sub>23</sub>Ni<sub>19</sub>Cr<sub>18</sub>Cu<sub>20</sub>Mn<sub>16</sub>C<sub>2.3</sub>Si<sub>1.8</sub>**. Нижні індекси у хімічних формулах вказують на атомні долі кожного елемента.

При виплавці однорорідних за хімічним складом високоентропійних сплавів на повітрі температури перегріву не повинні перевищувати 150-200 °C. Сплав системи FeNiCrCuAl можна перегрівати до більшої температури ніж сплав FeNiCrCuMn із-за утворення щільної оксидної плівки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на поверхні розплаву.

### Список літератури

1. Yong Zhang, Preparation Methods of High-Entropy Materials /in book High-Entropy Materials (a brief introduction) // Springer Nature Singapore Pte Ltd. **2019**. ISBN 978-981-13-8526-1 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8526-1>

2. Ghazi, S. S., Ravi K.R. Phase-evolution in high entropy alloys: Role of synthesis route / S. S. Ghazi, K.R. Ravi // *Intermetallics* – **2016**. –V. 73 – P. 40-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.intermet.2016.03.002>

3. Singh, A. K., Subramaniam, A. On the formation of disordered solid solutions in multi-component alloys / A. K. Singh, A. Subramaniam // *J. Alloys Compound*. – **2014**. –V. 587 – P. 113-119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.10.133>

4. Xia, S., Phase stability and microstructures of high entropy alloys ion irradiated to high doses / M.C. Gao, T. Yang, P.K. Liaw, Y. Zhang // *Journal of Nuclear Materials* – **2016**. – V. 480 – P. 100–108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2016.08.017>

УДК 621.74:669.13.017

**К. А. Сіренко**

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*e-mail: [thermoexp.metal@gmail.com](mailto:thermoexp.metal@gmail.com)*

### **ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ШИХТИ ПРИ ВИПЛАВЛЕННІ ЧАВУНУ**

Виготовлення деталей литвом складається з наступних основних технологічних етапів: металозавалки, яка включає формування шихти, виплавлення металів та сплавів, розливки розплаву за ливарними схемами. Усі вказані виробничі перетини і технологічні етапи рішуче впливають на якість виливків та техніко-економічні показники виробництва. Металозавалка складається з розрахунку шихти, виходячи з наявних на підприємстві матеріалів (металобрухту, звороту власного виробництва, феросплавів тощо), і завантаження шихти в піч. Далі відбувається розплавлення шихти і доводка хімічного складу розплаву до необхідних показників на підставі результату аналізу відібраної з розплаву проби металу. Доводка розплаву до необхідної кондиції здійснюється шляхом «тонкого» регулювання за допомогою його дошихтовки. Виплавка ведеться за температурно-часовими режимами, які забезпечують повну розчинність та засвоєння компонентів шихти у розплаві при мінімально можливому угарі хімічних елементів.

Досвід ливарних підприємств свідчить, що шихтування є одним з найвідповідальніших етапів технологічного процесу. Вагомий вплив на якість ливарної продукції має не тільки маса, кількість кожного компонента шихти, а й стабільність їх хімічного складу