

А. Н. Смирнов, А. П. Верзилов, С. В. Куберский

Влияние периодических колебаний и флуктуаций уровня металла в кристаллизаторе на процесс непрерывной разливки

Резюме

Проанализированы причины возникновения волновых процессов на поверхности жидкого металла при непрерывной разливке слэбов. Показано влияние флуктуаций уровня металла в кристаллизаторе на возникновение аварийных ситуаций и качество заготовки. Предложены рекомендации для снижения вероятности возникновения и развития волновых процессов.

O. M. Smirnov, O. P. Verzilov, S. V. Kuberskiy

Influence of periodic oscillations and fluctuations of the metal level in the crystallizer on the continuous casting process

Summary

The reasons of occurrence of wave processes on a surface of a liquid metal at a continuous casting of slabs are analyzed. The influence of metal level fluctuations in the crystallizer on the occurrence of emergency situations and the quality of the billet is shown. Recommendations are proposed to reduce the probability of occurrence and development of wave processes.

УДК 669.018.4.29:620.17/18

Особливості формування литої структури багатоконпонентних ніобієвих сплавів системи Nb – Ti – Al

Т. Л. Кузнєцова, кандидат технічних наук

М. П. Бродніковський, кандидат фізико-математичних наук

О. А. Рокицька

М. О. Крапівка, кандидат фізико-математичних наук

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

Досліджено особливості формування дендритної неоднорідної литої структури перспективних багатоконпонентних, в тому числі і високоентропійних, сплавів на основі ніобію, які обумовлені фізико-хімічними і теплофізичними характеристиками сплавів. Встановлена необхідність та запропоновані способи активного втручання в процес кристалізації для одержання гомогенних за хімічним складом і структурою литих бездефектних заготовок.

Науково обґрунтовано, що найбільш перспективним напрямком робіт для підвищення робочих характеристик виробів газового приводу, який

входить в систему управління польотом ракети-носія космічного призначення, є розробка сплавів на основі ніобію. Багатообіцяючим при розробці сплаву є новий напрямок, пов'язаний з використанням особливостей формування структури і властивостей багатокомпонентних високоентропійних сплавів. Проте високоентропійні сплави на основі ніобію, як правило, відрізняються широким інтервалом кристалізації, що призводить до утворення дендритних структур, розвитку дендритних ліквіації, схильністю до утворення пір і кристалізаційних тріщин, що негативно позначається на їх технологічних характеристиках і є причиною підвищеної дефектності литих передільних заготовок [1].

Тому, значний інтерес для сплавів системи Nb – Ti – Al, легованих хромом, цирконієм, молібденом та кремнієм, представляє вивчення умов формування литої структури, оскільки цей фактор дозволить підвищити їх механічні властивості та жаро-корозійну стійкість, не змінюючи хімічний склад.

Структура та фазовий склад литих сплавів зумовлені, в першу чергу, фізико-хімічними характеристиками подвійних сплавів системи та інтервалами кристалізації сплавів, які, в свою чергу, визначають морфологію та параметри литої структури.

Аналітичні дослідження фізико-хімічних характеристик та фазового складу цих сплавів на основі діаграм стану подвійних сплавів систем та експериментальні дослідження інтервалів кристалізації сплавів визначили особливості литої структури. Встановлені широкі (>200 °C) інтервали кристалізації сплавів системи Nb – Ti – Al, легованих хромом, цирконієм, молібденом та кремнієм, обумовили формування дендритної структури литих сплавів і стали причиною хімічної неоднорідності, а також можливості утворення мікротріщин та міжкристалічної пористості.

Враховуючи, що особливості кристалізації сплавів обумовлені також їх теплофізичними характеристиками, проведено визначення теплових характеристик компонентів сплавів [2] системи Nb – Ti – Al, легованих хромом, цирконієм, молібденом та кремнієм, які наведені в таблиці.

Теплофізичні особливості компонентів сплавів ніобію (таблиця) – аномальне зниження коефіцієнту теплопровідності ніобію при охолодженні з $102 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ (при 2700К) до $53 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ (при 293К), існування в сплавах системи компонентів титану та цирконію з порівняно низькою теплопровідністю (коефіцієнт теплопровідності цирконію – $c = 25 - 31 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, коефіцієнт теплопровідності титану – $c = 24 - 20 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$), а також компонентів з підвищеною теплоємністю (титан – $C_p = 0,51 - 0,85 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, алюміній – $C_p = 0,90 - 1,15 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$), які зменшують залежність кристалізації цих сплавів від швидкості охолодження, яка характерна для ряду тугоплавких металів.

Металографічні дослідження типової морфології вихідних литих структур експериментальних сплавів системи Nb – Ti – Al, легованих хромом, цирконієм, молібденом та кремнієм підтвердили утворення дендритної структури сплавів, причому розмір дендритів литих сплавів системи різняться, залежно від складу та швидкості кристалізації.

Плавлення і кристалізація

Порівняльні теплові характеристики компонентів сплавів системи Nb – Ti – Al, легованих хромом, цирконієм, молібденом та кремнієм

Теплові характеристики	Компоненти сплавів системи Nb – Ti – Al						
	Ti	Zr	Cr	Fe	Nb	Al	Mo
Коефіцієнт теплопровідності, λ , Вт/м·К :							
293K	24,00	27,00	90,00	80,00	53,00	230,00	135,00
800K	20,00	25,00	70,00	45,00		211,00	
1300K			60,00	40,00			
1400 K							90,00
2700 K					102,00		
2896K							82,00
Теплоємність, C_p , кДж/кг·К:							
293K	0,51	0,27	0,45	0,44	0,27	0,90	0,24
1000K	0,70	0,36	0,60	0,76		1,15	
1300K	0,85	0,39	0,70	0,60			
2700K					0,43		
2896K							0,54

На рис. 1 наведена типова морфологія вихідної литої структури експериментальних високоентропійних сплавів системи – (16Al – 16Cr – 16Ti – 16Zr – 36Nb) ат. %.

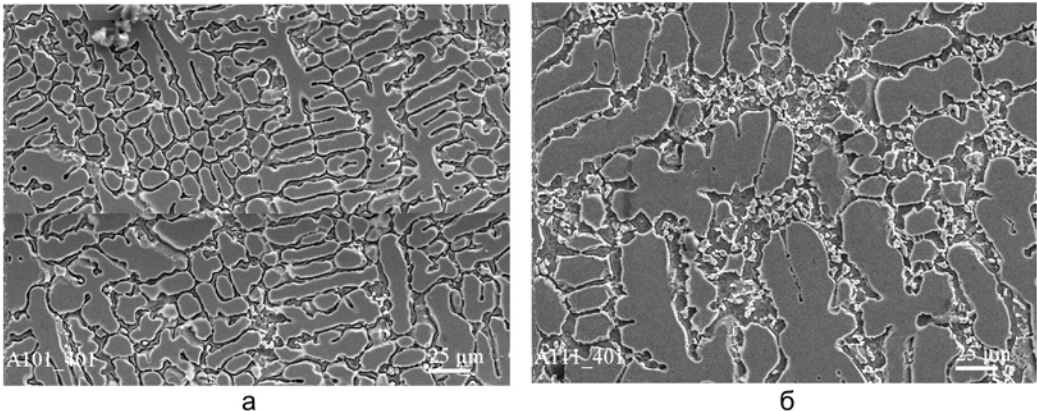


Рис. 1. Типова морфологія вихідної литої структури експериментальних високоентропійних сплавів системи 16Al – 16Cr – 16Ti – 16Zr – 36Nb (ат. %). а – лита структура після вакуумно-дугової плавки; б – лита структура після переплаву сплаву в тиглі із оксиду ітрію в процесі диференційно-термічного аналізу сплавів.

Як і передбачалось аналітичними дослідженнями, лита структура цих сплавів – дендритна, розмір дендритів в зразках перевищує 25x100 мкм. Незначне збільшення розмірів дендритів в зразку «б» можна пояснити перегрівом розплаву в процесі ДТА, що призводить до зменшення швидкості зародження центрів кристалізації і збільшення критичного розміру стійкого

зародку кристалу. У всіх зразках сплавів в міжзеренній зоні встановлено підвищену кількість цирконію та хрому, що свідчить, що в розплаві сплаву між цирконієм та хромом існує активна взаємодія, яка викликана тим, що цирконій з хромом здатен утворювати низькотемпературну евтектику (діаграма стану Zr – Cr), яка кристалізується останньою. В результаті високоентропійні сплави системи відрізняються підвищеними характеристиками жароміцності при пониженої пластичності при кімнатних температурах.

Тому було проведено корегування хімічного складу сплавів на основі аналізу фізико-хімічних характеристик подвійних сплавів системи для створення удосконалених сплавів з більш оптимальними характеристиками жароміцності та пластичності, підвищення їх технологічності. Науково-обумовлене управління властивостями сплавів передбачало цілеспрямоване введення легуючих компонентів системи або для твердорозчинного зміцнення вихідної ґратки, або для виділення в ній дисперсних фаз за умови зменшення сегрегацій по границях зерен, а також зменшення інтервалу кристалізації сплаву.

На рис. 2 наведена типова вихідна літа структура удосконалених експериментальних сплавів системи Nb – Ti – Al, легованих хромом, цирконієм, молібденом та кремнієм, яка відрізняється більшою однорідністю, дещо меншими розмірами дендритів та відсутністю суцільних сегрегацій на межах зерен, що посприяло підвищенню характеристик жароміцності і пластичності.

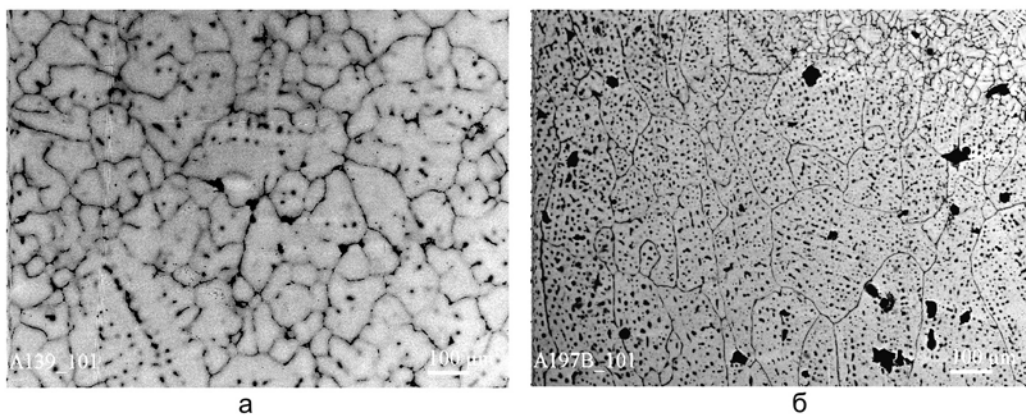


Рис. 2. Типова вихідна літа структура сплаву 10Al – 10Cr – 16Ti – 5Mo – 2Zr – 1Si – 56Nb (ат. %). а – легкоплавкі сегрегації по границях зерен, б – сегрегації по зерну.

Металографічні дослідження удосконалених сплавів показали, що сегрегації містять цирконій, кремній, алюміній та хром, що відповідає аналітичним дослідженням фізико-хімічних характеристик сплаву. В системі подвійних сплавів наведеної системи існують легкоплавкі евтектики: Al – Si (577 °C), Cr – Zr (1332 °C), а також високотемпературний інтерметалід Si_4Zr_5 , температура плавлення якого 2250 °C. При нерівномірному розподілу цих компонентів в сплаві вони можуть утворювати сегрегації підвищених розмірів і, таким чином, негативно впливати на термопластичні характеристики.

Плавлення і кристалізація

Таким чином, фізико-хімічні особливості сплавів системи Nb – Ti – Al, легованих хромом, цирконієм, молібденом та кремнієм, (широкий інтервал кристалізації, існування високотемпературних, високощільних інтеметалідів, легкоплавких евтектик та відносно низької розчинності ряду компонентів в ніобії) зумовлюють високу схильність їх до кристалізаційної крихкості і утворенню в об'ємі зливок і виливків ливарних дефектів. Крім того, теплофізичні особливості цих сплавів (порівняно низька теплопровідність та підвищена теплоємність), зменшують залежність кристалізації цих сплавів від умов переохолодження, яка характерна для ряду тугоплавких металів.

Виходячи із наших досліджень [3], покращувати якість даних литих сплавів в структурному плані можливо за рахунок проведення спеціальної обробки розплаву в процесі кристалізації:

- суміщення підвищеної швидкості охолодження при кристалізації з пластичною деформацією в рідко-твердому стані;

- проведення спеціальної обробки розплаву в процесі кристалізації за рахунок вібрації і ультразвуку та застосування модифікаторів для збільшення центрів кристалізації;

Література

1. Бродниковский Н.П., Кузнецова Т.Л., Крапивка Н.А. О повышении технологичности высокоэнтропийных сплавов на основе ниобия // IX Міжнародна конференція «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий». – 2016. – Київ. – С. 85.
2. Лариков Л.Н., Юрченко Ю.Ф. Тепловые свойства металлов и сплавов. Справочник. – Киев: Наукова думка, 1985. – 440 с.
3. Ракицкий А.Н., Кузнецова Т.Л., Якименко И.Л., Кравченко В.С. Измельчение структуры отливок из сплавов хрома в процессе кристаллизации за счет низко- и высокочастотных колебаний // Процессы литья. – 2003. – № 2. – С. 81 – 86.

References

1. Brodnikovsky N.P. / O povyshenii tekhnologichnosti vysokoentropiynykh spлавov na osnove niobiya // Brodnikovsky N.P., Kuznetsova T.L., Krapivka N.O. // IX Mizhnarodna konferentsiyna «Materialy i pokrytiya v ekstremal'nykh usloviyakh: issledovaniya, primeneniye, ekologicheski chistyye tekhnologii proizvodstva i utilizatsii izdeliy», 2016, Kyiv – P. 85.
2. Larikov L.N., Yurchenko Y.F. Teplovyye svoystva metallov i spлавov. Spravochnik / L.N.Larikov, - Kiev: Naukova Dumka, 1985. – 440 p.
3. Rakitskyi A.N. / zmel'cheniye struktury otlivok iz spлавov khroma v protsesse kristallizatsii za schet nizko- i vysokochastotnykh kolebaniy / A.N/ Rakitskyi, T.L.Kuznetsova, I.L.Yakimenko, V.S.Kravchenko // Protsessy littyа. – 2003. – № 2. – P. 81 – 86.

Одержано 05.04.18

Т. Л. Кузнецова, М. П. Бродниковский, Е. А. Рокицкая, Н. А. Крапивка

**Особенности формирования литой структуры многокомпонентных
ниобиевых сплавов системы Nb – Ti – Al**

Резюме

Исследованы особенности формирования дендритной неоднородной литой структуры перспективных многокомпонентных, в том числе и высокоэнтропийных, сплавов на основе ниобия, которые обусловлены физико-химическими і теплофизическими характеристиками сплавов. Установлены предпосылки необходимости и предложены способы активного вмешательства в процесс кристаллизации для получения гомогенных бездефектных литых заготовок.

T. L. Kuznetsova, M. P. Brodnikovsky, O. A. Rokytska, N. O. Krapivka

**Particularity of formation the cast structure of multicomponent niobium
alloys Nb – Ti – Al**

Summary

The features of formation the dendritic heterogeneous cast structure of perspective multicomponent niobium alloys, including highly entropic alloys, which are due to physicochemical і thermophysical characteristics of alloys, are investigated. The precondition the necessity and ways for active intervention in the crystallization process for obtaining homogeneous defectless castings are established.

Шановні автори!

**Пропонуємо Вам підготувати статті за матеріалами
досліджень для публікації**

у ЮВІЛЕЙНИХ ВИПУСКАХ ЖУРНАЛУ

“Металознавство та обробка металів” у 2018 році,

присвячених 100-річчю НАН України