

Вплив швидкості охолодження на структурутворення сплаву АМ4,5Кд (ВАЛ10)

Пригунова А. Г., доктор технічних наук, завідувачка відділу, adel_nayka@ukr.net,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8030-9160>

Жидков Є. А., науковий співробітник, ezh71@ukr.net

Бабюк В. Д., науковий співробітник, vdbptima@ukr.net

Борисов А. Г., кандидат фізико-математичних наук, старший науковий
співробітник, wwwrogneda@ukr.net

Шеневідько Л. К., науковий співробітник, onml@ukr.net

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Високоміцний ливарний алюмінієвий сплав АМ4,5Кд (ВАЛ10) відноситься до системи Al-Si і завдяки поєднанню високого рівня фізико-механічних і експлуатаційних властивостей широко використовується у високотехнологічних галузях промисловості і техніки: авіаційній, космічній, судно-автобудуванні, транспорті. Вироби зі сплаву АМ4,5Кд (ВАЛ10) отримують усіма відомими способами лиття (в піщані форми, в кокіль, під тиском), які відрізняються швидкостями охолодження. Це суттєво впливає на структуру і властивості сплаву не тільки в литому, але й термообробленому стані, що зумовлює актуальність проведення наукових робіт у цьому напрямі.

У статті наведено результати дослідження мікроструктури сплаву АМ4,5Кд (ВАЛ10) при зміні швидкості його охолодження в процесі тверднення ($V_{\text{охол}}$) від 0,4 °C/с до ≥ 105 °C/с. Сплав розплавляли, рафінували і при температурі 750 °C заливали в форми з різним тепловідводом. Показано, що підвищення швидкості охолодження в процесі тверднення призводить до зменшення розміру структурних складових, зокрема, кристалів твердого розчину алюмінію (Al_2) та до збільшення їх мікротвердості. При швидкості охолодження 0,4 °C/с, яка відповідає твердненню в піщаній формі, формуються первинні кристали Al_2 у вигляді огрубілих дендритів середнім розміром трохи більшим 800 мкм, по границях яких утворюється тонка сітка з частинок фаз Al_3Ti , $Al_{12}Mn_2Si$ та евтектики Al_2+CuAl_2 . З підвищенням швидкості охолодження збільшується розгалуженість дендритів і об'ємна частка тонкодиференційованої евтектики, кооперативне зростання фаз в якій зберігається в усьому дослідженому інтервалі швидкостей охолодження. Закономірно зменшується величина дендритного параметра твердого розчину алюмінію при практично незмінному факторі форми його кристалів, який майже до $V_{\text{охол}} \approx 10^5$ °C/с складає від 1,45 до 3,15. Аналогічну залежність зміни величини макрозерна від швидкості охолодження не виявлено. Зафіксовано його аномальне зростання при швидкості охолодження ≥ 120 °C/с, при якій розмір макрозерна співрозмірний зі сплавом, охолодженим зі швидкістю 0,4 °C/с. В роботі таку невідповідність пояснено з позицій теорії зародкоутворення та росту кристалів.

Ключові слова: швидкість охолодження, мікроструктура, АМ4,5Кд (ВАЛ10), структуроутворення, розмір макрозерна.

Високоміцні ливарні алюмінієві сплави системи Al-Cu, до яких відноситься сплав АМ4,5Кд (ВАЛ10), є одними з найбільш затребуваних в промисловості, особливо в високотехнологічних галузях. Кристалізація сплаву АМ4,5Кд (ВАЛ10) здійснюється по типу твердого розчину. Він характеризується високою міцністю та жароміцністю після термічної обробки. Його конкурентна здатність визначається якісним співвідношенням ливарних та експлуатаційних характеристик [1].

Основною особливістю сплаву АМ4,5Кд (ВАЛ10) є наявність в його складі кадмію [2], який прискорює процеси зародкоутворення зміцнювальної метастабільної θ' -фази, збільшуючи її об'ємну частку та уповільнюючи процеси коалесценції. При нагріванні під гартування утворюються комплекси Cd-вакансія або Cu-Cd-вакансія, внаслідок чого зменшується кількість вільних вакансій та ускладнюється дифузія атомів міді при старінні. Це створює передумови обмеження зростання зон Гінье-Престона. Більш інтенсивно розпадається твердий розчин алюмінію, зростають об'ємна частка і щільність виділень θ' -фази. Характерною особливістю метастабільних виділень є їхнє взаємно перпендикулярне розташування. Все це призводить до суттєвого зростання міцності при температурах 20 °С – 25 °С. Разом із легуванням і зміцненням твердого розчину алюмінію, кадмій сприяє підвищенню корозійної стійкості [3, 4].

Висока міцність і пластичність сплаву АМ4,5Кд (ВАЛ10), який спроможний тривалий час працювати при температурах вище 300 °С [2], дозволяє застосовувати його в якості конструкційного матеріалу для деталей, які несуть навантаження в нагрітому стані. Його властивості суттєво залежать від умов охолодження, режимів термічної обробки. Так, за ДСТУ 2839-94 механічні властивості сплаву АМ4,5Кд (ВАЛ10) при температурі 20 °С після термічної обробки Т4 складають: при литті в піщану форму σ_B – 294 МПа, δ – 10 %, твердість – 70 НВ; при литті в кокіль σ_B – 314 МПа, δ – 12 %, твердість – 90 НВ.

Орієнтуючись на потреби машинобудування, вироби зі сплаву АМ4,5Кд (ВАЛ10) одержують різними способами лиття (у піщаній формі, в кокілі, під тиском), які відрізняються швидкостями охолодження при формуванні виливка. Оскільки швидкість охолодження ($V_{\text{охол.}}$) є одним з основних факторів впливу на параметри структури і властивості не тільки в литому, але й термообробленому стані, метою роботи є дослідження мікроструктури сплаву АМ4,5Кд (ВАЛ10) при зміні швидкості його охолодження в процесі тверднення від 0,4 °С/с до $\approx 10^5$ °С/с.

Хімічний склад сплаву, який досліджували, наведено в таблиці.

Сплав розплавляли в лабораторній печі опору, нагрівали до температури 750 °С, рафінували препаратом «Дегазер-190» виробництва фірми «Foseco» в кількості 0,2 % від ваги шихти. Після двадцятихвилинної витримки розплаву з його поверхні видаляли шлак і заливали в графітові та сталеві форми, що відрізнялися розміром і товщиною стінки, а також в

Плавлення і кристалізація

Хімічний склад дослідного сплаву AM4.5Кд (ВАЛ10)

Chemical composition of the experimental alloy AM4.5Kd (VAL10)

Марка сплаву		Масова частка хімічних елементів, %					
		Mn	Cu	Ti	Cd	Fe	Al
ВАЛ10	ДСТУ 2839-94	0,35-0,8	4,5-5,1	0,15-0,35	до 0,15	до 0,15	залишок
	дослідний	0,52	4,51	0,24	0,11	0,11	залишок

клиноподібну мідну та трирівневу чавунну форми. Швидкості охолодження визначали за кривими зміни температури в часі (рис. 1 а), одержаними методом комп'ютерного термічного аналізу [5]. Зразки, охолоджені зі швидкістю $\geq 105^\circ\text{C}/\text{с}$, отримували методом спінінгування, з використанням мідного барабану, що обертався зі швидкістю 3000 об/хв.

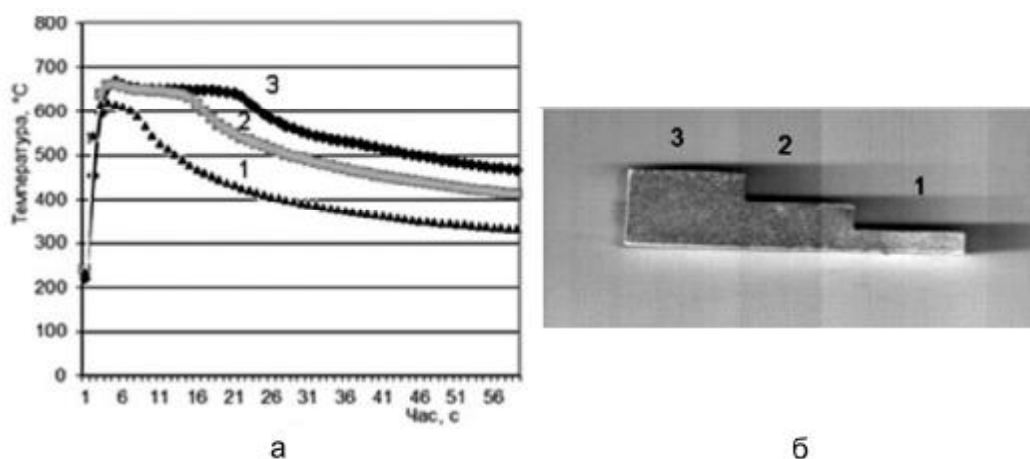


Рис. 1. Криві охолодження (а) виливка (б) в чавунній трирівневій формі, нагрітій до 160°C .

Fig. 1. Cooling curves (a) of casting (b) in cast iron three-level form heated to 160°C .

Мікроструктури сплаву AM4.5Кд (ВАЛ10) при зміні швидкості охолодження від $0,4^\circ\text{C}/\text{с}$ до $120^\circ\text{C}/\text{с}$ представлено на рис. 2.

При швидкості охолодження $0,4^\circ\text{C}/\text{с}$, яка відповідає твердненню в піщаній формі, формуються первинні кристали твердого розчину алюмінію (Al_α) у вигляді огрубілих дендритів середнім розміром трохи більшим 800 мкм, по границях яких утворюється тонка сітка з частинок фаз Al_3Ti , $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$ та евтектики, до складу якої входять кристали твердого розчину алюмінію та інтерметаліду CuAl_2 [6] (рис. 2 а). Кадмій як поверхнево-активний елемент, найбільш ймовірно, також розташовується в тонких прошарках поміж зернами твердого розчину [1].

З підвищенням швидкості охолодження сплаву AM4.5Кд (ВАЛ10) понад $0,4^\circ\text{C}/\text{с}$ збільшується частка евтектики, розгалуженість дендритів твердого розчину алюмінію (рис. 2 б-ж), зменшується дендритний параметр

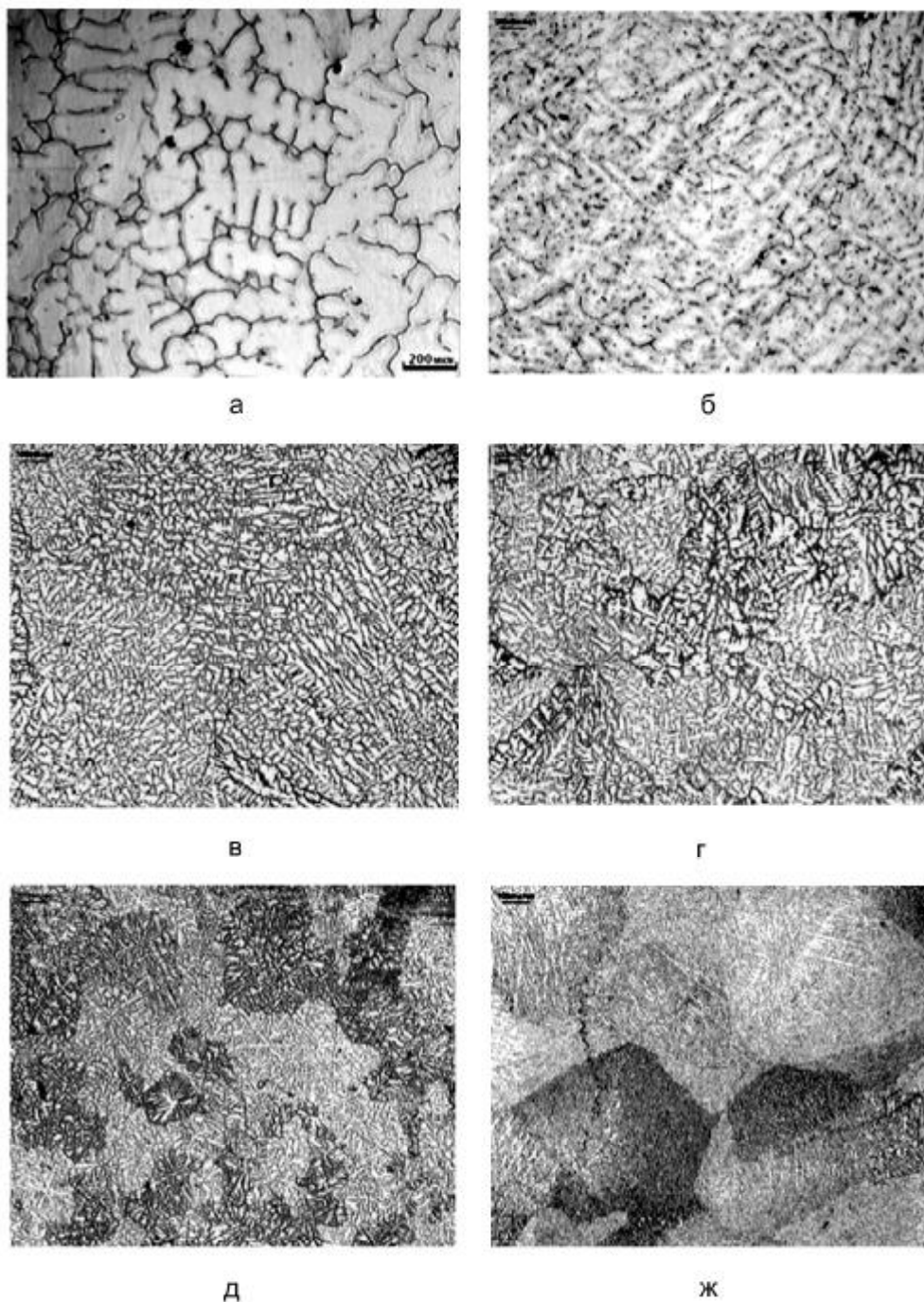


Рис. 2. Мікроструктура сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) при різних швидкостях охолодження в інтервалі температур тверднення. а – $V_{\text{охл.}} = 0,4 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$, б – $V_{\text{охл.}} = 0,85 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$, в – $V_{\text{охл.}} = 11 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$, г – $V_{\text{охл.}} = 22,6 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$, д – $V_{\text{охл.}} = 39,3 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$, ж – $V_{\text{охл.}} = 120 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$.

Fig. 2. The microstructure of the alloy AM4.5Kd (VAL10) at different cooling rates in the range of crystallization temperatures. а – $V_c = 0.4 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$, б – $V_c = 0.85 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$, в – $V_c = 11 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$, г – $V_c = 22.6 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$, д – $V_c = 39.3 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$, ж – $V_c = 120 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$.

(рис. 3). Проте розмірний фактор первинних кристалів Al_α практично не змінюється і майже до $V_{\text{охол.}} \approx 10^5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ складає від 1,45 до 3,15.

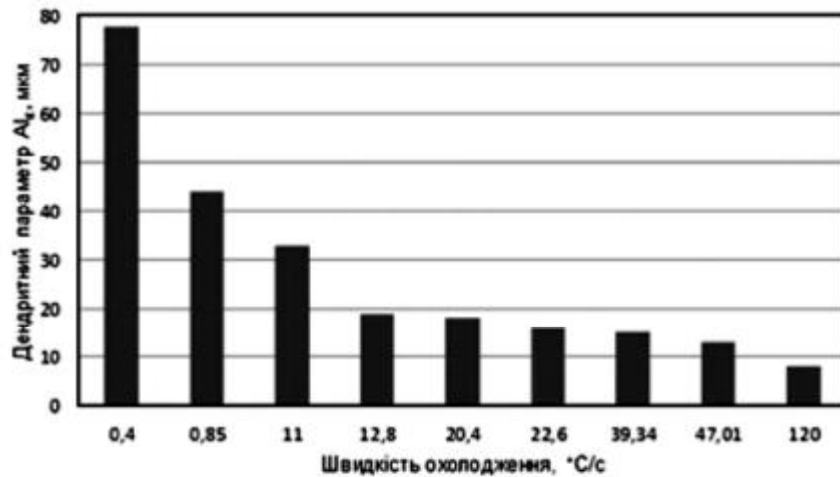


Рис. 3. Вплив швидкості охолодження на дендритний параметр твердого розчину алюмінію.

Fig. 3. Influence of cooling rate on dendritic parameter of solid aluminum solution.

При цьому збільшується мікротвердість кристалів твердого розчину алюмінію (рис. 4), яку вимірювали на зразках, охолоджених з мінімальною швидкістю (0,4 °C/с), і у трирівневій чавунній формі, в якій тверднення різних за товщиною частин виливка (див. рис. 1 б) здійснювалося з різною швидкістю, відповідно 14,3; 22,6 і 47 °C/с, і одночасно.

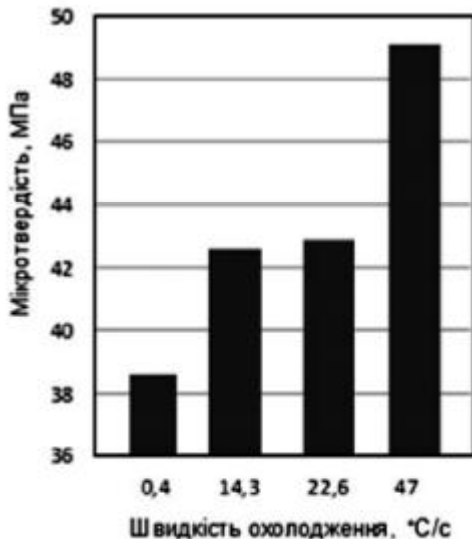


Рис. 4. Вплив швидкості охолодження на мікротвердість твердого розчину алюмінію.

Fig. 4. Influence of cooling rate on microhardness of solid aluminum solution.

Основними структурними складовими металевих стрічок товщиною від 100 мкм до 150 мкм, отриманих охолодженням розплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) зі швидкістю $\geq 10^5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, є твердий розчин алюмінію переважно з розміром кристалів від 100 нм до 4000 нм і розмірним фактором, близьким до 1, а також тонкодиференційована евтектика, в якій зберігається безперервне і кооперативне зростання фаз (рис. 5).

Не зважаючи на стабільне зменшення величини дендритного параметра твердого розчину алюмінію зі збільшенням швидкості охолодження (див. рис. 3), аналогічну

залежність зміни розміру макрозерна сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) від швидкості охолодження не виявлено (рис. 6).

Такий на перший погляд незвичний результат, що протирічить даними статті [7], в якій встановлено зменшення розміру зерна сплаву ВАЛ10 з підвищенням швидкості охолодження від 10 °С/с до 50 °С/с, спробуємо пояснити з позицій теорії зародкоутворення. Розмір зерен, що зростають в переохолодженому розплаві, визначається співвідношенням між частотою зародження кристалів і швидкістю їх зростання [8]. Так, при великих переохолодженнях і відповідних їм високих швидкостях зростання один-два кристали, що зародилися, встигають заповнити (поглинути) практично весь об'єм розплаву, внаслідок чого іншим зернам просто «не має місця», де зароджуватися, і весь виливок буде складатися з декількох зерен. З іншого боку, якщо швидкість зростання невелика, а процес зародження інтенсивний, то кристали, що виникли, збільшуються у розмірах повільно. При цьому великий об'єм переохолодженої рідини залишається «вільним» і в ній зароджуються нові кристали. Результат визначається співвідношенням

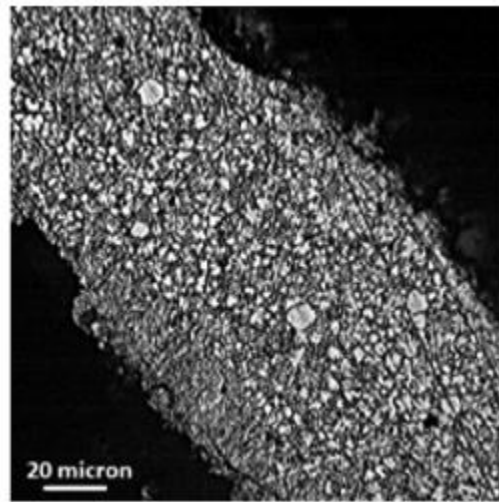


Рис. 5. Мікроструктура сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) при швидкості охолодження з рідкого стану близько 10⁵ °С/с.

Fig. 5. The microstructure of the alloy AM4.5Kd (VAL10) at a cooling rate from the liquid state of about 10⁵ °C/s.

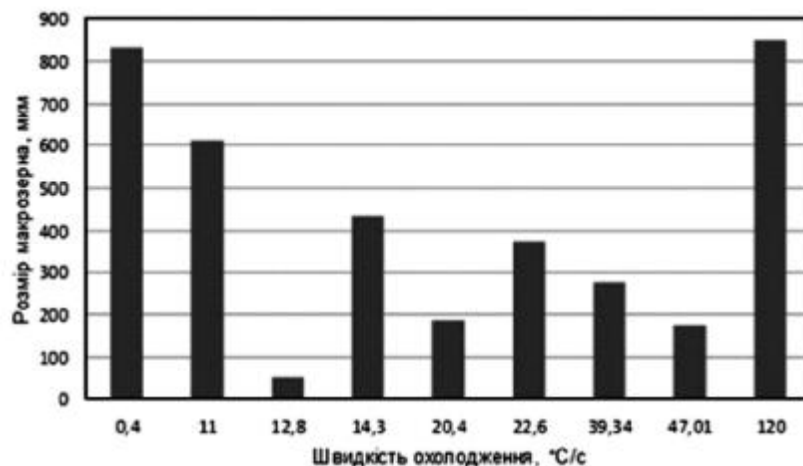


Рис. 6. Вплив швидкості охолодження на розмір макрозерна.

Fig. 6. Influence of cooling rate on macrograin size.

цих швидкостей, які можуть залежати від температури, матеріалу, стану поверхні та інших параметрів форми, в якій відбувається тверднення. Якщо швидкість зростання зі збільшенням переохолодження збільшується «пропорційно» частоті зародкоутворення, то розмір зерен при невеликому і великому переохолодженні може бути однаковим. Проте при великому переохолодженні процес тверднення закінчується швидше.

Треба думати, що аномальне зростання макрозерен з підвищенням швидкості охолодження до $120\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ (див. рис. 2 ж), найбільш ймовірно, пов'язане з зародженням і наступним зростанням комірчастих дендритів, які характеризуються сильною анізотропією швидкості зростання первинних і вторинних гілок. Комірчасті дендрити є переважаючою формою твердої фази, що збільшується з найбільшою швидкістю і обумовлює розвиток великих за розміром макрозерен, аналогічно тому, як це відбувається в сплаві $\text{Al} - 2\% \text{Mn} - 2\% \text{Cr}$ при збільшенні швидкості його охолодження до $5 \cdot 10^3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ [9].

Разом з тим відзначимо, що в трирівневій чавунній формі, в якій формується різнотовщинний виливок у вигляді «сходинок» різної висоти (h), структуроутворення відбувається одночасно і з різними швидкостями, співмірними з тими, що реалізовані в роботі [7]. Зі зменшенням товщини виливка, тобто висоти «сходинок» (див. рис. 1 б), підвищується швидкість охолодження, зменшується розмір макрозерна, який при температурі форми $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ складає: $h = 24\text{ мм}$ ($V_{\text{охол.}} = 14,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$) – 435 мкм ; $h = 12\text{ мм}$ ($V_{\text{охол.}} = 22,6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$) – 375 мкм ; $h = 6\text{ мм}$ ($V_{\text{охол.}} = 47,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$) – 175 мкм (див. рис. 6).

Таким чином, підвищення швидкості охолодження сплаву AM4.5Kd (BAL10) в процесі тверднення з $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до $\geq 10^5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ призводить до зміни мікро- і макроструктури:

- зменшення розміру структурних складових;
- підвищення ступеня пересиченості твердого розчину алюмінію;
- збільшення об'ємної частки і ступеня диференціювання евтектики, кооперативне зростання фаз в якій зберігається до $V_{\text{охол.}} \approx 10^5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$;
- зменшення дендритного параметру Al_α при неоднозначній зміні розміру макрозерна.

Виявлені структурні зміни, що обумовлені дією різних швидкостей охолодження, є суттєвими факторами впливу на властивості виливків і потребують урахування при модифікуванні і подальшій термічній обробці сплаву.

Література

1. Строганов Г.Б. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1985. – 216 с.
2. Огородов Д.В., Трапезников А.В., Попов Д.А., Пентюхин С.И. Развитие литейных алюминиевых сплавов в ВИАМ // Труды ВИАМ. – 2017. – № 2.
3. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / Под ред. И.Н. Фридляндера: Энциклопедия. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 2-3. – 880 с.
4. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 368 с.

Плавлення і кристалізація

5. Смольский А.А., Семенченко А.И., Елов С.М. Термический анализ алюминиевых сплавов // Процессы литья. – 2002. – № 1. – С. 10 – 16.
6. Захаров А.М. Промышленные сплавы цветных металлов. Фазовый состав и структурные составляющие. – М.: Металлургия, 1980. – 255 с.
7. Середенко Е.В. Комплексное влияние скорости охлаждения и постоянного магнитного поля на размер зерна литого сплава ВАЛ10 // Литейное производство. – 2018. – № 9. – С. 16 – 17.
8. Овсиенко Д.Е. Зарождение и рост кристаллов из расплава. – К.: Наукова думка, 1994. – 255 с.
9. Бродова И.Г., Попель П.С., Бардин Н.М., Ватолин Н.А. Расплавы как основа формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 369 с.

References

1. Stroganov G.B. *Vysokoprochnyye liteynyye alyuminiyevyye splavy* (High strength cast aluminum alloys), Moscow: Metallurgiya, 1985, 216 p. [in Russian].
2. Ogorodov D.V., Trapeznikov A.V., Popov D.A., Pentiuhin S.I. *Trudy VIAM*, 2017, No. 2 [in Russian].
3. *Tsvetnyye metally i splavy. Kompozitsionnyye metallicheskiye materialy* (Non-ferrous metals and alloys. Composite metal materials) / Edited by I. N. Fridliander: Encyclopedia, M.: Mashinostroenie, 2001, T. 2-3, 880 p. [in Russian].
4. Maltsev M.V. *Metallografiya promyshlennykh tsvetnykh metallov i splavov* (Metallography of industrial non-ferrous metals and alloys), Moscow: Metallurgiya, 1979, 368p. [in Russian].
5. Smulskii A. A., Semenchenko A. I., Yelov S. M., *Processy litya*, 2002, № 1, pp. 10 – 16. [in Russian].
6. Zaharov A.M. *Promyshlennyye splavy tsvetnykh metallov. Fazovyy sostav i strukturnyye sostavlyayushchiye* (Industrial alloys of non-ferrous metals. Phase composition and structural components), M.: Metallurgiya, 1980, 255 p. [in Russian].
7. Seredenko Y.V., *Liteynoe proizvodstvo*, 2018, No. 9, pp. 16 – 17. [in Russian].
8. Ovsienko D.E. *Zarozhdeniye i rost kristallov iz rasplava* (Origin and growth of crystals from the melt, Kiev: Naukova dumka, 1994, 255 p. [in Russian].
9. Brodova I. G., Popel P.S., Bardin N.M., Vatolin N.A. *Rasplavy kak osnova formirovaniya struktury i svoystv alyuminiyevykh splavov* (Melts as the basis for the formation of the structure and properties of aluminum alloys), Yekaterinburg: UrO RAN, 2005, 369 p. [in Russian].

Одержано 31.01.22

Prigunova A. G. , Zhydkov Y. A. , Babiuk V. D., Borisov A. G., Shenevidko L. K.

Influence of the cooling rate on the structure formation of the AM4.5kd (VAL10) alloy

Summary

High-strength cast aluminum alloy AM4.5Kd (VAL10) belongs to the Al-Cu system and due to the combination of a high level of physical, mechanical and operational properties, is widely used in high-tech industries and technology: aviation, space, shipbuilding, transport. Products from the alloy AM4.5Kd (VAL10) are obtained

Плавлення і кристалізація

by all known methods of casting (in sand molds, in a chill mold, under pressure), differing in cooling rates. This has a significant effect on the structure and properties of the alloy, not only in the as-cast, but also in the heat-treated state, which determines the relevance of scientific work in this direction.

The article presents the results of a study of the microstructure of the AM4.5Kd (VAL10) alloy with a change in its cooling rate during the curing process ($V_{cool.}$) from $0.4\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ to $\geq 10^5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. The alloy was melted, refined and, at a temperature of $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, poured into molds with different heat sinks. It is shown that an increase in the cooling rate during the hardening process leads to a decrease in the size of structural components, in particular, aluminum (Al_α) solid solution crystals and to an increase in their microhardness. At a cooling rate of $0.4\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, corresponding to solidification in a sandy form, primary Al_α crystals are formed in the form of coarsened dendrites with an average size slightly larger than $800\text{ }\mu\text{m}$, along the boundaries of which a fine network of particles of Al_3Ti , $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$ phases and $\text{Al}_\alpha + \text{CuAl}_2$ eutectics is formed. With an increase in the cooling rate, the branching of the dendrites and the volume fraction of the finely differentiated eutectic increase, the cooperative growth of phases in which is maintained throughout the entire range of cooling rates studied. The value of the dendritic parameter of the solid solution of aluminum regularly decreases with a practically unchanged shape factor of its crystals, which is almost up to $V_{cool.} \approx 10^5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ is from 1.45 to 3.15. A similar dependence of the change in the macrograin size on the cooling rate was not found. Its anomalous growth was recorded at a cooling rate of $\geq 120\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, at which the macrograin size is commensurate with the alloy cooled at a rate of $0.4\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. In the work, such a discrepancy is explained from the standpoint of the theory of the nucleus and growth of crystals.

Keywords: cooling rate, microstructure, AM4.5Kd (VAL10), structure formation, macrograin size.

Metalozn. obrobka met. 2021, vol.28(101), 37-43
<https://doi.org/10.15407/mom2021.04.037>

УДК 621.791: 621.791.92: 621.31

Структурутворення сталей в умовах високих швидкостей нагріву при зварюванні

Артѐмова С. В., начальник центральної заводської лабораторії,
artemova@ukrenergymachines.com

АТ «Українські енергетичні машини», Харків

Досліджено процес структурутворення в зварних з'єднаннях сталей 15Х5М і 12Х1МФ, виконаних зварюванням «коротким циклом» (швидке нагрівання металу шва вище температури A_{c3} та короткий час перебування за цієї температури) в середовищі аргону і можливість регулювання фазово-структурних перетворень та якості зварних з'єднань. Показано, що при використанні вищевказаної технології, метал шва щільний, без дефектів, з мартенсито-феритною структурою. У біляшовній зоні (БШЗ) зварювального з'єднання при
Науково-технічний журнал "Металознавство та обробка металів" 1'2022 37