

- систем при описании фазовых равновесий / Ольшанецкий В. Е. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2008. – № 2. – С. 34–39.
15. Гегузин Я. Е. Восходящая диффузия и диффузионное последствие / Гегузин Я. Е. // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 149. – Вып. 1. – С. 149–159.

16. Мутигуллин И. В. Влияние степени покрытия углеродом на возможность формирования твердого раствора внедрения в подповерхностном слое железа (001) и (111) / Мутигуллин И. В., Бажанов Д. И., Илюшин А. С. // ФТТ. – 2011. – Т. 53. – Вып. 3. – С. 558–563.

Одержано 21.11.2013

Недоля А.В., Ольшанецкий В.Е. Расчетная оценка энергетического состояния нанокластера аустенита на основе Fe-C

Методом классической молекулярной динамики рассчитано энергетическое состояние нанокластера аустенита выбранного размера системы Fe-C. Расчеты показали, что движение углерода как примеси внедрения энергетически выгоднее в направлении поверхности в незавершенную октапору и поэтому его необходимо рассматривать как один из возможных механизмов реализации восходящей и зернограничной диффузии и перераспределения легирующих элементов на поверхности и границах зерен с образованием новых фаз.

Ключевые слова: аустенит, нанокластер, диффузия, подвижность, молекулярная динамика, октапора, поверхностная энергия.

Nedolia A., Ol'shanetskii V. The estimated energy value of the nanocluster austenite based on Fe-C

By classical molecular dynamics method the energy of selected size austenite nanocluster of Fe-C was calculated. Results show that the movement of carbon as an interstitial impurity is more favorable towards the surface in incomplete octahedral sites. This is one of possible mechanisms of realization of ascending and grain boundary diffusion and redistribution of alloying elements on surface and grain boundaries with the formation of new phases.

Key words: austenite, nanocluster, diffusion, mobility, molecular dynamics, octahedral state, the surface energy.

УДК 669.017.113:669.715 (043)

Д-р техн. наук В. И. Мазур, канд. техн. наук С. В. Капустникова,
канд. техн. наук А. Ю. Шпортько, С. В. Бондарев

Національна металургічна академія України, м. Дніпропетровськ

ЗАЛЕЖНІСТЬ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ СИЛУМІНУ ПІСЛЯ ТВЕРДІННЯ ВІД СТАНУ РІДКОГО СПЛАВУ

Досліджено мікроструктуру та механічні властивості затверділого сплаву АК12 після його термочасової обробки в рідкому стані. Показано, що відбувається покращення структури та стрибкоподібне зростання міцності та пластичності виливків після нагріву сплаву до температур структурних перебудов у рідкому стані 720, 780, 830 °С.

Ключові слова: силумін, термочасова обробка, розплав, евтектика, властивості.

Вступ

Велике місце в обсязі виробництва алюмінієвих сплавів належить ливарним алюмінієвим сплавам і, насамперед, сплавам системи Al-Si – силумінам. Із цих сплавів відливають деталі циліндро-поршневої групи автотракторних та танкових двигунів, корпусні деталі і багато ін.

Основною структурною складовою силумінів є евтектика α -Al + Si. Від об'ємної частки евтектики в сплаві залежать ливарні властивості (рідкоплинність) силумінів. Рівень механічних властивостей (міцність, пластичність,

жароміцність та ін.) суттєво залежить від будови евтектичних колоній, об'ємної частки евтектики та ступеня кооперативності росту евтектичних фаз.

Підвищення механічних властивостей можна частково досягти термічною обробкою відливка або деталі, однак така технологічна операція не може вплинути на морфологію евтектичних колоній. Разом з тим узагальнення результатів експериментальних досліджень, отриманих за останні десятиліття, свідчить про генетичний взаємозв'язок сплавів у рідкому і твердому стані, що розширює можливості і шляхи поліпшення якості лиття.

Численні роботи, присвячені вивченню взаємозв'язку рідкого і твердого металевих станів [1–3], показують, що великі можливості поліпшення структури і властивостей металів і сплавів лежать у використанні різних видів рідкофазної обробки розплавів, одним з яких є термочасова обробка (нагрівання рідкого сплаву до заданої температури і витримка його при цій температурі протягом певного часу).

Відомо, що залежно від часу витримки розплаву при певній температурі, параметри ближнього порядку в ньому можуть змінюватися. При цьому змінюються і фізико-механічні властивості затверділого зливка.

Вплив рідкого стану на структуру сплаву і його властивості у твердому стані встановлено для сплавів різних систем [4, 5]. У [6] показано позитивний вплив термочасової обробки розплаву на структуру і властивості нікелевих сплавів.

В запропонованій роботі проведено дослідження структури зразків зі сплаву АК12, який піддавався термочасовій обробці в рідкому стані та механічним випробуванням після твердіння розплаву з визначених температур.

Матеріали та методика досліджень

Матеріалом досліджень був силумін АК12 близько-евтектичного складу із вмістом домішок: Fe (до 0,6 % мас.), Mn (до 0,3 % мас.), Cu та Ni (до 0,01 % мас.) та ін.

Дослідження мікроструктури сплавів проводили на металографічних шліфах, виготовлених за стандартною методикою, з використанням світового мікроскопа «НЕОРНОТ-30» та стандартного протравлювача алюмінієвих сплавів – 0,5 % водяного розчину HF. Просторову будову евтектичних колоній різних типів досліджували методом растрової електронної мікроскопії з використанням растрового електронного мікроскопа JSM-35.

Для вивчення будови розплавів АК12 використовували методи рентгенівської дифракції. Рентгенодифракційні дослідження проводили на високотемпературній рентгенівській установці лабораторії фізики рідких металів ІМФ НАН України. Дифракційні криві, які являють собою залежність інтенсивності розсіяного рентгенівського випромінювання від кута розсіювання, отримували при різних температурах перегріву розплаву (720...900) °С. Час ізотермічної витримки при всіх температурах досліджень був однаковим і становив 15 хв. На основі експериментально отриманих залежностей з використанням відповідних рівнянь будували функції радіального розподілу атомів (ФРРА). Аналіз кривої дозволяє визначити площі під максимумами ($A_{\text{мин}}$) та положення максимумів (r_1), тобто структурні параметри розплаву для заданої температури.

Вплив термочасової обробки розплаву та її ефективність оцінювали за зміною механічних властивостей зразків досліджуваного сплаву. Механічні властивості (σ_g – тимчасовий опір розриву, δ – відносне подовження) визначали при випробуваннях зразків на

розтяг на розривній машині FP-100 згідно з ГОСТ 1497-84. Зразки для випробувань отримували при кристалізації сплаву в металевому кокіль ($V_{\text{охол}} \sim 10^2$ °С/с). Сплав нагрівали до різних температур у інтервалі (600...900) °С, витримували при заданих температурах упродовж 15 хв, потім заливали в кокіль.

Результати та їх обговорення

Аналіз ФРРА, отриманих при рентгенодифракційних дослідженнях рідкого силуміну АК12, свідчить про істотну зміну структурного стану розплаву в інтервалі температур (720...900) °С (рис. 1).

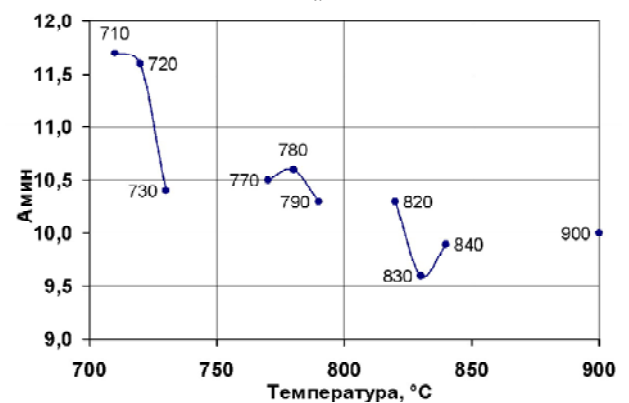
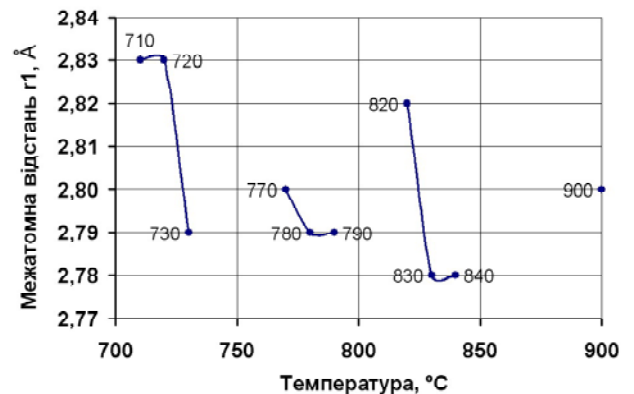


Рис. 1. Зміна структурних параметрів r_1 (а) і $A_{\text{мин}}$ (б) в інтервалі температур (720...900) °С

Використані модельні уявлення про будову розплавів дозволили визначити, що рідкий сплав АК12 при температурах 720, 780, 830 °С характеризується квазіевтектичним типом будови. Складовими квазіевтектики є кластери в основному двох типів: перші складаються переважно з атомів Al з упакованням, яке подібне ГЦК гратці спотвореній у бік тетрагональності; другі – з атомів Al та Si з упакованням атомів, яке є характерним для метастабільної η -фази з тетрагональною граткою [7]. Така будова найбільшою мірою є характерною для розплаву при температурі 830 °С. З підвищенням температури до 900 °С спостерігається підвищення ступеня мікрооднорідності розплаву, а при температурі $T = 900$ °С розподілення атомів кремнію стає однорідним.

Ураховуючи особливості будови розплаву при зазначених температурах, важливо було встановити, як вони впливають на структуру та механічні властивості досліджуваного сплаву після його твердіння. З цієї метою було проведено докладні дослідження мікроструктури зразків після їхнього випробовування на розтяг (рис. 2, 3).

Поблизу місць руйнування структура зразків характеризується різними структурними складовими: дендритами α - твердого розчину та двома евтектиками – грубодиференцьованою і тонкодиференцьованою. Об'ємна частка структурних складових у зразках є різною і залежить від температури розплаву перед заливанням у цокіль. Змінюється також і об'ємна частка висококремнієвої фази в евтектиках.

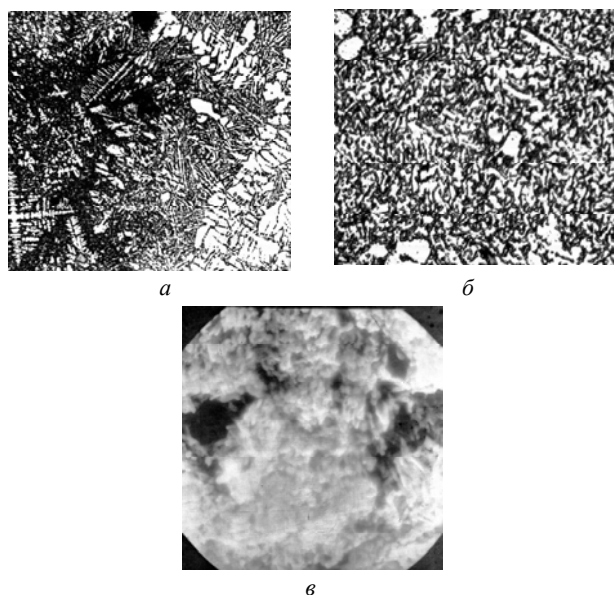


Рис. 2. Мікроструктура зразка, що затвердів після нагріву розплаву до температури 830 °С: *a* – $\times 200$; *b* – $\times 800$; *v* – $\times 4000$

У зразках, отриманих твердінням розплаву, нагрітого до температур 640, 700, 760, 800, 900 °С (рис. 3), зменшується об'ємна частка висококремнієвої фази на ділянках евтектики з тонким диференціюванням і зменшується об'ємна частка цієї евтектики в структурі. З'являються ділянки евтектики з дуже низьким ступенем кооперативності зростання фаз, схожі на структуру грубого конгломерату, пластини евтектичного кремнію злегка зігнуті (рис. 3, *в*). Порівняння цих структур показує, що термочасова обробка рідкого сплаву АК12 при температурах структурних перебудов у розплаві суттєво модифікує литу структуру: змінюється морфологія евтектики, з'являється тонкодиференційована евтектика, збільшується її об'ємна частка і частка висококремнієвої фази в ній.

Механічні випробування литих зразків зі сплаву АК12 показали, що при температурах нагріву, близьких температурам структурних перебудов у рідкому стані, відбувається стрибкоподібне зростання механічних вла-

стивостей виливків, причому зростають як міцнісні (σ_{ϵ}), так і пластичні властивості (δ) – табл. 1.

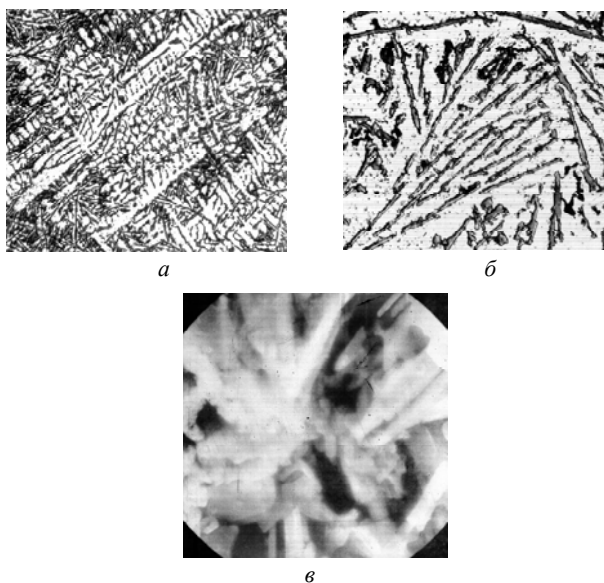


Рис. 3. Мікроструктура зразка, що затвердів після нагріву розплаву до температури 760 °С: *a* – $\times 200$; *b* – $\times 800$; *v* – $\times 4000$

Таблиця 1 – Механічні властивості литих зразків сплаву АК12, які були отримані після термочасової обробки розплаву

Температура нагріву, °С	Тимчасовий опір розриву σ_{ϵ} , МПа	Відносне подовження δ , %
640	170	2,6
700	180	2,9
720	185	3,2
760	180	2,5
780	195	3,7
800	182	3,3
830	200	4,5
900	185	3,2

Згідно [8], у бінарних силумінах рівень міцнісних властивостей в основному визначається трьома структурними характеристиками: об'ємною часткою кремнію, розміром і формою частинок кремнію та середньою відстанню між такими частинками. Механічні властивості максимальні в тих випадках, коли в структурі зразків максимальна об'ємна частка тонкодиференційованої евтектики з більшою об'ємною часткою висококремнієвої фази, механічні властивості якої перевищують аналогічні характеристики грубодиференційованої евтектики і α - твердого розчину кремнію в алюмінії (рис. 2).

Це відбувається через якісні зміни фазового складу, зміни типу кристалічної решітки висококремнієвої фази, тобто утворення метастабільних проміжних фаз. При подальшій зміні температури нагріву розплаву спостерігається зменшення σ_{ϵ} і δ , що пов'язано зі зменшен-

ням об'ємної частки тонкодіфференційованої евтектики (рис. 3).

Таким чином, застосовуючи обробку силумінів, яка полягає в нагріві їх у рідкому стані до визначених температур, що обираються з урахуванням структурних перебудов у розплаві, можливо значно поліпшити структуру та підвищити механічні, а також службові властивості виробів із цих сплавів.

Висновки

1. Термочасова обробка рідкого досліджуваного сплаву при температурах структурних перебудов у розплаві істотно модифікує литу структуру: змінюється морфологія евтектики, з'являється тонкодіфференційована евтектика, збільшується її об'ємна частка і частка висококремнієвої фази в ній.

2. Механічні випробування литих зразків зі сплаву АК12 показали, що при температурах нагріву розплаву, близьких до температур структурних перебудов у рідкому стані 720, 780, 830 °С, відбувається стрибкоподібне зростання механічних властивостей виливків, причому зростають як міцнісні (до 200 МПа), так і пластичні властивості (до 4,5 %).

Список літератури

1. Жукова Л. А. К классификации металлических расплавов / Жукова Л. А., Попель С. И. // Расплавы. – 1990. – № 4. – С. 29–32.
2. Баум Б. А. О взаимосвязи жидкого и твердого металлических состояний / Баум Б. А. // Расплавы. – 1988. – Т. 2, вып. 2. – С. 18–32.
3. Губенко А. Я. Взаимосвязь между свойствами жидкой и твердой фаз / Губенко А. Я. // Расплавы. – 1991. – № 1. – С. 27–33.
4. Жидкая сталь / [Баум Б. А., Г. А. Хасин, Г. В., Тягунов Г. В. и др.]. – М. : Металлургия, 1984. – 208 с.
5. Исходные расплавы как основа формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов / [Бродова И. Г., Попель П. С., Барбин Н. М., Ватолин Н. А.]. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 361 с.
6. Наумик В. В. Перспективы использования возврата при получении качественных отливок из никелевых сплавов с управляемой кристаллизацией / В. В. Наумик, Э. И. Цивирко, В. В. Лунев // Технології отримання та обробки конструкційних матеріалів. – 2007. – С. 37–43.
7. Мазур А. В. Влияние термовременной обработки расплава на фазовый состав Al-21,5 %Si сплава / А. В. Мазур // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2010. – № 2. – С. 15–20.
8. Строганов Г. Б. Сплавы алюминия с кремнием / Строганов Г. Б., Ротенберг В. А., Гершман Г. Б. – М. : Металлургия, 1977. – 272 с.

Одержано 26.12.2023

Мазур В.И., Капустникова С.В., Шпортко А.Ю., Бондарев С.В. Зависимость структуры и свойств силумина после затвердевания от состояния жидкого сплава

Исследованы микроструктура и механические свойства затвердевшего сплава АК12 после его термовременной обработки в жидком состоянии. Показано, что происходит улучшение структуры и скачкообразный рост прочности и пластичности отливок после нагрева сплава до температур структурных перестроек в жидком состоянии 720, 780, 830 °С.

Ключевые слова: силумин, термовременная обработка, расплав, эвтектика, свойства.

Mazur V., Kapustnikova S., Shportko A., Bondarev S. Dependence of Al-Si alloy structure and properties after solidification on the liquid melt condition

The microstructure and mechanical properties of the solidified alloy AK12 after thermal time treatment of melt was investigated. It is shown that an improvement of the structure and abrupt increase in strength and ductility of castings after heating to alloy temperatures of structural rearrangements in the liquid state 720, 780, 830 °С.

Key words: Al-Si alloy, thermal time treatment, melt, eutectic, properties.