



УДК 669.154

Поступила 03.08.2017

## ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И МЕХАНИЗМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ ПРИ ЛИТЬЕ СПЛАВОВ

### BASIC ELEMENTS AND THE MECHANISM OF METALLURGICAL HEREDITY WHEN CASTING ALLOYS

*Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бурули, 11. E-mail: lms@itm.by*

*E. I. MARUKOVICH, V. Yu. STETSENKO, Institute of Technology of Metals of the National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: lms@itm.by*

*Показано, что основными элементами металлургической наследственности при литье сплавов являются центры кристаллизации микрокристаллов и строительные нанокристаллы. Постоянство их концентраций в расплаве обеспечивает эффект металлургической наследственности. Чтобы ее сохранить, необходимо предотвратить избыточное насыщение расплава кислородом и водородом.*

*It is shown that basic elements of metallurgical heredity when casting alloys are the centers of crystallization of microcrystals and construction nanocrystals. Constancy of their concentration in fusion provides effect of metallurgical heredity. That to keep her, it is necessary to prevent excess saturation of fusion oxygen and hydrogen.*

**Ключевые слова.** Металлургическая наследственность, литье, нанокристалл, центр кристаллизации, расплав, сплавы.

**Keywords.** Metallurgical heredity, casting, nanocrystal, center of crystallization, fusion, alloys.

Эффект металлургической наследственности заключается в сохранении микроструктуры переплавляемых шихтовых заготовок получаемой отливкой. Объяснить это явление с точки зрения классической теории металлических расплавов невозможно, поскольку считается, что выше температуры ликвидуса существуют лишь кластеры. Принято считать, что они спонтанно образуются и распадаются с частотой  $10^7$ – $10^8$  Гц. Такие очень нестабильные, гипотетические наночастицы не могут служить элементами металлургической наследственности при литье сплавов. Для этого нужны стабильные нанокристаллы. Термодинамически доказано, что они существуют при температуре выше ликвидуса, т. е. кластеры в расплавах – стабильные нанокристаллы [1]. Известно, что для них выполняется условие [2]:

$$\sigma = kr, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – удельная межфазная поверхностная энергия;  $r$  – радиус нанокристалла;  $k$  – константа, зависящая от температуры.

Нанокристалл испытывает лапласовское давление  $P$ , которое определяется по уравнению:

$$P = \frac{2\sigma}{r}. \quad (2)$$

Подставляя в уравнение (2) значение  $\sigma$  из уравнения (1), получаем:

$$P = 2k. \quad (3)$$

Это означает, что при постоянном объеме процесс плавления нанокристаллов будет определяться уравнением состояния газа. Им являются атомы, атомизированные в процессе плавления сплава [2]. Атомный газ ослабляет связи в микрокристаллах. В результате они распадаются на нанокристаллы. Атомный газ значительно ослабляет связи между нанокристаллами, обеспечивая расплаву высокие реологические свойства.

Определим устойчивость нанокристалла при температуре выше ликвидуса. Предположим, что при ее превышении радиус нанокристалла сферической формы уменьшится на величину  $dr$ . Данный сферо-

кристалл не будет растворяться, если изменение объемной энергии Гиббса  $dG$  будет превышать изменение межфазной поверхностной энергии  $d\Pi$  этого процесса:

$$dG > d\Pi. \quad (4)$$

Поскольку  $dG$  при температуре выше ликвидуса будет в основном определяться молярной теплотой плавления  $L$ , то уравнение (4) можно представить следующим образом:

$$d\left(\frac{VL\rho}{M}\right) > d(S\sigma), \quad (5)$$

где  $V$  и  $S$  – соответственно объем и площадь поверхности нанокристалла;  $M$  и  $\rho$  – молярный (атомный) вес и плотность нанокристалла. Подставляя значения  $V = 4/3\pi r^3$  и  $S = 4\pi r^2$  в уравнение (5) с учетом (1), получаем следующее условие стабильного существования нанокристалла в расплаве при температуре выше ликвидуса:

$$L\rho > 3kM. \quad (6)$$

При относительно невысоких перегревах выше ликвидуса, когда сохраняется эффект металлургической наследственности, значение  $k$  рассчитаем по уравнению [1]:

$$k = \frac{L\rho\Delta T}{3T_0M}, \quad (7)$$

где  $\Delta T$  – переохлаждение при затвердевании сплава. Подставляя значение  $k$  из уравнения (7) в уравнение (6), получаем основное условие стабильного существования нанокристалла в расплаве при температуре выше ликвидуса:

$$1 > \frac{\Delta T}{T}. \quad (8)$$

Это условие выполняется всегда. Из уравнения (8) следует, что после распада микрокристаллов на нанокристаллы (расплавление сплава) последние будут стабильно находиться в расплаве при температуре выше ликвидуса и определять явление металлургической наследственности.

Исследование тонкой структуры графита в чугунах показало, что графитный микрокристалл состоит из наноразмерного центра кристаллизации (ЦК) и сросшихся вокруг него более мелких глобулярных строительных нанокристаллов [3, 4]. Таким образом, можно предложить следующий механизм металлургической наследственности. При плавлении сплава его микрокристаллы распадаются на ЦК и строительные нанокристаллы. Они устойчивы в расплаве выше температуры ликвидуса при относительно невысоком перегреве. Если концентрации ЦК и строительных нанокристаллов остаются неизменными, то при затвердевании такого расплава будет наследоваться микроструктура исходного переплавленного сплава. Известно, что эффект металлургической наследственности сохраняется до определенной температуры. Это можно объяснить тем, что при ее превышении расплав будет значительно (избыточно) насыщаться из паров атмосферного воздуха кислородом и водородом. Атомы кислорода являются поверхностно-активными по отношению к ЦК и способствуют их распаду на более мелкие нанокристаллы по эффекту Ребиндера. В результате концентрация ЦК в расплаве будет уменьшаться. При затвердевании такого расплава количество микрокристаллов в сплаве снизится. Кроме того, растворенный в избытке водород, выделяющийся в виде микропузырьков на кристаллизующихся дендритах основной фазы сплава, будет уменьшать их разветвленность [5]. Все это приведет к демодификации микроструктуры переплавленного сплава и нарушению эффекта металлургической наследственности. Чтобы ее сохранить, необходимо предотвратить избыточное насыщение расплава кислородом и водородом.

Таким образом, основными элементами металлургической наследственности при литье сплавов являются центры кристаллизации микрокристаллов и строительные нанокристаллы. Постоянство их концентрации в расплаве обеспечивает эффект металлургической наследственности.

### Литература

1. Стеценко В. Ю. Кластеры в жидких металлах – стабильные нанокристаллы // *Литье и металлургия*. 2015. № 2. С. 33–35.
2. Стеценко В. Ю. Металлические расплавы – наноструктурные системы // *Литье и металлургия*. 2014. № 1. С. 48–49.
3. Захарченко Э. В., Левченко Ю. Н., Горенко В. Г., Вареник П. А. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом. Киев: Наукова думка, 1986.
4. Щабатинов М. П., Абраменко Ю. Е., Бех Н. И. Высокопрочный чугун в автомобилестроении. М.: Машиностроение, 1988.
5. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Модифицирование сплавов. Минск: Беларуская навука, 2009.