

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ БИНАРНЫХ СПЛАВОВ, ЗАТВЕРДЕВАЮЩИХ ПРИ ДВИЖЕНИИ ОТНОСИТЕЛЬНО РАСПЛАВА

Марукович Е.И., Брановицкий А.М., Лебединский Ю.А., Дементьев В.А.

Институт технологии металлов НАН Беларуси, г.Могилев, Беларусь, info@itm.by

Литье остается дешевым методом производства многих изделий с достаточно высокими механическими свойствами. Моделирование микроструктуры сплавов, образующейся при вынужденном движении расплава относительно растущих зародышей кристаллов, позволяет оценить возможности и перспективы ряда методов литья в области улучшения механических свойств отливок без значительных затрат.

В настоящее время часто используются методы литья с вынужденным движением расплава, направленные на получение полужидкой смеси с большой плотностью зародышей кристаллов, например, реолитье. Как правило, микроструктура первичных кристаллов таких сплавов имеет глобулярный характер. В ряде способов литья без формирования полужидкой смеси, например, при непрерывном литье с использованием электромагнитного перемешивания расплава, кристаллы растут с большей скоростью, получаются меньшего размера и могут иметь черты розеточной морфологии (рис. 1 а). Производство сплава с такой морфологией микроструктуры требует гораздо меньших затрат по сравнению с глобулярной.

Несмотря на то, что повышение механических свойств таких заготовок частично объясняется изменением микроструктуры первичных кристаллов, исследований её зависимости от перемешивания практически нет. Поиск методов улучшения микроструктуры при непрерывном литье может привести к появлению недорогих методов литья заготовок с механическими свойствами, не уступающими литью из полужидкой смеси.

Рост кристаллов первичных моделируется с помощью метода фазового поля для бинарных сплавов [1]. Алгоритм уменьшения концентрации примеси в перемешиваемом расплаве вблизи растущего кристалла, созданный ранее [1], может быть использован в основном при очень активном перемешивании расплава, например со скоростью сотен и тысяч оборотов в минуту [2,3], используемом только в специальных экспериментах. Разработанный алгоритм учитывает коррекцию концентрации примеси на большом расстоянии от периметра кристалла в так называемом предположении смыва [4-6] и может быть использован для более практического случая перемешивания кристаллов при полужидком затвердевании в промышленных схемах литья. Использование данного алгоритма приводит к относительно небольшой коррекции концентрации примеси в зоне, достаточно удалённой от границы растущего кристалла.

Устойчивыми при росте из малого зародыша могут являться две морфологии – дендритная (рис. 1 б) и розеточная (рис. 1 в). В экспериментах в качестве исходных затравок часто используются зародыши относительно большого размера, при этом растущий кристалл в условиях «смыва» потоком расплава заметно отличен от кристалла, растущего из малого зародыша. Расчёты роста из большого круглого зародыша выявили ряд особенностей, характерных для начального этапа роста (рис. 2):

- скорость роста сильно различается для разных параметров смыва, при этом максимальная скорость роста достигается при ближайшем расположении границы смыва к растущему кристаллу;
- влияние параметров смыва на ориентацию несущественно;
- с уменьшением параметров смыва ветви утолщаются, их количество уменьшается.

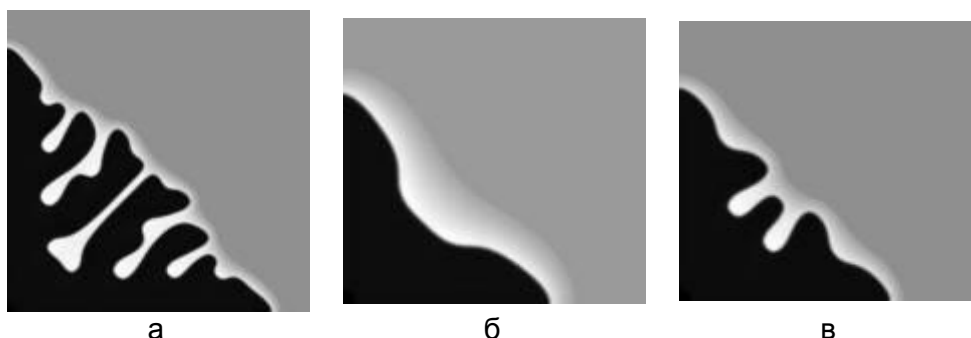


Рисунок 1 – Типовые морфологии кристаллов силумина. Рост из малого сферического зародыша на ранней (б, в) и более поздней стадиях (а)

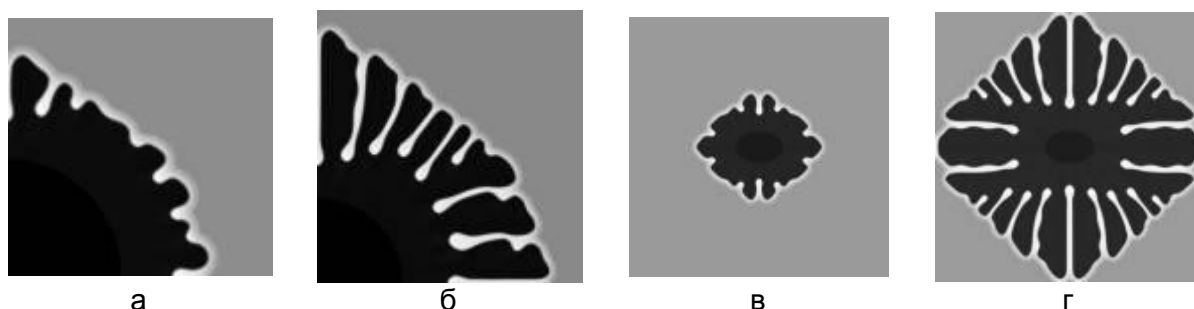


Рисунок 2 – Типовые морфологии кристаллов при росте из большого зародыша сферической (а, б) и овальной (в, г) формы для двух последовательных моментов времени (а, в и б, г)

Процесс смыва в достаточной мере случаен, соответственно параметр смыва может существенно различаться в различных зонах границы кристалла. Это связано с возможной турбулентностью движения расплава, с неравномерным вращением кристалла несферической формы в потоке, но в первую очередь с тем, что расплав уже содержит в себе зоны повышенной концентрации примеси, выделившейся из соседних кристаллов.

Для случая флуктуирующего по пространству смыва с высоким средним значением, несмотря на заметное отклонение от стандартных форм в начале роста, дальнейший рост кристалла обнаруживает стандартную, так называемую «водорослеобразную» морфологию [7] (рис. 3 а, б). При таком росте кристалла отсутствуют выделенные кристаллографические направления, что физически соответствует «изотропному» кристаллу без анизотропии поверхностного натяжения. Рост ветвей определяется преимущественно флуктуациями различных параметров. Разрастающийся зародыш кристалла может вращаться в расплаве, таким образом, оказывая периодическое влияние на границы смыва. В тех точках периметра, где в данный момент жидкость течет «в лоб» кристаллу, интенсивность смыва больше и, наоборот, в точках периметра «в тени» кристалла интенсивность смыва уменьшается. Приблизительно влияние вращения кристалла в расплаве на смыв может описываться некоторой периодической зависимостью параметров смыва от времени. При наличии периодичности смыва рост кристалла гораздо ближе к стандартной дендритной форме (рис. 3 в, г), а при его отсутствии к так называемой «разориентированной» форме (рис. 3 а, б), характеризующейся отсутствием анизотропии [7]. Необходимо отметить практически одинаковые размеры кристаллов в обоих случаях.

Скорость роста кристалла существенно зависит от периода смыва. Вместе с тем сама морфология зависит от периода смыва в достаточно малой степени. Основным фактором, влияющим на морфологию при достаточно малых периодах смыва, когда смыв имеет значащее влияние на форму кристалла, все-таки является пространственная зона смыва.

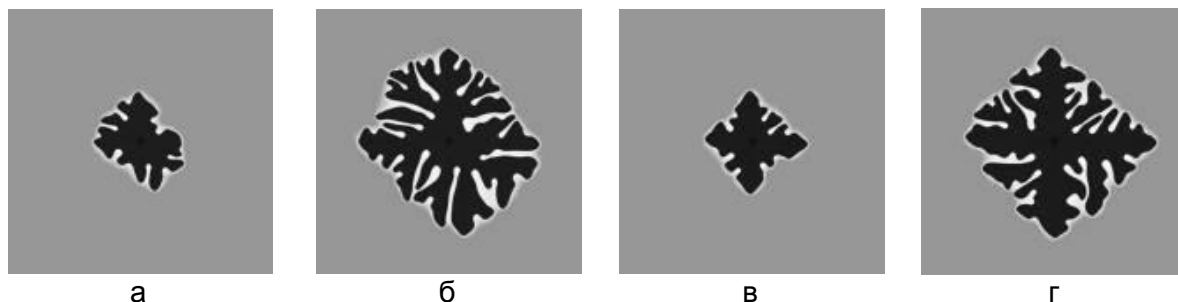


Рисунок 3 - Рост кристалла при наличии пространственных флуктуаций границы смыва с синусоидальной модуляцией по времени (в, г) и без неё (а, б) для двух последовательных моментов времени (а,в и б,г)

Известным преимуществом розеточной морфологии является уменьшение склонности к горячим трещинам. Они образуются при деформации частично затвердевшего металла, движущегося относительно полностью затвердевших участков. Согласно наиболее распространенной сейчас модели [8], горячие трещины появляются при пластической деформации дендритного каркаса двухфазной зоны. В начале, когда такой каркас занимает небольшой объем, расплав заполняет пустоты, образующиеся при деформации каркаса. При увеличении объема дендритного каркаса расплав перестает проникать в пустоты и образуются зародыши трещин. При дальнейшем росте каркаса он становится упругим, пластическая деформация сменяется на упругую и образование пустот прекращается. Обычно считается, что зародыши горячих трещин появляются в зоне, где доля твердой фазы лежит в области от 0.9 до 0.99. Наличие значительно более компактных и обтекаемых, чем дендриты, «розеток» способствует проникновению расплава в пустоты и уменьшению склонности к горячим трещинам.

Список литературы

1. А.Г. Борисов, Е.И. Марукович, Ю.А. Лебединский, А.М. Брановицкий. Исследование влияния потока расплава на процессы формирования недендритной структуры при затвердевании бинарного сплава Al-Si // Процессы литья. Киев. – 2013. - № 6. -С. 37-47.
2. Molenaar J.M.M., Katgerman L., Kool W.H., Smeulders R.J. On the formation of the stircast structure // J. Mater. Sci. 21, 1986, p.389-394.
3. Molenaar J.M.M., Salesmans H.C., Katgerman L. The structure of stircast Al-6Cu. // J. Mater. Sci. 20, 1985, p.4335-4344.
4. Burton J.A., Prim R.C., Slichter W.P. The distribution of solute in crystals grown from the melt. Part I. Theoretical // J. Chem. Phys., 21, 1953, p.1987-1991.
5. Wilson L.O. On interpreting a quantity in the Burton, Prim, and Slichter equation as a diffusion boundary layer thickness // Journal of Crystal Growth, 44, 1978, p.247–250.
6. Wilson L.O. A new look at the Burton, Prim, and Slichter model of segregation during crystal growth from the melt // J. Cryst. Growth, 44, 1978, p.371-376.
7. Utter B., Bodenschatz E. Dynamics of Low Anisotropy morphologies in directional solidification // Physical review. E, 66, 051604, 2002.
8. Young M.W., Yae-jung Y., Dong J.S., Kyu H.O. A new criterion for internal crack formation in continuously cast steels // Metallurgical and materials transactions B, Vol. 31B, august 2000, p.779-793.