

$$\left. \begin{array}{l} i=0,1,2,\dots,N_1-1 \\ j=M_2, M_2+1, \dots, N_2 \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} i=M_2, M_2+1, \dots, N_1-1 \\ j=0,1,2,\dots, M_2-1 \end{array} \right\} \quad l=0,1,2$$

$$\begin{aligned} -\lambda'_{M_1-\frac{1}{2},j} \frac{u_{M_1,j}^{l+1} - u_{M_1,j-1}^{l+1}}{h_1} &= -\lambda''_{M_1-\frac{1}{2},j} \frac{v_{M_1,j}^{l+1} - v_{M_1-1,j}^{l+1}}{h_1} = \\ &= K \left( \frac{u_{M_1,j}^{l+1} + u_{M_1,j-1}^{l+1}}{2} - \frac{v_{M_1,j}^{l+1} + v_{M_1-1,j}^{l+1}}{2} \right) \quad (16) \end{aligned}$$

$$(j = -1, 0, 1, \dots, M_2 - 1)$$

$$\begin{aligned} -\lambda'_{i,M_2-\frac{1}{2}} \frac{u_{i,M_2}^{l+1} + u_{i,M_2-1}^{l+1}}{h_2} &= -\lambda''_{i,M_2-\frac{1}{2}} \frac{v_{i,M_2}^{l+1} - v_{i,M_2-1}^{l+1}}{h_2} = \\ &= K \left( \frac{u_{i,M_2}^{l+1} + u_{i,M_2-1}^{l+1}}{2} - \frac{v_{i,M_2}^{l+1} + v_{i,M_2-1}^{l+1}}{2} \right) \quad (17) \end{aligned}$$

$$(i = -1, 0, 1, \dots, M_1 - 1)$$

Выражения (14)–(17) были реализованы для составления АЛГОЛ-программы по разработанному алгоритму при расчете на ЭВМ М-22 двумерного температурного поля отливки (250x250x42 мм, сплав АЛ4) и стального кокиля (250x250x30 мм) для момента затвердевания теплового центра отливки.

А.М. Галушко, С.Н. Леках,  
М. Шварценбергер

### ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ АЛЮМИНИЯ

В работе исследовалось влияние большого числа тугоплавких и легкоплавких элементов (Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Y, Zn, Nb, Mo, Hf, W, B, Na, Bi, S, Pb, Sn, Sb, Cu, Mg, Zn) на размер зерна алюминия марки А9995 и величину его переохлаждения. Плавка образцов производилась в атмосфере арго-

на, тугоплавкие микролегирующие примеси вводились в виде лигатур. Величина переохлаждения измерялась с помощью хромель-алюмелевой термопары с диаметром электродов 0,1 мм и фоторегистрирующего пирометра Ку рнакова. Применяемая методика позволяла фиксировать отклонения величины переохлаждения с точностью 0,06°С.

В табл. 1, 2 представлены основные результаты исследования влияния величины вводимой добавки на число зерен в единице площади шлифа и переохлаждение расплава.

Таблица 1. Влияние добавок тугоплавких элементов на число зерен на 1 см<sup>2</sup> площади шлифа (числитель) и переохлаждение алюминия марки А995 (знаменатель)

Величина добавки, вес. %	Элемент											
	B	Ti	V	Cr	Mn	Y	Nb	Mo	Hf	W	Zr	Fe
0,05	$\frac{17}{1,2}$	$\frac{13}{2,0}$	$\frac{12}{2,7}$	$\frac{10}{2,0}$	-	-	$\frac{16}{1,1}$	$\frac{10}{2,7}$	$\frac{1,2}{2,8}$	$\frac{1,3}{2,8}$	$\frac{15}{2,5}$	-
0,1	$\frac{32}{0,7}$	$\frac{20}{1,5}$	$\frac{17}{1,9}$	$\frac{11}{2,6}$	$\frac{14}{2,7}$	$\frac{12}{3,2}$	$\frac{27}{0,8}$	$\frac{11}{2,7}$	$\frac{13}{2,5}$	$\frac{24}{2}$	$\frac{17}{2,3}$	$\frac{10}{3,2}$
0,2	$\frac{53}{0,6}$	$\frac{35}{0,5}$	$\frac{32}{1,0}$	$\frac{12}{2,6}$	$\frac{13}{2,7}$	$\frac{15}{3,2}$	$\frac{33}{0,7}$	$\frac{13}{2,6}$	$\frac{17}{1,9}$	$\frac{38}{1,4}$	$\frac{30}{1,0}$	$\frac{10}{3,3}$
0,4	-	$\frac{90}{0,4}$	$\frac{30}{1,1}$	$\frac{25}{1,7}$	$\frac{14}{2,6}$	$\frac{19}{3,0}$	$\frac{37}{0,8}$	$\frac{34}{1,9}$	$\frac{18}{1,1}$	$\frac{32}{2,0}$	$\frac{60}{0,5}$	-
0,5	-	-	-	-	-	$\frac{20}{2,9}$	-	$\frac{40}{1,1}$	-	-	-	$\frac{10}{3,0}$
0,6	-	$\frac{100}{0,4}$	-	$\frac{25}{1,7}$	$\frac{14}{2,7}$	-	-	-	$\frac{50}{0,5}$	-	-	-
1,5	-	-	-	-	$\frac{32}{2,0}$	$\frac{22}{2,5}$	-	-	-	-	-	$\frac{12}{3,1}$

В основном присадки всех исследованных элементов, за исключением олова, никеля, цинка, железа, меди и магния, приводили в разной степени к измельчению зерен. Однако характер влияния микролегирования на величину переохлаждения су-

еще существенно различен. Такие элементы, как титан, ванадий, хром, марганец, железо, кобальт, цирконий, ниобий, гафний, вольфрам, бор, молибден измельчают зерно и при этом уменьшают величину переохлаждения расплава. Эффект измельчения зерна зависит от величины и характера вводимой добавки. Анализ концентрационных зависимостей числа зерен и переохлаждения показывает, что при определенной величине добавки наблюдается резкий перегиб кривых. Так, при введении Ti, Zr, Hf, Mo, W, Cr, V и Nb можно считать, что критическая концентрация составляет соответственно 0,2; 0,1; 0,4; 0,2; 0,1; 0,4; 0,05 и 0,1. Это весьма близко совпадает со значением концентрации данных элементов в эвтектике либо перитектике. При превышении указанной величины на термических кривых обнаруживаются перегибы, свидетельствующие о появлении первичных фаз. Интервал метастабильности расплава при этом уменьшается с 3 до 1<sup>0</sup> -0,4<sup>0</sup> С и число зерен увеличивается в 3 - 10 раз. Величина переохлаждения тесно коррелируется с числом зерен алюминия.

Измельчение зерен происходит наиболее интенсивно при добавке титана, циркония, бора, гафния, молибдена и вольфрама. Соответствие точек перегибов на зависимостях числа зерен и величины переохлаждения расплава от величины добавки и концентрации элементов в эвтектике либо перитектике свидетельствует о том, что причиной измельчения зерна являются дисперсионные включения первичных интерметаллидов. Эффективность данных включений определяется, по-видимому, количеством первичных кристаллов и их физико-химическими свойствами.

Легкоплавкие элементы - натрий, висмут, сурьма, сера и свинец также способствуют измельчению зерна, однако переохлаждение расплава при этом не уменьшается, а в некоторых случаях увеличивается (табл. 2).

Все концентрационные зависимости числа зерен носят экстремальный характер. Увеличение переохлаждения при добавках указанных элементов свидетельствует о затруднении процесса зарождения кристаллов алюминия, что может быть связано с дезактивацией потенциальных зародышей за счет блокировки центров кристаллизации атомами микродобавки. Характерно, что наибольшее измельчение зерна наблюдается при добавках натрия, свинца и серы, соответствующих концентрации монотектики или области несмешиваемости в жидком состоянии.

Проведенные с применением метода термического анализа исследования процесса микрорегулирования алюминия позволили

Таблица 2. Влияние добавок легкоплавких элементов на число зерен на 1 см<sup>2</sup> площади шлифа (числитель) и переохлаждение алюминия марки А035 (знаменатель)

Величина добавки, вес, %	Элемент					
	Sb	Pb	Sn	S	Na	Bi
0,05	-	$\frac{12}{2,4}$	$\frac{10}{2,7}$	$\frac{45}{3,4}$	$\frac{25}{3,5}$	-
0,1	$\frac{27}{3,3}$	$\frac{12}{2,3}$	$\frac{9}{2,7}$	$\frac{27}{3,1}$	$\frac{33}{3,5}$	$\frac{20}{2,7}$
0,1	$\frac{27}{3,3}$	$\frac{12}{2,3}$	$\frac{9}{2,7}$	$\frac{27}{3,1}$	$\frac{33}{3,5}$	$\frac{20}{2,7}$
0,2	$\frac{30}{3,4}$	$\frac{12}{2,2}$	$\frac{9}{2,7}$	$\frac{18}{2,8}$	$\frac{35}{3,3}$	$\frac{25}{2,7}$
0,5	$\frac{22}{3,3}$	$\frac{12}{2,2}$	$\frac{10}{2,6}$	-	-	$\frac{29}{2,8}$
1,0	$\frac{22}{3,2}$	$\frac{65}{3,6}$	$\frac{10}{2,6}$	-	-	-

установить различный механизм измельчения зерна алюминия при вводе тугоплавких и легкоплавких добавок.

Влияние первой группы элементов на процесс затвердевания алюминия обусловлено образованием дополнительных центров кристаллизации, что приводит к снижению степени переохлаждения расплава. Легкоплавкие добавки, вследствие высокой поверхностной активности, затрудняют рост образующихся кристаллов алюминия.