

УДК 669.7.018

Study Modification Technology for Casting Flat Bars 5XXX Series

**Igor V. Kostin^a,
Alexandr I. Bezrukikh^b, Sergey V. Belyaev^{b*},
Viktor F. Frolov^a, Ivan Yu. Gubanov^b,
Elena M. Lesiv^b and Nikita A. Stepanenko^b**

^a"RUSAL ETC" LLC

37 Pogranichnikov Str., Krasnoyarsk, 660111, Russia

^bSiberian Federal University

79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

Received 28.02.2017, received in revised form 10.03.2017, accepted 23.03.2017

The article presents the results of investigation of influence of the concentration of ligatures in the melt over the cross section metallotrakta on structure refinement ingot at a semi-continuous casting for the two feeding options ligatures, modifying control ability by TR-1, and also presented a computer model of ligature of the particle distribution along metallotrakta. The analysis of the results and make a choice of rational variants of ligatures supply.

Keywords: aluminum wrought alloys 5XXX series, Al-Mg system alloys, grain refinement, fine-grained structure, procedure TR-1, methods for evaluating the ability of the modifier.

DOI: 10.17516/1998-2836-0009.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: 244812@mail.ru

Исследование технологии модифицирования при литье плоских слитков 5XXX серии

**И.В. Костин^а, А.И. Безруких^б,
С.В. Беляев^б, В.Ф. Фролов^а,
И.Ю. Губанов^б, Е.М. Лесив^б, Н.А. Степаненко^б**

^аООО «РУСАЛ ИТЦ»

Россия, 660111, Красноярск, ул. Пограничников, 37

^бСибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

В статье изложены результаты исследования влияния концентрации лигатуры в расплаве по сечению металлтракта на измельчение структуры слитка при полунепрерывном литье для двух вариантов подачи лигатуры, контроль модифицирующей способности методом TP-1, а также представлена компьютерная модель распределения частиц лигатуры вдоль металлтракта. Дан анализ полученных результатов и сделан выбор рациональных вариантов подачи лигатуры.

Ключевые слова: алюминиевые деформируемые сплавы 5XXX серии, сплавы системы Al-Mg, измельчение зерна, мелкозернистая структура, процедура TP-1, методы оценки модифицирующей способности.

Введение

Алюминиевые сплавы 5XXX серии относятся к системе Al-Mg (магналии, сплавы группы АМг) и входят в группу деформируемых термически неупрочняемых сплавов, которые хорошо свариваются, имеют достаточно высокую пластичность, коррозионную стойкость при средних значениях прочности и текучести. Магналии применяют в автомобилестроении, кораблестроении, авиации, машиностроении, они служат для изготовления сварных конструкций, арматуры строительных сооружений, деталей холодильных установок, заклепок, бензопроводов и др. [1, 2].

Проблема повышения механических и эксплуатационных свойств изделий из сплавов Al-Mg, как и других различных алюминиевых сплавов, до сих пор остается актуальной в теории и практике литейного производства. В настоящий момент существуют различные технологии воздействия на структуру сплава, например ультразвуковое воздействие, магнитное, физическое [3, 4].

Наиболее распространенный метод – модифицирование. Использование модификаторов затравочного действия считается наиболее эффективным, простым, относительно недорогим и надежным способом измельчения зерна. Среди модификаторов наибольшее распространение получили модифицирующие прутковые лигатуры, содержащие в своем составе тугоплавкие дисперсные частицы, являющиеся потенциальными центрами кристаллизации сплавов.

Их ввод в корне меняет процесс кристаллизации, что позволяет получить мелкую и довольно однородную структуру, снизить газовую пористость и тем самым улучшить механические и технологические свойства сплава [3].

Для процесса модифицирования алюминиевых сплавов широко применяют лигатуры типа Al-Ti-B, Al-Ti-C, которые чаще всего используются в форме прутка (проволоки) в бухтах для обеспечения непрерывной подачи во время процесса полунепрерывного литья. Лигатуры этой группы обеспечивают эффективное измельчение зерна за счет введения в расплав мелкодисперсных тугоплавких фаз TiB₂ и TiC, служащих центрами кристаллизации [4]. Так, для сплавов AMg4, AMg5, используемых для изготовления литейных форм пластмасс либо прецизионных плит для различных целей, получение мелкозернистой структуры на этапе слитка упрощает процесс изготовления плит, повышает качество поверхности при продольной распиловке или дает возможность заменить процесс прокатки резкой [5, 6]. Мелкозернистая структура означает равномерное распределение размера зерна по сечению слитка, устранение столбчатых и перистых зерен, улучшает технологические показатели, а также снижает склонность к образованию горячих и холодных трещин [7-9].

Однако до настоящего времени остается открытым вопрос влияния таких конструктивных и технологических параметров литейного производства, как состав и качество, расход, место ввода в технологической цепи, на модифицирующую способность прутковых лигатур.

Методика проведения исследований

Для оценки модифицирующей способности лигатурных прутков была разработана установка РУСАЛ-ТЕСТ для применяемой за рубежом (рис. 1а) процедуры TP-1 [10], на которую получено положительное решение [11].

Исследования осуществляли в промышленных условиях во время литья плоских слитков из алюминиевого сплава 5052 с использованием лигатурных прутков марок AlTi5B1, AlTi3B1.

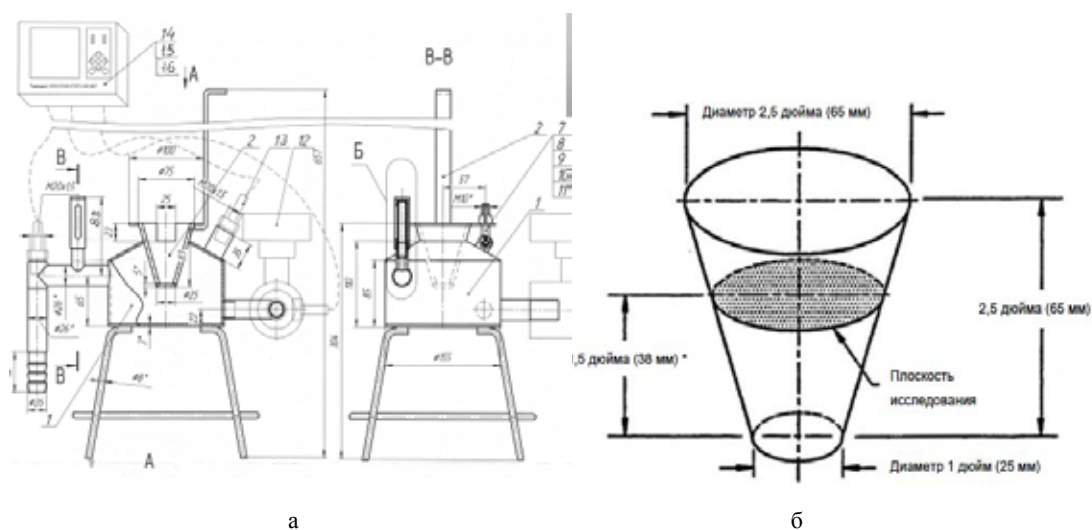


Рис. 1. Установка РУСАЛ-ТЕСТ: а – эскиз разработанной установки; б – схема вырезки образцов для металлографических исследований

Во время литья слитка производили отбор проб расплава из металлотректа пробоотборником (поз. 2 на рис. 1а) с использованием разработанной установки РУСАЛ-ТЕСТ для анализа макроструктуры и модифицирующей способности лигатуры. Далее после кристаллизации проб производили вырезку образцов согласно рис. 1б для проведения последующих металлографических исследований. Расход лигатуры при проведении исследований изменялся в пределах от 1 до 2 кг/т, а модифицирование осуществлялось лигатурными прутками марки AlTi5B1, AlTi3B1. Маркировка проб и параметры литья представлены в табл. 1.

В табл. 2 отражены результаты металлографического анализа проб алюминиевого сплава 5052. Во всех случаях макроструктура равномерна по сечению и состоит из мелких равноосных зерен со средним размером зерна $0,15 \div 0,23$ мм. С увеличением подачи лигатурного прутка от 1,0 до 1,5 кг/т происходит измельчение размера зерна с $220 \div 230$ до 180 мкм. Дальнейшее увеличение расхода лигатурного прутка до 2 кг/т приводит к измельчению размера зерна до $150 \div 160$ мкм. При этом меньший размер зерна обеспечивает применение лигатурного прутка AlTi5B1 по сравнению с лигатурным прутком AlTi3B1.

Моделирование процесса распределения интерметаллидов в системе литейных металлотректов

Проведение исследований в промышленных условиях всегда более затратно, а в лабораторных условиях не всегда удастся учесть все факторы. Поэтому была предпринята попытка проведения компьютерного моделирования процесса распределения интерметаллидов Al_3Ti и TiB_2 при растворении лигатурного прутка AlTi5B1 в литейном металлотректе протяженностью от выхода расплава из миксера и до его входа в кристаллизатор при литье плоских слитков в зависимости от места ввода и различного расхода лигатуры от 1,0 до 2,0 кг/т. При реализации данной компьютерной модели учитывались реальные конструктивные и технологические параметры литейного оборудования. Скорость расплава в лотке принимались равной 0,1 м/с, а начальная температура расплава из миксера была равна 727 °С.

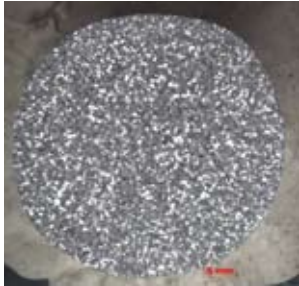
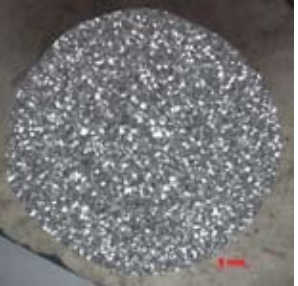
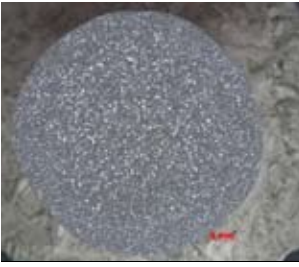


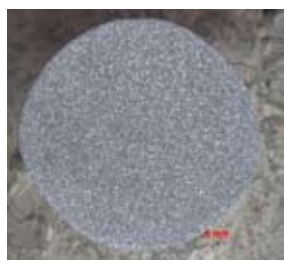
Для решения гидродинамической задачи течения расплава в металлотректе по чертежам учитывались размеры и свойства материалов элементов лотковой системы, футеровки, фильтров тонкой очистки и пеночерамического фильтра. Внутренняя система внепечного рафинирования металла была смоделирована с учетом вращения трех роторов.

На рис. 2 представлена расчетная схема литейной оснастки.

Таблица 1. Маркировка проб параметров литья плоских слитков из алюминиевого сплава 5052

Номер образца	Марка сплава	Наименование лигатуры	Расход лигатуры, кг/т
1	5052	AlTi5B1	1,0
2			1,5
3			2,0
4		AlTi3B1	1,0
5			1,5
6			2,0

Таблица 2. Результаты металлографического анализа проб алюминиевого сплава 5052

№	Структура	Размер зерна, мкм	№	Структура	Размер зерна, мкм
без модифицирования					
00		560	01		600
AlTi5B1			AlTi3B1		
Расход лигатуры 1,0 кг/т					
1		220	4		230
Расход лигатуры 1,5 кг/т					
2		180	5		180
Расход лигатуры 2,0 кг/т					

Рассматривали два варианта места ввода лигатурного прутка:

- 1) перед установками фильтрации с суммарным расходом 1 и 1,5 кг/т;
- 2) перед установкой дегазации и фильтрации с суммарным расходом 2 кг/т.

На рис. 3 показано изменение температуры расплава вдоль металлотракта, которая изменяется незначительно – от 706 до 727 °С.

На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования распределения интерметаллидов Al_3Ti и TiB_2 при растворении лигатурного прутка AlTi5B1 на расстоянии 150 мм от дна металлотракта с учетом места ввода лигатурного прутка. Суммарная концентрация интерметаллидов соответствует массовому проценту содержания лигатуры в горизонтальной плоскости

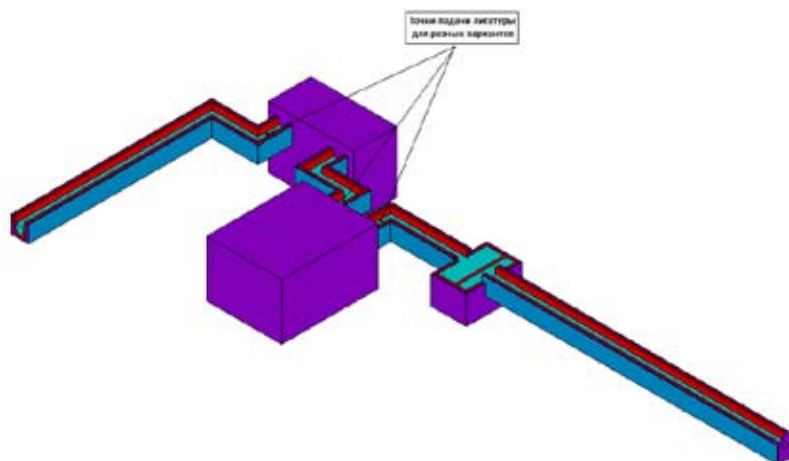


Рис. 2. Расчетная схема литейной оснастки

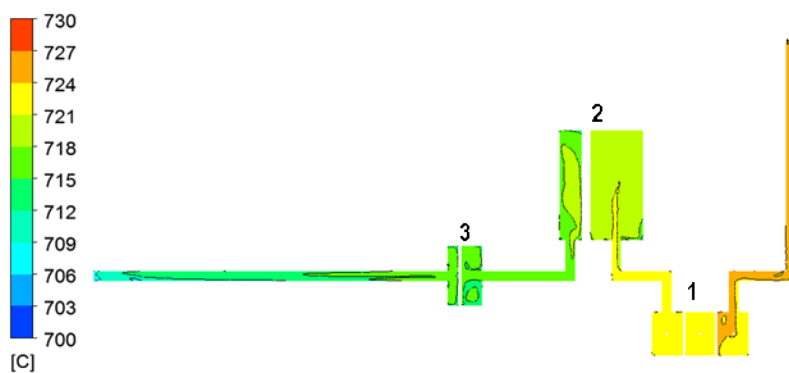


Рис. 3. Изменение температуры расплава вдоль металлотракта: 1 – установка дегазации; 2 – фильтр тонкой очистки; 3 – пенокерамический фильтр

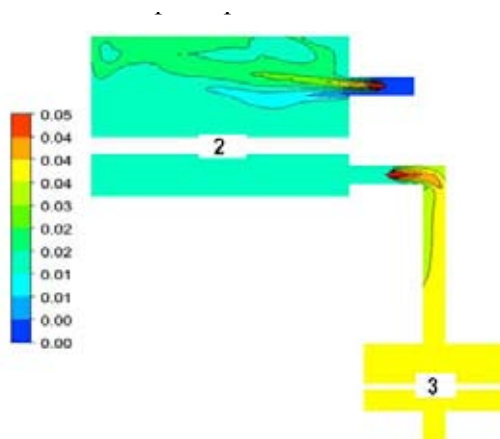


Рис. 4. Изменение суммарной концентрации интерметаллидов Al_3Ti и TiB_2 в жидком алюминии вдоль металлотракта по варианту 1 при установившемся режиме течения

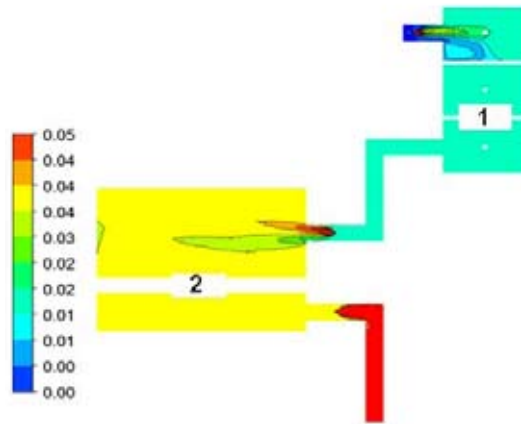


Рис. 5. Изменение суммарной концентрации интерметаллидов Al_3Ti и TiB_2 в жидком алюминии вдоль металлотракта по варианту 2 при установившемся режиме течения

Таблица 3. Массовое процентное содержание легирующих веществ (сколько процентов составляет масса в сумме Al_3Ti и TiB_2 от массы алюминия) на втулках перед входом в кристаллизатор

Вариант	Место определения суммарной концентрации интерметаллидов			
	1	2	3	4
1	0,03687	0,03689	0,03689	0,03688
2	0,05544	0,05546	0,05546	0,05544

разрезов литейных металлотракт, установки дегазации, фильтра тонкой очистки и пенокерамического фильтра.

В табл. 3 представлен средний по сечениям массовый процент содержания в сумме Al_3Ti и TiB_2 на выходных отверстиях для всех вариантов моделирования.

Для оценки равномерности перемешивания лигатуры по четырем вариантам было посчитано среднеквадратичное отклонение массовой концентрации лигатуры от среднего значения по всем сечениям (1). Чем выше величина среднеквадратичного отклонения массовой концентрации лигатуры, тем больше величина разброса этой величины и тем, соответственно, менее равномерно она перемешана.

$$\begin{aligned}
 SKO = & \left[\frac{\sum \left(A_{1i} \left(C_{1i} - \frac{\sum (A_{1i} C_{1i})}{\sum A_{1i}} \right) \right)}{\sum A_{1i}} + \frac{\sum \left(A_{2i} \left(C_{2i} - \frac{\sum (A_{2i} C_{2i})}{\sum A_{2i}} \right) \right)}{\sum A_{2i}} + \dots \right. \\
 & \left. + \frac{\sum \left(A_{4i} \left(C_{4i} - \frac{\sum (A_{4i} C_{4i})}{\sum A_{4i}} \right) \right)}{\sum A_{4i}} \right] \cdot \frac{1}{4}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где SKO – среднеквадратичное отклонение объемной концентрации лигатуры по четырем отверстиям; A_{1i} – площадь i -го поверхностного элемента на отверстии номер 1; C_{1i} – объемная концентрация в i -ом элементе поверхности отверстия номер 1.

Среднеквадратичное отклонение концентрации лигатуры на выходных отверстиях для варианта 1 составило $10,42 \times 10^{-9}$ для варианта 2 СКО составило $8,45 \times 10^{-9}$, т. е. наиболее равномерное распределение частиц лигатуры в объеме металла характерно для варианта 2.

Выводы

В результате проведенных исследований технологии модифицирования при литье плоских слитков 5XXX серии получены следующие результаты:

1. С помощью разработанной установки РУСАЛ-ТЕСТ для оценки модифицирующей способности лигатур установлено, что применение лигатурного прутка AlTi5B1 по сравнению с лигатурным прутком AlTi3B1 обеспечивает меньший размер зерна.

2. С увеличением подачи лигатурного прутка от 1,0 до 1,5 кг/т происходит измельчение размера зерна с $220 \div 230$ до 180 мкм. Дальнейшее увеличение расхода лигатурного прутка до 2 кг/т приводит к измельчению размера зерна до $150 \div 160$ мкм.

3. Созданная компьютерная модель процесса распределения интерметаллидов Al₃Ti и TiB₂ при растворении лигатурного прутка AlTi5B1 в литейном металлотракте позволила выбрать рациональное место подачи лигатурного прутка.

Список литературы

1. Напалков В.И., Черепок Г.В., Махов С.В. *Непрерывное литье алюминиевых сплавов: справочник*. М.: Интермет Инжиниринг, 2005. 512 с. [Napalkov V.I., Cherepok G.V., Makhov S.V. *Continuous casting aluminum alloys: a handbook*. M., Internet Engineering, 2005. 512 p. (in Russian)]

2. ГОСТ 4784-97 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые» [GOST 4784-97 "Aluminium and aluminum alloy deforming" (in Russian)]

3. Drezet J.M., Rappaz M., Krahenbuhl Y. Thermomechanical effects during direct chill and electromagnetic casting of aluminum alloys. *Essential Readings in Light Metals. The Minerals, Metals & Materials Society* 2013. 378 p.

4. Eskin D.G., Atamanenko T.V., Zhang L., Katgerman L. On the mechanism of grain refinement by ultrasonic melt treatment in the presence of transition metals. *Light Metals* 2010. P. 911-915.

5. Фридляндер И.Н. *Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы*. М.: Металлургия, 1979. 208 с. [Friedlander I.N. *Aluminum wrought alloys construction*. M.: Metallurgy, 1979. 208 p. (in Russian)]

6. Напалков В.И., Махов С.В. *Легирование и модифицирование алюминия и магния*. М.: МИСИС, 2002. 376 с. [Napalkov V.I., Makhov S.V. *The doping and modifying of aluminum and magnesium*. M.: MISIS, 2002. 376 p. (in Russian)]

7. Елагин В.И. *Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами*. М.: Металлургия, 1975. 248 с. [Elagin V.I. *Doping wrought aluminum alloys with transition metals*. M.: Metallurgy, 1975. 248 p. (in Russian)]

8. Grandfield J.F., Eskin D.G., Bainbridge I.F. Direct-chill casting of light alloys. *Science and Technology. The Minerals Metals & Materials. Society*, 2013. 412 p.

9. Пронь Е.Б. *Управление структурой и свойствами литых алюминиевых сплавов и разработка технологии их модифицирования мелкокристаллическими добавками*: дис. ... канд.

техн. наук. Самара, 1998. 196 с. [Pron E.B. *Management structure and properties of cast aluminum alloys and the development of technology for their fine crystalline modification additives*: PhD thesis. tehn. Sciences / SamSTU. Samara, 1998. 196 p. (in Russian)]

10. Standard Test Procedure for Aluminum Alloy Grain Refiners. *Aluminum Association* 2012.

11. Положительное решение на патент на полезную модель № 153019 от 04.04.2016. Российская Федерация, МПК F27B17/02, G01N33/20. Установка для исследования модифицирующей способности лигатур / Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, С.В. Беляев [и др.]. [A positive decision on the patent for utility model № 153019 from 04.04.2016. the Russian Federation, F27B17 / 02 IPC, G01N33/20. Installation for the study of the ability of modifying ligatures / N.N. Dovzhenko, S.B. Sidelnikov, S.V. Belyaev [et al.]. (in Russian)]