

УДК 621.745.55

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОРОШКОМ АЛЮМИНИДА ТИТАНА НА СТРУКТУРУ АЛЮМИНИЕВЫХ ОТЛИВОК

ТРОЦАН А. И.¹, *д.т.н., проф.*,
КАВЕРИНСКИЙ В. В.¹, *аспирант, вед. инж.*
БРОДЕЦКИЙ И. Л.^{1*}, *к.т.н., с.н.с.*

^{1*} Отдел № 46 материаловедения стали, Институт проблем материаловедения НАН Украины, ул. Кржижановского, 3, 03680, Киев – 142, Украина, тел. 0-50-96-42-900, e-mail: brodig@mail.ru. ORCID ID: 0000-0002-1918-4976

Аннотация. *Цель.* Подтверждение эффективности, предложенных на основании результатов компьютерного моделирования, рекомендаций по модифицированию алюминиевых отливок порошком TiAl и исследование его влияния на характеристики структуры металла. *Методика.* Материал отливок – технический алюминий содержащий 0,3...0,4 % Mn, 0,1...0,2 % Cu и менее 0,1 % Si и Fe. Выполнена предварительная рафинирующая обработка хлоридом марганца MnCl₂. Для ввода модификатора использованы капсулы с порошковым наполнителем: TiAl – 57 %, порошок Al – 29 %, MnCl₂ – 14 %. Фракционный состав порошка TiAl отвечал параметрам логнормального распределения $\mu = 0,90$ и $\sigma = 0,47$. Температура металла при обработке 750...760 °С. Расход TiAl – 0,4 г/кг. Методы исследования: количественная оптическая металлография, измерение твердости по Виккерсу. *Результаты.* За счёт модифицирования достигнуто уменьшение средней площади сечений макрозерна на шлифах в 6...8 раз, что соответствует измельчению средних линейных размеров в 2,5...2,8 раз. Устранена столбчатость макрозерен. Достигнута глобуляризация микроструктуры. Приближение формы зерен микроструктуры к равноосной в модифицированном металле сопровождалось уменьшением средней площади их сечений на плоскости шлифа. Измельчение микроструктуры наиболее выражено в периферийной зоне отливки и в районе половины радиуса является примерно 4-х кратным (по площади сечения). Измельчение структуры приводит к увеличению твердости на 23,5 %. *Научная новизна.* Установлено, что распределение зерен микроструктуры по размерам, как в сравнительных, так и в опытных отливках описывается логнормальным законом, при этом модифицирование существенно влияет на параметры σ и незначительно на μ . Показано, что условная характерная форма зерен микроструктуры в не модифицированных отливках тяготеет к прямоугольной, в модифицированных она приближается к эллиптической (в центре) и ромбической (на периферии). *Практическая значимость.* Подтверждена эффективность предложенных теоретически (с использованием компьютерного моделирования) рекомендаций по модифицированию малогабаритных быстро охлаждаемых алюминиевых отливок. Достигнутые результаты позволяют в значительной мере повысить качество как литых изделий из технического (вторичного) алюминия, так и технологические свойства литых заготовок, подвергаемых обработке давлением.

Ключевые слова: модифицирование; алюминид титана; алюминиевое литьё; макро- и микроструктура; твердость

ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ПОРОШКУ АЛЮМІНИДУ ТИТАНУ НА СТРУКТУРУ АЛЮМІНІЄВИХ ВИЛИВОК

ТРОЦАН А. І.¹, *д.т.н., проф.*,
КАВЕРІНСЬКІЙ В. В.¹, *пров. інж., аспірант*,
БРОДЕЦЬКИЙ І. Л.^{1*}, *к.т.н., с.н.с.*

^{1*} Відділ № 46 матеріалознавства сталі, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, вул. Крижанівського, 3, 03680, Київ - 142, Україна, тел. 0-50-96-42-900, brodig@mail.ru. ORCID ID: 0000-0002-1918-4976

Анотація. *Мета.* Підтвердження ефективності, запропонованих на підставі результатів комп'ютерного моделювання, рекомендацій по модифікуванню алюмінієвих виливків порошком TiAl та дослідження його впливу на характеристики структури металу. *Методика.* Матеріал виливків – технічний алюміній, що містить 0,3...0,4% Mn, 0,1...0,2% Cu і менше 0,1% Si та Fe. Виконана попередня рафінуюча обробка хлоридом марганцю MnCl₂. Для вводу модифікатора використані капсули з порошковим наповнювачем: TiAl – 57%, порошок Al – 29%, MnCl₂ – 14%. Фракційний склад порошку TiAl відповідав параметрам логнормального розподілу $\mu = 0,90$ і $\sigma = 0,47$. Температура металу при обробці 750...760 °С. Витрата TiAl – 0,4 г/кг. Методи дослідження: кількісна оптична металлографія, вимірювання твердості за Віккерсом. *Результати.* За рахунок модифікування досягнуто зменшення середньої площі перетинів макрозерна на шлифах у 6...8 разів, що відповідає подрібненню середніх лінійних розмірів в 2,5...2,8 разів. Усунена стовпчастість макрозерен. Досягнута глобуляризація микроструктури. Наближення форми зерен микроструктури до рівноосної в модифікованому металі супроводжувалося зменшенням середньої площі їх перерізів на площині шлифа. Подрібнення микроструктури найбільш виражено у периферійній зоні виливки і в районі половини радіуса є приблизно 4-х кратним (по площі перетину). Подрібнення структури призводить до збільшення твердості на 23,5%. *Наукова новизна.* Встановлено, що розподіл зерен микроструктури за розмірами як для дослідних, так і для порівняльних виливків описується логнормальним законом, при цьому модифікування суттєво впливає на параметри σ і незначно на μ . Показано, що умовна характерна форма зерен

мікроструктури в не модифікованих виливках тяжіє до прямокутної, в модифікованих вона наближається до еліптичної (у центрі) і ромбічної (на периферії). **Практична значимість.** Підтверджена ефективність запропонованих теоретично (з використанням комп'ютерного моделювання) рекомендацій по модифікуванню малогабаритних швидко охолоджуваних алюмінієвих виливків. Досягнуті результати дозволяють значною мірою підвищити якість як литих виробів з технічного (вторинного) алюмінію, так і технологічні властивості литих заготовок, що піддаються обробці тиском.

Ключові слова: модифікування; алюмінідів титану; алюмінієве литво; макро- і мікроструктура; твердість

EFFECT OF MODIFICATION BY TITANIUM ALUMINIDE POWDER ON THE STRUCTURE OF ALUMINUM CASTINGS

TROTSAN A. I.¹, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*,
KAVERINSKY V. V.¹, *leading engineer, graduate student*,
BRODETSKY I. L.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Senior Researcher*.

^{1*} Department № 46 of Materials Science of steel, Institute for Problems of Materials Science, Krzyzanowskiego str., 3, 03680, Kiev – 142, Ukraine, tel. 0-50-96-42-900, brodig@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1918-4976

Abstract. Purpose. Validation of proposed based on the results of computer model recommendations for modification of aluminium castings by TiAl powder and study of its effect on the characteristics of the metal structure. **Methodology.** Casting material is technical aluminium which contains 0,3...0,4% Mn, 0,1...0,2% Cu and less than 0,1% Si and Fe. A pre-refined processing of manganese chloride $MnCl_2$ was performed. For modifier input capsules filled with powder including TiAl – 57%, Al powder – 29% and $MnCl_2$ – 14% were used. Fractional composition of TiAl powder was corresponding to the parameters of the lognormal distribution $\mu = 0,90$ and $\sigma = 0,47$. The metal processing temperature was 750...760 ° C. Consumption of TiAl was 0,4 g/kg. Methods: Quantitative optical metallography, measurement of the Vickers hardness. **Findings.** By modifying the decrease in the average cross-sectional areas of macro-grains in sections 6...8 times has been achieved. That corresponds to the average linear size reduction by 2.5...2.8 times. Columnar grains were eliminated. Globularization of microstructure was achieved. Approaching of the microstructure grains shape to equiaxed in the modified metal is accompanied by a decrease in the average area of their cross sections in the plane of the sample section. Microstructure refinement is most manifested in the peripheral zone and the half radius area of the casting is approximately 4x (sectional area). Structure refinement leads to an increase in their hardness up to 23.5%. **Originality.** It was found that the distribution of the grain size of the microstructure for both experimental and comparative castings described as lognormal, but modification significantly affects the parameters σ but rather slightly to μ . It is shown that the conditional characteristic shape of the grains in the microstructure of the unmodified casting tends to be rectangular; in modified it approaches the elliptical (centre) and rhombic (the periphery). **Practical value.** The effectiveness of the theoretically proposed recommendations for modification of small swiftly cooled aluminium castings was confirmed. Achieved results can significantly improve either quality of cast products from technical aluminium or technological properties of cast billets for further shaping.

Keywords: modification; titanium aluminide; aluminium castings; macro- and microstructure; hardness

Введение

Сплавы на основе алюминия используются в различных сферах техники благодаря малой плотности и высокой коррозионной стойкости. Рост требований к качеству металлопродукции делает актуальной разработку методов улучшения структуры и механических свойств. Эффективным способом одновременного повышения прочности и пластичности является измельчение зёрен [3, 4, 6], достаточно значимого эффекта легче добиться при изначально более мелкодисперсной литой структуре, которую возможно получить за счёт модификаторов.

Модифицирование отливок из алюминия являлось предметом многих исследований [3, 5 – 7]. В качестве модификаторов применяли как лигатуры, влияющие на свойства расплава [7], так и дорогостоящие наноразмерные порошки [3, 5].

Разработаны комплексные модификаторы, объединяющие действие первого и второго рода [5, 13]. Идея применения для модифицирования дисперсных порошков, способных растворяться к моменту начала затвердевания до наноподложек и становиться центрами принудительной объёмной кристаллизации основного металла была разработана в [8, 9]. В качестве модификатора для алюминия и его сплавов был предложен алюминид титана TiAl. С использованием компьютерного моделирования в работе [8] были определены оптимальные характеристики гранулометрического состава вводимого порошка. На основании [2, 10] были сделаны выводы о его оптимальном расходе. Применение математического моделирования позволило свести к минимуму необходимый объём экспериментальных исследований, которым посвящена данная работа.

Цель

Целью работы является подтверждение эффективности, предложенных на основании результатов компьютерного моделирования, рекомендаций по модифицированию алюминиевых отливок порошком TiAl и исследование его влияния на характеристики структуры и свойства металла.

Материал и методика выполнения работы

В качестве материала для отливок использовался технический алюминий, состав которого приведен в таблице 1.

Таблица 1

**Состав материала отливок, % масс.
Material composition of castings, % mass**

Si	Mn	Fe	Cu	Al
<0,1	0,3...0,4	<0,1	0,1...0,2	основа

Повышенное содержание марганца обусловлено предварительной обработкой расплава хлоридом марганца (MnCl₂) с целью рафинирования за счёт барботажа жидкого металла [5]. Добавки марганца не только повышают прочность и твердость металла, но и улучшают пластичности и формуемость [4, 5]. Мелкие дисперсоиды Al₆Mn [1] стабилизируют рост зерна при отжиге. Марганец улучшает литейные свойства, снижает усадку при затвердевании [4]. Микродобавки титана способствуют измельчению структуры алюминиевых сплавов [4, 5, 12].

Более эффективным представляется ввод дисперсного порошка TiAl, имеющего параметры решётки близкие к таковым у алюминия [1], растворимого в металле [4, 11] и способного образовывать дополнительные центры принудительной кристаллизации. Таким образом обеспечивается двойное воздействие: одновременно как модификатора первого и второго рода.

Порошок TiAl, используемый в эксперименте, изготавливали методом размола. При этом частицы, как правило, имеют логнормальное распределение по размерам. Согласно результатам работы [8] для малогабаритных отливок из алюминия оптимальным представляется порошок TiAl, гранулометрический состав которого соответствует логнормальному распределению с параметрами $\mu = 0,8...1,0$ и $\sigma = 0,3...$

...0,5. Это порошки со средним размером частиц 2,3...3,1 мкм и интервалом варьирования размеров от 0,5...1,0 до 5,0...7,0 мкм. Поэтому для проведения экспериментов использован порошок TiAl, фракционный состав которого отвечал параметрам $\mu = 0,90$ и $\sigma = 0,47$. Для ввода модификатора в расплав были изготовлены закрытые капсулы, которые закреплялись в колокольчике и вводились вглубь расплава, затем производилось перемешивание. Температура металла при обработке составляла 750...760 °С. Расход TiAl – 0,4 г/кг. Порошковый наполнитель капсулы имел следующий состав (масс. %): TiAl – 57 %, порошок алюминия 29 %, MnCl₂ – 14 %.

На литых образцах производился количественный анализ макро- и микроструктуры с применением оптической микроскопии и измерение твёрдости.

Результаты

На рисунке 1 приведено сравнение типичных макроструктур не модифицированной (1) и модифицированной (2) отливок в продольном разрезе (на линейках – цена деления). Количественные характеристики макроструктуры даны в таблице 2.



Рис. 1. Влияние модифицирования порошком TiAl на макроструктуру алюминиевой отливки:

1) без модифицирования; 2) модифицированная /

Effect of the modification by TiAl powder on the macrostructure aluminium casting:

1) non-modified; 2) modified

Средние площади сечений зерна на поперечных шлифах в модифицированных отливках уменьшаются примерно в 6...7 раз, на продольных шлифах – в 7...8 раз. Это соответствует измельчению средних линейных размеров зерна, при условном предположении их кубической формы, в 2,5...2,8 раз.

Таблица 2

Влияние модифицирования алюминия порошком TiAl на характеристики макроструктуры алюминиевых отливок

Effect of modification by TiAl aluminium powder on characteristics of aluminium castings macrostructures

Тип образца	Разрез	Средняя площадь сечения зерна, мм ²		Интервал варьирования площадей сечения зёрен, мм ²
		Методом подсчёта зёрен	Методом непосредственного измерения	
Без модифицирования	поперечный	2,27	2,59	0,06...11,15
	продольный	4,34	4,01	0,11...12,12
Модифицирование TiAl	поперечный	0,37	0,36	0,02...1,60
	продольный	0,54	0,58	0,02...3,87

На рисунке 2 приведены типичные микроструктуры немодифицированных (1, 2) и модифицированных порошком TiAl (3, 4) отливок. Численные характеристики микроструктуры приведены ниже в таблице 3.

Характер микроструктуры в центральной и периферийной зонах заметно различается. Так в периферийной области прослеживается своеобразная двухуровневая структура (рис. 2 (2)), в которой вытянутые зёрна (среднее соотношение продольного размера к поперечному 5,03) объединены в разграниченные пакеты, соответствующие макрозёрнам. В центральной части зёрна ближе к равноосным, но некоторая вытянутость сохраняется (среднее соотношение продольного размера к поперечному 2,40).

Микроструктура центральной зоны в сравнительных и опытных отливках различается мало, но отмечается некоторая глобуляризация (рис. 2 (1), (3)). Средняя площадь зерна в центральной части модифицированной отливки на 20 % меньше, чем в немодифицированной. Соотношение продольных размеров к поперечным уменьшилось до 1,68. Условная форма зёрен тяготеет к эллиптической, в отличие от немодифицированных, где она близка к прямоугольной.

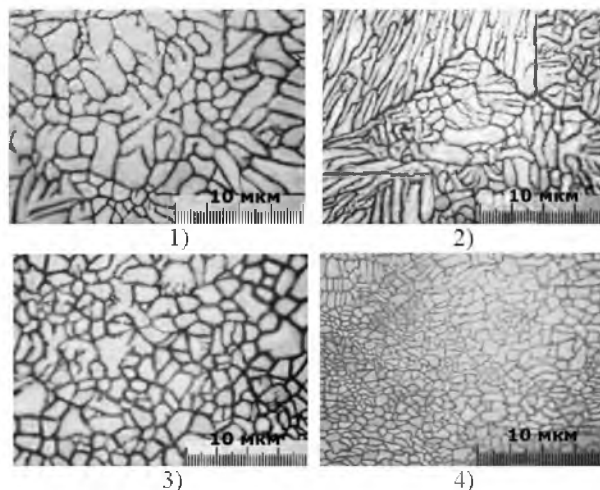


Рис. 2. Влияние модифицирования порошком TiAl на микроструктуру алюминиевой отливки: 1) немодифицированная (середина); 2) немодифицированная (полурадиус); 3) модифицированная (середина); 4) модифицированная (полурадиус) /

Effect of the modification by TiAl powder on the microstructure of aluminium casting (×50):

- 1) non-modified (middle); 2) non-modified (half-radius); 3) modified (middle); 4) modified (half-radius)

Таблица 3

Влияние модифицирования TiAl на характеристики микроструктуры алюминиевых отливок
Effect of modification by TiAl on characteristics of the microstructure of aluminium castings

Тип образца	Место измерения	Средняя площадь зерна, мкм ²	Линейные размеры зерна, мкм					
			В продольном направлении			В поперечном направлении		
			Среднее значение	Интервал варьирования	Среднее квадратичное отклонение	Среднее значение	Интервал варьирования	Среднее квадратичное отклонение
Без добавок	Середина	4022	98,9	27...203	44,4	41,2	13...121	21,5
	Полурадиус	3176	138,4	29...418	86,2	27,5	6...81	13,7
Модиф. TiAl	Середина	3351,4	84,3	22...186	31,2	50,2	11...117	24,5
	Полурадиус	787,5	41,5	17...89	15,6	28,1	7...50	9,6

Различия в структуре периферийных зон существенны (рис. 2 (2), (4)). Развитая столбчатость зёрен, характерная для немодифицированных отливок, устраняется. Структура образована относительно мелкими кристаллами, средняя площадь которых меньше в 4 раза. Соотношение продольных размеров к поперечным – 1,48. Условная форма сечений зёрен близка к ромбической. Продольный размер зёрен уменьшился в 3,3 раза, поперечный практически не изменился. Следовательно, при модифицировании происходит дробление столбчатых кристаллов на более короткие (но примерно той же толщины).

Распределение зёрен по размерам для всех рассмотренных случаев описывается логнормальным законом. В качестве примера на рисунке 3 приведены гистограммы частотного распределения зёрен по продольным размерам для середины (1, 2) и половины радиуса (3, 4).

Плотность логнормального распределения

описывается следующей функцией:

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (1)$$

где $f(x)$ – плотность распределения; x – характерная величина, которая описывается функцией распределения, в данном случае – размер частиц порошка, $x > 0$; σ, μ – численные параметры, определяющие форму функции распределения, её математическое ожидание, медиану, моду и дисперсию, $\sigma > 0, \mu \in R; \pi = 3,14$.

Установленные значения параметров σ и μ для каждого из рассмотренных случаев приведены в таблице 4. Как видно из приведенных результатов, параметры μ для соответствующих случаев модифицированного и немодифицированного металла различаются не значительно, в то время как различие в параметрах σ существенно. Это говорит о меньшей вариативности размеров зёрен в модифицированных отливках при незначительном

смещении медианы их распределения по размерам.

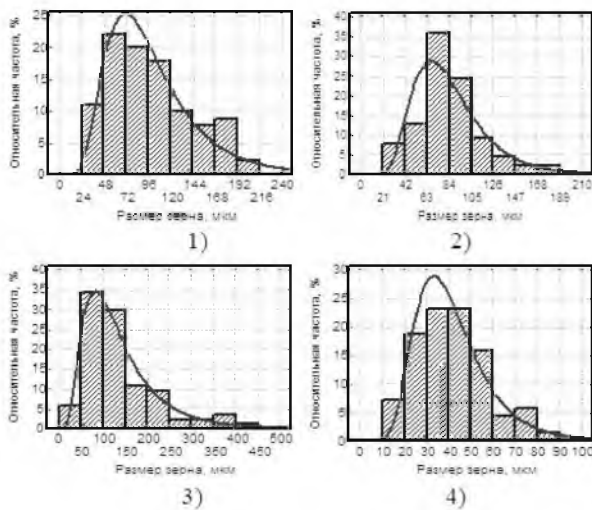


Рис. 3. Влияние модифицирования порошком TiAl на распределение зёрен микроструктуры по размерам: 1) немодифицированная (середина); 2) модифицированная (середина); 3) немодифицированная (полурадиус); 4) модифицированная (полурадиус)

Effect of modifying on the microstructure grain size distribution of TiAl powder:

- 1) non-modified (middle); 2) modified (middle); 3) non-modified (half-radius); 4) modified (half-radius)

Таблица 4

**Значения параметров μ и σ для микроструктуры
Values of parameters μ and σ for the microstructure**

Место и направление измерения	Без модифициров.		Модифициров. TiAl	
	μ	σ	μ	σ
Середина (прод. напр.)	4,488	0,226	4,362	0,160
Середина (попер. напр.)	3,602	0,228	3,788	0,283
Полурадиус (прод. напр.)	4,760	0,342	3,654	0,148
Полурадиус (попер. напр.)	3,203	0,232	3,266	0,158

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ
/ REFERENCES**

1. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т 1. / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение. – 1996. – 992 с.
Diagrams of binary metallic systems: Enchiridion. In 3 volumes. Vol. 1. T 1, ed. by N. P. Lyakishev. – Moscow: Mechanical engineering. – 1996. – 992 p. <http://www.twirpx.com/file/337860>

2. Каверинский В. В. Модифицирование алюминиевого сплава АК9 дисперсным порошком меди / В. В. Каверинский, В. А. Воронич, Г. А. Иванов // Вісник ДонНАБА – Збір. наук. праць. – вип. 2013-4(102). Актуальні проблеми фізико-хімічного матеріалознавства. – Макіївка. – ДонНАБА. – С. 125 – 130.
Kaverinsky V. Modification of Aluminium alloy AK9 by

Среднее значение твёрдости в образцах не модифицированного алюминия составило 27,6 HV, при среднем квадратичном отклонении $\pm 2,2$ и интервале варьирования от 22 до 31 HV. В модифицированном оно возросло до 34,2 HV (на 23,5 %), при среднем квадратичном отклонении $\pm 3,5$ и интервале варьирования от 26 до 42 HV.

Научная новизна и практическая значимость

Установлено, что распределение зёрен микроструктуры по размерам описывается логнормальным законом, при этом модифицирование существенно влияет на параметры σ и незначительно на μ . Подтверждена эффективность разработанных с применением компьютерного моделирования рекомендаций по модифицированию малогабаритных алюминиевых отливок, что позволяет повысить качество как литых изделий из технического (вторичного) алюминия, так и технологические свойства литых заготовок, подвергаемых в дальнейшем обработке давлением.

Выводы

Экспериментально подтверждена эффективность использования в качестве модификатора для алюминия дисперсного порошка TiAl, частицы которого способны растворяться с образованием наноподложек.

Установлено, что ввод дисперсного порошка TiAl в расплав алюминия приводит к измельчению средней площади сечений макрозерна малогабаритных кокильных отливок в 6...8 раз, существенной глобуляризацией микроструктуры и обеспечивает измельчение средней площади сечения зерна на 20 % в центральной зоне и до 4-х раз в районе половины радиуса. Измельчение микроструктуры достигается в основном за счёт значительного уменьшения вытянутости зёрен, поперечный же размер практически не изменяется.

Измельчение структуры литого алюминия при модифицировании порошком TiAl сопровождается повышением средних значений твёрдости на 23,5 %.

dispersed copper powder / V. V. Kaverinsky, V. A. Voronich, G. A. Ivanov // News of DonNABA – Scientific Papers - Vol. 2013-4 (102). Actual problems of physical and chemical materials science. – Makeyevka – DonNABA. – P. 125 – 130.

3. Калинина Н. Е. Повышение технологических свойств литейных алюминиевых сплавов при модифицировании нанодисперсными частицами / Н. Е. Калинина, О. А. Кавац, В. Т. Калинин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 4. – С. 17 – 20.

Kalinina N. E. Increasing of technological properties of cast aluminium alloys in the modification nano-particles / N. E. Kalinina, O. A. Kavats, V. T. Kalinin // Aviation and space equipment and technology. – 2010. – № 4. – P. 17 – 20. <http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/AKTT/2010/AKTT410/Kalinina.pdf>

4. Монфольдо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л. Ф. Монфольдо. – М.:

Металлургия. – 1979. – 640 с.

Monfaldo L. F. Structure and properties of aluminium alloys / L. F. Monfaldo. – Moscow: Metallurgy. – 1979. – 640 с.

<http://www.twirpx.com/file/374705/>

5. Пат. 69720 Україна, МПК C22C 1/06. Рафінувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / Н. В. Широкобокова, О. А. Мітяєв, І. П. Вовчок, С. В. Кюрчев, О. С. Колодій; заявник і патентотримувач Запорізький нац. техн. ун-т; заявл. 31.10.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. – 6 с.

Patent 69720 Ukraine, IPC S22S 1/06. Refining-modifying complex for aluminium alloys / N. V. Shyrokobokova, O. A. Mityaev, I. P. Vovchok, S. V. Kyurchev, O. S. Kolodiy; applicant and patentee Zaporozhye National Technical University; announced 31.10.2011; published 10.05.2012, Bull. № 9. – 6 p.

<http://uapatents.com/6-69720-rafinuvalno-modifikuvalnij-kompleks-dlya-alyuminievikh-splaviv.html>

6. Пат. 28570 Україна, МПК⁶ C 22 C 1/00. Склад для модифікування алюмінієвих сплавів / О. А. Кавац, Н. С. Калініна, Д. А. Кавац, О. К. Федорчук; заявник і власник ДП «Вироб. об'єдн. Півд. машинбуд. з-д ім. О.М.Макарова». – №u200709846; заявл. 03.09.07; опубл. 10.12.07, Бюл. №20 (І кн.).

Patent 28570 Ukraine, IPC 6 C 22 C 1/00. Ingredients for the modification of aluminium alloys / O. A. Kavatsiv, N. E. Kalinyina, D. A. Kavatsiv, O. K. Fedorchuk; applicant and patentee “Yuzhny Machine-Building Plant named after A. Makarov”. – №u200709846; announced 03.09.07; published 10.12.07, Bull. №20 (book 1).

<http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/AKTT/2008/AKTT708/Kalinina.pdf>

7. Пат. 2348718 Российская Федерация, МПК C22C1/03, C22C21/04. Способ модифицирования эвтектических силуминов / А. Я. Лавринов, В. А. Изотов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П. А. Соловьева. – №ru2007114430/02; заявл. 16.04.2007; опубл. 10.03.2009.

Patent 2348718 Russian Federation, IPC C22C1 / 03, C22C21/04. A method of modifying of the eutectic silumin / A. Ya. Lavrinov, V. A. Izotov; applicant and patentee Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P. A. Solovyov. – №ru2007114430/02; announced 16.04.2007; published 10.03.2009.

<http://www.freepatent.ru/patents/2348718>

8. Троцан А. И. Влияние фракционного состава порошка TiAl на его эффективность в качестве модификатора для алюминиевого литья / А. И. Троцан,

В. В. Каверинский, И. Л. Бродецкий, З. П. Сухенко // Металл и литье Украины. – 2015. – №1. – С. 1 – 6.

Trotsan A. I. The influence of fractional composition of TiAl powder on its effectiveness as a modifier for the aluminium casting / A. I. Trotsan, V. V. Kaverinsky, I. L. Brodetsky, Z. P. Suhenko // Metal and casting of Ukraine. – 2015. – №1. – P. 1 – 6.

http://ptima.kiev.ua/index.php?option=com_content&task=category§ionid=8&id=27&Itemid=68&lang=ru

9. Троцан А. И. Модифицирование железоуглеродистых расплавов дисперсными порошками / А. И. Троцан, И. Л. Бродецкий, В. В. Каверинский. – Саарбрюккен: «LAP Lambert Academic Publishing. GmbH & Co. KG», 2012. – 182 с.

Trotsan A. I. Modification of iron-carbon melts by disperse powders / A. I. Trotsan, I. L. Brodetsky, V. V. Kaverinsky. – Saarbruecken: International Publishing House «LAP Lambert Academic Publishing. GmbH & Co. KG », 2012. – 182 p.

<https://www.lap-publishing.com/catalog>

10. Троцан А.И. Оценка числа дополнительных центров кристаллизации для получения заданной степени дисперсности структуры / А. И. Троцан, В. В. Каверинский, И.Л. Бродецкий // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. – Днепропетровск. – ПГАСА, 2011. – Вып. 62. – С. 690 – 693.

Trotsan A. I. Assessment of additional nucleation for a given degree of the structure dispersion / A. I. Trotsan, V. V. Kaverinsky, I. L. Brodetsky // Construction, materials science, mechanical engineering. Scientific Papers. - Dnepropetrovsk. - Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2011. – Vol. 62 – P. 690 – 693.

11. Kattner U. R. Thermodynamic Assessment and Calculation of the Ti-Al System / U. R. Kattner, J. C. Lin, Y. A. Chang // Metallurgical and Materials Transactions A. – Vol. 23, № 8. – 1992. – P. 2081–2090.

<http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF0264601#page-1>

12. Mohammed R. Role of Ti & B in microstructure and mechanical properties of a 360 alloy / R. Mohammed, A. Kumar, M. Arun // IMPACT: International Journal of Research in Engineering & Technology. – 2014. – Vol.2, Issue 2. – P.75 – 83. <http://www.impactjournals.us/download.php?fname=--1392286567-9.%20Eng-Role%20of%20Ti%20and%20B%20in%20Microstructure-Riyaz%20Mohammed.pdf>

13. Prasada Rao A.K. A melt inoculant for simultaneous grain refinement and modification of hypoeutectic Al-Si alloys / A. K. Prasada Rao, K. Das, B. S. Murty, M. Chakraborty // Journal of Alloys and Compounds – 2009. – Vol.480. – P. 49 – 51. http://www.researchgate.net/publication/236170113_AITiCSr_master_alloyA_melt_inoculant_for_simultaneous_grain_refinement_and_modification_of_hypoeutectic_AlSi_alloy.

Статья рекомендована к публикации в д-ром. техн. наук, Г. А. Баглюком (Украина); д-ром. техн. наук, проф. И. Ф. Ткаченко (Украина)

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015