



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Модифицирование сплава марки АК12 частицами ультрадисперсного порошка вольфрама

Никита Мартюшев^{1, а, *}, Анна Зыкова^{1, b}, Василий Башев^{1, c}¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия^а  <http://orcid.org/0000-0003-0620-9561>,  martjushev@tpu.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0001-8779-3784>,  zykovaap@mail.ru,^c  <http://orcid.org/0000-0003-0605-9110>,  bashevvasilly@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 67.02

История статьи:

Поступила: 28 июня 2017

Рецензирование: 28 июля 2017

Принята к печати: 15 августа 2017

Доступно онлайн: 15 сентября 2017

Ключевые слова:

Силумин

АК12

Модифицирование

Ультрадисперсный порошок

Вольфрам

Благодарности:

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

АННОТАЦИЯ

Широко распространенным методом, оказывающим влияние на равномерное формирование микроструктуры и повышение прочностных свойств Al-Si сплавов, является модифицирование ультра- и нанодисперсными частицами различного химического состава. Несмотря на значительные успехи в исследованиях влияния различных модифицирующих составов на структуру и механические свойства литых силуминов, в литературе отсутствуют данные о влиянии нанодисперсного порошка W на формирование структурно-фазового состояния и механические свойства сплава АК12. В работе исследовано влияние нанопорошка W в количестве 0,1 масс.% на структурно-фазовое состояние и механические свойства сплава АК12 при разной выдержке модифицированного расплава. Выплавку металла осуществляли в муфельной печи. Модифицирование расплава ультрандисперсным порошком производили перед разливкой. Перед введением в расплав было проведено исследование химического, фазового и гранулометрического состава используемого порошка. Для полученных образцов проводили металлографические исследования и определяли химический состав, также определялась ударная вязкость. Результаты проведенных экспериментов показали, что часть порошка не усваивается расплавом и выпадает на стенки и дно тигля. Количество порошка, не усвоенного расплавом, зависит от времени выдержки. Усвоившийся порошок значительно влияет на структуру отливок, значительно измельчаются пластины кремния, уменьшаются размеры осей первого порядка и расстояния между осями второго порядка для кристаллов матрицы отливок. Такие изменения в структуре в значительной мере сказываются на свойствах. Модифицирование сплава АК12 порошком вольфрама с выдержкой расплава в печи в течение 10 мин дает увеличение ударной вязкости на ~15 %. По результатам экспериментов установлено, что добавка 0,1 масс.% W в расплав и выдержка его в нагретом состоянии перед разливкой является оптимальным режимом. Такой режим приводит к равномерному распределению эвтектики (α -Al + Si), уменьшению пластин эвтектического кремния в 1,5 раза, изменению формы грубых пластин на тонкую волокнистую форму и увеличению механических свойств на 15–20 %.

Для цитирования: Мартюшев Н.В., Зыкова А.П., Башев В.С. Модифицирование сплава марки АК12 частицами ультрандисперсного порошка вольфрама // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 51–58. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-51-58.

Введение

В настоящее время силумины являются одним из самых распространенных сплавов цветных металлов. Силумины широко используются

в авиации, судостроении, автомобилестроении, а также для бытовых нужд. Их широкое применение обусловлено высокой жидкотекучестью, низкой склонностью к образованию усадки при литье, возможностью пайки и сварки, низкой стоимостью. Хорошими литейными свойствами из-за малой усадки и высокой жидкотекучести обладают эвтектические и заэвтектические силумины. Эвтектические силумины содержат

*Адрес для переписки

Мартюшев Никита Владимирович, к.т.н., доцент
Томский политехнический университет
пр. Ленина, 30, 634050, г. Томск, Россия
Тел.: +7 (3822) 60-62-85, e-mail: martjushev@tpu.ru

около 12 % кремния и при комнатной температуры состоят из эвтектики – смеси твердого раствора алюминия с содержанием Si до 1,65 % и кристаллов чистого кремния. Такой фазовый состав эвтектических силуминов в твердом состоянии обуславливает их невысокие механические свойства. Невысокие механические свойства эвтектических силуминов ограничивают сферу применения этого материала. Повысить механические характеристики силуминов можно за счет [1–4]:

1) изменения морфологии и уменьшения размеров кристаллов первичного и эвтектического кремния;

2) измельчения структурных компонентов сплава, включая нерастворимые в матрице интерметаллиды, преимущественно на основе железа;

3) подавления дендритной кристаллизации путем диспергирования и превращения дендритов твердого раствора в равноосные кристаллы;

4) модифицирования добавками различных ультрадисперсных порошков [4–10].

Одним из эффективных путей реализации данных механизмов является увеличение числа зародышей в процессе кристаллизации путем модифицирования силуминов. Распространенным методом, оказывающим влияние на равномерное формирование микроструктуры и повышение прочностных свойств Al-Si сплавов, является модифицирование ультра- и нанодисперсными частицами различного химического состава. Основными используемыми наноразмерными модификаторами для силуминов являются порошки оксидов и карбидов металлов. Они обладают высокой температурой плавления

и высокой инертностью, что позволяет им не растворяться в расплаве и служить центрами кристаллизации. Подобным образом действуют и частицы тугоплавких металлов (W, Ti, Mo и др.). При введении частиц порошка в расплав необходимо для достижения эффекта модифицирования обеспечить их смачиваемость.

Действие частиц химических соединений отличается от действия чистых металлов. Металлы порошков (Ti, Mo, Cr, Sb etc.) хорошо взаимодействуют с расплавом силумина [5–9].

Согласно диаграмме состояния Al-W растворимость W в твердом растворе α -Al составляет 0,16...0,20 масс. % [10]. Поэтому введенные в расплав частицы нанодисперсного порошка W в количестве до 0,5 масс. % будут полностью растворяться в твердом растворе α -Al. В процессе формирования структуры силуминов тугоплавкие частицы вольфрама, являющиеся дополнительными центрами кристаллизации, будут влиять на измельчение структурных составляющих отливок [11–15].

Настоящая работа направлена на исследование влияния времени выдержки расплава силумина с модифицирующим нанопорошком вольфрама на микроструктуру и свойства эвтектического силумина марки АК12(Al-12%Si).

Методика экспериментального исследования

В качестве материала исследования был выбран силумин марки АК12. Для плавки в качестве шихты использовали чушковый силумин с металлургического завода с химическим составом по ГОСТ 1583-93 (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

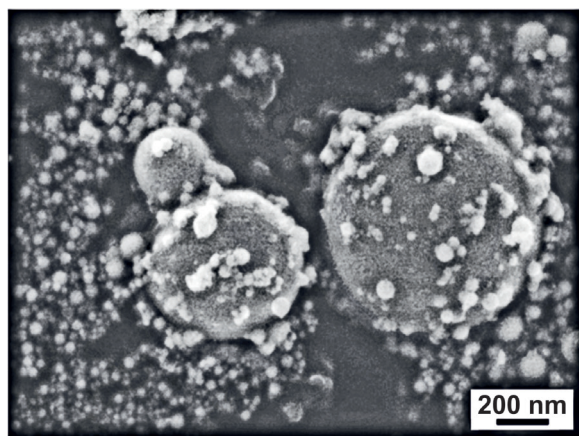
Химический состав сплава марки АК 12 (масс. %)
Chemical composition of Al-12%Si alloy (mass. %)

Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Mg	Ca	Pb	Ni
11,2	0,44	0,29	0,28	0,08	0,04	0,05	0,04	0,01	0,03

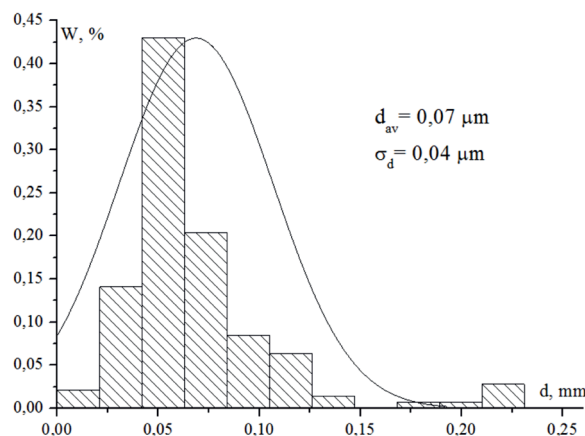
Для его модифицирования применялся порошок вольфрама, полученный электровзрывным способом со средним размером частиц 240...380 нм и площадью удельной поверхности 1,7...2,4 м²/г. Средний размер частиц W составляет $d_{av} = 1,32$ мкм. На поверхности частиц W присут-

ствуют наночастицы, средний размер которых составляет $d_{av} = 0,07$ мкм (рис. 1).

Плавка силуминов осуществлялась в муфельной печи. Для форсирования плавки сначала нагревалась печь до 800 °С, затем в печь помещался стальной тигель с порцией шихты. Масса



а



б

Рис. 1. Наночастицы на поверхности частиц W (а) и гистограмма распределения наночастиц по размерам (б)

Fig. 1. Nanoparticles on the surface of tungsten particles (а) and the histogram of size distribution of nanoparticles (б)

одной плавки составляла 500 г. Масса загружаемого металла и масса порошков для модифицирования измерялась с помощью аналитических весов Shinko HJR-620CE с точностью до 0,01 г. После плавления силумина тигель извлекался из печи, производилась очистка зеркала расплава от окисной пленки и затем вводился модификатор. Количество вводимого модификатора составляло 0,1 масс. %. После введения модификатора расплав выдерживался в печи при температуре 800 °С в течение 10, 60, 120 мин. Разливка производилась со скоростью 0,06...0,09 л/с. Для каждого времени выдержки проводилось по три плавки для накопления статистики.

Гранулометрический анализ нанодисперсных порошков W проводили методом лазерной дифракции (анализатор частиц SALD-7101). Химический и фазовый состав нанопорошка вольфрама исследовали методами оптико-эмиссионной спектроскопии (PMI-MASTER Sort) и рентгенофазового анализа (XRD-7000S). Химический анализ силуминов определялся по среднему значению пяти измерений. Перед измерением поверхность образцов фрезеровалась на глубину 5 мм. Погрешность измерения прибора составляла 0,01 %.

Для металлографического анализа структуры применяли оптические микроскопы МИМ-8М, ZEISS AXIO Observer.A1m со встроенной фотокамерой и ZEISS Axiovert 40 MAT. Измерение расстояния параметров микроструктуры осуществлялось с помощью программы анализа структур фирмы Carl ZEISS.

Для проведения испытаний применялся маятниковый копер марки 2130KM-0,3 с максимальным запасом энергии маятника 300 Дж. Объектами исследований служили стандартные образцы Шарпи размерами 55×10×10 без надреза (ГОСТ 9454–78). Количество образцов составляло 4...6 для каждой серии испытаний.

Результаты и обсуждение

Результаты проведенного эксперимента показали, что после проведения плавки и выдержки расплава с порошком в течение 10 мин в печи при 800 °С на стенках тигля после заливки расплава остается 25...30 % порошка. Увеличение времени выдержки тигля с нанопорошком, введенным в расплав в печи до 60 мин, приводит к тому, что количество порошка, остающегося в тигле после разливки, сокращается до 10...15 %. При увеличении времени выдержки до 120 мин на стенках тигля порошка не остается.

Исследования показали, что по составу порошок, оставшийся на стенках тигля после плавки, отличается от исходного. По данным XRD, исходный порошок вольфрама содержит металлический вольфрам (85 % по объему) и оксид вольфрама W₃O (15 % по объему) (рис. 2, а). По данным XRD, порошок, оставшийся в тигле после плавки, состоит из остатков металлического W и его оксидов различной модификации (WO₃, W₃O) (рис. 2, б). После плавки объемная доля металлического W составляет 72 % по объему, W₃O – 8 % по объему и WO₃ – 20 % по объему.

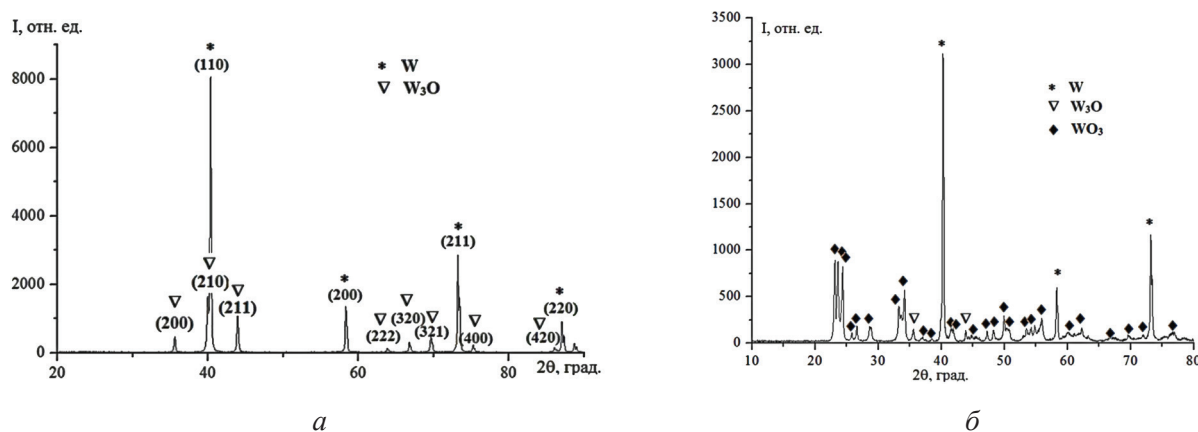


Рис. 2. Рентгенограмма нанопорошка W:

a – исходный порошок; *б* – оставшийся в тигле после плавки (выдержка расплава с порошком в печи в течение 60 мин)

Fig. 2. The X-ray diffraction pattern of the tungsten nanopowder:

a – initial powder; *б* – powder that remained in the crucible after melting (soaking of the melt with the powder in the furnace during 60 min)

Изменение времени выдержки модифицированного расплава в печи приводит к достаточно существенному изменению в микроструктуре (табл. 2). В немодифицированных образцах длина осей первого порядка составляет 500...800 мкм (рис. 3, *a*). Выдержка расплава в течение 10 мин перед разливкой значительно измельчает дендриты твердого раствора (рис. 3, *б*). Формируются короткие оси первого порядка длиной менее 200 мкм и короткие оси второго порядка (длиной не более 30...40 мкм). Значительно измельчаются пластины кремния. При выдержке расплава с нанопорошком вольфрама в печи в течение 60 мин в структуре отливок формируются развитые дендриты твер-

дого раствора кремния в алюминии. По данным оптической микроскопии (рис. 3, *в*), видно, что дендриты твердого раствора имеют развитые оси первого порядка длиной более 500 мкм, а также достаточно развитые оси второго порядка. При увеличении времени выдержки до 120 мин (рис. 3, *г*) длина осей первого порядка существенно уменьшается. Аналогично уменьшается и длина осей второго порядка, они становятся менее развитыми (меньшей длины и толщины). Изменения происходят и с пластинами кремния. Так, рост времени выдержки в печи до 120 мин уменьшает среднюю длину пластин кремния на 15...25 %. При этом возрастает толщина пластин.

Таблица 2

Table 2

Параметры микроструктуры и ударная вязкость образцов сплава марки АК 12
The microstructure parameters and impact strength of castings from the Al-12%Si alloy

Время выдержки расплава с модификатором перед разливкой, мин / Holding time of the melt with the modifier before casting, min	Длина дендритов первого порядка, мкм / The length of dendrites of the first order, μm	Расстоянием между осями дендритов второго порядка, мкм / Distance between the axes of dendrites of the second order, μm	Ударная вязкость, КС / Impact strength, J/m^2
Без модификатора / Without modifier	500...800	32	15,6
10	200	17	18
60	500...700	34	14,2
120	300...400	29	13,4

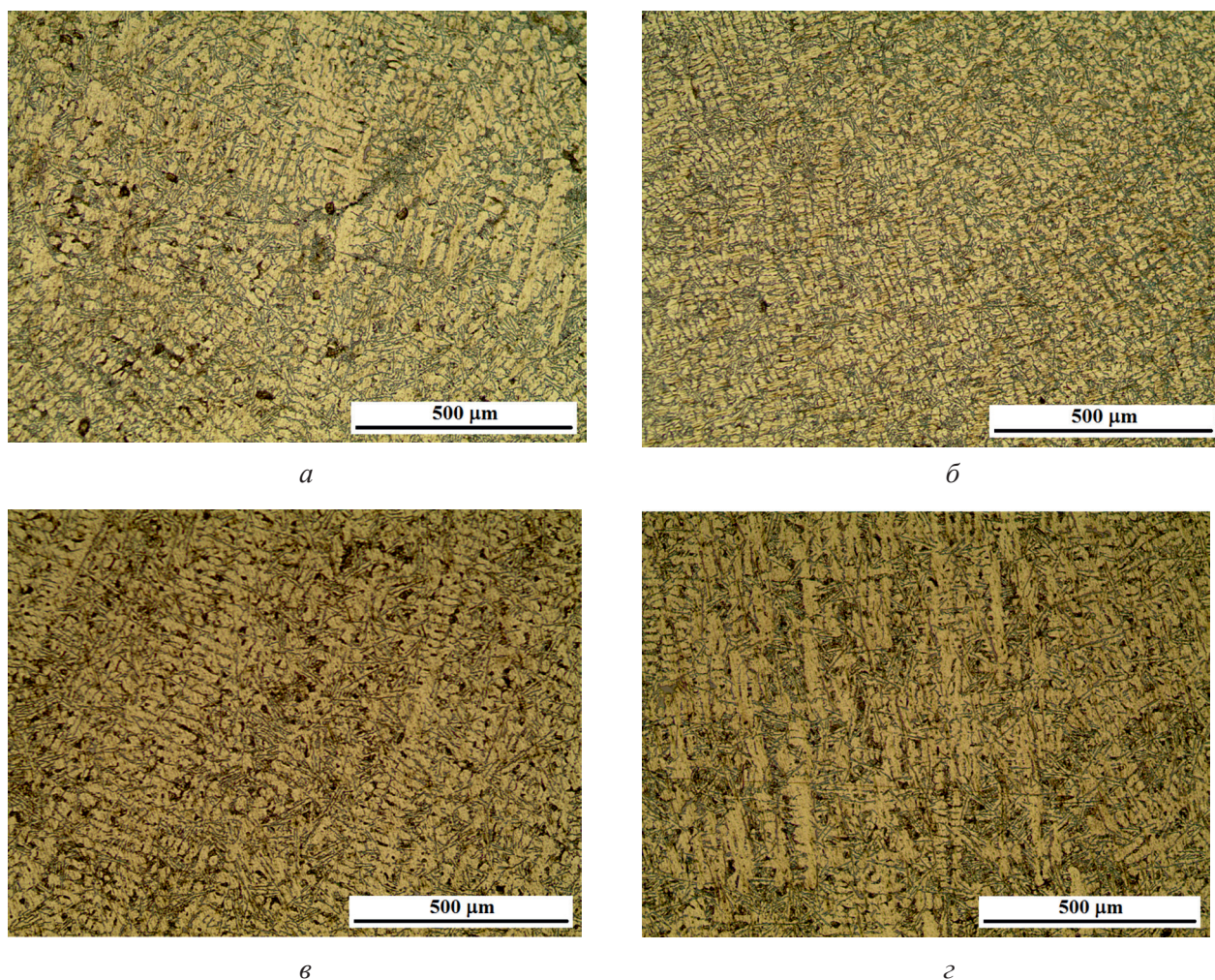


Рис. 3. Микроструктура отливок из сплава АК12:

a – без модифицирования; *б* – 0,1 масс. % W, выдержка 10 мин; *в* – 0,1 масс. % W, выдержка 60 мин.; *г* – 0,1 масс. % W выдержка 120 мин

Fig. 3. The microstructure of castings from the Al-12%Si alloy:

a – without modification; *б* – 0.1. mass. % of tungsten, soaking for 10 min; *в* – 0.1. mass. % of tungsten, soaking for 60 min; *г* – 0.1. mass. % of tungsten, soaking for 120 min

Такие изменения в структуре в значительной мере сказываются на свойствах. Проведенные испытания образцов, полученных при различной выдержке с введенным модификатором в печи, показали значительное влияние на ударную вязкость. Данные испытаний показывают, что ударная вязкость немодифицированных образцов составляет КС 15,6. Добавка порошка и выдержка расплава с порошком в печи в течение 10 мин дает рост ударной вязкости до КС18. Дальнейшее увеличение времени выдержки расплава в печи приводит к снижению ударной вязкости до КС13,4.

Выводы

На основании проведенных экспериментальных работ можно сделать вывод о том, что

введение нанопорошка вольфрама в расплав силумина АК12 оказывает существенный модифицирующий эффект и позволяет изменить микроструктуру. При этом существенное влияние на эффект модифицирования порошком будет оказывать время выдержки расплава с порошком в нагретом состоянии. В случае введения порошка, выдержки в течение 10 мин и заливки расплава в тигле остается до 30 % неусвоившегося порошка. Избежать этого можно путем увеличения времени нахождения расплава с порошком в печи до 120 мин.

Оптимальным с точки зрения ударной вязкости является выдержка в печи расплава с модификатором в течение 10 мин и дальнейшая заливка. Это хорошо согласуется с данными металлографического анализа. Образцы, полу-

ченные при 10-минутной выдержке, обладают измельченными дендритами с неразвитой структурой и короткими пластинами кремния. Увеличение выдержки расплава в печи приводит к увеличению размеров дендритов и пластин кремния даже в сравнении с немодифицированной структурой. Поэтому ударная вязкость таких образцов снижается.

Список литературы

1. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.
2. Influence of additives on the microstructure and tensile properties of near-eutectic Al-10.8%Si cast alloy / A.M.A. Mohamed, A.M. Samuel, F.H. Samuel, H.W. Doty // *Materials & Design*. – 2009. – Vol. 30, iss. 10. – P. 3943–3957. – doi: 10.1016/j.matdes.2009.05.042.
3. Белов Н.А., Савченко С.В., Хван А.В. Фазовый состав и структура силуминов: справочное издание. – М.: Изд-во МИСиС, 2007. – 283 с. – ISBN 978-5-87623-181-9.
4. Формирование структуры в системе Al-Si / С.С. Петров, А.Г. Пригунова, Д.Н. Ключник, С.В. Пригунов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – Днепропетровск, 2008. – № 1. – С. 43–52.
5. Куцова В.З., Носко О.А., Шерстобитова А.С. Влияние легирования на структуру, фазовый состав и свойства промышленных заэвтектических поршневых силуминов // *Стародубовские чтения 2008*. – Днепропетровск, 2008. – Ч. 3. – С. 10–19.
6. Nanoparticle-inhibited growth of primary aluminum in Al-10Si alloys / K. Wang, H.Y. Jiang, Y.W. Jia, H. Zhou, Q.D. Wang, B. Ye, W.J. Ding // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 103. – P. 252–263. – doi: 10.1016/j.actamat.2015.10.005.
7. Eidhed W. Modification of β -Al₅FeSi compound in recycled Al-Si-Fe cast alloy by using Sr, Mg and Cr additions // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2008. – Vol. 24, N 1. – P. 45–47.
8. О влиянии Sr, Ti и В на модифицируемость доэвтектических силуминов / В.И. Никитин, К.В. Никитин, С.А. Акишин, Д.С. Криволапов // *Литейное производство*. – 2012. – № 1. – С. 24–28.
9. Effect of in situ γ -Al₂O₃ particles on the microstructure of hypereutectic Al-20%Si alloy / Q. Li, T. Xia, Y. Lan, W. Zhao, L. Fan, P. Li // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2013. – Vol. 577. – P. 232–236. – doi: 10.1016/j.jallcom.2013.04.043.
10. El-Mahallawi I.S., Shash A.Y., Amer A.E. Nanoreinforced cast Al-Si alloys with Al₂O₃, TiO₂ and ZrO₂ nanoparticles // *Metals*. – 2015. – Vol. 5, N 2. – P. 802–821. – doi: 10.3390/met5020802.
11. Modification of Al-Si alloys by metallothermic reduction using submerged SrO powders injection / C.M. Molina, A.F. Valdes, R.M. Valdez, J.T. Torres, N.R. Rosales, R.G. Estrada // *Materials Letters*. – 2009. – Vol. 63, iss. 9–10. – P. 815–818. – doi: 10.1016/j.matlet.2009.01.019.
12. Zykova A.P., Kazantseva L.A., Kurzina I.A. The effect of ultrafine powders on the structural formation processes and mechanical properties of Al-7%Si alloy // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – Vol. 1772, iss. 1. – P. 030020-1–030020-7. – doi: 10.1063/1.4964558.
13. Modification of eutectic Si in Al-Si alloys with Eu addition / J.H. Li, X.D. Wang, T.H. Ludwig, Y. Tsunekawa, L. Arnberg, J.Z. Jiang, P. Schumacher // *Acta Materialia*. – 2015. – Vol. 84. – P. 153–163. – doi: 10.1016/j.actamat.2014.10.064.
14. Yuansheng R.A.O., Hong Y.A.N., Zhi H.U. Modification of eutectic silicon and β -Al₅FeSi phases in as-cast ADC12 alloys by using samarium addition // *Journal of Rare Earths*. – 2013. – Vol. 31, iss. 9. – P. 916–922. – doi: 10.1016/S1002-0721(12)60379-2.
15. Martyushev N.V., Bashev V.S., Zykova A.P. Influence of soaking time of modifier in melt on microstructure of Al-12%Si alloys // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 177. – P. 012118. – doi: 10.1088/1757-899X/177/1/012118.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2017 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Modification of Al–Si Alloys with Particles of Ultrafine Tungsten Powder

Nikita Martyshev^{1, a, *}, Anna Zykhova^{1, b}, Vasily Bashev^{1, c}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a  <http://orcid.org/0000-0003-0620-9561>,  martjushev@tpu.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0001-8779-3784>,  zykhovaap@mail.ru,

^c  <http://orcid.org/0000-0003-0605-9110>,  bashevvasilly@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 28 June 2017

Revised: 28 July 2017

Accepted: 15 August 2017

Available online: 15 September 2017

Keywords:

Silumin

Al–Si alloy

Modifying

Ultradisperse powder

Tungsten

Acknowledgements:

The research is carried out at Tomsk Polytechnic University within the framework of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program grant.

ABSTRACT

Purpose: A widespread method, exerting the influence on the homogeneous formation of the microstructure and enhancement of strength properties of Al–Si alloys, is a modification by super- and nanodispersed particles of different chemical compositions. Despite the significant advances in the studies of the influence of various modifying compositions on the structure and mechanical properties of casted silumins, there are no data about the influence of nanodispersed tungsten powder on the formation of the structural-phase state and mechanical properties of the Al–Si alloy in the literature. **Materials and methods:** The paper investigates the influence of the tungsten nanopowder in the amount of 0.01...0.5 mass.% on the structural-phase state and mechanical properties of the Al–12 %Si alloy with different soaking time of the modified melt. Metal smelting is conducted in the muffle furnace. Modification of the melt by the ultrafine powder is carried out before pouring. Before introducing the powder into the melt, its chemical, phase and granulometric composition is studied. For the obtained samples, metallographic examinations are made and the chemical composition, as well as impact toughness are determined. **Results and discussion:** The results of the conducted experiments showed that a part of the powder is not assimilated by the melt, but precipitated on the walls and the bottom of the crucible. The amount of the powder, not assimilated by the melt, depends on the soaking time. The assimilated powder influences significantly the cast structure; silicon plates are significantly refined; the sizes of the first-order axes and the distances between the axes of the second order decrease for the matrix crystals of casts. These changes in the structure influence largely the properties. Modification of the Al–12%Si alloy by the tungsten powder and soaking it in the furnace during 10 minutes allow increasing impact toughness by ~15 %. By the results of the experiments, it has been established that addition of 0.1 mass.% of tungsten into the melt and soaking it in the heated condition before pouring is an optimal mode. Such mode leads to a uniform distribution of eutectic (α -Al + Si), a 1.5-time reduction of eutectic silicon plates, a change of the form of coarse plates into a fine fibrous form and enhancement of mechanical properties by 15...20 %.

For citation: Martyshev N.V., Zykhova A.P., Bashev V.S. Modification of Al–Si alloys with particles of ultrafine tungsten powder. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2017. no. 3 (76), pp. 51–58. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-51-58. (in Russian).

References

1. Mondolfo L.F. *Aluminum alloys: structure and properties*. Butterworths, 1976. 971 p. ISBN 10: 0408706805. ISBN 13: 9780408706803 (Russ. ed.: Mondolfo L.F. *Struktura i svoystva alyuminievykh splavov*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 640 p).
2. Mohamed A.M.A., Samuel A.M., Samuel F.H., Doty H.W. Influence of additives on the microstructure and tensile properties of near-eutectic Al–10.8%Si cast alloy. *Materials & Design*, 2009, vol. 30, iss. 10, pp. 3943–3957. doi: 10.1016/j.matdes.2009.05.042.
3. Belov N.A., Savchenko S.V., Khvan A.V. *Fazovyi sostav i struktura siluminov: spravochnoe izdanie* [Phase composition and structure of alphas: reference book]. Moscow, MISiS Publ., 2007. 283 p. ISBN 978-5-87623-181-9.

* Corresponding author

Martyshev Nikita V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Tomsk Polytechnic University,
 30 Lenin Avenue, 634050, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: +7 (3822) 60-62-85, e-mail: martjushev@tpu.ru

4. Petrov S.S., Prigunova A.G., Klyuchnik D.N., Prigunov S.V. Formirovanie struktury v sisteme Al-Si [Formation of structure in the Al-Si system]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, 2008, no. 1, pp. 43–52.
5. Kutsova V.Z., Nosko O.A., Sherstobitova A.S. [Influence of alloying on structure, phase structure and properties of industrial piston alpacas]. *Starodubovskie chteniya 2008* [The Proceedings in Memory of Starodubov 2008]. Dnepropetrovsk, 2008, pt. 3, pp. 10–19.
6. Wang K., Jiang H.Y., Jia Y.W., Zhou H., Wang Q.D., Ye B., Ding W.J. Nanoparticle-inhibited growth of primary aluminum in Al–10Si alloys. *Acta Materialia*, 2016, vol. 103, pp. 252–263. doi: 10.1016/j.actamat.2015.10.005.
7. Eidhed W. Modification of β -Al₅FeSi compound in recycled Al-Si-Fe cast alloy by using Sr, Mg and Cr additions. *Journal of Materials Science & Technology*, 2008, vol. 24, no. 1, pp. 45–47.
8. Nikitin V.I., Nikitin K.V., Akishin S.A., Krivolapov D.S. O vliyanii Sr, Ti i B na modifitsiruemost' doevtekticheskikh siluminov [Effect of Sr, Ti and B on the modifiability of hypoeutectic silumins]. *Liteinoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 2012, no. 1, pp. 24–28.
9. Li Q., Xia T., Lan Y., Zhao W., Fan L., Li P. Effect of in situ γ -Al₂O₃ particles on the microstructure of hypereutectic Al-20%Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 577, pp. 232–236. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.04.043.
10. El-Mahallawi I.S., Shash A.Y., Amer A.E. Nanoreinforced cast Al-Si alloys with Al₂O₃, TiO₂ and ZrO₂ nanoparticles. *Metals*, 2015, vol. 5, no. 2, pp. 802–821. doi: 10.3390/met5020802.
11. Molina C.M., Valdes A.F., Valdez R.M., Torres J.T., Rosales N.R., Estrada R.G. Modification of Al-Si alloys by metallothermic reduction using submerged SrO powders injection. *Materials Letters*, 2009, vol. 63, iss. 9–10, pp. 815–818. doi: 10.1016/j.matlet.2009.01.019.
12. Zykova A.P., Kazantseva L.A., Kurzina I.A. The effect of ultrafine powders on the structural formation processes and mechanical properties of Al–7%Si alloy. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1772, iss. 1, pp. 030020-1–030020-7. doi: 10.1063/1.4964558.
13. Li J.H., Wang X.D., Ludwig T.H., Tsunekawa Y., Arnberg L., Jiang J.Z., Schumacher P. Modification of eutectic Si in Al-Si alloys with Eu addition. *Acta Materialia*, 2015, vol. 84, pp. 153–163. doi: 10.1016/j.actamat.2014.10.064.
14. Yuansheng R.A.O., Hong Y.A.N., Zhi H.U. Modification of eutectic silicon and β -Al₅FeSi phases in as-cast ADC12 alloys by using samarium addition. *Journal of Rare Earths*, 2013, vol. 31, iss. 9, pp. 916–922. doi: 10.1016/S1002-0721(12)60379-2.
15. Martyushev N.V., Bashev V.S., Zykova A.P. Influence of soaking time of modifier in melt on microstructure of Al-12%Si alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 177, pp. 012118. doi: 10.1088/1757-899X/177/1/012118.

Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2017 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).