

УДК 669.2

д.т.н. Алимов В. И.,
к.т.н. Георгиаду М. В.,
д.т.н. Шевелев А. И.,
Зубенко В. В.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

ТЕРМОВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА ФАСОННЫХ ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Усовершенствована технология термовременной обработки фасонных отливок из алюминиевых сплавов с медью путём регламентации параметров температура-время-перемешивание расплава. Показано, что комплексная термовременная обработка способствует облегчению удаления примесей железа, уменьшению пористости, увеличению микротвердости, степени дисперсности эвтектики и её сфероидизации. Опробованная технология показала возможность повышения надёжности и срока службы деталей петельного типа в холодильной технике из-за снижения хрупкости, приводящей к разрушению; дальнейшее упрочнение изделий достигается локальным гидропрессованием.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы с медью, петля, термовременная обработка, литъё в кокиль, локальное упрочнение гидропрессованием, величина зерна, пористость, микротвердость, колонии эвтектики, примеси железа.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами.

Продукция из алюминия и его сплавов как продукт цветной металлургии занимает лидирующие позиции как в производстве, так и в потреблении в мире. Для повышения уровня свойств и качества алюминиевых отливок в целом широкое распространение получили такие виды термообработки литейных алюминиевых сплавов как отжиг и упрочнение путём закалки и старения [1].

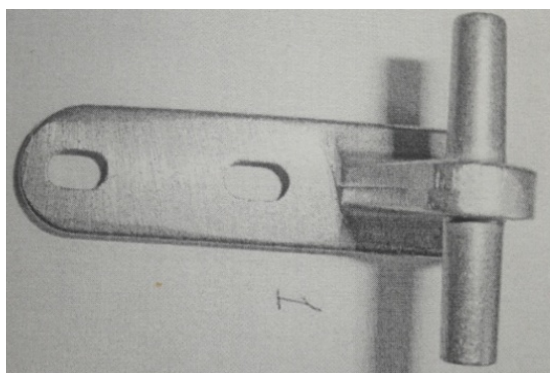
Технологии, основанные на термовременной обработке жидкого металла, являются инновационными и перспективными методами улучшения технологических свойств расплавов силуминов. После расплавления металл находится в неравновесном состоянии и на скорость перехода расплава в состояние, близкое к равновесному, влияют температура, продолжительность и интенсивность перемешивания при вакуумировании, обработке ультразвуком, продувке газами, воздействии электромагнитным полем и др. [2, 3].

Постановка задачи. Термовременная обработка заключается в расплавлении

или переплаве вторичного алюминиевого сплава с регламентацией температурно-временных параметров жидкого металла при его изотермической выдержке. Актуальной задачей является изучение данного процесса и его влияние на качество вторичных силуминов с целью улучшения механических свойств получаемых сплавов и отливок из них.

Изложение материала и его результаты. Важными особенностями вторичных алюминиевых сплавов, по отношению к первичным, являются менее стабильные механические характеристики и технологическая пластичность по причине загрязнения сплавов примесями. Для проведения исследований термовременной обработки использовали лом сложных отливок — петли из алюминиевого сплава АК12М2 для холодильной техники. Данный сплав относится к системе алюминий-кремний-медь со средним содержанием кремния 12 % и меди 2 %.

На рисунке 1 показана петля холодильника и типичный излом ушка петли при статочных испытаниях на разрушение (или уже в эксплуатации) при увеличении $\times 16$.



а



б

Рисунок 1 Общий вид (а) и излом ушка (б) петли после испытания на разрушение, $\times 1$

После испытания на разрушение при изучении излома ушка петли установили, что излом квазихрупкий, кристаллический, блестящий, сложной формы.

Квазихрупкое разрушение характеризуется присутствием в изломе гребней, ступенек, язычков и фасеток квазискола.

Наличие гребней в изломе свидетельствует о том, что в процессе разрушения в этих участках проходила некоторая локальная пластическая деформация.

Термовременную обработку (ТВО) расплава АК12М2 проводили путём перегрева расплавов до температур 600, 700 и 800 °С ($T_{пл} = 577$ °С), изотермической выдержки при этих температурах в течение 30, 25 и 20 мин с перемешиванием керамическим стержнем жидкого расплава.

Навески шихты помещали в алундовые жаростойкие тигли и загружали в печь СНОЛ-16.25.1/8М2, предварительно нагретую до заданной температуры. С целью изучения влияния различных факторов на скорость кристаллизации расплавы в тиглях 2, 4 и 6 подвергали обработке с перемешиванием керамическим стержнем жидкого металла. Полученные данные по микротвёрдости и пористости приведены в таблице 1.

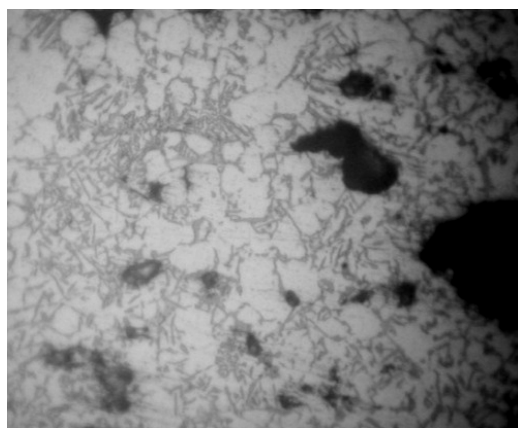
Таблица 1

Параметры ТВО, строение и свойства сплава АК12М2

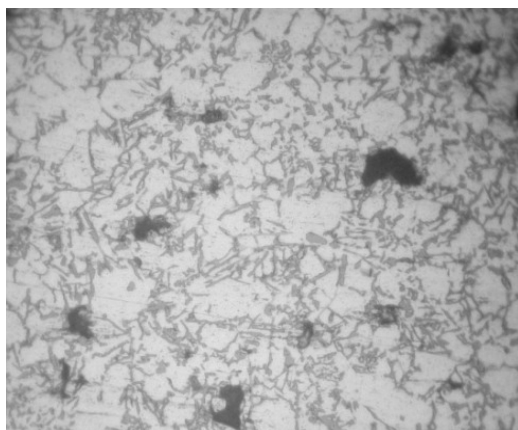
Вариант обработки	Режим обр.	$T_{пл}$, °С	$\tau_{выд}$, мин	Перемешивание расплава (+)	Микротвёрдость α -фазы, Н/мм ²	Микротвёрдость эвтектики, Н/мм ²	Средняя степень пористости, об. %
1	ТВО	600	30	-	730 \pm 40	1082 \pm 35	0,8
2	ТВО	600	30	+	766 \pm 32	1118 \pm 31	0,4
3	ТВО	700	25	-	748 \pm 40	1114 \pm 35	0,8
4	ТВО	700	25	+	785 \pm 35	1147 \pm 30	0,4
5	ТВО	800	20	-	779 \pm 40	1182 \pm 37	0,4
6	ТВО	800	20	+	793 \pm 33	1219 \pm 30	0,2
-	Литьё в кокиль	810	45	-	973 \pm 85		15,4

Из таблицы видно, что перемешивание является значимым фактором. Термовременная обработка повышает микротвёрдость. Также видно, что средняя степень пористости в отливках при литье в кокиль очень высокая и составляет 15,4 %, а отливки после термовременной обработки обладают значительно меньшей пористостью. Причем в отливках с перемешиванием пор меньше. Таким образом, этот фактор имеет большое влияние, так как материал отливки в кокиль не плотный за счёт большого количества пор.

На рисунке 2 представлены структуры алюминиевого сплава после литья в кокиль. Видно, что в структуре присутствует значительное количество пор.



а



б

Рисунок 2 Структуры алюминиевого сплава АК12М2 после литья в кокиль, $\times 600$:
а) поперечный шлиф; б) продольный шлиф

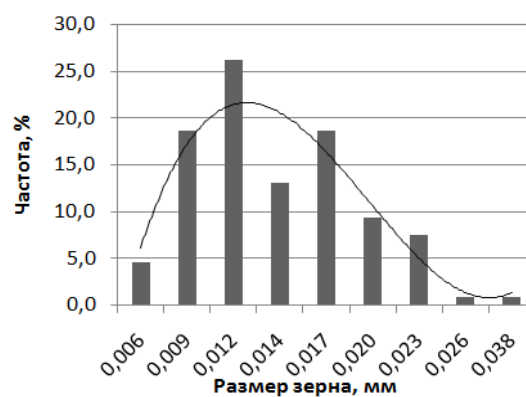
Методом определения величины зерна пересечением границ зёрен (ГОСТ 5639) рассчитывали средний условный диаметр зерна d_L в мм по формуле:

$$d_L = \frac{L}{N}, \quad (1)$$

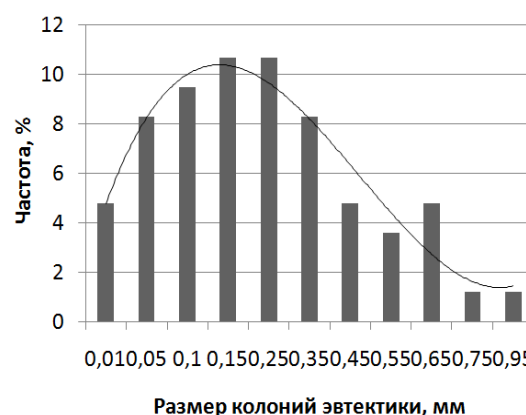
где L — суммарная длина отрезков в мм; N — общее число зёрен, пересечённых отрезками длиной L .

Средний условный диаметр зерна структурных составляющих твёрдого раствора α -фазы равен $d_L = 0,0143 \pm 0,0004$ мм, а колоний эвтектики — $d_L = 0,0628 \pm 0,002$ мм.

На рисунке 3 представлены частоты распределения размера зерна твёрдого раствора α -фазы (рис. 3, а) и размера колоний эвтектики (рис. 3, б).



а



б

Рисунок 3 Частота распределения размера:
а) зёрен твёрдого раствора α -фазы;
б) колоний эвтектики

Из рисунка 3,а видно, что диапазон распределения размера зерна твёрдого раствора α -фазы колеблется в пределах 0,006–0,038 мм. Наиболее часто встречаются зёрна размером 0,009, 0,012 и 0,017 мм.

Из рисунка 3,б видно, что диапазон распределения размера колоний эвтектики колеблется в пределах 0,01–0,95 мм. Наиболее часто встречаются колонии эвтектики размером 0,05–0,35 мм.

Основными структурными составляющими в литом состоянии алюминиевого сплава АК12М2 являются тройная эвтектика α -Si-CuAl₂ и твердый раствор α -Al. Крупными выделениями прямоугольной формы в структуре являются первичные кристаллы

кремния Si_п. Фаза CuAl₂ представлена кристаллами округлой морфологии.

На рисунке 4 представлены структуры алюминиевого сплава после ТВО при температурах 600, 700 и 800 °С при увеличении $\times 100$.

После термовременной обработки в структуре сплава наблюдали значительное уменьшение пористости и увеличение микротвердости. Перемешивание при термовременной обработке также уменьшает количество пор и незначительно увеличивает микротвердость. При перемешивании в структуре присутствует меньше выделений первичных кристаллов кремния Si_п, а эвтектика более дисперсна.

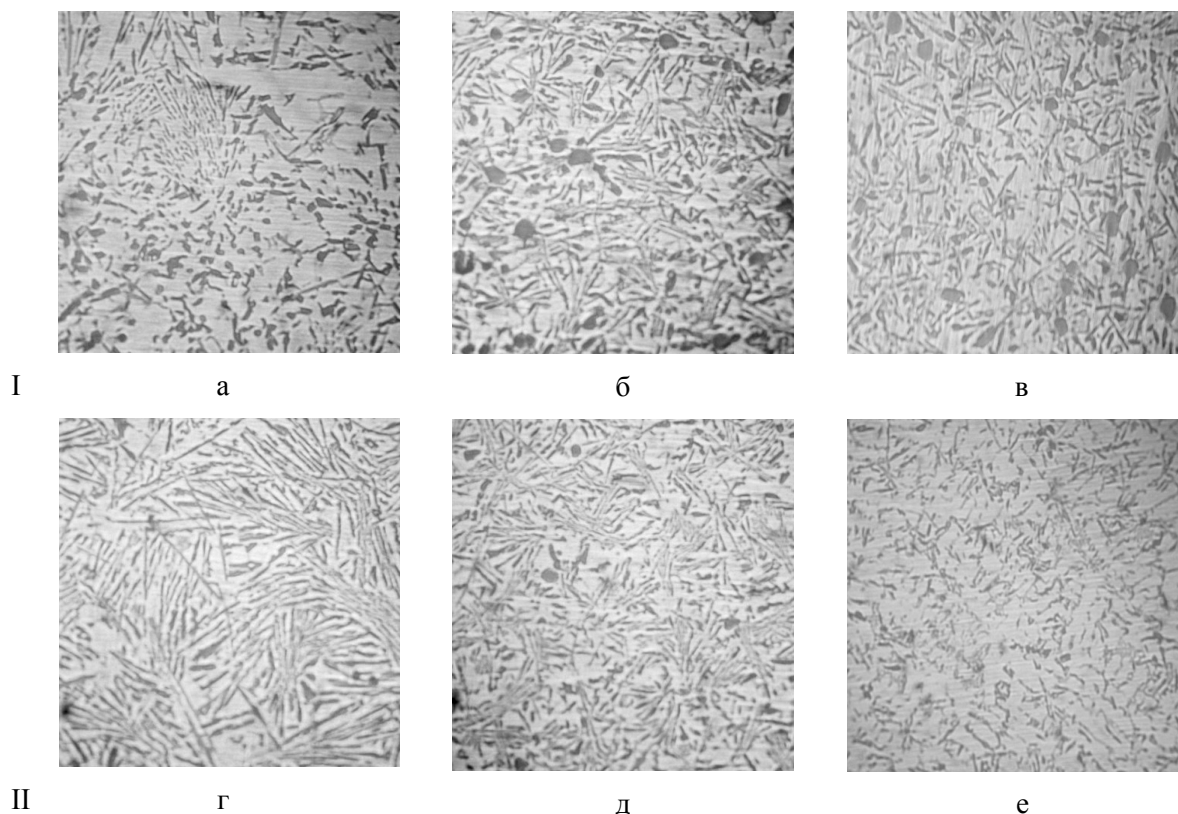


Рисунок 4 Микроструктуры образцов после ТВО, $\times 100$:

I — без перемешивания: а) 600; б) 700; в) 800 °С;

II – с перемешиванием: г) 600; д) 700; е) 800 °С

На вторичном алюминиевом сплаве с медью АК8МЗ в литом состоянии [4, 5], выплавленном в промышленной роторной печи, путём статистической обработки

производственных данных предприятия ООО «Донсплав» за 3-летний период и построения регрессионных моделей при помощи программного обеспечения на базе

«Statistica 6.0» установлено, что свинец и железо вызывают колебания твёрдости с размахом до 20–25 НВ; влияние же олова оказалось статистически незначимым.

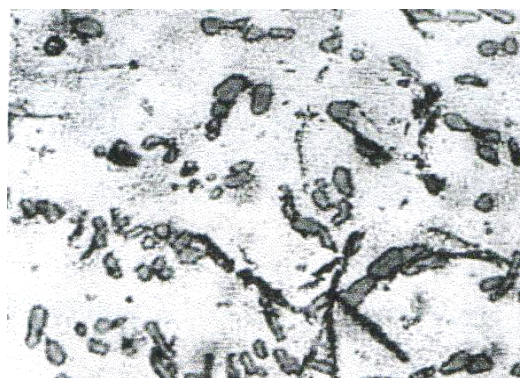
Усредненный химический состав сплава АК8МЗ в выборке для статистической обработки составил, % масс.: 9,09 Si; 2,73 Cu; 0,29 Mg; 0,2 Mn; 0,65 Zn; 0,83 Fe; 0,08 Ni; 0,029 Ti; 0,09 Pb; 0,03 Sn. Это соответствует общеевропейскому стандарту EN 1676.

Оптимальным режимом термической обработки изделий является закалка без полиморфного превращения от $515 \pm 5^\circ\text{C}$ с охлаждением в холодной воде и искусственное старение свежезакалённого сплава при $180 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 2-х часов; травление шлифов для оценки микроструктуры производили в 4-процентном водном растворе HF.

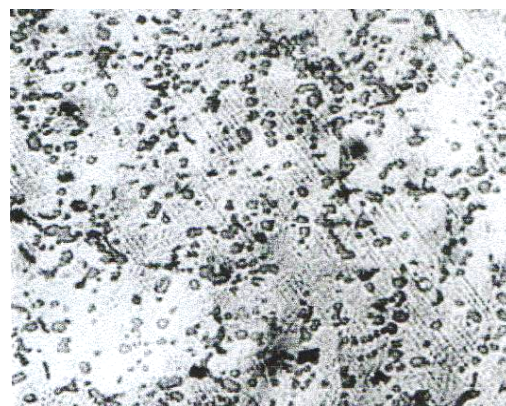
Эффект упрочнения, оценённый по приросту твердости, снижается по мере повышения содержания железа (с 35–40 до 10–25 НВ): железо способствовало образованию грубодифференцированных структурных составляющих пластинчатого типа (рис. 5, а), снижающих весь комплекс механических свойств сплава [6].

По мере минимизации примесей увеличивается количество мелкодисперсных частиц интерметаллидов, приближающихся по форме к сферам (рис. 5, б); при этом наблюдаются вариации размеров частиц по сечению изделий с тенденцией укрупнения к сердцевине. В то же время однозначного влияния свинца на упрочнение в обработанном массиве плавки не было выявлено.

Повышение качества сплава АК8МЗ достигается снижением содержания железа и измельчением примесных соединений. Регламентация разливки плавки может снизить содержание железа на 15–25 %; определённый эффект вносит использование чистого электротехнического алюминиевого лома — в нём содержание железа не превышает долей процента. Модифицирование также позволяет решить эту задачу; естественно, технологический процесс при этом усложняется, а экономические показатели падают.



а



б

Рисунок 5 Микроструктура литого сплава АК8МЗ; содержание железа: а) максимальное; б) минимальное; $\times 500$.

Опробование этого сплава для деталей петельного типа в холодильной технике взамен использовавшегося сплава АК12М2 показало возможности повышения надёжности и срока их службы из-за снижения хрупкости, приводящей к обламыванию петель.

Следует отметить также наблюдавшуюся тенденцию к большей размерной стабильности [7] у сплава АК8МЗ в интервале температур работы бытовой холодильной техники от -40 до $+40^\circ\text{C}$.

Для дальнейшего увеличения комплекса свойств оценивали возможности локального упрочнения гидропрессованием. Пластичность сплавов типа АК12М2 и АК8МЗ в литом состоянии недостаточна для обработки их давлением при комнатной температуре, так как в их структуре присутствуют хрупкие фазы пластинчатой формы,

выделившиеся по границам зерен при кристаллизации. Поэтому была опробована смягчающая обработка литых вторичных алюминиевых сплавов, основанная на их деформации методом винтовой экструзии [8, 9]. Тёплая винтовая экструзия с противодавлением приводит к значительному измельчению хрупкого межзёрненного каркаса и повышению однородности

распределения включений в пластичной матрице, что способствует увеличению пластичности и дает возможность дальнейшей обработки давлением с целью придания необходимой формы [10]. В таблице 2 приведены сравнительные характеристики механических свойств для алюминия и его сплавов в литом состоянии и после винтовой гидроэкструзии.

Таблица 2

Механические свойства алюминиевых сплавов в литом состоянии и после обработки методами винтовой экструзии [10]

Сплав, %	Механические свойства							
	В литом состоянии				После тёплой винтовой экструзии			
	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
	МПа		%		МПа		%	
Al — 99,3	96,5	84	11	17	159	137	21	70
Al — 88 Si — 9,5	75,2	60	1,5	0	203	180	12	13
Al — 93 Mg — 2,28	62	60	1,5	1	324	269	3,8	11

Выводы и направление дальнейших исследований.

Комплексная термовременная обработка жидкого алюминиевого сплава АК12М2 для сложных отливок холодильной техники с перемешиванием позволяет улучшить механические свойства и уменьшить количество пор. Применение термовременной обработки расширяет возможности использования вторичных силуминов.

Сплав АК8М3 для деталей петельного типа в холодильной технике взамен АК12М2 позволяет снизить хрупкость и

повысить срок службы деталей из сложных отливок.

Дополнительное локальное упрочнение литых вторичных алюминиевых сплавов, основанное на их деформации методом винтовой тёплой экструзии гидропрессованием, позволяет измельчить хрупкие фазы пластинчатой формы, выделившиеся по границам зёрен при кристаллизации и повысить однородность их распределения в пластичной матрице, что способствует увеличению пластичности и прочности изделий в целом.

Библиографический список

1. Колачев, Б. А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов [Текст] : учебник для вузов / Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов. — [3-е изд., перераб. и доп.]. — М. : «МИСИС», 1999. — 416 с.*
2. Пат. 66673А Україна, МПК 7 B21C1/00. Пристрій для формування виробів / В. І. Алімов, О. І. Шевелєв, Ю. Ю. Юдіна. — № 2003098350; заявл. 10.09.03; опубл. 17.05.04, Бюл. № 5. — 3 с.
3. Алимов, В. И. Свойства и структура нового вторичного Zn-Al-Si сплава [Текст] / В. И. Алимов, Е. А. Манаева, О. И. Воронцова, А. И. Шевелев // *Металлургия и обработка металлов : материалы научной технической конференции. — Донецк : ДонНТУ, 2004. — № 7. — С. 36–38.*
4. Шевелев, А. И. Применение алюминиевых сплавов [Текст] / А. И. Шевелев // *Металл и литьё Украины. — 2004. — № 11. — С. 39–42.*

5. Шевелев, А. И. Новые технологии получения изделий из вторичных цветных металлов // Металл и литьё Украины. — 2004. — № 4. — С. 32–42.

6. Алимов, В. И. Влияние примесей на качество вторичных алюминиевых сплавов с медью [Текст] / В. И. Алимов, А. И. Шевелев, М. В. Георгиаду, В. В. Зубенко, В. О. Генкузина // Материалы VII Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». — Москва : Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, 2017. — С. 245.

7. Термическое размерное восстановление инструмента и деталей повышенной точности [Текст] : монография / В. И. Алимов, М. В. Георгиаду, А. И. Шевелев, В. В. Зубенко. — Харьков : Водный спектр Джи-Эм-Пи, 2016. — 208 с.

8. Пат. 17700 Україна, МПК C22C33/00. Спосіб виробництва вторинного фероалюмінію у тигельній індукційній печі / О. І. Шевелєв, В. І. Алімов, В. Г. Куликов, С. С. Апоначенко. — № 200603221; заявл. 27.03.06; опубл. 16.10.06, Бюл. № 10. — 3 с.

9. Шевелев, А. И. Обработка литых вторичных алюминиевых сплавов методом винтовой экструзии [Текст] / А. И. Шевелев, Я. Е. Бейгельзимер, А. С. Сынков // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. — 2004. — № 6. — С. 54–57.

10. Шевелев, А. И. Комбинированная деформационная обработка вторичных алюминиевых сплавов [Текст] / А. И. Шевелев, В. Н. Варюхин, С. Г. Сынков, А. В. Решетов // Физика и техника высоких давлений. — 2005. — Том 15. — № 1. — С. 139–145.

© Алимов В. И.
 © Георгиаду М. В.
 © Шевелев А. И.
 © Зубенко В. В.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМД ДонГТУ Денищенко П. Н.,
 к.т.н., доц. каф. ОМД ДонНТУ Митьевым А. П.**

Статья поступила в редакцию 07.02.18.

д.т.н. Алімов В. І., к.т.н. Георгіаду М. В. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР, alim41@mail.ru, geote@mail.ru), **д.т.н. Шевелєв О. І.** (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР), **Зубенко В. В.** (ТОВ «Термолайф», м. Донецьк, ДНР)

ТЕРМОЧАСОВА ОБРОБКА ФАСОННИХ ВИЛИВКІВ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ХОЛОДИЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Вдосконалено технологію термочасової обробки фасонних виливків з алюмінієвих сплавів з міддю шляхом регламентації параметрів температура-час-перемішування розплаву. Показано, що комплексна термочасова обробка сприяє полегшенню видалення домішок заліза, зменшенню пористості, збільшенню мікротвердості і ступеня дисперсності евтектики, її сфероїдизації. Випробувана технологія показала можливість підвищення надійності і терміну служби деталей петельного типу в холодильній техніці через зниження крихкості, що приводить до руйнування; подальше зміцнення виробів досягається локальним гідропресуванням.

Ключові слова: алюмінієві сплави з міддю, петля, термочасова обробка, лиття в кокіл, локальне зміцнення гідропресуванням, величина зерна, пористість, мікротвердість, колонії евтектики, домішки заліза.

Doctor of Tech. Sc. Alimov V. I., PhD Georgiadu M. V. (*DonNTU, Donetsk, DPR, alim41@mail.ru, geote@mail.ru*), **Doctor of Tech. Sc. Shevelev A. I.** (*DonNTU, Donetsk, DPR*), **Zubenko V. V.** (*ООО «Termolife» (Limited Liability Company), Donetsk, DPR*)

HEAT-TIME TREATMENT OF SHAPED ALUMINUM-COPPER ALLOY CASTINGS FOR REFRIGERATION

There has been improved the heat-time treatment method for shaped aluminum-copper alloy castings by regulating the parameters “temperature-time-melt stirring”. It is proved that the overall heat-time treatment provides easy removing of iron impurities, reducing porosity, increasing the microhardness and dispersion eutectic degree and its spheroidization. The proved method has shown the possibility to increase reliability and lifetime of loop-type parts in refrigeration through reducing the fragility terminated in failure; further strengthening of workpieces is achieved by local hydraulic forging.

Key words: *aluminum-copper alloys, loop, heat-time treatment, chilling, local strengthening by hydraulic forging, grain size, porosity, microhardness, eutectic colony, iron impurities.*