

На правах рукописи



ЕФРЕМОВ Вячеслав Петрович

**Полунепрерывное литье крупногабаритных слитков  
из алюминиевого сплава В96ц-Зпч**

Специальность 05.16.04- «Литейное производство»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена на кафедре «Физики» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина» и на Корпорации «ВСМПО-АВИСМА»

Научный руководитель:

Профессор, доктор технических наук

**Замятин Виктор Михайлович**

Официальные оппоненты:

**Комаров Сергей Борисович** - профессор, доктор технических наук, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина, зав. каф. прикладной механики и основ проектирования

**Лашенко Дмитрий Дмитриевич** - кандидат технических наук, ОАО «Линде Уралтехгаз», руководитель направления по металлургии

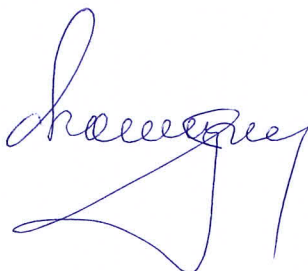
Ведущая организация: ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод»

Защита состоится 14 мая 2012г. в 17 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, главный учебный корпус, ауд. I (зал Учёного совета), тел. (343) 374-36-31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Автореферат разослан 13 апреля 2012г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Карелов Станислав Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Полуфабрикаты из алюминиевых сплавов являются основным конструкционным материалом авиакосмической техники благодаря хорошему сочетанию их механических, коррозионных и конструктивных свойств. Для замены широко используемых в авиастроении сплавов В95пч и В95оч системы Al-Zn-Mg-Cu планировалось использовать сплав В96ц-3, разработанный ВИАМ и ВИС в 1970г. Однако повышенная склонность полуфабрикатов из сплава В96ц-3 к коррозионному растрескиванию явилась серьёзным препятствием для его применения в самолётостроении.

В последнее десятилетие авиаконструкторы проявили интерес к разработанному специалистами ВИАМ сплаву В96ц-3пч, получившему практическое применение. Отличие сплава В96ц-3пч от сплава В96ц-3 заключается в уменьшении верхнего предела по содержанию меди до 1,95%, железа до 0,15%, добавлении бора до 0,01%, бериллия, никеля. Сплав В96ц-3пч системы Al-Zn-Mg-Cu обладает наиболее высокими значениями прочности (650-700МПа) и остаётся одним из перспективных материалов для строительства современной авиационной техники. В отличие от широко применяемых сплавов В95пч и В95оч сплав В96ц-3пч повышает прочность конструкций на 15-25% и обеспечивает выигрыш в весе самолётов от 10 до 20%.

Одна из самых главных причин, сдерживающих серийное производство листов, плит и панелей из сплава В96ц-3пч, заключается в том, что слитки, особенно крупногабаритные, характеризуются высокой склонностью к образованию горячих трещин при полунепрерывном литье.

**Цель диссертационного исследования** заключается в установлении закономерностей влияния металлургических и технологических факторов на горячеломкость сплавов В96ц-3 и В96ц-3пч, структуру и свойства отливаемых слитков; использовании полученных закономерностей для разработки промышленной технологии приготовления сплавов В96ц-3, В96ц-3пч и полунепрерывного литья из них высококачественных крупногабаритных слитков.

### **Для достижения этой цели потребовалось решение следующих задач:**

1. Исследовать влияние химического состава, состава шихты, температурно-временных режимов приготовления, рафинирования, вакуумирования и модифицирования расплавов В96ц-3 и В96ц-3пч на образование горячих трещин, структуру и свойства крупногабаритных цилиндрических и плоских слитков.

2. Изучить влияние способов фильтрации расплава в процессе литья, параметров литья, конструкции кристаллизатора и распределителей расплава в лунке слитка на образование горячих трещин, структуру и свойства крупногабаритных слитков из сплавов В96ц-3 и В96ц-3пч.

3. Разработать технологию полунепрерывного литья слитков диаметром 680мм и плоских слитков сечениями 345x1340мм и 450x1200мм из сплавов В96ц-3 и В96ц-3пч для изготовления из них крупногабаритных полуфабрикатов (плит, профилей, поковок) с требуемыми значениями механических, коррозионных и служебных свойств.

### **Научная новизна**

- Уточнены пределы легирования и соотношения концентраций легирующих элементов (Zn, Mg, Cu), примесей (Fe и Si, Fe и Mn) в сплавах В96ц-3 и В96ц-3пч при производстве крупногабаритных слитков в условиях интенсивного внешнего охлаждения.

- Установлена зависимость между содержанием неметаллических включений в слитках сплавов В96ц-3, В96ц-3пч и массовой долей вовлекаемых в шихту кусковых оборотных отходов, способами фильтрации расплавов.

- Выявлены закономерности формирования макроструктуры слитков из сплавов В96ц-3 и В96ц-3пч при использовании разных способов модифицирования расплавов лигатурами Al-4Ti, Al-5Ti-1В с учетом борсодержащих оборотных отходов, совместными добавками Zr и Ti, струйным перемешиванием расплава в лунке кристаллизующегося слитка.

- Уточнена взаимосвязь между содержанием водорода, цинка и магния в сплавах В96ц-3 и В96ц-3пч и параметрами вакуумирования расплавов.

**Практическая значимость.** Разработаны и внедрены режимы приготовления сплава В96ц-Зпч и полунепрерывного литья плоских слитков сечениями 345x1340мм, 450x1200мм и слитков Ø680мм. В результате удалось существенно понизить вероятность образования в них горячих трещин и повысить выход годного на 21,4%. Разработка, освоение и внедрение технологии полунепрерывного литья крупногабаритных слитков расширило номенклатуру выпускаемых полуфабрикатов, необходимых для строительства новых пассажирских самолётов Ан-148, МС-21 и истребителя пятого поколения СУ(Т50).

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены: на V конференции молодых специалистов авиационно-космических и металлургических организаций России: г. Королёв, 2006г; на IV Российской научно-практической конференции «Физические свойства металлов и сплавов» г.Екатеринбург: 2007г; на VII международном научно-техническом симпозиуме «Наследственность в литейных процессах» г. Самара: 2008г.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе и библиографического списка из 95 наименований, изложена на 173 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков и 93таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы её цель и задачи, научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** представлен аналитический обзор отечественной и зарубежной литературы о влиянии различных факторов на процесс образования горячих трещин в слитках из алюминиевых сплавов. Анализ этих данных показал, что образование горячих трещин в слитках зависит от химического состава сплава, подготовки расплава к литью и процесса кристаллизации слитка. Для решения за-

дачи предотвращения образования горячих трещин в слитках необходимо совершенствование каждой технологической стадии производства. Особенно это касается крупногабаритных слитков, отливаемых методом полунепрерывного литья. На основании анализа серийной технологии и литературных источников сформулированы задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** дана характеристика состава шихты, объектов исследования, оборудования, технологии приготовления сплавов В96ц-3, В96ц-3пч и процесса полунепрерывного литья слитков. В условиях серийного производства производилась обработка статистических данных по химическому составу, металлографическому контролю слитков и механическим свойствам полуфабрикатов. Эксперименты проводились в производственных условиях. Представлены схемы вырезки образцов из слитков.

Для оценки чистоты слитков по содержанию неметаллических включений применяли технологическую пробу Добаткина-Зиновьева. Пористость слитков оценивали по значениям коэффициента затухания ультразвуковых колебаний. Для исследования структуры и свойств отлитых слитков и деформированных полуфабрикатов использовали стандартные методики. В отдельных случаях применяли методы термического анализа и электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп JSM – 5900LV с приставкой микроанализатора).

**В третьей главе** изложены результаты исследования влияния химического состава сплава, массовой доли оборотных отходов сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu в шихте, процессов вакуумирования и модифицирования расплавов на образование горячих трещин в крупногабаритных слитках из сплавов В96ц-3 и В96ц-3пч.

Увеличение от 0 до 100% в шихте массовой доли оборотных кусковых отходов от слитков сплава В96ц-3пч, содержащего добавки титана и бора, вызывает повышение коэффициента загрязнённости вновь приготавливаемого сплава В96ц-3пч оксидными плёнами. По мере увеличения доли отходов в шихте уменьшается размер литого зерна в крупногабаритных слитках. Массовая доля кусковых отходов от слитков в шихте, обеспечивающая приемлемое качество слитков и полу-

фабрикатов, составляет 30% от массы плавки. Использование в шихте 30% отходов от деформированных полуфабрикатов сплава В96ц-3пч приводит к более сильному измельчению литого зерна в слитках по сравнению с использованием 30% отходов от литых слитков. Этот эффект обусловлен фрагментацией фаз кристаллизационного происхождения в деформированных полуфабрикатах и, как следствие, увеличением в приготавливаемом расплаве центров кристаллизации. Вовлечение отходов в виде переплава стружки для приготовления сплава В96ц-3пч непригодно из-за высокого содержания в нём оксидных плёнок.

Статистический поиск взаимосвязи между химическим составом сплава В96ц-3пч (25 промышленных плавов) и образованием в слитках горячих трещин показал, что для уменьшения частоты образования горячих трещин в крупногабаритных слитках необходимо содержание компонентов в сплаве В96ц-3пч поддерживать в узких пределах: Cu(1,6÷1,8%), Mg(2,2÷2,4%), Mn(0,02÷0,03%), Fe(0,12÷0,15%), Si(0,010÷0,025%), Zn(8,2÷8,4%), Zr(0,1-0,12%), Ti(0,04-0,06%), B(0,0007–0,0009%).

Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) закаленных образцов сплава В96ц-3пч разного химического состава выявил (рис.1 и 2, табл.1), что в алюминиевой матрице сплава В96ц-3пч содержится (в мас.%): 9,20Zn; 1,96Mg; 1,69Cu. Указанные концентрации представляют предельные растворимости цинка, магния и меди в алюминиевой матрице сплава В96ц-3пч при температуре 470<sup>0</sup>С и соответствуют формуле Mg(Zn,Cu)<sub>2</sub> при атомном соотношении Zn/Cu близким к 5. Избыток магния и меди по отношению к составу фазы Mg(Zn,Cu)<sub>2</sub> приводит к формированию труднорастворимой фазы Al<sub>2</sub>CuMg, которая сохраняется при гомогенизации слитков и нагреве полуфабрикатов под закалку.

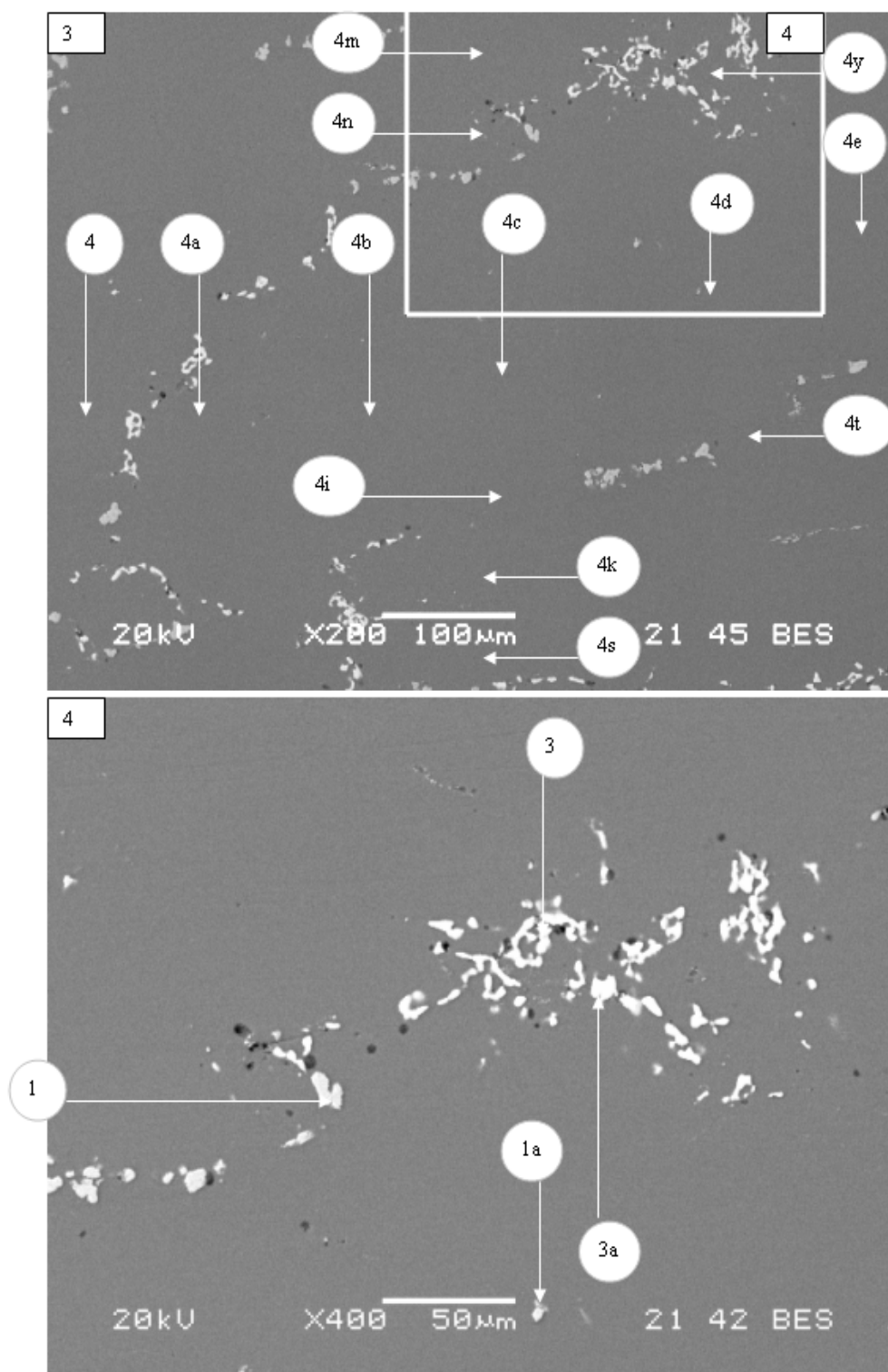


Рис. 1. Изображение участка микрошлифа закаленного образца сплава В96ц-3пч в обратно отраженных электронах (BES)



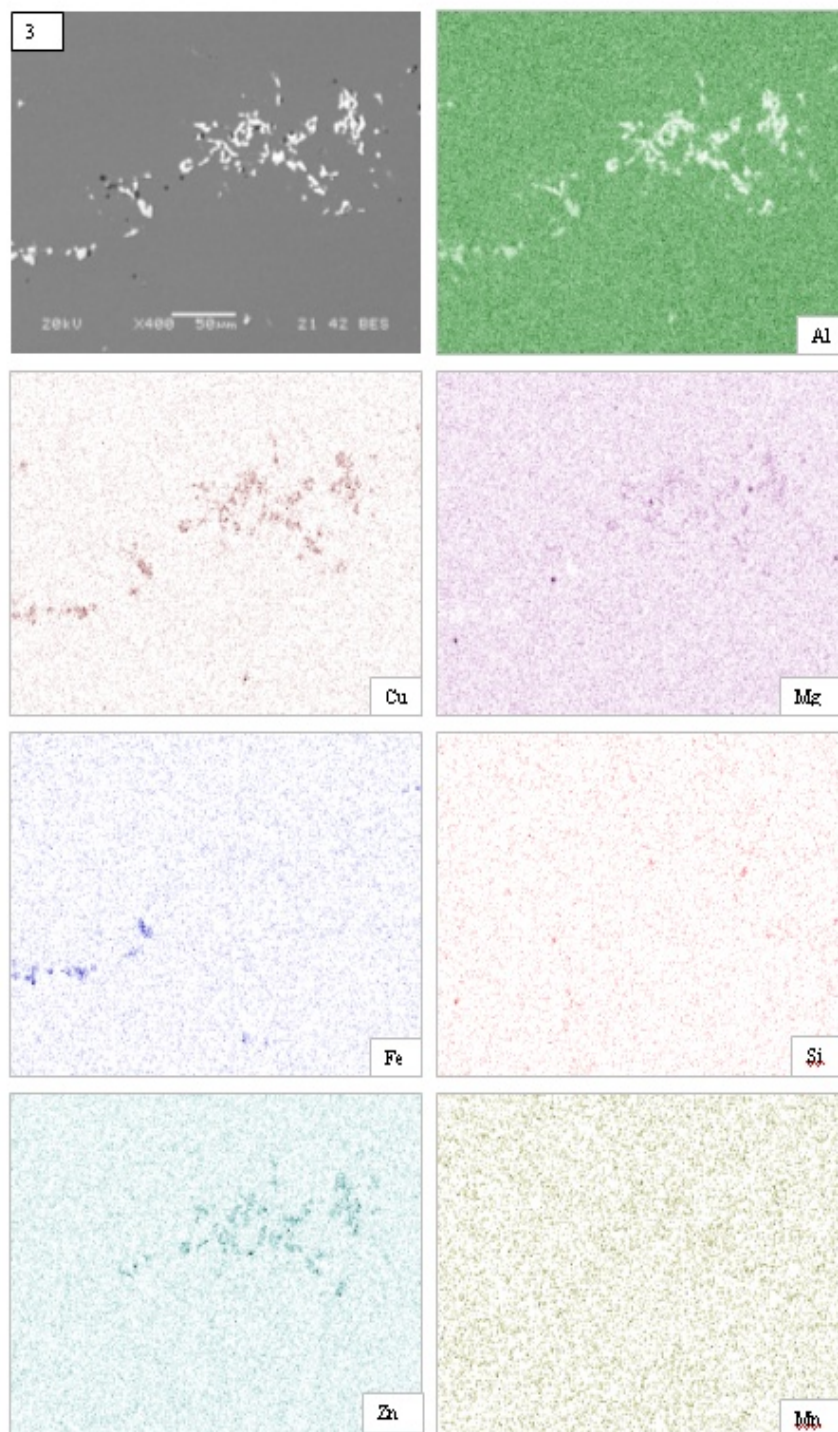


Рис. 2. Изображение участка микрошлифа закаленного образца сплава В96ц-3пч  
в характеристическом рентгеновском излучении

Таблица 1- Средний химический состав фаз и матрицы в закаленных образцах сплава В96ц-3пч

№ точки	Среднее содержание элементов, мас % (ат.%)								фаза
	Zn	Mg	Cu	Zr	Mn	Fe	Si	Al	
1 и 1а	2,02 (1,12)	0,27 (0,40)	29,83 (16,99)	0,07 (0,03)	-	13,45 (8,72)	-	54,35 (72,77)	Al <sub>7</sub> Cu <sub>2</sub> Fe
3 и 3а	32,57 (19,11)	15,44 (24,35)	20,5 (12,39)	0,03 (0,01)	-	0,06 (0,04)	0,02 (0,03)	40,55 (55,4)	AlZnMgCu
4÷4у	9,20 (4,03)	1,96 (2,32)	1,69 (0,79)	0,10 (0,04)	0,03 (0,01)	0,04 (0,03)	0,03 (0,04)	86,7 (92,61)	матрица

Полученные данные свидетельствуют о том, что для предотвращения образования избыточной фазы Al<sub>2</sub>CuMg содержание основных легирующих элементов в сплаве В96ц-3пч необходимо поддерживать в пределах, указанных в строке рекомендуемый химический состав табл.2.

Таблица 2- Химический состав сплава В96ц-3пч по основным легирующим компонентам

Сплав В96ц-3пч	Содержание элементов, масс.%			
	Zn	Mg	Cu	Zr
предельная растворимость компонентов при 470°C	9,20	1,96	1,69	~0,12
фактический химический состав серийных плавок	7,8-8,2	2,0-2,1	1,6-1,8	0,11-0,12
требования НД	7,6÷8,6	1,7÷2,3	1,4÷1,95	0,10÷0,16
рекомендуемый химический состав	8,3-8,5	2,1-2,2	1,7-1,8	0,10-0,12

В промышленных условиях были приготовлены опытные плавки сплава В96ц-3пч, отлиты плоские слитки поперечным сечением 335х1340мм, прокатаны плиты толщиной 25 и 40 мм и термообработаны по режиму Т12. Результаты испытания механических свойств, вязкости разрушения ( $K_{IC}$ ) и электропроводности ( $\sigma$ )

плит приведены в табл.3. Как видно из табл.3, свойства плит из сплава В96ц-3пч опытных плавков по сравнению с серийными плавками не только полностью соответствуют требованиям технических условий ТУ 1-804-438-2007, но и имеют некоторый запас.

Определены поправки на содержание цинка, магния и меди, которые необходимо вводить в расчётный химический состав сплавов В96ц-3 и В96ц-3пч при их приготовлении для получения заданного химического состава.

Таблица 3- Механические свойства, вязкость разрушения ( $K_{IC}$ ) и электропроводность ( $\sigma$ ) плит из сплава В96ц-3пч в состоянии Т12

Плавки	Толщина плиты, мм	Механические свойства (направление вырезки образцов – продольное)			$K_{IC}$ , МПа $\sqrt{м}$	$\sigma$ , МСм/м
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %		
опытные	40	625-630	605-620	11,2-11,6	26,0-26,7	19,9-20,1
серийные	25	615-632	595-609	12,8-15,6	25,5-26,4	20,3-20,7
серийные	40	616-636	595-618	12,8-17,2	26,0-26,3	20,4-20,8
Требования НД: ТУ 1-804-438-2007	-	$\geq 615$	$\geq 595$	$\geq 8,0$	$\geq 25$	19,8÷21,0

Для снижения склонности сплава к образования горячих трещин в плоских слитках сечениями 310x1130мм, 440x1180мм и 335x1340мм из сплава В96ц-3пч, содержащего 0,12-0,15%Fe, необходимо поддерживать в нем содержание кремния в пределах 0,020-0,025%. Содержание же марганца в сплаве не должно превышать 0,03% (для плоских слитков сечением 310x1130мм) и 0,02% (для плоских слитков сечением 440x1180мм и 335x1340мм).

В соответствии с данными МРСА (см.табл.1, точки 4÷4у ) при содержании кремния и марганца меньше вышеуказанных концентраций они полностью входят в твердый раствор на основе алюминия и не образуют хрупких фаз по границам дендритных ячеек. Содержание железа в твердом растворе колеблется в пределах

0,02 – 0,06%, а избыток железа идет на образование фазы  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  кристаллизационного происхождения.

Установлено совместное влияние параметров вакуумирования расплавов (температура  $t$ , продолжительность  $\tau$ , остаточное давление воздуха  $P_{\text{ост.}}$ ) в миксере на содержание цинка, магния и водорода в сплавах В96ц-3 и В96ц-3пч. Обнаружено, что при параметрах вакуумирования:  $t = 710-715^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 60\text{мин}$  и  $P_{\text{ост.}} = 12\text{мм.рт.ст}$  испарение цинка оказывается минимальным (порядка 0,1-0,2%), а содержание водорода в слитках 0,10 – 0,13  $\text{см}^3/100\text{г}$ .

Разработан новый способ вакуумирования алюминиевых расплавов в миксере, заключающийся в том, что расплав после перелива из плавильной печи в миксер сразу же подвергается вакуумированию, а не нагревается перед вакуумированием до температуры литья, как это предусмотрено серийной технологией. Опыт-но-промышленная апробация нового способа вакуумирования расплава В95оч показала, что содержание водорода в слитках находится в пределах 0,10-0,12  $\text{см}^3/100\text{г}$ , коэффициент загрязнённости сплава оксидными плёнами составляет 0,07-0,09  $\text{мм}^2/\text{см}^2$ , а коэффициент затухания ультразвука в слитках 1,23-1,25  $\text{дБ/см}$ . Способ защищён патентом РФ №2361938.

Присадку лигатуры  $\text{Al-Ti-B}$  в сплав В96ц-3пч нужно осуществлять с учетом вовлекаемых в шихту борсодержащих оборотных отходов. Модифицирование сплава В96ц-3пч лигатурой  $\text{Al-5Ti-1B}$  в виде прутка, присаживаемого в расплав за 1,5 - 2,0 м до кристаллизатора, вызывает существенное измельчение литого зерна (до 80-130  $\text{мкм}$ ), однако вязкость разрушения  $K_{\text{IC}}$  плит оказывается ниже требуемых значений (табл.4).

Присадка лигатуры  $\text{Al-5Ti-1B}$  под струю расплава при переливе его из плавильной печи в миксер обеспечивает достаточное измельчение зерна (260-310  $\text{мкм}$ ) в слитках, полуфабрикаты из которых имеют требуемые нормативной документацией служебные характеристики. Использование новой лигатуры  $\text{Al-Ti-B}$ , приготовленной из техногенных отходов титанового производства, позволяет значительно снизить затраты на производство лигатуры.

Таблица 4 - Механические свойства и вязкость разрушения ( $K_{IC}$ ) плит толщиной 25 и 40мм из сплава В96ц-3пч в состоянии Т12

Способ модифицирования	Толщина плиты, мм	Механические свойства (направление вырезки образцов – продольное)			$K_{IC}, \text{МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$
		$\sigma_B, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	
(Al-3Ti)+(Al-5Ti-1В с подачей прутка в прилёточную коробку)	40	623÷627	601÷606	8,0	18,8
Al-3Ti	40	634÷638	609÷611	8,8÷11,6	26,3÷27,3
Al-5Ti-1В	25	620÷623	595-601	10,8÷12,2	25,0÷25,5
(Al-3Ti + Al-5Ti-1В)	40	629÷636	608÷618	13,6÷14,0	26,0÷26,3
Требования НД: ТУ 1-804-438-2007	-	$\geq 615$	$\geq 595$	$\geq 8,0$	$\geq 25$

Выявлена комбинация концентраций добавок Zr, В и Ti, позволяющая получать мелкозернистую макроструктуру (размер зерна 200-300мкм) слитков и снижать склонность алюминиевого сплава В96ц-3пч к образованию горячих трещин при литье крупногабаритных слитков.

**В четвёртой главе** изложены результаты исследования влияния разных способов фильтрации расплава, подаваемого из миксера в кристаллизатор, на коэффициент загрязнённости сплава В96ц-3пч неметаллическими включениями. Установлено, что способ последовательной фильтрации расплава через два слоя стеклосетки ССФ-1,0-0, пенокерамический фильтр пористостью 40ppi и сачок из стеклосетки ССФ-1,0-0, расположенный в распределительной литейной воронке, позволяет резко снизить коэффициент загрязнённости слитков оксидными пленами и флюсовыми включениями.

При отливке плоских слитков сечением 450x1200мм из сплава В96ц-3пч опробованы кристаллизаторы разной конструкции и различные способы распределения расплава в лунке слитка. Выяснено, что литье расплава в трубчатый восьмигранный кристаллизатор не позволяет отливать крупногабаритные слитки из сплава В96ц-3пч без образования горячих трещин.

Применение корпусного двухкамерного кристаллизатора и уменьшение давления охлаждающей воды, подаваемой на узкую грань слитка по сравнению с широкой гранью, значительно снизило частоту образования горячих трещин в плоских слитках вследствие снижения теплоотвода от их угловых зон.

С целью уменьшения температурных градиентов в лунке кристаллизующегося слитка и предотвращения образования в нем веерных кристаллов и единичных крупных зёрен опытным путём установлен интервал скоростей ( $v = 0,23-0,30$  м/с) истечения струек расплава из литейной распределительной воронки в лунку слитка (способ защищён патентом РФ №2414324). Указанный интервал скоростей реализуется выбором количества  $N$  и диаметра  $d$  отверстий в распределительной воронке в зависимости от диаметра  $D$  слитка и скорости его литья  $V$  в соответствии с формулой, полученной из уравнения неразрывности потока расплава из воронки в кристаллизатор:

$$N = (D/d)^2 V/v.$$

Эксперименты показали, что при  $d = 7$  мм обеспечивается наилучшее истечение струек расплава из воронки в кристаллизатор. При этом перепад уровней расплава в воронке и кристаллизаторе составляет 10-15 мм.

Исследование глубины, профиля и температурного поля лунки слитка диаметром 680 мм сплава В96ц-3пч показало, что скорость кристаллизации слитка изменяется по сечению достаточно плавно за исключением его поверхностного слоя толщиной 5 – 7 мм, в котором она изменяется экстремально. Толщина поверхностного ликвационного ободка плоского слитка сечением 335x1340 мм не превышает 2 мм, а слитка сечением 440x1180 мм – 9 мм.

Для определения температур неравновесного солидуса и ликвидуса сплава В96ц-3пч провели термический анализ образцов из отожжённого по режиму 380÷420°C, 6ч слитка поперечным сечением 335x1340 мм. На рис. 3а представлена термограмма нагрева, а на рис. 3б - термограмма охлаждения сплава В96ц-3пч. Видно, что температура неравновесного солидуса сплава В96ц-3пч равна 469°C, а ликвидуса 635°C.

Полученное значение температуры ликвидуса сплава использовано для корректировки температуры литья, а неравновесного солидуса учтено при выборе режима гомогенизации слитков. Установлено, что максимальная технологическая пластичность сплава В96ц-3пч наблюдается в интервале температур 380-420°C и обеспечивается режимами гомогенизации 460°C, 24ч и 460°C, 30ч.

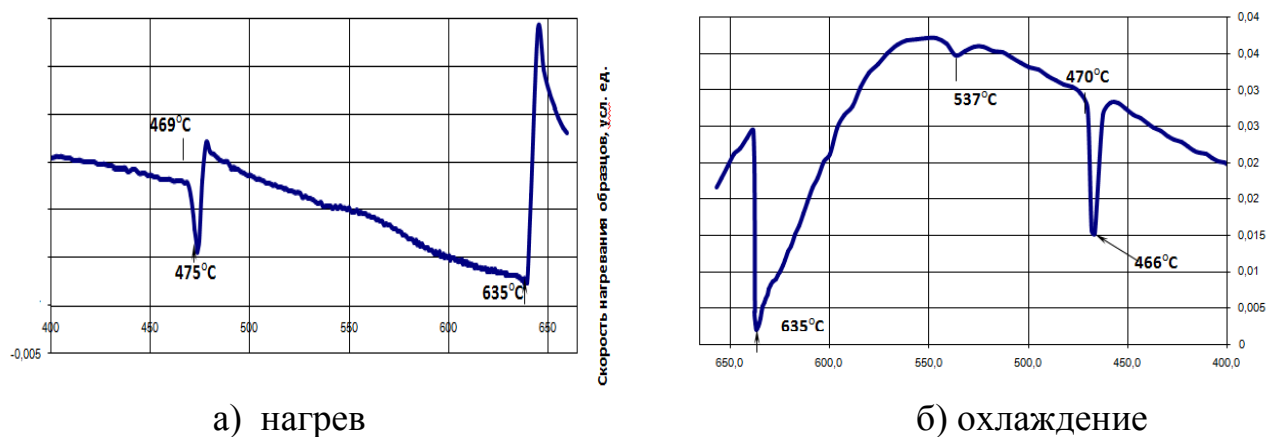


Рис. 3. Термограммы алюминиевого сплава В96ц-3пч в режиме нагрева (а) и охлаждения (б)

Указанные режимы гомогенизации обеспечивают наиболее полное растворение фаз  $Mg(Zn,Cu)_2$  и  $Al_2CuMg$ , входящих в состав неравновесной эвтектики, расположенной по границам дендритных ячеек в виде прослоек. На основании совокупности полученных данных рекомендован и внедрён в производство режим гомогенизации (460°C, 24-30ч) крупногабаритных слитков сплава В96ц-3.

**В пятой главе** представлены результаты практического освоения совместно с ВИАМ полуфабрикатов из сплава В96ц-3пч для отечественных и зарубежных авиастроительных компаний. Приведен комплекс эксплуатационных характеристик катаных, кованых и прессованных полуфабрикатов из сплава В96ц-3пч, изготовленных на ВСМПО из крупногабаритных слитков, отлитых по разработанной технологии. Даны результаты независимых испытаний структуры и свойств полуфабрикатов в условиях АНТК «Антонов» и ОКБ «Сухого», использованных при строительстве новых пассажирских самолётов Ан-148, МС-21 и истребителя пятого поколения СУ.

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

На основе выполненных исследований разработана и внедрена промышленная технология приготовления сплавов В96ц-3, В96ц-3пч и полунепрерывного литья крупногабаритных цилиндрических и плоских слитков, предназначенных для производства из них катаных, прессованных и кованных полуфабрикатов авиационного назначения.

1. Установлены закономерности влияния содержания и соотношения основных легирующих элементов (Zn, Mg, Cu), примесей (Fe, Si, Mn) и массовой доли (от 0 до 100%) кусковых отходов сплава В96ц-3пч в составе шихты на структуру, свойства и образование горячих трещин в крупногабаритных слитках из сплавов В96ц-3 и В96ц-3пч. На основании выявленных закономерностей сужены концентрационные интервалы основных легирующих компонентов и примесей, а также определена приемлемая доля кусковых оборотных отходов (30%) для приготовления сплава В96ц-3пч.

2. Выявлено влияние параметров вакуумирования (температура, продолжительность, остаточное давление воздуха) расплавов В96ц-3 и В96ц-3пч в миксере на изменение содержания цинка, магния, водорода и образование пористости в слитках. Установлена комбинация параметров вакуумирования, обеспечивающая допустимое испарение цинка из расплавов В96ц-3 и В96ц-3пч, достаточно низкое содержание водорода и пониженную пористость в слитках. Разработана новая технология вакуумирования расплава В96ц-3пч, позволяющая сократить время нахождения расплава в миксере, уменьшить содержание водорода в сплаве и, как следствие, предотвратить образование в слитках первичной, а в полуфабрикатах вторичной пористости (патент RU 2361938).

3. Обнаружено, что модифицирование расплава В96ц-3пч лигатурой Al-5Ti-1B за 1,5÷2,0м до кристаллизатора обеспечивает получение мелкозернистой структуры слитка, но сопровождается снижением вязкости разрушения  $K_{IC}$  полуфабрикатов. Более приемлемый способ модифицирования сплава В96ц-3пч при этих условиях заключается в присадке лигатуры Al-2Ti-0,6B в миксер под



струю расплава при переливе его из ковша в миксер. Предложен новый состав и технология получения модифицирующей лигатуры Al-Ti-B с использованием техногенных титановых отходов.

4. Применение корпусного кристаллизатора взамен трубчатого при полупрерывном литье крупногабаритных слитков из сплавов В96ц-3 и В96ц-3пч вызывает уменьшение вероятности образования горячих трещин в слитках. Это обусловлено более равномерным и менее интенсивным охлаждением кристаллизующегося слитка и, как следствие, уменьшением термических напряжений в нём по сравнению с отливкой слитков в трубчатый кристаллизатор.

5. Показано, что комбинированный способ рафинирования расплава от неметаллических включений, заключающийся в последовательном использовании двух слоёв стеклосетки марки ССФ1,0-0 и пенокерамического фильтра пористостью 40ppі, обеспечивает достаточное снижение коэффициента загрязнённости неметаллическими включениями сплавов В96ц-3 и В96ц-3пч.

6. За счёт симметричного распределения расплава в кристаллизаторе с помощью распределительной воронки и перемешивания его струйками, выходящими со скоростью 0,23-0,30м/с из отверстий или щелей распределительной воронки, обеспечивается предотвращение образования веерных кристаллов и единичных крупных зёрен в макроструктуре крупногабаритных слитков из сплавов В96ц-3 и В96ц-3пч (способ защищён патентом RU 2414324).

7. Разработан режим гомогенизации крупногабаритных слитков из сплавов В96ц-3 и В96ц-3пч, обеспечивающий их высокую технологическую пластичность при различных видах деформации (прокатка, прессование и ковка).

8. Использование крупногабаритных слитков из сплавов В96ц-3 и В96ц-3пч для прокатки, прессования иковки позволяет получать плиты, профили и поковки со структурой, механическими, коррозионными и служебными свойствами, требуемыми нормативной документацией.

9. Результаты работы внедрены в производство.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1.Ефремов В.П. Исследование влияния количества отходов в составе шихты для приготовления сплава В95пч на качество крупногабаритных плоских слитков 340x1340мм и изготовленных из них плит авиационного назначения /В.П. Ефремов, В.В.Иванов// Сборник докладов конференции молодых специалистов.- Верхняя Салда. ВСМПО. - 2002. –с.19.

2.Ефремов В.П. Освоение производства крупногабаритных плоских слитков сплава В95пч, идущих на изготовление плит авиационного назначения // Сборник докладов II конкурсная конференция молодых специалистов авиационно-космических и металлургических организаций России. – ИПК Машприбор.- Королёв.-2003. –с.6.

3.Сухих А.Ю. Опыт производства слитков и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов В96,В96ц-3,В96ц-3пч / А.Ю. Сухих, В.П. Ефремов, А.А. Бабинов, Т.Е. Нечаева //Технология лёгких сплавов.- 2006. - №4. – с. 119-122.

4.Ефремов В.П. Технология производства и качество слитков из высокопрочного алюминиевого сплава В96ц-3пч, предназначенных для изготовления деформированных полуфабрикатов, используемых при строительстве самолётов пятого поколения/ В.П. Ефремов, А.Ю. Сухих //Сборник докладов V конференция молодых специалистов авиационно-космических и металлургических организаций России. ИПК Машприбор - Королёв.- 2006. –с.20.

5.Московских О.П. Структура и свойства алюминиевого сплава В96ц-3пч/ О.П.Московских, В.М.Замятин, В.С. Мушников, В.П. Ефремов//Сборник докладов IV Российская научно-техническая конференция «Физические свойства металлов и сплавов».-Екатеринбург.- ГОУ ВПО УГТУ-УПИ.- 2007. –с.202-203.

6.Ефремов В.П. Наследственное влияние шихтовых материалов на качество слитков и полуфабрикатов из высокопрочного сплава В96ц-3пч / В.П. Ефремов, А.Ю. Сухих, В.М. Замятин, Г.А. Сулов // Сборник докладов VII международный научно-технический симпозиум.- «Наследственность в литейных процессах».- Самара.-2008. – с.136.

7.Ефремов В.П. Влияние технологических факторов на структуру и свойства слитков и полуфабрикатов из алюминиевого сплава В96ц-Зпч /В.П. Ефремов, А.Ю. Сухих, В.М. Замятин, Г.А. Суслов, В.В. Иванов //Цветные металлы.- 2009.- № 7 .– с.57-59.

8.Сухих А.Ю. Способ вакуумной обработки алюминиевых сплавов/ А.Ю. Сухих, Г.А.Суслов, С.Н.Тимохов, В.П.Ефремов, А.А.Бабинов, А.В.Потехин// Патент RU 2 361 938. - 2009. - с.8.

9.Ефремов В.П. Роль распределителей расплава в кристаллизаторе/ В.П. Ефремов, А.Ю. Сухих, В.М. Замятин, Г.А. Суслов//Технология лёгких сплавов.- 2010. - №1 . – с.44-50.

10.Сухих А.Ю. Способ непрерывного литья цилиндрических слитков из алюминиевых сплавов/ А.Ю. Сухих, В.М. Замятин, Г.А.Суслов, В.П.Ефремов// Патент RU 2414324. - 2011. – с.4.

Заказ № 100  
Тираж: 100экз.  
Типография ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА»,  
отдел полиграфических и рекламных проектов  
624760, Свердловская область, г. Верхняя Салда,  
ул. Парковая 1, (34345 62310)