

На правах рукописи

ФИЛИППОВА ИННА АРКАДЬЕВНА

**Исследование и разработка модификаторов, закаленных из жидкого состояния, и
технологии модифицирования доэвтектических силуминов с целью получения
высококачественных отливок транспортного машиностроения**

Специальность 05.16.04 – «Литейное производство»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Диссертационная работа выполнена на кафедре технологии литейных процессов
Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и
ОАО «Калугатрансмаш»

Научный руководитель

Заведующий кафедрой ТЛП НИТУ «МИСиС»,
профессор, доктор технических наук

Белов Владимир Дмитриевич

Официальные оппоненты:

Заведующий кафедрой Технологии
металлов и литейных процессов МГОУ
профессор, доктор технических наук

Батышев Александр Иванович

Заместитель главного металлурга
ОАО «АК «Рубин»,
кандидат технических наук

Гусева Вера Валерьевна

Ведущая организация:

ОАО «КАМАЗ-Металлургия»

Защита состоится «26» мая 2011 года в 10 часов на заседании диссертационного
совета Д.212.132.02 при Национальном исследовательском технологическом
Университете «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 6,
ауд. А-305.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью
учреждения) просьба направить по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4,
Ученый Совет.

Копии отзывов можно прислать по факсу: (495) 951-17-25, а также на e-mail:
vdbelov@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального
исследовательского технологического университета «МИСиС».

Автореферат разослан « » апреля 2011 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.132.02
доктор технических наук, профессор



Семин А.Е.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность работы. Отливки из алюминиевых сплавов находят все большее применение в различных отраслях промышленности. При этом основную долю алюминиевого литья составляют отливки из Al-Si сплавов (силуминов), которые обладают высокими механическими, эксплуатационными и литейными свойствами.

Технический и потребительский потенциал этих сплавов может быть повышен и расширен за счет разработки экономных и экологически чистых технологических процессов производства сплавов путем оптимизации состава шихты и применения высокоэффективных методов выпечной обработки. В настоящее время, для повышения свойств силуминов применяют различные методы обработки расплавов: модифицирование, флюсовое и фильтрационное рафинирование, продувка газом и др. При этом в модифицировании расплава имеется наибольший потенциал повышения их функциональных свойств.

В последние годы модифицирование доэвтектических силуминов в основном осуществляют металлическими лигатурами, в составе которых основными модифицирующими элементами являются титан, бор, цирконий, и др., которые в расплавах алюминия образуют тугоплавкие интерметаллиды, являющиеся центрами кристаллизации первичной фазы α_{Al} .

Анализ известных модификаторов и технологии их получения показал, что они существенно различаются по дисперсности структуры и это различие обусловлено разной интенсивностью затвердевания лигатур. Однако вопросы влияния дисперсности структуры модифицирующих лигатур на структуру и свойства доэвтектических силуминов в отливках изучены недостаточно и требуют дальнейших исследований.

Таким образом, разработка быстроохлажденных модификаторов с мелкозернистой структурой для доэвтектических силуминов и исследование их модифицирующего воздействия при литье алюминиевых отливок ответственного назначения представляется актуальной научно-технической задачей.

Цель работы. Разработка закаленных из жидкого состояния модификаторов для доэвтектических силуминов и исследование их модифицирующего воздействия с целью получения высококачественных отливок транспортного машиностроения.

Научная новизна.

1. Показано, что закаленный из жидкого состояния (ЗЖС) алюминиевый сплав АК7М2 оказывает модифицирующее воздействие на базовый расплав из такого же сплава, при этом эффект модифицирования возрастает по мере повышения дисперсности внутреннего строения закаленного сплава и наибольший уровень механических свойств ($\sigma_b \approx 200$ МПа; $\delta = 4,5\%$) достигается при использовании пластинок толщиной $\leq 0,5$ мм, полученных закалкой из жидкого состояния при скоростях охлаждения 10^5 - 10^6 К/с.

2. Установлен высокий модифицирующий эффект обработки доэвтектического силумина закаленным из жидкого состояния аморфным сплавом 50Cu-50Zr, который обусловлен на основании диаграмм состояния Cu-Zr и Al-Zr формированием в расплаве тугоплавких цирконийсодержащих интерметаллидных фаз, служащих центрами кристаллизации фазы α_{Al} .

3. Выявлены закономерности изменения количества и размеров интерметаллидных фаз в лигатурах Al-5Ti, Al-20Ti и Al-5Ti-B с увеличением скорости их охлаждения при закалке из жидкого состояния, а также зависимости механических свойств сплава АК7М2 от расхода указанных модификаторов. Показано, что более высокий модифицирующий эффект достигается при модифицировании лигатурами, закаленными из жидкого состояния при скоростях охлаждения 10^5 - 10^6 К/с, обеспечивая повышение предела прочности на разрыв на 30-35% и относительного удлинения в 2,0-2,5 раза.

Практическая значимость.

1. Разработаны технологии получения быстроохлажденного сплава АК7М2 в виде гранул закалкой из жидкого состояния и модифицирования им базового расплава такого же состава с целью повышения его механических свойств в отливках транспортного машиностроения.

2. Разработана технология получения быстроохлажденной лигатуры 50Cu-50Zr в виде аморфной ленты толщиной 0,08 мм, закаленной из жидкого состояния при скорости охлаждения 10^6 - 10^7 К/с, которая рекомендуется для модифицирования медьсодержащих силуминов при расходе 0,2% от массы расплава.

3. Получены методами закалки из жидкого состояния при скоростях охлаждения 10^5 - 10^6 К/с быстроохлажденные модификаторы из Al-Ti и Al-5Ti-B сплавов в виде пластинок, применение которых позволяет повысить механические свойства сплава АК7М2 на 15-20 % в сравнении с аналогичными модификаторами в виде чушек и прутков.

4. Проведено опытно-промышленное опробование модификаторов, закаленных из жидкого состояния: АК7М2, Al-5Ti-B и 50Cu-50Zr в условиях литейного цеха ОАО

«Калугатрансмаш». Изготовлена опытная партия отливок транспортного машиностроения из сплава АК7М2 с повышенными на 27-30 % пределом прочности на разрыв и в 2,0-2,2 раза относительным удлинением при модифицировании лигатурами Al-5Ti-B и 50Cu-50Zr и, соответственно, на 10-15 % и в 1,5 раза при модифицировании ЗЖС АК7М2. Литые детали прошли все требуемые испытания и признаны годными.

5. Даны рекомендации по применению модификаторов, закаленных из жидкого состояния, при различных условиях литья, в том числе при автоматизации заливки литейных форм.

Апробация работы.

Основные материалы диссертационной работы доложены и обсуждены: на научно-практической конференции «Наследственность в литейных сплавах», Самарский ГТУ, Самара, 2008; на девятом съезде литейщиков России, Уфа, РАЛ, 2009; на конференции «Энергосберегающие технологии и оборудование для литейного производства», Калуга, РАЛ, 2010; на 8-й всероссийской научно-практической конференции «Литейное производство сегодня и завтра», Санкт-Петербург, С-ПбГПУ, 2010; на конференции «Литейное производство и металлургия 2010 Беларусь», Минск, БАЛМ, 2010; на научных семинарах кафедры ТЛП МИСиС в 2009-2011 гг.

Результаты диссертационной работы отражены в 9 публикациях в виде статей и тезисов докладов конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на ____ страницах машинописного текста, содержит ____ рисунков, ____ таблицы, состоит из введения, ____ глав, выводов, списка литературы из ____ наименований.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

2.1 Состояние вопроса и постановка задач исследования

Рассмотрены особенности кристаллизации эвтектических, заэвтектических и доэвтектических алюминиевых сплавов на основе анализа диаграммы состояния Al-Si. Проанализированы основные принципы повышения механических свойств алюминиевых сплавов методами модифицирования. Особое внимание уделено процессу модифицирования доэвтектических алюминиевых сплавов металлическими мелкокристаллическими лигатурами, содержащими титан, бор и цирконий. Рассмотрены

методы получения модифицирующих лигатур и требования, предъявляемые к ним. Показано, что механические свойства в отливках при неизменном химическом составе, в основном, определяются качеством лигатуры и способом ее ввода в расплав. Наиболее простым и надежным методом повышения модифицирующего воздействия лигатур является повышение скорости охлаждения при их кристаллизации. Проведен анализ методов быстрого охлаждения лигатур. Показано, что повышение скорости охлаждения лигатур при затвердевании способствует измельчению, равномерному распределению и увеличению количества интерметаллидов, которые являются потенциальными зародышами для образования центров кристаллизации первичной фазы α_{Al} .

На основе литературного обзора сделан вывод о том, что наиболее перспективным методом повышения механических свойств алюминиевых сплавов в отливках является модифицирование лигатурами, полученными закалкой из жидкого состояния.

2.2 Методика исследования

Основным объектом исследования являлся доэвтектический силумин АК7М2 ТУ 24.04.13.64-2004 следующего химического состава: 85,8-92,1 % Al; 6-8 % Si; 1,5-3,0 % Cu; 0,2-0,6 % Mg; до 1,3 % Fe; сумма примесей – не более 2 %.

Алюминиевый сплав плавил в газовой печи вместимостью 300 кг. В качестве шихты использовали сплавы АК12 и АК5М2 в чушках (ГОСТ 1583-93) и возврат собственного производства (до 30 % от металлозавалки). Шихту расплавляли, перегревали до 800 °С и переливали в ковш вместимостью 5 кг. В ковше расплав модифицировали при температурах 720 °С $\pm$ 10 %. Контроль температуры осуществлялся хромель-алюмелевой термопарой, подключенной к автоматическому потенциометру КСП-1.

Быстроохлажденные модификаторы в виде пластинок получали методом переплава готовых лигатур с последующей закалкой их из жидкого состояния. Характеристики модификаторов и методов их получения приведены в таблице 1.

Для сравнительного исследования были выбраны модификаторы, наиболее широко применяемые в литейном и металлургическом производстве России.

Модификатор помещали на дно ковша перед выпуском плавки в ковш. При наполнении ковша расплавом за счет его интенсивного перемешивания достигалось хорошее усвоение модификатора.

Образцы для исследования механических свойств получали заливкой расплава в подогретый до 300 °С стальной кокиль. Прочность и пластичность сплавов АК7М2 определяли на разрывной машине типа Р-5.

Жидкотекучесть сплава изучали по стандартной пробе (ГОСТ 16438-70).

Макро- и микроструктуру сплава изучали на изломах и шлифах образцов, залитых для определения механических свойств. Анализ микроструктуры сплавов проводили с использованием микроскопов «NEOPHOT-21» и «ЕС МЕТАМ РВ-23» при увеличении до 500-крат.

Таблица 1 – Характеристика модификаторов и методов их получения

№ п/п	Модификатор	Форма и размер, мм	Метод получения	Скорость охлаждения, К/с ¹⁾
1.	Сплав АК7М2	Гранулы, $\varnothing = 5-20$	Закалка в воде	$10^2 - 10^3$
		Пластины, $h = 0,3-0,5$	Закалка на медном диске	$10^5 - 10^6$
2.	Лигатура Al5Ti	Слитки, $h = 20$	Литье в изложницу	40-50
		Пластины, $h = 0,3-0,5$	Закалка на медном диске	$10^5 - 10^6$
3.	Лигатура Al20Ti	Пластины, $h = 6$	Литье в изложницу	$10 - 10^2$
		Пластины, $h = 0,3-0,5$	Закалка на медном диске	$10^5 - 10^6$
4.	Лигатура Al5TiB	Пруток, $d = 9,5$	Формовка, волочение	150-200
		Пластины, $h = 0,3-0,5$	Закалкой на медном диске	$10^5 - 10^6$
5.	Лигатура 50Cu50Zr	Пластины, $h = 6$	Литье в изложницу	$10 - 10^2$
		Лента 0,08	Закалка на специальной установке	$10^6 - 10^7$

¹⁾ Значения скоростей охлаждения приняли по Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния. – Киев: Наукова Думка, 1974, стр.17.

Поверхность разрушения при разрыве образцов исследовали на сканирующем электронном микроскопе JSM-35 CF при увеличении до 10000 крат, а микроструктуру на изломах закаленных из жидкого состояния лент толщиной 0,08 мм – на микроскопе «Hitachi-TM-1000» при увеличении 10000 крат.

Все эксперименты повторяли не менее 3 раз. Из полученных результатов методом математической обработки сначала выявляли грубые ошибки с применением критерия Стьюдента, а затем определяли средние значения и доверительный интервал.

2.3 Исследование влияния быстроохлажденного сплава АК7М2 на структуру и свойства сплава АК7М2 базового состава

Исследовали влияние скорости охлаждения на микроструктуру сплава АК7М2 и влияние быстроохлажденных добавок этого сплава, полученных закалкой из жидкого состояния, на структуру и свойства базового сплава АК7М2.

Быстроохлажденный сплав (БОС) АК7М2 в виде гранул получали пропусканием жидкого металла через подогретое до 500 °С металлическое сито и путем последующей заковки каплей в воде с температурой 20 °С. При заковке в воде капли алюминиевого расплава охлаждались со скоростью 10^2 - 10^4 К/с. Сито использовали с размерами отверстий диаметром от 2 до 25 мм. За счет этого получали гранулы округлой формы, из которых путем сортировки отбирали фракции размером 5, 10 и 20 мм.

Пластинки толщиной 0,3-0,5 мм получали на вращающемся медном диске по методике, разработанной на кафедре технологии литейных процессов МИСиС. При этом они охлаждались со скоростью 10^5 - 10^6 К/с.

Для модифицирования сплава АК7М2 в его расплав при температуре 720 °С вводили БОС АК7М2 в виде гранул и пластин в количестве 0,5, 1, 2 и 3 % от массы жидкого металла.

Механические свойства сплава АК7М2 представлены на рис. 1.

Из рис. 1 следует, что с повышением количества вводимого в расплав БОС АК7М2 в виде гранул и тонких пластин, предел прочности на разрыв и относительное удлинение сплава АК7М2 увеличиваются. При этом, с уменьшением размера гранул БОС достигаемый уровень механических свойств сплава АК7М2 повышается. Наибольшие показатели этих свойств достигаются при обработке БОС в виде пластинок толщиной 0,3-0,5 мм. Для выявления природы различного модифицирующего воздействия разных видов БОС исследовали микроструктуру гранул и пластин (рис. 2). Результаты количественного анализа параметров микроструктуры приведены на таблице 2.

Из таблицы 2 следует, что с повышением скорости охлаждения при кристаллизации БОС размер зерна уменьшается, а их количество на одинаковой площади шлифа увеличивается. При этом наиболее дисперсную структуру имеет БОС – модификатор в виде пластины. Он же обеспечивает достижение наибольших значений механических свойств сплава АК7М2. БОС – модификатор АК7М2 в виде гранул диаметром 5 мм и пластин толщиной 0,3-0,5 мм обеспечивают повышение предела прочности на разрыв на 10-12 % и 18-20 %, а относительное удлинение – в 1,5 и в 2,2 раза соответственно.

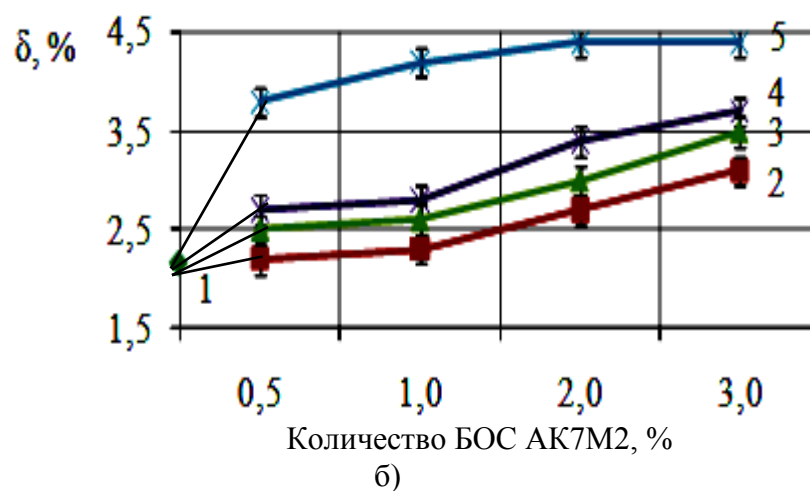
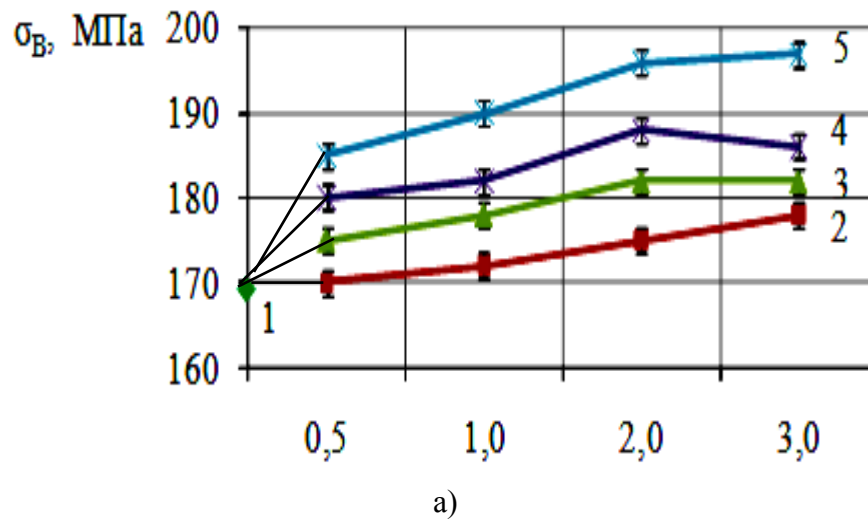


Рис. 1. Зависимость предела прочности на разрыв (а) и относительного удлинения (б) от количества введенного БОС АК7М2:

1 – исходный сплав АК7М2; 2, 3, 4 – гранулы диаметром 20, 10 и 5 мм соответственно;
5 – пластинки толщиной 0,3-0,5 мм

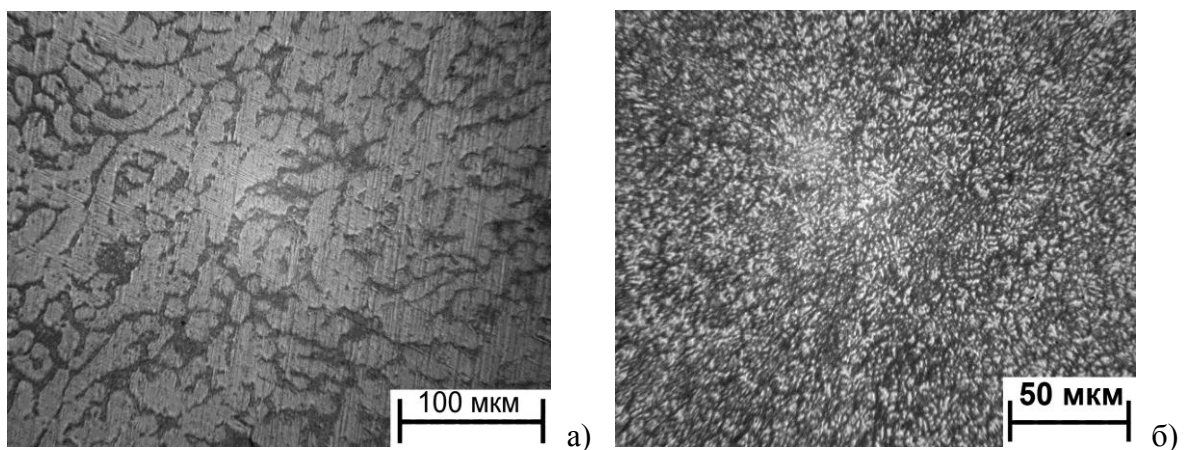


Рис. 2. Микроструктура БОС АК7М2 в гранулах диаметром 5 мм (а) и пластинках толщиной 0,5 мм (б)

Таблица 2 – Характеристика структуры БОС в виде гранул и пластин

№ п/п	Модификатор	Средний размер зерна, мкм	Количество зерен, шт / см ²
1	Гранулы Ø 20 мм	160	3280
2	Гранулы Ø 10 мм	130	4200
3	Гранулы Ø 5 мм	120	6900
4	Пластинки толщиной 0,3-0,5 мм	5-10	$6 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^6$

Таким образом, при вводе в расплав АК7М2 быстроохлажденного сплава такого же химического состава, он выполняет функцию модификатора для сплава АК7М2, так как измельчает его структуру. Модифицирующее воздействие закаленного из жидкого состояния сплава АК7М2 на матричный расплав идентичного состава может быть обусловлено несколькими факторами. Этому способствует внесение в расплав вместе с шихтой инородных частиц – потенциальных центров кристаллизации фазы α_{Al} . Кроме того, нельзя исключать и фактор образования в алюминиевом расплаве новых дисперсных частиц, в том числе и оксида алюминия. Но в основном, на наш взгляд, оно является следствием формирования в расплаве локальных зон растворения модификатора, в которых содержатся мелкие кристаллы α_{Al} , являющиеся, по существу, идеальными готовыми центрами кристаллизации α_{Al} из базового расплава.

2.4 Исследование влияния быстроохлажденных модификаторов с титаном и бором на структуру и свойства сплава АК7М2

Исследовали модифицирующее воздействие на сплав АК7М2 быстро-охлажденных модификаторов Al-5Ti, Al-20Ti и Al-5Ti-B и оценивали их эффективность в сравнении с аналогичными модификаторами, изготовленными известными производителями.

В Al-Ti лигатурах, согласно диаграмме состояния Al-Ti, присутствует титано-алюминиевый интерметаллид $TiAl_3$ с температурой плавления 1340 °С, который является центром кристаллизации фазы α_{Al} .

Лигатуры Al-5Ti и Al-20Ti готовили в виде слитков толщиной 6 и 20 мм и пластинок толщиной 0,3-0,5 мм, которые охлаждались при затвердевании со скоростями $10 \cdot 10^2$, 40-50 и $10^5 \cdot 10^6$ К/с соответственно. Влияние этих лигатур на механические и литейные свойства сплава АК7М2 изучали при расходе их в количестве 0,2-0,5 масс. %.

Зависимость предела прочности на разрыв и относительного удлинения сплава АК7М2 от количества модификаторов Al5Ti и Al20Ti представлена на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что с увеличением количества вводимого модификатора, независимо от его химического состава, механические свойства сплава АК7М2 повышаются. Максимальные механические свойства ($\sigma_B = 235$ МПа, $\delta = 4\%$) достигаются при модифицировании лигатурами в виде пластин толщиной 0,3-0,5 мм.

Средняя твердость на образцах сплавов АК7М2, модифицированных лигатурами: Al-5Ti в виде слитка толщиной 20 мм и пластинки толщиной 0,3-0,5 мм составляет 82 НВ и 88 НВ соответственно, а лигатурами Al-20Ti в виде слитка толщиной 6 мм и пластинок толщиной 0,3-0,5 мм – 87 НВ и 90 НВ соответственно.

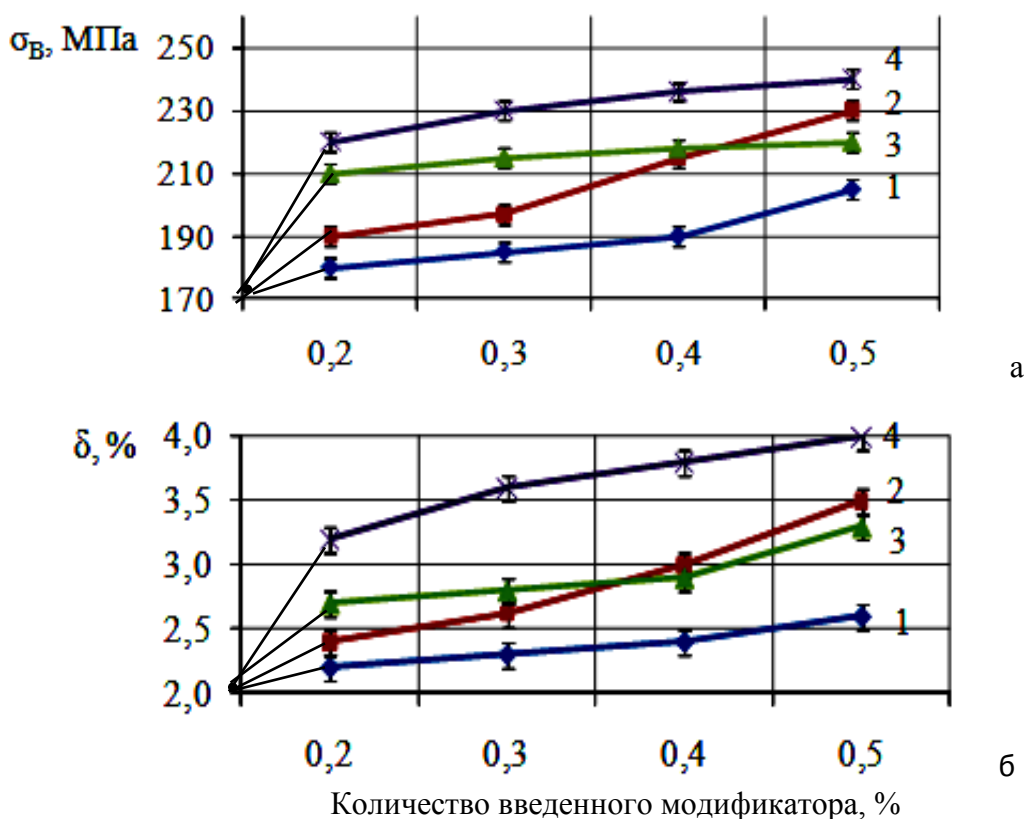
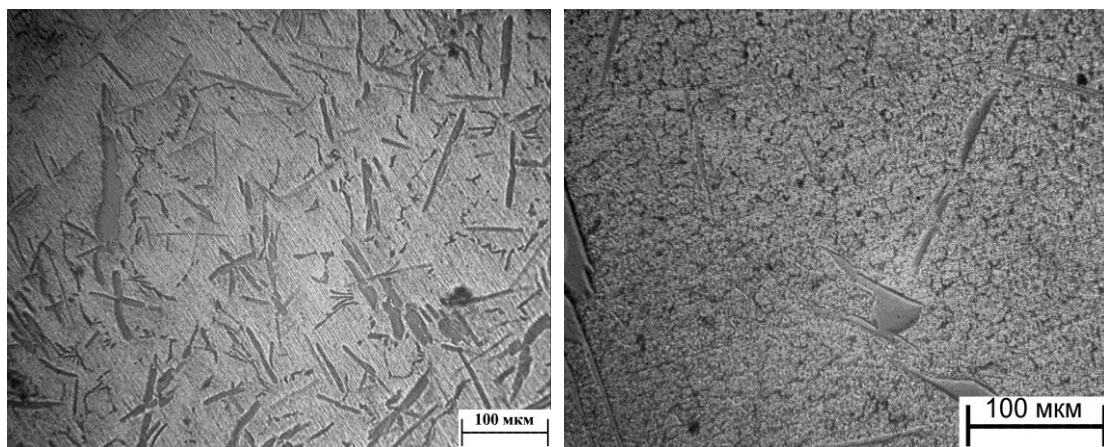


Рис. 3. Зависимость предела прочности на разрыв сплава АК7М2 (а) и относительного удлинения (б) от количества вводимого модификатора

1 – Al-5Ti, слиток толщиной 20 мм; 2 – Al-5Ti, пластинка толщиной 0,3-0,5 мм;
3 – Al-20Ti, пластина толщиной 6 мм; 4 – Al-20Ti, пластинка толщиной 0,3-0,5 мм

Результаты анализа микроструктуры модифицирующей лигатуры Al-5Ti приведены на рис. 4.



а)

б)

Рис. 4. Микроструктура модификатора Al-5Ti: а – в виде слитка толщиной 20 мм, б – в виде пластинки толщиной 0,3 мм

Размеры и количество интерметаллидов в лигатурах Al-5Ti и Al-20Ti представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Размеры и количество интерметаллидов в лигатурах Al-5Ti и Al-20Ti

Лигатура	Параметры интерметаллидной фазы $TiAl_3$			
	Объемная доля, %	Размер, мкм		Количество, шт./см ²
		длина	ширина	
Al-5Ti, слиток, h = 20 мм	4,2	118	20	620
Al-5Ti, пластинка h = 0,3 мм	5,6	6	2	9 000
Al-20Ti, пластина, h = 6 мм	4,8	96	12	600
Al-20Ti, пластинка, h = 0,3 мм	6,4	5	1	12 000

Анализируя данные рис. 4 и таблицы 3, можно заключить, что с увеличением скорости охлаждения лигатур размер интерметаллидной фазы $TiAl_3$ уменьшается в 20 раз и достигает минимального значения 5 мкм, а их количество увеличивается в лигатурах Al-5Ti и Al-20Ti в 13 и 20 раз соответственно. Таким образом, можно утверждать, что повышение механических свойств сплава АК7М2 происходит вследствие ввода в расплав большого количества мелкодисперсных частиц $TiAl_3$ из лигатур, закаленных из жидкого состояния. При этом, при прочих равных условиях, чем больше скорость охлаждения модифицирующих лигатур, тем выше механические свойства сплава АК7М2.

Установлено, что при обработке расплава АК7М2 модификаторами Al-5Ti и Al-20Ti жидкотекучесть его изменяется, и это изменение зависит от содержания титана и

способа получения модификатора. Чем выше скорость охлаждения и меньше содержание титана, тем выше жидкотекучесть расплава, что показано в таблице 4.

Таблица 4 – Показатели жидкотекучести сплава АК7М2 при различных вариантах его обработки

Без обработки	Обработка 0,5 масс. % Al-5Ti		Обработка 0,5 масс. % Al-20Ti	
	h = 20мм	h = 0,3-0,5 мм	h = 6 мм	h = 0,3-0,5 мм
Жидкотекучесть, мм	620	632	580	596

Лигатура Al-5Ti-B является наиболее эффективным модификатором для доэвтектических алюминиевых сплавов вследствие того, что в ней одновременно содержатся титан и бор и потому в модификаторе образуется больше центров кристаллизации фазы α_{Al} в виде интерметаллидов TiB_2 и $(Al,Ti)B_2$. Поэтому в работе исследовали влияние на структуру и механические свойства сплава АК7М2 закаленных из жидкого состояния модификаторов Al-5Ti-B в виде пластин толщиной 0,3-0,5 мм. В качестве исходной шихты использовали модификаторы в виде прутков диаметром 9,5 мм производства двух зарубежных компаний: I - «Affilips Master Alloys» (Бельгия) и II - «Aliastur-S.A.» (Испания). Эффективность модифицирующего воздействия закаленных модификаторов сравнивали с эффективностью прутковых модификаторов I и II.

Механические свойства сплава АК7М2, модифицированного лигатурами Al-5Ti-B представлены на рис. 5.

Из рисунка 5 следует, что с увеличением количества введенного модификатора Al-5Ti-B механические свойства сплава АК7М2 повышаются. При модифицировании сплава АК7М2 лигатурой Al-5Ti-B в виде пластинок, предел прочности на разрыв повышается на 10-12 %, а относительное удлинение – на 28-30 % по сравнению с модифицированием этого же сплава лигатурами в виде прутка.

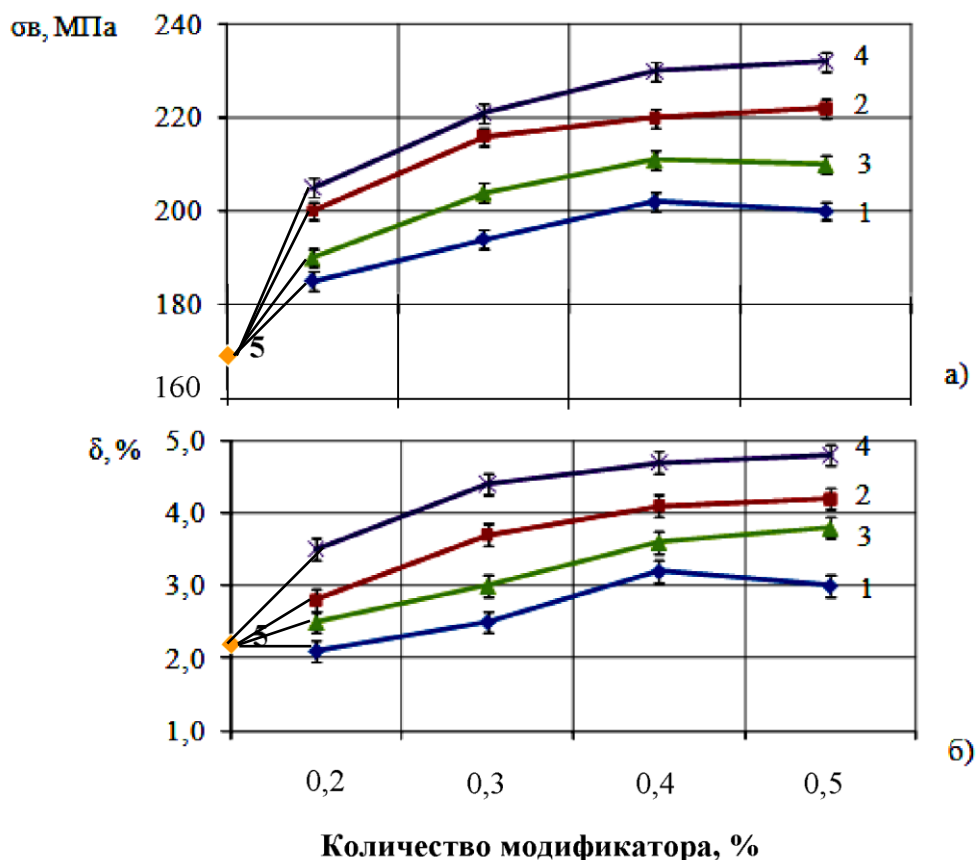


Рис. 5. Зависимость предела прочности на разрыв (а) и относительного удлинения (б) сплава АК7М2 от количества введенного модификатора Al-5Ti-B:

1 и 3 – прутки диаметром 9,5 мм из лигатур I и II, соответственно; 2 и 4 – пластинки толщиной 0,3- 0,5 мм, изготовленные из лигатур I и II, соответственно; 5 – исходный сплав АК7М2

На рис. 6 представлены микроструктуры прутковой и пластинчатой лигатур. В лигатурах, наряду с фазой α_{Al} , присутствуют интерметаллиды $TiAl_3$ и TiB_2 . Размеры и количество интерметаллидных фаз представлены в таблице 5.

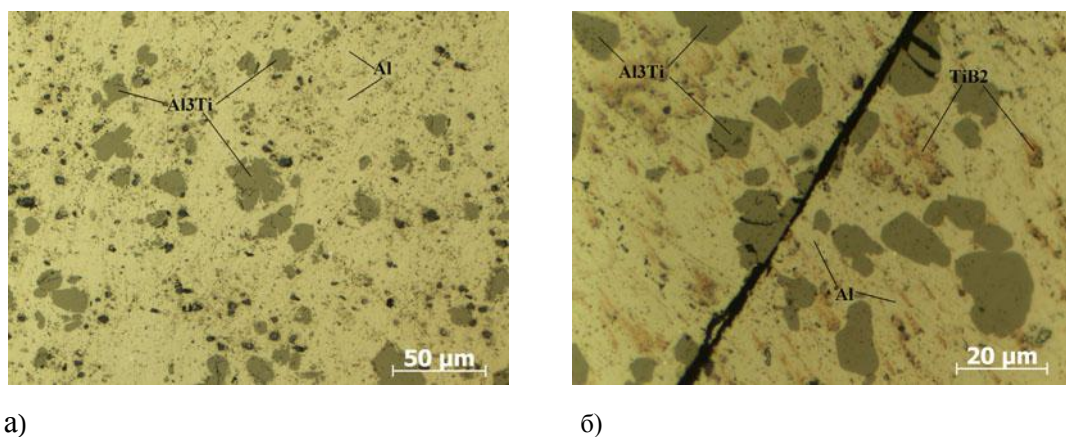


Рис. 6. Микроструктура лигатуры Al-5Ti-B: а – в виде прутка диаметром 9,5 мм (II); б – в виде пластинки толщиной 0,3 мм

Таблица 5 – Размеры и количество интерметаллидных фаз в лигатуре Al5TiB

Вид модификатора Al-5Ti-B	Интерметал- лидная (ИМ) фаза	Суммарное количество фазы, %	Размер ИМ, мкм	Количество ИМ, шт/см ²	Скорость охлаждения, К/с
Пруток, Ø 9,5 мм	TiB ₂	9,5	4-6	400	150-200
	Al ₃ Ti		40-50		
Пластинка, h = 0,5мм	TiB ₂	10,2	0,1-0,2	16000	10 ⁵ -10 ⁶
	Al ₃ Ti		2-3		

Из таблицы 5 следует, что размер интерметаллидных фаз в пластинках, закаленных из жидкого состояния, меньше в 20-30 раз, а их количество больше в 40 раз по сравнению с интерметаллидными фазами в прутке Ø 9,5 мм.

Характеристика макроструктуры сплава АК7М2, модифицированного лигатурой Al-5Ti-B, представлена в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристика макроструктуры сплава АК7М2

Вид модификатора Al-5Ti-B	Количество Ti, масс. % (по вводу)	Количество B, масс. % (по вводу)	Средний размер зерна, мм	Количество зерен, шт / см ²
Пруток, Ø 9,5 мм	0,1	0,02	12,5	8
Пластинка, h = 0,5 мм	0,1	0,02	8,3	12

Из таблицы 6 следует, что в сплаве АК7М2, модифицированном лигатурой Al-5Ti-B в виде пластинок толщиной 0,3 мм, средний размер зерна уменьшается в 1,5 раза, а количество зерен увеличивается в 1,6 раза. При этом средняя твердость на образцах АК7М2, модифицированного лигатурой Al-5Ti-B в виде прутка диаметром 9,5 мм составляет 87-90 НВ, а в виде пластинок толщиной 0,5 мм – 85-86 НВ.

На основании полученных результатов можно утверждать, что механические свойства сплава АК7М2 коррелируют со структурой лигатур Al-5Ti-B. При этом максимальный уровень механических свойств сплава достигается при введении лигатуры в виде пластинок, охлажденных со скоростью 10⁵-10⁶ °С/с, что связано с введением в расплав большого количества готовых центров кристаллизации фазы α_{Al} и, как следствие, с измельчением его макроструктуры.

Таким образом, при модифицировании лигатурами Al-5Ti, Al-20Ti и Al-5Ti-B в виде пластинок толщиной 0,5 мм, достигаются более высокие механические свойства сплава АК7М2 по сравнению с модифицированием лигатурами в виде прутка диаметром 9,5 мм и слитков толщиной 6 и 20 мм. Это обусловлено более высокой модифицирующим

воздействием быстро-охлажденных лигатур вследствие формирования в них при скорости охлаждения 10^5 - 10^6 °C/с большого количества мелкодисперсных интерметаллидных фаз – центров кристаллизации первичной фазы α_{Al} . Максимальный уровень механических свойств сплава АК7М2 достигаемый при применении лигатуры Al-5Ti-B в виде пластинок толщиной 0,5 мм составляет: $\sigma_b = 235$ МПа, $\delta = 4,4$ %.

2.5 Исследование влияния модифицирующей лигатуры 50Cu-50Zr, закаленной из жидкого состояния, на структуру и свойства сплава АК7М2

Для модифицирования доэвтектических силуминов в качестве модификаторов широко применяются титан, бор и цирконий. Причем, если титан и бор часто применяются совместно, то цирконий, как правило, применяют только отдельно. Сведения о модифицирующем воздействии циркония противоречивы. Связано это во многом с трудностями и нестабильностью его ввода в расплав алюминия, особенно при получении лигатур Al-Zr с содержанием циркония более 10 %.

В связи с этим в работе исследовали возможность обработки расплава цирконием с помощью быстроохлажденной лигатуры Cu-Zr, которая ранее не применялась для модифицирования алюминиевых сплавов. Сплав системы Cu-Zr более технологичен в изготовлении и применении, чем сплав системы Al-Zr, при этом может содержать в своем составе до 50 % циркония. Лигатура 50Cu-50Zr плавится при температуре 895 °C, что не требует высокого перегрева алюминиевого расплава для её усвоения.

Цирконий для алюминиевых сплавов является модификатором первого рода. С алюминием он образует интерметаллидное соединение типа $ZrAl_3$, которое в структуре сплава выделяется в форме иголок. Температура плавления интерметаллида $ZrAl_3$ составляет 1595 °C. Разница межатомных расстояний для интерметаллида $ZrAl_3$ и алюминия, по данным Мальцева М.В., составляет 7-8 %. Поэтому интерметаллид $ZrAl_3$ может быть активной подложкой для образования центров кристаллизации в алюминиевых сплавах.

В работе исследовали лигатуру 50Cu-50Zr и её влияние на структуру и свойства сплава АК7М2. Лигатуру готовили по технологии, разработанной на кафедре ТЛП МИСиС. Скорость охлаждения при кристаллизации лигатуры составляла 10^6 - 10^7 К/с. Лигатуру Cu50-Zr50 применяли в качестве модификатора в следующих видах: вафельной пластинки толщиной 6 мм; аморфной и отожженной лент толщиной 0,08 мм и шириной 10 мм. Внешний вид лигатуры 50Cu-50Zr в виде аморфной ленты представлен на рисунке 7.

Механические свойства сплава АК7М2 представлены в таблице 7.

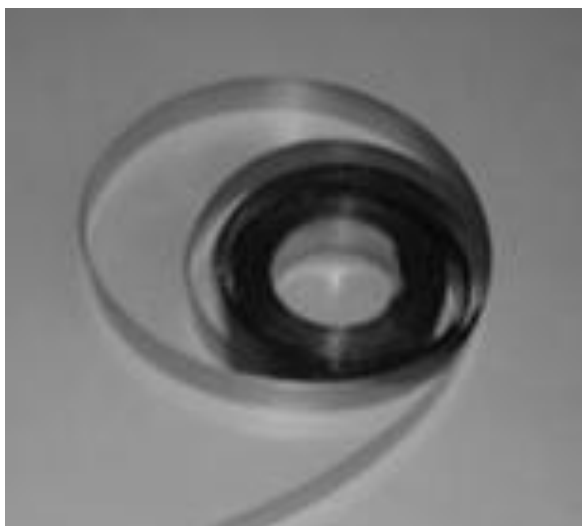


Рис. 7. Аморфная лента толщиной 0,08 мм

Анализ результатов показывает, что модифицирование лигатурой Cu50-Zr50 в виде аморфной ленты ЗЖС, изготовленной при скорости охлаждения 10^6 - 10^7 К/с, позволяет повысить предел прочности на разрыв сплава АК7М2 на 34 %, пластичность в **2,5** раза по сравнению с немодифицированным сплавом и на 22 % и в 1,4 раза, соответственно, по сравнению с модифицированием лигатурой в виде пластинки толщиной 6 мм. Твердость сплава АК7М2 при модифицировании его лигатурами в виде ленты и пластинки практически остается на одинаковом уровне: 80-85 НВ и по сравнению с немодифицированным сплавом повышается на 23 %.

Таблица 7 – Влияние модификаторов на механические свойства сплава АК7М2

Вариант обработки	Количество Zr, масс. % (по вводу)	Прочность, σ_b , МПа	Пластичность, δ , %	Твердость НВ
Без обработки	-	170	1,8	70
Обработка пластинами $h = 6$ мм	0,05	180	3,0	80
	0,1	185	3,6	86
	0,15	186	4,2	90
Обработка аморфной лентой	0,05	215	4,6	78
	0,1	224	5,4	82
	0,15	228	5,8	86
Обработка отожженной лентой	0,05	210	4,4	80
	0,1	220	4,5	84
	0,15	222	5,1	86

Исследование микроструктуры отожженной аморфной ленты показало, что при нагреве до 400 °С в её структуре выделяется значительное количество частиц интерметаллидной цирконийсодержащей фазы, возможно CuZr, размером ≤ 2 мкм (рис. 8).

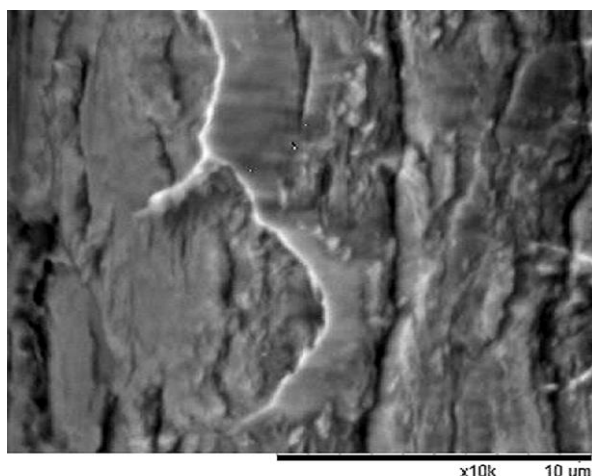


Рис. 8. Микроструктура отожженной аморфной ленты толщиной 0,08 мм

При введении отожженной ленты в расплав АК7М2 эти частицы могут являться готовыми центрами кристаллизации первичной фазы α_{Al} . Параллельно в расплаве могут образовываться интерметаллидные соединения типа Al_3Zr . При отжиге лента теряет прочность и становится хрупкой вследствие выделения из аморфного сплава интерметаллидов CuZr.

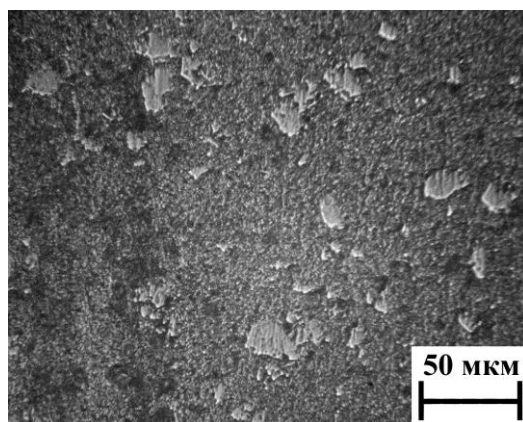
Исследовали влияние циркония на макроструктуру сплава АК7М2. Полученные результаты приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Характеристика макроструктуры сплава АК7М2, модифицированного лигатурой 50Cu-50Zr

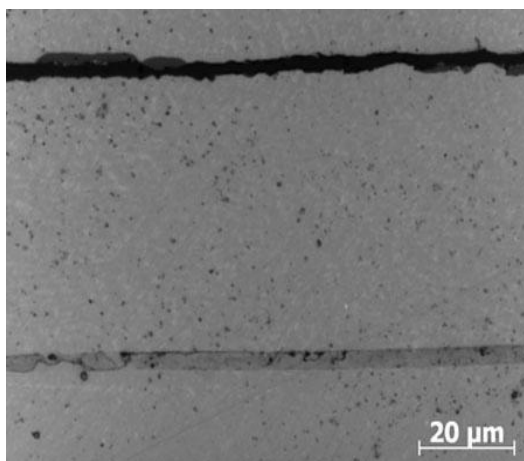
№ п/п	Вариант обработки	Количество Zr, масс. % (по вводу)	Средний размер зерна, мм	Количество зерен, шт./см ²
1	Без модификатора	-	13,3	7,5
2	Обработка аморфной лентой из Cu50-Zr50	0,1	8,7	11,5
3	Обработка отожженной лентой из Cu50-Zr50	0,1	8,0	12,5

Из таблицы видно, что в модифицированных сплавах средний размер зерна уменьшается на 60 %, а количество зерен на фиксированной площади увеличивается на

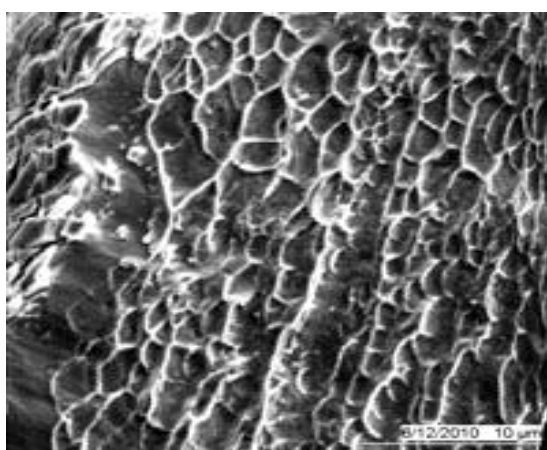
67 % по сравнению с немодифицированным сплавом. Микроструктуры лигатуры 50Cu-50Zr в виде пластинки толщиной 6 мм и аморфной ленты толщиной 0,08 мм представлены на рис. 9.



а)



б)



в)

Рис. 9. Микроструктура лигатуры 50Cu-50Zr:

а – пластинка толщиной 6 мм, х50; б – аморфная лента толщиной 0,08 мм (шлиф);
в – аморфная лента толщиной 0,08 мм (излом)

Сравнительные исследования микроструктур и фазового состава в виде пластинки толщиной 6 мм и ленты толщиной 0,08 мм показали, что в лигатурах в виде ленты количество интерметаллидов значительно больше и их размеры существенно меньше и достигают субмикронного значения.

Более высокий модифицирующий эффект аморфной ленты можно объяснить большим количеством интерметаллидов и меньшими их размерами, а также образованием при расплавлении ленты в среде алюминиевого расплава значительного количества активных подложек – центров кристаллизации первичной фазы α_{Al} .

Из данных, приведенных в таблице 7, следует, что модифицирующее воздействие лигатуры 50Cu-50Zr в виде аморфной и отожженной лент сопоставимо. Механические свойства сплава АК7М2, обработанного ими, находятся на одинаковом уровне.

Проведены эксперименты по модифицированию алюминиевого сплава АК7М2 лигатурой 50Cu-50Zr в виде аморфной ленты подачей её в струю расплава при переливе его из печи в ковш. В процессе подачи аморфной ленты в струю расплава она подогревалась до 400 °С с целью выделения в структуре субмикронных цирконий-содержащих частиц, которые, попадая в расплав, являются готовыми центрами кристаллизации фазы α_{Al} . В результате такой обработки получили следующие показатели средних значений механических свойств сплава АК7М2: $\sigma_b = 202$ МПа, $\delta = 4,6$ %.

Учитывая высокую прочность аморфной ленты 50Cu-50Zr, представляется целесообразным ее введение в струю заливаемого в литейные формы расплава при автоматизации процесса заливки на линиях и конвейерах. Расчеты показали, что время нагрева ленты до температуры 400 °С составляет примерно 1 с.

Таким образом, цирконий в составе лигатуры Cu50-Zr50 является активным модификатором для доэвтектических алюминиевых сплавов. Охлаждение расплава лигатуры Cu50-Zr50 со скоростью 10^6 - 10^7 К/с (закалка из жидкого состояния) обеспечивает существенное измельчение интерметаллидов до 1 мкм и увеличение их количества в лигатуре. При этом модифицирование лигатурой Cu50-Zr50 в виде ленты позволяет повысить прочность сплава АК7М2 на 34 % и пластичность в 2,5 раза по сравнению со сплавом, модифицированным этой же лигатурой в виде пластины толщиной 6 мм. Лигатура Cu50-Zr50 в виде ленты может быть использована в качестве модификатора, подаваемого в струю сплава, при заливке литейных форм на автоматических линиях и конвейерах.

2.6 Опытное-промышленное опробование

Опытное-промышленное опробование проводили в литейном цехе ОАО «Калугатрансмаш» при производстве из алюминиевого сплава АК7М2 трех наименований отливок транспортного машиностроения (рис. 10).

Сплав плавил в газовой тигельной печи емкостью 300 кг. В качестве шихты применяли сплавы АК12 и АК5М2 ГОСТ 1583-95 в соотношении 30/50 и возврат собственного производства в количестве 30 % от массы металлозавалки. После расплавления шихты расплав перегревали до 780-800 °С. Модифицировали его в ковше при температуре 720 °С и после перемешивания разливали по формам. Параллельно заливали образцы для контроля механических свойств.



Щит задний, ГК 00.001



Щит задний, ГЧ 30.100

Рис.10. Отливки-представители

Условия проведения опробования и полученные результаты приведены в табл. 9.

Таблица 9 – Составы и количество применяемых модификаторов

№ п/п	Состав модификатора	Количество модификатора, масс. %	Наименование и обозначение отливки	Количество отливок	σ_b , МПа	δ , %
1	Сплав АК7М2, пластинка, h = 0,5 мм	3	Корпус коробки КШГ 1.01.20.021	5	186	3,1
2	Al-5Ti-B, пластинка, h= 0,3 мм	0,5	Щит задний ГК 00.001	5	218	4,6
3	50Cu-50Zr, лента, h = 0,08 мм	0,2	Щит задний ГЧ 30.100	5	226	5,4

Типовая структура сплава АК7М2, модифицированного аморфной лентой 50Zr-50Cu в отливках представлена на рис.11.

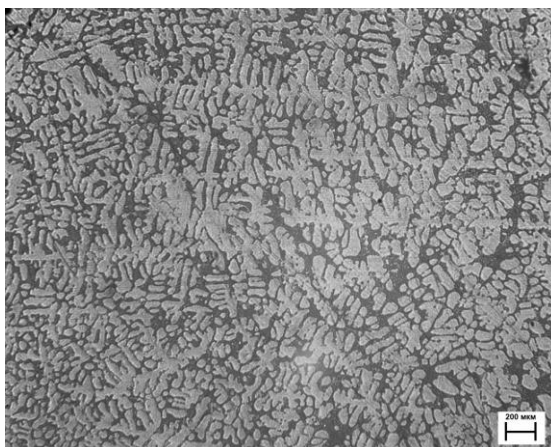


Рис. 11. Типовая структура сплава АК7М2, модифицированного аморфной лентой 50Zr-50Cu в отливках

Выборочно отливки разрезали в наиболее дефектных местах для проверки на наличие дефектов пористости. Остальные опытные отливки прошли механическую обработку, полученные детали признаны ОТК годными и допущены на сборку. Успешно прошли стандартные испытания в составе изделий на стендах испытательной станции.

3. ВЫВОДЫ

1. Установлено, что сплав АК7М2, полученный закалкой из жидкого состояния, оказывает на базовый расплав такого же состава модифицирующее воздействие, которое возрастает по мере увеличения дисперсности его структуры.

2. Разработаны технологии получения закаленного из жидкого состояния сплава АК7М2 в виде гранул диаметром 5-20 мм и пластинок толщиной 0,5 – 0,6 мм, применение которых обеспечивает, при прочих равных условиях, повышение предела прочности на разрыв на 10-15 % и относительного удлинения в 1,5-2,2 раза.

3. Впервые проведены сравнительные исследования структуры и свойств сплава АК7М2, модифицированного закаленными из жидкого состояния лигатурами Al-Ti, Al-Ti-B, Cu-Zr и известными лигатурами такого же состава, изготовленными в виде чушек и прутков, которые показали, что более высокий модифицирующий эффект достигается при модифицировании лигатурами, закаленными из жидкого состояния при скоростях охлаждения 10^5 - 10^7 К/с, обеспечивая повышение предела прочности на разрыв на 30-35 % и относительного удлинения в 2,0-2,5 раза.

4. Впервые исследована в качестве модификатора доэвтектического силумина лигатура 50Cu-50Zr, полученная закалкой из жидкого состояния при скоростях охлаждения 10^6 - 10^7 К/с в виде аморфной ленты толщиной 0,08 мм с прочностью 500 МПа, и показано, что цирконий в составе лигатуры 50Cu-50Zr является активным модификатором для доэвтектических алюминиевых сплавов и обеспечивает при расходе лигатуры 0,2 % от массы модифицируемого сплава повышение предела прочности на разрыв сплава АК7М2 на 34 % и относительного удлинения в 2,5 раза по сравнению с не модифицированным сплавом и на 24 % и в 1,4 раза, соответственно, по сравнению с сплавом, модифицированным пластинами толщиной 6 мм.

5. Установлены зависимости структуры и механических свойств сплава АК7М2 от количества введенного в расплав модификатора 50Cu-50Zr в виде лент толщиной 0,08 мм, полученных закалкой из жидкого состояния со скоростью 10^6 - 10^7 К/с, и показано, что в аморфном и отожженном состояниях они обеспечивают одинаковый результат модифицирования, при этом их модифицирующее воздействие обусловлено как введением в расплав готовых центров кристаллизации в виде интерметаллида ZrCu, так и формированием в алюминиевом расплаве интерметаллидов Al_3Zr .

6. Разработанные быстроохлажденные модификаторы рекомендуются для модифицирования доэвтектических алюминиевых сплавов с целью измельчения первичной фазы α_{Al} , при этом модификатор 50Cu-50Zr предназначается преимущественно для модифицирования медьсодержащих алюминиевых сплавов, а принцип самомодифицирования сплава АК7М2 таким же сплавом, закаленным из жидкого состояния, может быть применим для широкой номенклатуры алюминиевых сплавов.

7. Проведено опытно-промышленное опробование разработанных модификаторов, закаленных из жидкого состояния, в условиях литейного цеха ОАО "Калугатрансмаш".

Из сплава АК7М2, приготовленного с применением новых типов модификаторов, получена опытная партия из трех наименований фасонных отливок транспортного машиностроения с повышенными показателями механических свойств, которые прошли все требуемые испытания и признаны годными.

8. Ожидаемый экономический эффект от внедрения новых модификаторов составит 11-12 тыс. руб. на тонну годных отливок, в зависимости от применяемого вида модификатора, за счет удешевления шихты и снижения массы отливок.

Основные результаты работы представлены в публикациях:

1. Филиппова И.А., Дибров И.А., Белов В.Д. Повышение механических свойств алюминиевых сплавов модифицированием лигатурами, полученными закалкой из жидкого состояния // Литейщик России. – 2009. – № 3. – с. 30-33.
2. Филиппова И.А. , Дибров И.А., Белов В.Д. Повышение механических свойств алюминиевых отливок методом модифицирования лигатурами, полученными закалкой из жидкого состояния// Труды девятого съезда литейщиков России. – Уфа: РАЛ. – 2009. – с. 101-104.
3. Филиппова И.А., Дибров И.А., Белов В.Д. Модифицирование алюминиевых сплавов лигатурами, полученными закалкой из жидкого состояния // Литейщик России. – 2009. – № 12. – с. 35-38
4. Филиппова И.А., Дибров И.А., Белов В.Д. Модифицирование доэвтектических алюминиевых сплавов лигатурами, полученными закалкой из жидкого состояния. Литейное производство сегодня и завтра. Труды 8-й Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург: С-ПбГПУ, 2010. – с. 81-88.
5. Утешев Г.В., Филиппова И.А. Реконструкция литейного цеха ОАО «Калугатрансмаш» // Литейщик России. – 2009. – № 4. – с. 25-27
6. Filippova I.A., Dibrov I.A., Belov V.D. Modification of Aluminium Alloys with Master Alloys Obtained by Quenching from Liquid State // Revista de Turnatorie. – 2010. – № 5-6. – с. 35-37.
7. Утешев Г.В., Филиппова И.А. Изготовление выплавляемых моделей литниковой системы методом свободной заливки // Литейщик России, 2009. – № 5. – с. 20-22.
8. Белов В.Д., Филиппова И.А., Дибров И.А. Модифицирование доэвтектических алюминиевых сплавов циркониевыми лигатурами, закаленными из жидкого состояния. // Литейщик России. – 2011. – № 1. – с. 41-44.
9. Филиппова И.А., Белов В.Д., Дибров И.А. Модифицирование алюминиевых сплавов лигатурами Al-Ti-B, закаленными из жидкого состояния // Литейщик России. – 2011. – № 3. – с. 38-40.

