

Том 4 № 1 2017

ISSN 2313-1020

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

**МАТЕРИАЛЫ ЧЕТВЕРТОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

г. Новосибирск, 29 марта 2017 г.

ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING

SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL ARTICLES

**Proceedings of the Fourth International
Scientific and Practical Conference**

Novosibirsk, 29 March 2017

НОВОСИБИРСК



АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ISSN 2313-1020

Том 4 №1 2017 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

Батаев Анатолий Андреевич - доктор технических наук, профессор, почётный работник высшего профессионального образования, ректор НГТУ, г. Новосибирск (Российская Федерация)

Члены совета

Федеративная Республика Бразилия: **Альберто Морейра Хорхе**, профессор, доктор технических наук, Федеральный университет, г. Сан Карлос

Федеративная Республика Германия: **Монико Грайф**, профессор, доктор технических наук, Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук, г. Рюссельсхайм, **Томас Хассел**, доктор технических наук, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен, **Флориан Нюрнбергер**, доктор технических наук, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен

Республика Беларусь: **Пантелеенко Ф.И.**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Украина: **Ковалевский С.В.**, доктор технических наук, профессор, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

Российская Федерация: **Анисименко Г.Е.**, директор производственно-технической фирмы «Сигма-инструмент», г. Новосибирск, **Атапин В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Балков В.П.**, зам. ген.директора АО «ВНИИинструмент», канд. техн. наук, г. Москва, **Батаев В.А.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Буров В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Герасенко А.Н.**, директор ООО НПКФ «Машсервисприбор», г. Новосибирск, **Иванцовский В.В.**, доктор техн. наук, доцент, НГТУ, г. Новосибирск, **Кирсанов С.В.**, доктор техн. наук, профессор, ТПУ, г. Томск, **Коротков А.Н.**, доктор техн. наук, профессор, академик РАЕ, КузГТУ, г. Кемерово, **Кудряшов Е.А.**, доктор техн. наук, профессор, Засл. деятель науки РФ, ЮЗГУ, г. Курск, **Макаров А.В.**, доктор техн. наук, с.н.с., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург, **Овчаренко А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, БТИ АлтГТУ, г. Бийск, **Рахимянов Х.М.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Сараев Ю.Н.**, доктор техн. наук, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, г. Барнаул, **Янюшкин А.С.**, доктор техн. наук, профессор, БрГУ, г. Братск

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Скиба Вадим Юрьевич - доцент, канд. техн. наук

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Лобанов Дмитрий Владимирович - профессор, доктор техн. наук

Мартынова Татьяна Геннадьевна - доцент, канд. техн. наук

Плотникова Наталья Владимировна - доцент, канд. техн. наук

Перепечатка материалов из журнала «Актуальные проблемы в машиностроении» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

ИЗДАЕТСЯ С 2014 г.

Периодичность – 1 Том в год

ИЗДАТЕЛЬ ЖУРНАЛА

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Журнал зарегистрирован 31.10.2016 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-67566.

Журнал зарегистрирован в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU.

Адрес редакции:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, к. 137ВЦ, Скиба В.Ю. Тел. (383) 346-17-79

Сайт журнала:

<http://journals.nstu.ru/machine-building>
E-mail: machine-building@mail.ru

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ЧЕТВЕРТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

г. Новосибирск, 29 марта 2017 г.

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- Новосибирский государственный технический университет, научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология · оборудование · инструменты)», г. Новосибирск, Россия
- Выставочная компания «ГТЕ Сибирь», г. Новосибирск, Россия

СООРГАНИЗАТОРЫ

- Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук, г. Рюссельсхайм, Федеративная Республика Германия;
- Ганноверский университет Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен, Федеративная Республика Германия;
- Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина;
- Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь;
- ОАО НПТ и ЭИ «Оргстанкинпром», г. Новосибирск, Россия;
- ООО НПКФ «Машсервисприбор», г. Новосибирск, Россия;
- Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия;
- Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия;
- Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия;
- Бийский технологический институт АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Бийск, Россия;
- Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия;
- Томский политехнический университет, г. Томск, Россия;
- Братский государственный университет, г. Братск, Россия

ПОЧЕТНЫЙ КОМИТЕТ

Члены комитета: *Монико Грайф*, профессор, доктор, Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук (г.Рюссельсхайм), *Томас Хассел*, профессор, доктор, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница (г.Гарбсен), *Флориан Нюрнбергер*, профессор, доктор, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница (г.Гарбсен), *Ковалевский С.В.*, профессор, д.т.н., ДГМА (г.Краматорск), *Пантелеенко Ф.И.*, профессор, д.т.н., член-корреспондент НАН Беларуси, БНТУ (г. Минск), *Афанасьев В.К.*, академик РАЕН, профессор, д.т.н., зав. каф. СибГИУ (г. Новокузнецк), *Буров В.Г.*, профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), *Вандакуров А.Н.*, ген. директор АО "Новосибирский механический завод "Искра", (г.Новосибирск), *Герасенко А.Н.*, директор ООО НПФК «Машсервисприбор» (г.Новосибирск), *Гурьев А.М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. АлтГТУ (г. Барнаул), *Кирсанов С.В.*, профессор, д.т.н., ТПУ (г.Томск), *Марков А.М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. АлтГТУ (г.Барнаул), *Овчаренко А.Г.*, профессор, д.т.н., зав.каф. БТИ АлтГТУ (г. Бийск), *Рассохин В.А.*, ген. директор АО "Швабе - Оборона и Защита", *Рахмянов Х.М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. НГТУ (г. Новосибирск), *Сараев Ю.Н.*, д.т.н, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, *Ситников А.А.*, д.т.н., профессор, АлтГТУ (г.Барнаул), *Стецовский А.С.*, директор подразделения ООО «АйТиИ Экспо» (г. Новосибирск), *Янюшкин А.С.*, профессор, д.т.н., член- корреспондент САН ВШ, академик МАН ВШ, зав. каф. БГУ (г. Братск).

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- *Батаев А.А.*, главный редактор научно-технического и производственного журнала «Обработка металлов», профессор, д.т.н., ректор НГТУ, (г. Новосибирск), **председатель;**
- *Коротков А.Н.*, академик РАЕ, профессор, д.т.н., КузГТУ (г. Кемерово), **сопредседатель.**
- *Атапин В.Г.*, зам. главного редактора журнала «Обработка металлов», профессор, д.т.н., НГТУ (г.Новосибирск), **сопредседатель;**

Члены программного комитета: *Иванцовский В.В.*, , профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), *Ленивцева О.Г.*, к.т.н., (г.Новосибирск), *Лобанов Д.В.*, д.т.н., профессор, БГУ (г. Братск), *Трегубчик П.В.*, гл. технолог ОАО «Новосибирский стрелочный завод», (г. Новосибирск), *Янюльский В.В.*, к.т.н., доцент, декан МТФ НГТУ (г.Новосибирск).

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

- *Скиба В.Ю.*, зам. главного редактора журнала «Обработка металлов», доцент, к.т.н., НГТУ (г. Новосибирск);
- *Волкова М.В.*, Руководитель дирекции отраслевых выставок ООО «АйТиИ Экспо» (г. Новосибирск).

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- Инновационные технологии в машиностроении;
- Технологическое оборудование, оснастка и инструменты;
- Материаловедение в машиностроении;
- Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении.

СОДЕРЖАНИЕ

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Жаргалова А.Д., Еремейкин П.А. Программная система автоматизированного выбора режимов механической обработки тонкостенных деталей	9
Маркова М.И., Дронова О.Б. Управление технологической подготовкой механической обработки партий деталей в условиях серийного производства	15
Маликов А.Г. Разработка метода модифицирования сварного шва скандием, при лазерной сварке сплавов системы Al-Cu-Li и Al-Mg-Li	20
Буслаева В.В., Герасимов Н.В., Демешко П.В., Проскурин Р.С. Особенности обработки керамических материалов на станке с ЧПУ	25
Алфёрова Е.А., Дзян Дилун Возможности конфокальной микроскопии при оценке микрогеометрии поверхности	30
Бычков Н.В., Безнедельный А.И., Гилета В.П. Выбор методов финишной обработки для повышения усталостной прочности деталей двигателя автомобиля	35
Эдигаров В.Р. Исследование температурных полей в рабочей зоне фрикционно-электрического контакта	41

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ОСНАСТКА И ИНСТРУМЕНТЫ

Рычков Д.А., Попов В.Ю. Износостойкость твердосплавного фрезерного инструмента при варьировании скорости резания стеклотекстолитов	47
Павлов Л.Н., Шамина О.Б. Проектирование пресс-формы для термопластавтомата	53
Пантелеенко Ф.И., Данилов А.А. Системный анализ и синтез рациональных методов профилирования некруглых поверхностей	59
Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Сидоренко С.А. Программное обеспечение для формирования базы данных сборного токарного инструмента	65
Бабаев А.С., Чарторийский В.П., Лаптев Н.В. Исследование влияния условий буксирного полирования режущих инструментов на изменение микрогеометрии режущих кромок	75
Нейман Л.А., Щуров Н.И. Анализ динамических характеристик синхронной электромагнитной машины ударного действия с пружинным реверсом бойка	81
Беляева И.А., Глушников В.А., Пыльцын А.М., Косолапова А.Ю. Штамп для реализации комбинированной технологии «вытяжка-обрезка припуска»	88

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Белоцерковский М.А., Григорчик А.Н., Кукареко В.А. Концентрационная неоднородность азотированных слоев в газотермических покрытиях, подвергнутых ионно-лучевой обработке	93
---	----

Максимов А.Б., Ерохина И.С. Влияние предварительной схемы деформации на ударную вязкость низколегированной стали	99
Петров М.Г. Ползучесть и усталость металлов с позиций кинетической концепции разрушения	105
Попова М.В., Малюх М.А., Лаврова Н.Б. Совместное влияние легирования и условий кристаллизации на технологичность и тепловое расширение литых алюминиевых сплавов	112
Кормышев В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Батаев В.А., Кондратова О.А., Никитина Е.Н. Повышение свойств поверхности стали наплавкой и последующей электронно-пучковой обработкой	119
Бережная Е.В. Технологические особенности термообработки деталей, восстановленных электроконтактной наплавкой	126
Рекомендации по написанию научной статьи	131
Подготовка аннотации	133
Правила для авторов	135

УДК 669.715.046.516.2

**СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ И УСЛОВИЙ
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ
И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ЛИТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

*М.В. ПОПОВА¹, доктор техн. наук, профессор
М.А. МАЛЮХ¹, соискатель
Н.Б. ЛАВРОВА², ст. преподаватель
(¹СибГИУ, г. Новокузнецк,
²СФУ, г. Красноярск)*

Малюх М.А. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: starostina_ma1976@mail.ru

Представлены результаты исследований влияния легирования и условий кристаллизации на температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР, α) сплавов алюминия с кремнием и медью в интервале температур испытания 50–450 °С. Показано, что высокоскоростная кристаллизация повышает технологичность и уменьшает ТКЛР двойных силуминов Al–(5–20)%Si в интервале 50–100 °С, а также делает менее выраженной аномалию теплового расширения в интервале 250–350 °С для доэвтектических сплавов. Установлено, что тройные сплавы Al–Si–Cu имеют более низкий ТКЛР, чем двойные сплавы Al–Si и Al–Cu сравнимых концентраций. Результаты исследований могут быть использованы для получения легких сплавов с контролируемым тепловым расширением.

Ключевые слова: алюминий, сплавы алюминий-кремний, сплавы алюминий-медь, температурный коэффициент линейного расширения, кристаллизация, легирование.

Введение

Достижения Российской авиационной и ракетно-космической техники, атомной энергетики, которые сегодня находятся на передовом мировом уровне, связаны с успехами в разработке алюминиевых сплавов. Дальнейшая разработка и реализация «прорывных» технических проектов в самолетостроении, двигателестроении и других отраслях (в том числе создание гиперзвуковых прямоточных ракетных двигателей, многоразовых аэрокосмических самолетов) будет, прежде всего, определяться возможностями материалов [1]. Для обеспечения весового совершенства конструкций, их повышенной надежности и ресурса необходима разработка новых алюминиевых сплавов, обладающих свойствами, обеспечивающими надежность и безопасность эксплуатации конструкции.

Для космического приборостроения необходимо сочетание высокой стабильности размеров в широком интервале температур, коррозионной стойкости и малого удельного веса, так как облегчение выводимых на орбиту конструкций и приборов способствует значительной экономии топлива [2, 3].

Этим требованиям отвечают сплавы Al с Si, так как Al – легкий и пластичный металл, обладающий хорошей коррозионной стойкостью. ТКЛР у него достаточно велик ($\alpha_{0-100} = 23,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), однако легированием кремнием его можно значительно снизить [4]. Эти сплавы немагнитны, характеризуются хорошими литейными свойствами и герметичностью [5, 6]. Большое их достоинство в том, что при понижении температуры ТКЛР становится

ниже, а механические свойства – выше, чем при комнатной температуре. Таким образом, Al–Si-сплавы – самая удачная основа для разработки «летающих материалов».

Медь, также как и кремний, является важнейшим легирующим элементом алюминия. Сплавы системы Al–Si–Cu широко применяются в машиностроении как конструкционные материалы и их свойства постоянно повышаются [7]. Ранее авторским коллективом [8] подробно изучались сплавы Al–Cu, чтобы определить возможность использования Cu в новых композициях легких сплавов с контролируемым тепловым расширением.

Большой предшествующий опыт изучения теплового расширения сплавов Al–Si и Al–Cu позволяет утверждать, что они могут иметь широкий спектр ТКЛР (от 22 до $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), величина которого, в первую очередь, определяется содержанием легирующих элементов [9]. Кроме того, важное значение имеют условия получения сплавов, например, скорость кристаллизации. По данным многих исследователей быстрое охлаждение расплава, а также высокие скорости охлаждения алюминиевых сплавов в процессе кристаллизации способствуют улучшению параметров микроструктуры и благоприятно влияют на физико-механические свойства, в том числе и на ТКЛР [10-13].

Поэтому, *целью настоящей работы* являлось исследование возможности уменьшения ТКЛР алюминиевых сплавов за счет совместного легирования элементами, ТКЛР которых меньше, чем у алюминия, такими как кремний и медь ($\alpha_{\text{Si}} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{\text{Cu}} = 16,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Учитывались также условия приготовления сплавов, а именно – скорость кристаллизации.

Методика экспериментального исследования

Сплавы готовили в лабораторных условиях в печах с силитовыми нагревателями, исключаящими наведение магнитного поля, с соблюдением всех правил подготовки шихты и ведения плавки. Легирующие добавки вводили в виде металлов и лигатур. После растворения легирующих элементов проводили заливку металла с разной скоростью кристаллизации: в алюминиевый кокиль ($\sim 20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$) и между двумя медными плитами – имитация жидкой штамповки ($\sim 100 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$). Высокая скорость кристаллизации применялась с целью фиксации пересыщенного твердого раствора водорода в Al, так как, согласно [14–16], в жидком Al при температуре кристаллизации содержание водорода гораздо больше, чем в твердом. Кроме того, при высоких скоростях кристаллизации силуминов происходит измельчение в их структуре кристаллов первичного и эвтектического кремния, а также частиц CuAl_2 . При этом улучшается технологичность сплавов, т.к. предельная степень деформации до разрушения при нагреве силуминов определяется их микроструктурой, в первую очередь, количеством и размерами кристаллов первичного кремния, а также дисперсностью эвтектики [17].

Из полученных слитков изготавливали образцы для дилатометрического исследования. ТКЛР определяли с помощью дифференциального оптического фоторегистрирующего дилатометра системы Шевенара в интервале температур испытания 50–450 $^\circ\text{C}$, погрешность определения составляла $\pm 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Особенности теплового расширения силуминов, закристаллизованных с различной скоростью, изучали, сравнивая с алюминием А7, полученным по общепринятой технологии – заливкой в алюминиевый кокиль [18, 19].

Результаты и обсуждение

Авторами исследованы сплавы алюминия, содержащие от 1 до 50% Si, залитые с разной скоростью кристаллизации. Результаты определения ТКЛР сплавов приведены в

таблице 1. При изучении теплового расширения доэвтектических сплавов отмечено, что ТКЛР Al при температуре испытания $T_{исп} = 50...100^{\circ}\text{C}$ с увеличением содержания Si, постепенно уменьшается, что важно для приборной техники. Также отмечена возможность существенного снижения ТКЛР при высоких $T_{исп} = 400...450^{\circ}\text{C}$, что представляет значительный интерес для разработки жаропрочных сплавов. Главная особенность изменения ТКЛР для этих сплавов – наличие аномалии расширения при $T_{исп} = 250...350^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о возможности доэвтектических силуминов иметь ТКЛР, значительно больший, по сравнению с алюминием А7.

Таблица 1

Сравнение действия скорости кристаллизации и легирования Si на ТКЛР Al

Сплав	Способ кристаллизации	ТКЛР $\alpha \times 10^6$, град ⁻¹ , при температурах испытания, °C								
		50	100	150	200	250	300	350	400	450
Al	К	21,5	22,3	23,2	23,6	24,3	25,2	25,5	26,5	27,0
Al-5%Si	К	20,0	21,3	22,5	22,9	26,2	30,0	28,1	25,9	24,3
	Ш	18,5	20,3	22,5	22,8	26,2	29,2	22,3	23,0	23,4
Al-10%Si	К	19,6	20,0	20,2	20,5	20,7	21,1	23,9	24,4	24,8
	Ш	18,3	19,4	19,9	21,0	26,2	26,6	21,5	20,7	20,1
Al-15%Si	К	17,9	18,4	18,5	18,8	19,0	19,3	19,7	18,5	18,0
	Ш	16,8	18,2	18,3	19,4	22,4	22,9	19,7	20,1	20,0
Al-20%Si	К	17,4	18,2	18,7	19,2	20,0	19,2	17,2	17,4	17,3
	Ш	16,7	17,1	17,1	17,6	21,1	24,7	17,9	15,6	14,7
Al-25%Si	К	15,7	16,1	16,2	16,5	17,2	18,0	18,3	18,6	19,0
	Ш	15,7	16,1	16,2	17,2	18,0	18,3	18,6	17,8	16,9
Al-30%Si	К	15,2	16,1	16,5	17,3	18,9	17,6	17,4	16,9	14,5
	Ш	14,5	16,5	17,7	17,9	19,2	19,8	18,4	16,6	15,7
Al-40%Si	К	13,5	13,8	13,9	13,1	12,4	11,8	11,9	12,1	12,9
	Ш	13,5	13,7	13,1	13,0	13,5	12,8	11,9	11,7	10,9
Al-50%Si	К	11,1	11,0	10,9	10,9	9,8	9,4	8,9	7,9	6,8
	Ш	10,5	10,6	10,7	10,9	11,0	12,1	12,1	9,9	9,5

Примечание: К – литье в алюминиевый кокиль; Ш – имитация жидкой штамповки.

В сплавах близких к эвтектической концентрации (10 – 15 % Si), залитых с более высокой скоростью, ТКЛР в большей мере снижается при $T_{исп} = 50...100^{\circ}\text{C}$ чем существенно уменьшает аномалию теплового расширения. Если в малокремнистых сплавах максимальные значения ТКЛР в интервале аномалии достигают $\alpha = (27...34) \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, то в сплавах эвтектической концентрации и с малым выходом за нее максимальные значения ТКЛР уменьшаются до $\alpha = (22...23) \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Высокая степень модифицирования структуры приводит к значительному повышению механических свойств (прочностных – более чем на 40 %, при сохранении уровня пластичности) и увеличению технологичности, в частности, предельной степени деформации до разрушения на 25%.

В сплавах Al – (15...20%)Si, где размер выделений Si-фазы еще невелик, кристаллизация с более высокой скоростью увеличивает аномалию. Именно в этих сплавах проявляется максимальное действие высокой скорости кристаллизации, измельчающей выделения кремнистой фазы. Далее при увеличении содержания Si от 25 до 50% резко укрупняются выделения первичного Si, и в меньшей мере проявляется влияние скорости кристаллизации. Однако даже в сплаве Al-50% Si имеются некоторые различия ТКЛР у образцов, закристаллизованных в алюминиевом кокиле и между двумя медными плитами.

После тщательного анализа влияния кремния на тепловое расширение алюминия, подробно изучались сплавы Al–Cu, чтобы определить оптимальное количество Cu в новых композициях легких сплавов с низким ТКЛР. В таблице 2 приведено сравнение действия Cu и Si на ТКЛР алюминия.

Таблица 2

Влияние легирования медью и кремнием на ТКЛР алюминия

Легирующий элемент	Массовая доля, %	Средний ТКЛР $\alpha \times 10^6$, град ⁻¹ , при температурах испытания, °С			
		50-100	150-250	300-350	400-450
А7		22,4	23,6	25,3	26,8
Si	5	20,6	23,8	29,0	25,1
Cu		22,1	24,2	27,5	25,8
Si	10	19,8	20,5	22,5	24,6
Cu		21,4	23,7	26,9	26,2
Si	15	18,2	18,8	19,5	18,3
Cu		21,7	22,5	25,6	23,2
Si	20	17,8	19,3	18,2	17,4
Cu		19,7	21,8	25,5	23,5
Si	25	15,9	16,6	18,2	18,8
Cu		19,2	21,4	24,8	23,4
Si	30	15,6	17,6	17,5	15,7
Cu		19,5	21,1	23,0	25,4

Из представленных данных видно, что до 15% Cu резко увеличивает ТКЛР при температуре испытания $T_{исп.} = 300$ °С (первая аномалия). Здесь α алюминия увеличивается до значений $(27...28) \cdot 10^{-6}$, град⁻¹. После первой аномалии появляется вторая при $T_{исп.} = 400$ °С, которая проявляется в резком снижении ТКЛР.

Увеличение содержания Cu до 20...25% существенно снижает α алюминия при $T_{исп.} = 50...300$ °С с сохранением первой аномалии. Анализ таблицы показал, что Cu незначительно отстает от Si по уменьшению ТКЛР алюминия А7. Так, значения α при $T_{исп.} = 50...100$ °С, равные $19,7 \cdot 10^{-6}$, град⁻¹, что характерно для сплава Al–10% Si, могут быть получены лишь при добавке к алюминию 20% Cu. Однако, сплавы, содержащие 5% Cu и 5% Si, при $T_{исп.} = 400...450$ °С имеют практически одинаковые значения ТКЛР.

Судя по большой разнице в ТКЛР меди и кремния при комнатной температуре ($16,6$ и $3,0 \cdot 10^{-6}$, град⁻¹), следовало бы ожидать большего различия в ТКЛР сплавов Al–Si и Al–Cu при одинаковом содержании легирующих элементов.

Дальнейшим шагом нашей работы было изучение влияния комплексного легирования на линейное расширение алюминиевых сплавов (рисунок 1).

ТКЛР при добавке 11% Si к сплаву Al–11%Cu плавно увеличивается с $\alpha = 18 \cdot 10^{-6}$ до $20 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ в интервале 50...250 °С. Температура аномалии смещается до $T_{исп.} = 350$ °С с последующим резким снижением до $\alpha = 10,3 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ при $T_{исп.} = 450$ °С. Сильнее эта добавка Si снижает ТКЛР при увеличении содержания Cu до 15%. Для интервала $T_{исп.} = 50...100$ °С (приборная техника) добавка 11% Si уменьшает ТКЛР до $\alpha = 15,6...17,4 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, что соответствует ТКЛР двойного сплава Al–30...32%Si, который отличается от сплава Al–15%Cu–11%Si очень высокой хрупкостью. Таким образом, тройные сплавы Al–Si–Cu имеют более низкий ТКЛР, чем двойные сплавы Al–Si и Al–Cu сравнимых концентраций.

Еще меньшие значения ТКЛР, но с сохранением аномалии при $T_{исп.} = 300$ °С, можно получить у многокомпонентного сплава [8]. Сплав Al–15%Cu–11%Si–11%Ge–10%Sb–1,2%V имеет такой же ТКЛР, как и сплав Al–40%Si. Можно считать, что комплексное легирование

элементами, ТКЛР которых больше, чем у кремния (15%Cu–11%Ge–10%Sb–1,2%V), может заменить 29%Si (α равен: Si – 2,33; Ge – 5,75; V – 7,8; Cu – 16,61 и Sb – $9,2 \cdot 10^{-6}$, град $^{-1}$).

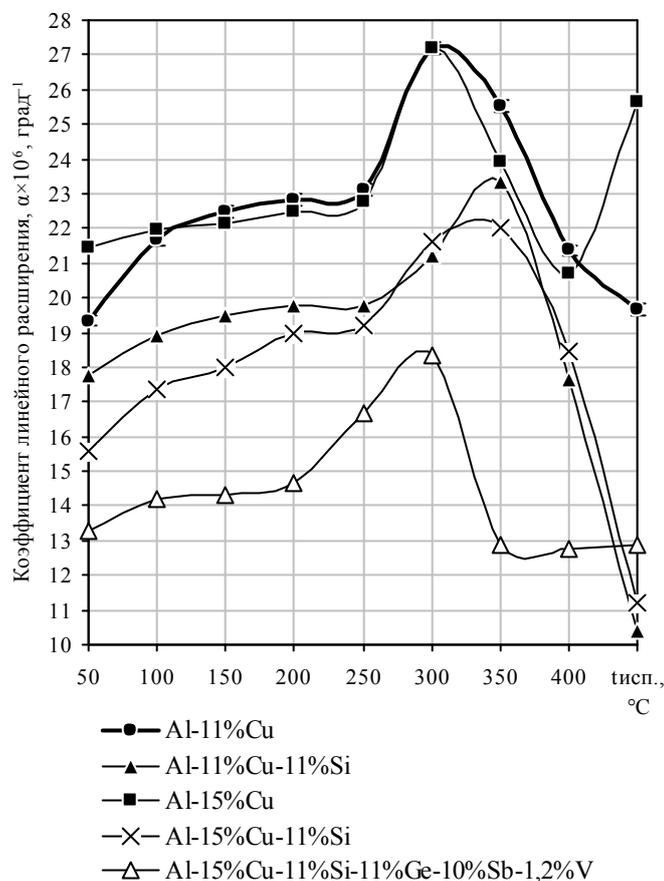


Рис. 1. Влияние легирования на линейное расширение сплавов алюминий – медь

Выводы

Применение высоких скоростей кристаллизации двойных силуминов способствует измельчению структурных составляющих, которое обеспечивает повышение технологичности сплавов и дополнительное снижение ТКЛР, что особенно заметно проявляется у сплавов околоэвтектического состава.

Установлено, что тройные сплавы Al–Si–Cu имеют более низкий ТКЛР, чем двойные сплавы Al–Si и Al–Cu сравнимых концентраций. Результаты исследований могут быть использованы для получения легких сплавов с контролируемым тепловым расширением.

Список литературы

1. Перспективные высокопрочные материалы на алюминиевой основе / И.Н. Фридляндер, А.В. Добромислов, Е.А. Ткаченко, О.Г. Сенаторова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2005. – № 7. – С. 17–23.

2. *Афанасьев В.К., Попова М.В.* Перспективы развития легких сплавов с малым тепловым расширением для космической техники // *Металлургия машиностроения.* – 2012. – № 6. – С. 8–13.
3. *Polmear I.J.* Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals. – Amsterdam: Elsevier, 2005.
4. О влиянии кремния на тепловое расширение алюминия А7 / В.К. Афанасьев, А.В. Горшенин, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.А. Старостина (М.А. Малюх) // *Металлургия машиностроения.* – 2010. – № 6. – С. 23–26.
5. *Материаловедение и технология материалов: учебное пособие / под ред. А.И. Батышева, А.А. Смолькина.* – М.: Инфра-М, 2012. – 288 с.
6. *Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливано В.А.* Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.
7. *Jeong C.-Y.* High temperature mechanical properties of Al-Si-Mg-(Cu) alloys for automotive cylinder heads // *Materials Transactions.* – 2013. – Vol. 54, N 4. – P. 588–594.
8. Особенности влияния меди на линейное расширение алюминия А7 / В.К. Афанасьев, А.В. Горшенин, М.А. Старостина (М.А. Малюх), Е.В. Первакова, И.В. Дегтярева // *Металлургия машиностроения.* – 2010. – № 3. – С. 30–34.
9. *Попова М.В.* Некоторые пути получения алюминиевых инваров // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* – 2004. – № 3 (24). – С. 16–19.
10. Density and thermal expansion of liquid Al-Si alloys / J. Schmitz, B. Hallstedt, J. Brillo, I. Egry, M. Schick // *Journal of Materials Science.* – 2012. – Vol. 47, iss. 8. – P. 3706–3712.
11. Microstructure and mechanical properties of an Al-Si alloy consolidated by spark plasma sintering / T. Schubert; J. Schmidt, T. Weißgärber, B. Kieback // *World PM 2010 Proceedings. Vol. 2: Sintering, secondary & finishing operations, full density & alternative consolidation, Florence, Italy, 10–14 October 2010 / European Powder Metallurgy Association.* – Florence, 2010. – P. 117–124.
12. *Srivastava V.C., Mandal R.K., Ojha S.N.* Microstructure and mechanical properties of Al-Si alloys produced by spray forming process // *Materials Science and Engineering: A.* – 2001. – Vol. 304–306. – P. 555–558.
13. Structural and mechanical properties of Al-Si alloys obtained by fast cooling of a levitated melt / S.P. Nikanorov, M.P. Volkov, V.N. Gurin, Yu.A. Burenkov, L.I. Derkachenko, B.K. Kardashev, L.L. Regel, W.R. Wilcox // *Materials Science and Engineering: A.* – 2005. – Vol. 390, iss. 1–2. – P. 63–69.
14. *Флемингс М.* Процессы затвердевания: пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 423 с.
15. *Афанасьев В.К.* Водород и свойства алюминиевых сплавов. – Кемерово: Полиграф, 2009. – 428 с.
16. О распределении водорода в металле при кристаллизации / Р.М. Габидуллин, В.А. Засыпкин, В.Д. Юшин, В.Н. Титов // *Алюминиевые сплавы: сборник.* – М., 1968. – Вып. 5. – С. 14–21.
17. О природе процессов пластической деформации сплавов Al–1...50% Si / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.В. Горшенин, С.В. Долгова, В.В. Герцен // *Металлургия машиностроения.* – 2014. – № 3. – С. 2–9.
18. *Альтман М.Б.* *Металлургия литейных алюминиевых сплавов.* – М.: *Металлургия,* 1972. – 153 с.
19. *Москвитин В.И., Николаев И.В., Фомин Б.А.* *Металлургия легких металлов: учебник для вузов.* – М.: *Интермет Инжиниринг,* 2005. – 416 с.

THE COMBINED EFFECT OF ALLOYING AND CRYSTALLIZATION CONDITIONS FOR MANUFACTURABILITY AND THERMAL EXPANSION OF CAST ALUMINUM ALLOYS

Popova M.V.¹, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: m.popova@rdtc.ru

Malyuh M.A.¹, Applicant, e-mail: starostina_ma1976@mail.ru

Lavrova N.B.², Senior Lecturer, e-mail: lavrova-nataly2016@yandex.ru

¹ Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

² Siberian Federal University, 79 Avenue Free, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

Abstract

To ensure weight perfection structures, their increased reliability and resource necessary to develop new aluminum alloys with properties that ensure the reliability and safety of operation of the structure.

For space instrumentation requires the combination of high dimensional stability in wide temperature range, corrosion resistance and small specific gravity, so as a relief to orbit designs and devices contributes to a significant fuel savings. These requirements are met by alloys of Al with Si, as Al – light and ductile metal with good corrosion resistance. Temperature coefficient of linear expansion (TCLE, α) it is large enough, however, doping with silicon can be significantly reduced.

The results of researches of influence of alloying and crystallization conditions for TCLE of alloys of aluminum with silicon and copper in the temperature range of 50-450 ° C test. It is shown that high-speed crystallization improves technology-lichnosti and reduces TCLE dual silumin Al–(5-20)%Si in the range of 50 ° C and 100°, and also makes a less pronounced anomaly of thermal expansion in the range of 250-350 ° C for doauthenticate alloys. Established that ternary alloys Al–Si–Cu have a lower TCLE than double the alloys Al–Si and Al–Cu is comparable concentrations. The research results can be used to produce light alloys with controlled thermal expansion.

Studies show that quite reasonable may be the use of copper for making alloys with controlled thermal expansion.

The fact of the strong action of silicon on the thermal expansion of the alloys Al–Cu, which may further have a significant impact on the practical working of the lungs Invar alloys.

Keywords

aluminium, alloys of aluminium-silicon alloys aluminium-copper, the temperature coefficient of linear expansion, crystallization, alloying