

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
РЕФЕРАТ	4
1 Знание свойств металлов и сплавов – основа для разработки технологического процесса и эксплуатационных свойств изделий	5
1.1 Теплофизические свойства сплавов для разработки технологического процесса.....	5
1.2 Закономерности теплового расширения	8
1.4. Сплавы на основе системы AL-SI.....	17
1.5 Роль ТКЛР при расчете литейной усадке	18
1.5 Расчетный метод определения ТКЛР	24
1.6 Методы измерения ТКЛР	33
2 Методика эксперимента	46
2.1 Выбор химического состава сплавов	46
2.2 Технология получения сплавов	47
2.3 Изготовление шлифов.....	52
2.4 измерение ТКЛР полученных сплавов.....	52
3 Исследование влияния содержания кремния на физико-механические свойства сплавов	53
3.1 Измерение твердости образцов	53
3.2 Исследование микроструктуры.....	54
3.3 Измерения ТКЛР на дилатометре DIL 402	57
3.4 Сравнительный анализ полученных данных.....	62
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	66

ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс невозможен без создания материалов, обладающих новыми и более высокими свойствами. От современного конструкционного материала требуется хорошая механическая прочность в сочетании с малой плотностью и хорошей коррозионной стойкостью, все эти требования можно отнести к алюминиевым сплавам

Благоприятное сочетание литейных, механических и ряда эксплуатационных свойств позволяет применять силумины в машино-, авиа- и приборостроении. Свойства сплавов Al – Si зависят от их микроструктуры, которая определяется химическим составом, условиями плавки (в том числе обработки шихты и расплава), кристаллизации и термической обработки. Актуальной проблемой для промышленности остается разработка легких сплавов с низким температурным коэффициентом линейного расширения (α). Как известно [6], основным легирующим элементом, который оказывает значительное влияние на снижение удельного веса Al– Si и коэффициент α , является кремний.

Повышение содержания кремния с эвтектического до заэвтектического состава способствует появлению в структуре первичных кристаллов кремнистой фазы в местах скопления дендритов α -твердого раствора и участков слабо модифицированной эвтектики, а также устранению пористости. Изменение количества кремния, содержащегося в силуминах, оказывает влияние на величину и характер изменения температурного коэффициента линейного расширения.

РЕФЕРАТ

Отчет 67 с., 37 рис., 8 табл., 32 источников.

Ключевые слова – Силумины, ТКЛР, алюминий, литейная усадка, дилатометр .

Исследовано влияние содержания кремния (0,15, 1,5, 5,5, 8,5, 12 и 21 %) на температурный коэффициент линейного расширения силуминов. Показано эффективное влияние повышения содержания кремния в силуминах с 0,15 до 21 % на снижение температурного коэффициента линейного расширения.

Показана практическая возможность применения температурного коэффициента линейного расширения для расчета литейной (затрудненной) усадки при литье в постоянные формы.

1 Знание свойств металлов и сплавов – основа для разработки технологического процесса и эксплуатационных свойств изделий

1.1 Теплофизические свойства сплавов для разработки технологического процесса

Развитие вычислительной техники и физико-математических моделей формирования металлических заготовок требует знаний теплофизических свойств сплава, обеспечивающих получение заготовок с высоким качеством. Известны пакеты прикладных программ LVMflow , Procast, Poligon , которые обеспечивают, хорошую сходимость результатов моделирования с натурными испытаниями. В то же время выявилось недостаточность знаний теплофизических характеристик для обеспечения программ моделирования теплофизических процессов .

Теплоемкость

Удельная теплоемкость (c) – энергия, необходимая для нагревания 1 кг вещества на 1 К при заданных внешних условиях. Молярная (C) теплоемкость энергия, необходимая для нагревания 1 моля вещества на 1 К.

В твердых телах экспериментально измеряется теплоемкость при постоянном давлении (C_p). Разница между ней и теплоемкостью при постоянном объеме (C_v), обусловленная термическим расширением [1, 2, 5].

Вопросу влияния термических вакансий на теплоемкость и другие свойства металлов посвящены многочисленные работы [1, 3), но до настоящего времени значения вакансионного вклада и концентрация вакансий являются предметом дискуссий.

В связи с рассмотрением вопроса о роли различных вкладов в теплоемкость особый интерес представляет сравнение теплоемкости в твердом и жидком состояниях, а также установление корреляции ее поведения с другими свойствами, в частности, с электросопротивлением. При больших значениях удельного электросопротивления длина свободного пробега

электронов достигает расстояний, близких к межатомным, и в условиях потери трансляционной симметрии классические представления о характере зонной структуры и других фундаментальных характеристиках металла могут оказаться не справедливыми.

Температуропроводность

По физическому смыслу она определяет скорость перемещения температурного фронта или температурной волны в образце. Для диэлектриков в изотропном случае она определяется скоростью распространения звука и длиной свободного пробега фононов .

Таким образом, в первом приближении температуропроводность не зависит от температуры и определяется плотностью и температурным коэффициентом электросопротивления данного металла.

Теплопроводность

В металлах теплопроводность можно представить в виде электронная, фононная, магнитная и биполярная составляющие соответственно. В немагнитных металлах с большой концентрацией электронов последними двумя вкладками можно пренебречь, а в магнитных металлах вклад кт может быть заметен лишь при низких температурах вблизи точек магнитных переходов, хотя даже и в этих случаях вопрос о его выделении является дискуссионным [4].

Таким образом, основной проблемой является разделение фононной и электронной составляющих теплопроводности. К сожалению, при средних и высоких температурах в металлах не существует прямых экспериментальных методов их разделения (при низких температурах в чистых металлах они могут быть разделены в магнитном поле), и для его осуществления приходится прибегать к тем или иным теоретическим представлениям. Основным при этом обычно является закон Видемана—Франца—Лоренца. С другой стороны, фононная составляющая теплопроводности может быть оценена независимо на основе теории колебаний решетки [5, 6—7]. Таким образом, появляется

возможность в известной мере независимой оценки этих вкладов и их температурных зависимостей.

Подчеркнем, что ввиду слабой теоретической базы и больших физических и математических сложностей вопрос о корректном выделении рассматриваемых вкладов для конкретных металлов остается предметом достаточно отдаленного будущего, а для решения вопроса о качественном характере отношения между ними необходимо привлечение приближенных методов раз.

Уже из этих простейших соотношений следует, что механизмы рассеяния и проводимости в теплопроводности оказываются достаточно тесно связанными, перепутанными, и при изменении вклада одного из них может происходить изменение вклада других. Более подробно этот вопрос будет обсуждаться при рассмотрении путей разделения механизмов переноса и рассеяния тепла в конкретных металлах.

Решеточная теплопроводность

Решеточное теплосоппротивление, обусловленное рассеянием на дефектах кристаллической решетки и примесях, в первом приближении не зависит от температуры выше [7, 8].

Главный вклад в решеточное теплосоппротивление при средних и высоких температурах дают трехфононные процессы рассеяния. Их теория подробно разработана Лейбфридом и Шлеманом [7, 8–9]. Главным выводом этой теории является прямая пропорциональность решеточного теплосоппротивления от температуры. Коэффициент пропорциональности может быть оценен несколькими способами; удобным приближением является формула Дугдела и Мак Дональда [10].

Электронная теплопроводность

Теоретическое исследование теплосоппротивления, обусловленного электрон-фононным рассеянием для нормальных металлов, проведено

достаточно хорошо [7,9] и ссылки в них). Теплопроводность вблизи точек фазовых переходов.

Вблизи точки магнитного фазового перехода второго рода типа точки Кюри и Нееля в металлах существует два конкурирующих механизма, определяющих поведение теплопроводности.

1.2 Закономерности теплового расширения

При увеличении температуры происходит расширение твердого тела, которое называют тепловым расширением. Его делят на линейное и объемное тепловое расширение.

Коэффициентом линейного расширения называют физическую величину характеризующую изменение линейных размеров твердого тела при изменении его температуры. Оперировать, обычно средним коэффициентом линейного расширения. Коэффициент линейного расширения относят к характеристикам теплового расширения материала. Коэффициент линейного расширения используют для нахождения длины тела, после нагревания. Коэффициент линейного удлинения является характеристикой относительного удлинения, которое происходит при увеличении температуры тела на 1К [10].

Величина в общем случае зависит от температуры. Эмпирически установлено, что одно и то же тело при высоких температурах испытывает большее тепловое расширение, чем при низких температурах. Но в большинстве случаев этим пренебрегают и считают, что изменение размеров тела пропорционально температуре.

Для нахождения величины коэффициента линейного расширения измеряют длину стержня (l_0) из изучаемого материала. При этом температура стержня поддерживается одинаковой по всей длине. Температуру увеличивают на некоторую величину ΔT и измеряют удлинение стержня $l-l_0$ которое вызвало повышение температуры.

Тепловое расширение – это изменение размеров тела в процессе его нагревания при постоянном давлении. Причины теплового расширения можно понять, рассматривая классический осциллятор с учетом ангармоничности его колебаний.

Ангармоничность колебаний частиц твердого тела обусловлена характером зависимости сил взаимодействия между атомами от расстояния между ними.

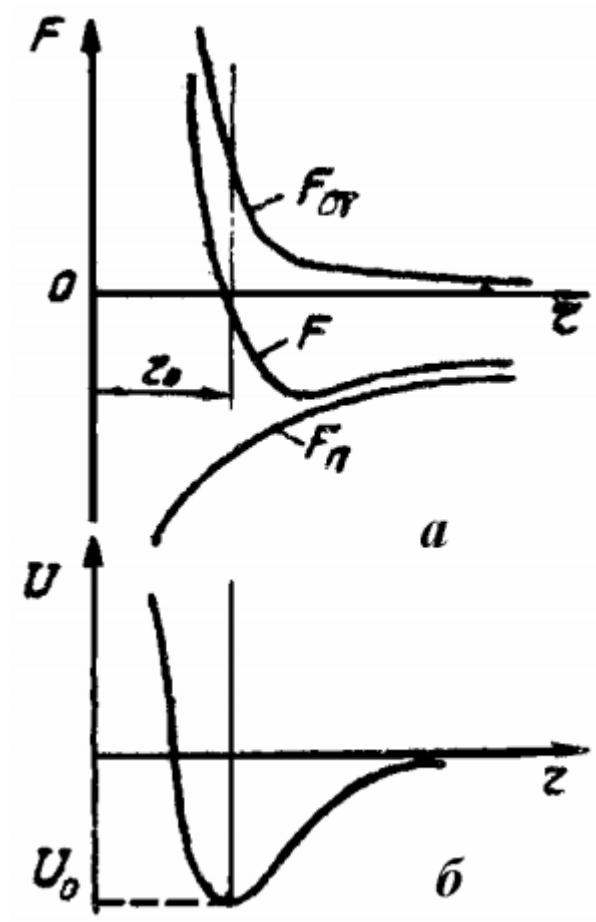


Рисунок 1 ангармоничность движения частиц

Независимо от природы сил, возникающих при сближении частиц (атомов или молекул), общий характер их остается одинаковым (рис.1) [11]: на относительно больших расстояниях появляются силы притяжения F_n , быстро

увеличивающиеся с уменьшением расстояния r между частицами; на малых расстояниях возникают силы отталкивания $F_{от}$, которые с уменьшением r увеличиваются значительно быстрее, чем F_n .

На расстоянии $r = r_0$ силы отталкивания уравновешивают силы притяжения и результирующая сила взаимодействия F обращается в нуль, а энергия взаимодействия достигает минимального значения U_0 (рис. 1). Эти расстояния r_0 определяют размер тела при абсолютном нуле температуры.

С повышением температуры частицы начинают колебаться около положений равновесия. Допустим частица 1 (рис. 1) закреплена неподвижно и колеблется лишь частица 2 вдоль оси x . Колеблющаяся частица обладает кинетической энергией, достигающей наибольшего значения E_k в момент прохождения положения равновесия O . На рис. 1 энергия E_k отложена вверх от дна потенциальной ямы авс.

При движении частицы 2 влево от положения равновесия кинетическая энергия расходуется на преодоление сил отталкивания ее от частицы 1 и переходит в потенциальную энергию взаимодействия частицы. Отклонение влево происходит до тех пор, пока вся кинетическая энергия частиц E_k не перейдет в потенциальную, которая увеличивается до $U_1 = E_k$, а частица 2 сместится предельно влево на расстояние x_1 [11,12].

При движении частицы 2 вправо от положения равновесия кинетическая энергия расходуется на преодоление сил притяжения ее к частице 1 и также переходит в потенциальную энергию взаимодействия частиц. На расстоянии x_2 от положения равновесия вся кинетическая энергия E_k переходит в потенциальную (рис.2).

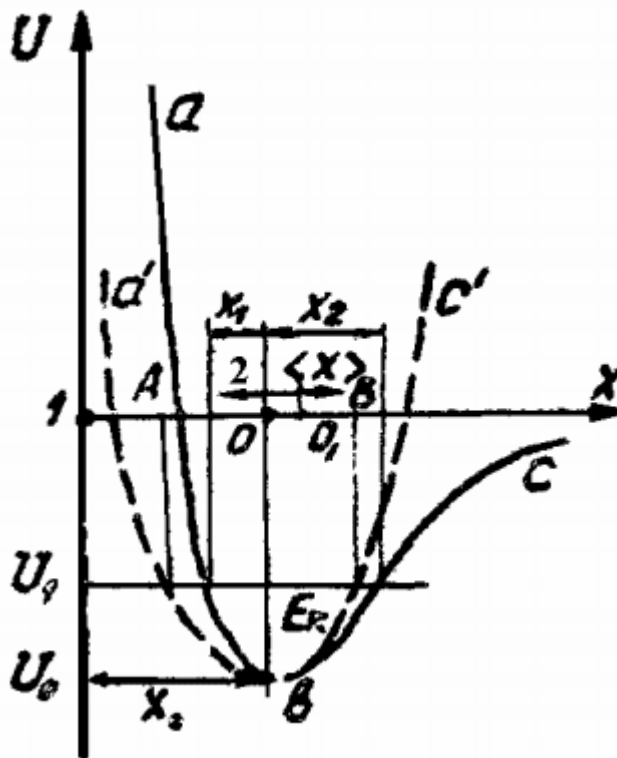


Рисунок 2 зависимость энергии от температуры

Если бы частица 2 совершала гармонические колебания, то сила, возникающая при смещении x частицы из положения равновесия, удовлетворяла бы закону Гука:

$$F = -k \cdot x \quad (1)$$

А изменение потенциальной энергии $U(x)$:

$$U(x) = (k \cdot x^2) / 2 \quad (2)$$

описывалось бы симметричной параболой a' в c' (рис 2). Отклонения x_1 и x_2 были бы одинаковыми по величине и середина размаха AB совпала бы с положением равновесия O . Нагревание тела в этом случае не могло бы вызвать его расширения, так как с увеличением температуры происходило бы лишь увеличение амплитуды колебаний частицы, а средние расстояния между ними оставались бы неизменными[10].

В действительности же потенциальная кривая abc (см. рис.2) является несимметричной, т.к. ее левая ветвь ba поднимается круче правой ветви bc .

Для учета асимметрии потенциальной кривой необходимо ввести дополнительный член $(g \cdot x^3) / 3$, тогда (1) и (2) примут следующий вид:

При $x > 0$ член $(g \cdot x^3) / 3$ вычитается, а при $x < 0$, он прибавляется к $(k \cdot x^2)/2$, что приводит к асимметрии потенциальной кривой.

Несимметричный характер потенциальной кривой приводит к тому, что отклонения частицы 2 вправо и влево оказываются неодинаковыми: вправо частица отклоняется сильнее, чем влево (см. рис.2).

Вследствие этого среднее положение частицы 2 (точка O_1) уже не совпадает с положением равновесия O , а смещается вправо. Это соответствует увеличению среднего расстояния между частицами на $\langle x \rangle$.

Таким образом, причиной теплового расширения тел является ангармонический характер колебаний частиц твердого тела, обусловленный асимметрией кривой зависимости энергии взаимодействия частиц от расстояния между ними.

Количественное тепловое расширение твердых тел характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения α , который показывает, на какую долю первоначальной длины l изменяются размеры тела при нагревании его на один градус, и определяется соотношением.

$$\alpha = (1 / l) \cdot (dl / dT) \quad (3)$$

Коэффициент α зависит от природы T твердых тел и вследствие анизотропии кристаллов может быть различным в различных направлениях. Коэффициент линейного расширения α в области низких температур зависит также от температуры: вблизи абсолютного нуля коэффициент α уменьшается с понижением температуры пропорционально кубу температуры, стремясь к нулю при абсолютном нуле [13].

В области высоких температур для большинства материалов коэффициент линейного расширения практически не зависит от температуры, и

тогда длина твердого тела возрастает линейно с температурой, а коэффициент α определяется выражением:

$$\alpha = (l / l) \cdot (\Delta l / \Delta T) \quad (4)$$

где l - длина тела при некоторой начальной температуре T_1 ; Δl - удлинение тела при нагревании его от температуры T_1 до T_2 ($\Delta T = T_2 - T_1$). М

Коэффициент теплового расширения связан со многими другими физическими характеристиками.

Магнитные явления в металлах и сплавах могут вносить заметный вклад в их тепловое расширение. Наиболее заметные изменения коэффициента расширения наблюдаются вблизи точек Кюри.

1.3. Технологические свойства

Температура плавления силумина составляет около 670 градусов, что намного ниже температуры плавления стали. Такое физическое свойство также влияет на снижение себестоимости металлических изделий.

Изделия из этого вещества отличаются устойчивостью к механическим нагрузкам и длительным сроком эксплуатации.

Усадочные свойства сплавов

Усадкой называется уменьшение объема и линейных размеров отливки в процессе ее формирования, а также охлаждения с температуры заливки до температуры окружающей среды. Усадка является одним из важнейших литейных свойств сплавов.

Виды усадки Для оценки усадки используют понятия: относительная усадка и коэффициент усадки в интервале температур. В зависимости от агрегатного состояния сплава различают усадку в жидком, твердо-жидком и твердом состояниях. Полная усадка является суммой этих трех слагаемых. Основу усадки составляет термическое сжатие, которое

увеличивается или уменьшается в результате фазовых превращений и изменения растворимости газов. У ряда сплавов вблизи от температуры ликвидуса наблюдается увеличение объема, называемое предусадочным расширением[14].

Для характеристики усадки на различных этапах формирования отливки используют следующие способы ее оценки. *Объемная усадка* – относительное изменение объема сплава – используется для характеристики изменения в жидком или твердожидком состоянии, а также для полного изменения объема. [14] *Линейная усадка* оценивает относительное изменение размеров отливки с момента перехода ее в твердое или твердожидкое состояние с разрозненными включениями жидкой фазы и твердой наружной коркой. *Литейная усадка* – относительная (в процентах) разность линейных размеров модели и отливки Она оценивает полное изменение размеров отливки и поэтому наиболее удобна для использования в технологических расчетах и операциях. Литейная усадка зависит не только от свойств и состояния сплава, но также от конструкции отливки и формы, от технологических условий литья и других факторов. В связи с торможением усадочного процесса формой (для фасонных отливок) необходимо различать *свободную* и *затрудненную усадку*, которые численно не совпадают[15].

Общее уменьшение объема сплава в процессе усадки отливки дают три составляющие - наружная усадка, усадочная раковина и пористость. *Наружная усадка* - изменение наружных размеров и объема. Именно этот вид усадки оценивается характеристикой $E_{лит.}$ *Усадочная раковина* – - полость в теле отливки или прибыльной части, образующаяся вследствие некомпенсированной объемной усадки при затвердевании. Различают внутренние раковины; образующиеся обычно в тепловых узлах, и наружную раковину, которая может быть открытой или закрытой (т.е. под коркой металла) [16]. Размер усадочной раковины зависит от усадочных свойств сплава, условий формирования отливки и технологических условий литья. *Усадочная пористость* – скопление

мелких пустот, возникающих в изолированных микрообъемах отливки, обычно в междоузльных пространствах дендритов, в условиях отсутствия питания жидким расплавом. Различают *рассеянную пористость*, распределенную более или менее равномерно по всему объему отливки, и *зональную пористость*, *сосредоточенную* в осевых частях, в тепловых узлах и других частях отливки.

Формирование пористости при затвердевании отливки идет параллельно с процессом выделения газов, которые заполняют поры и могут создавать в них значительное давление. В связи с этим в реальных условиях пористость в большинстве случаев имеет газоусадочный характер. Развитие усадочных дефектов и их распределение в отливке зависят от взаимодействия факторов, отражающих усадочные свойства сплава, а также тепловые и кинетические условия формирования отливки.

Жидкотекучесть – способность расплавленного металла течь по каналам литейной формы, заполнять ее полости и четко воспроизводить контуры отливки. При высокой жидкотекучести сплавы заполняют все элементы литейной формы. Жидкотекучесть зависит от многих факторов: от температурного интервала кристаллизации, вязкости и поверхностного натяжения расплава, температуры заливки и формы, свойств формы и т.д. [16].

Чистые металлы и сплавы, затвердевающие при постоянной температуре, обладают лучшей жидкотекучестью, чем сплавы, затвердевающие в интервале температур (твердые растворы). Чем выше вязкость, тем меньше жидкотекучесть. С увеличением поверхностного натяжения жидкотекучесть понижается. С повышением температуры заливки расплавленного металла и формы жидкотекучесть улучшается. Увеличение теплопроводности материала формы снижает жидкотекучесть. Так, песчаная форма отводит теплоту медленнее, и расплавленный металл заполняет ее лучше, чем металлическую форму. Наличие неметаллических включений снижает жидкотекучесть. [17] Так же влияет химический состав сплава (с увеличением содержания серы,

кислорода, хрома жидкотекучесть снижается; с увеличением содержания фосфора, кремния, алюминия, углерода жидкотекучесть увеличивается).

Газопоглощение – способность литейных сплавов в расплавленном состоянии растворять водород, азот, кислород и другие газы. Степень растворимости газов зависит от состояния сплава: с повышением температуры твердого сплава увеличивается незначительно; возрастает при плавлении; резко повышается при перегреве расплава[18]. При затвердевании и последующем охлаждении растворимость газов уменьшается, в результате их выделения в отливке могут образоваться газовые раковины и поры[20].

Растворимость газов зависит от химического состава сплава, температуры заливки, вязкости сплава и свойств литейной формы.

Ликвация – неоднородность химического состава сплава в различных частях отливки. Ликвация образуется в процессе затвердевания отливки, из-за различной растворимости отдельных компонентов сплава в его твердой и жидкой фазах. В сталях и чугунах заметно ликвируют сера, фосфор и углерод.

Различают ликвацию *зональную*, когда различные части отливки имеют различный химический состав, и *дендритную*, когда химическая неоднородность наблюдается в каждом зерне. Это все можно в дополнительный раздел – технологические свойства[21].

1.4. Сплавы на основе системы AL-SI

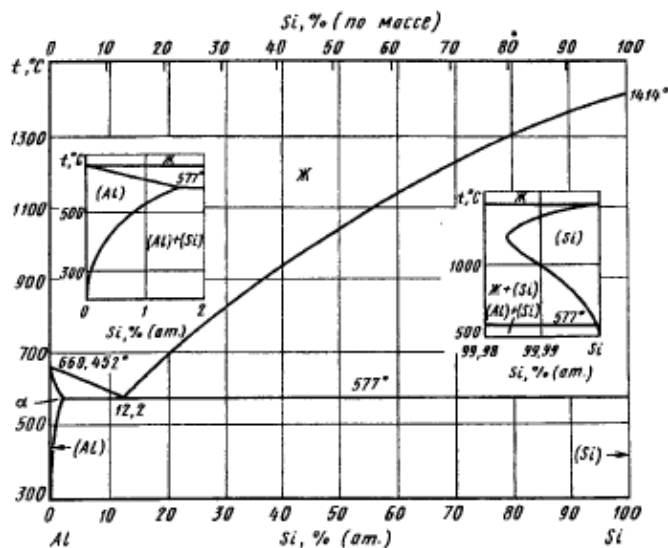


Рисунок 3 Диаграмма состояния Al-Si

Диаграмма Состояния Al-Si [21] относится к простому эвтектическому типу с небольшой растворимостью компонентов друг в друге в твердом состоянии. Многочисленные результаты различных исследований хорошо согласуются между собой. Диаграмма состояния является обобщением результатов ряда работ. На в ставках рисунка показана растворимость компонентов в твердом состоянии на основе Al и на основе Si. Максимальная растворимость Si в твердом Al составляет 1,5 % (ат.) при эвтектической температуре 577 градусов. Растворимость Al в Si носит ретроградный характер, максимальное значение равно 0,016-0,003 % (ат.) при температуре 1190 градусов.

Эвтектическая точка расположена при содержании 12,2% (ат.) Si. Это значение приведено в работе [22].

Согласно диаграмме состояния системы Al – Si кремний не образует с алюминием химических соединений и присутствует в сплавах алюминия в элементарном виде. Но по своим физическим свойствам кремний близок к химическим соединениям, он обладает высокой твердостью (HRC 106) и так же, как и они, хрупок.

Несмотря на заметную и переменную растворимость, кремний не придает алюминию способность к упрочнению термической обработкой, что связано с неблагоприятным характером распада твердого раствора кремния в алюминии. Растворяясь в алюминии, кремний несколько упрочняет его, незначительно снижая при этом пластические свойства. Алюминиевый сплав, содержащий даже 10–12 % Si, остается достаточно пластичным.

Силумины подразделяют на двойные (или простые), легированные только кремнием, и специальные, в которых помимо кремния содержатся в небольшом количестве другие легирующие компоненты (Mg, Si, Mn, Ni). Силумины относятся к числу эвтектических или доэвтектических сплавов. Без учета влияния других компонентов (кроме Si) их структура представляет собой либо эвтектику + Si (АЛ2), либо первичные кристаллы + эвтектика + Si (АЛ4, АЛ9, АЛБ).

Кремний имеет переменную растворимость в алюминии, которая возрастает от <0,1 % при комнатной температуре до 1,65 % при эвтектической температуре (577 °С). Поэтому нагревом алюминиево-кремниевых сплавов до температуры, близкой к эвтектической, и быстрым охлаждением можно получить пересыщенный твердый раствор кремния в алюминии, который при последующем старении распадается с выделением дисперсных частиц кремния. Однако упрочняющий эффект от указанной обработки крайне мал и не имеет практического значения. Таким образом, двойные (простые) силумины относятся к числу термически неупрочняемых сплавов, обладающих невысокими прочностными характеристиками.

1.5 Роль ТКЛР при расчете литейной усадке

Усадка при охлаждении играет важнейшую роль в получении отливок с необходимой точностью. Усадка изменяется в широких пределах и зависит от состава сплава. Линейная свободная усадка двойных и сложных алюминиевых

сплавов основательно изучена. Установлено [23], что усадка чистого алюминия имеет наиболее высокое значение, по сравнению с другими промышленными металлами. Легирование алюминия приводит к изменению усадки, которая зависит от температуры солидуса и коэффициента термического расширения компонентов сплава. Усадка уменьшается с увеличением температуры плавления легирующего компонента. Собственно литейную усадку ε сплава приближенно оценивают [23] по уравнению :

$$\varepsilon = \alpha_{\text{ср}} (T_{\text{с}} - T_{\text{н}}) 100\%, \quad (5)$$

где $T_{\text{с}}$, $T_{\text{н}}$ – соответственно температуры солидуса и окружающей среды.

Однако в производстве реальных отливок наиболее часто встречается затрудненная усадка отливок. Как правило, отливка имеет внутреннюю полость, которая оформляется металлическим стержнем или из стержневых смесей. В результате охлаждения сплава после заливки размер усадки будет зависеть от степени сжимаемости стержня. При получении отливок из алюминиевых сплавов большое распространение имеет литье в металлическую форму (кокиль) с жестким чугунным или стальным стержнем. Поэтому усадка и конечный размер отливки определяются термическими свойствами стержня и отливки. Вышеуказанный подход [23, 24], [24] был разработан и реализован для учета затрудненной усадки при литье в кокиль. При условии отсутствия или минимального предусадочного расширения, которым можно пренебречь, рассчитали изменение размеров кокиля и отливки при охлаждении.

Рассмотрим усадку подробнее:

$$l_{298\text{ст}} = l_{\text{ст}} (1 - \alpha_{\text{ст}} \Delta T_{\text{ст}}); \quad (6)$$

$$l_{298\text{от}} = l_{\text{от}} (1 - \alpha_{\text{от}} \Delta T_{\text{от}}), \quad (7)$$

где $l_{\text{ст}}$ и $l_{\text{от}}$ – размер стержня и отливки при температуре кристаллизации;

$l_{298\text{ ст}}, l_{298\text{ от}}$ – то же при $T=298\text{ K}$; $\Delta T_{\text{ст}}, \Delta T_{\text{от}}$ – температурный интервал охлаждения стержня и отливки до 298 K.

В процессе охлаждения твердой отливки происходит уменьшение размера отливки $l_{\text{отл}}$ и стержня $l_{\text{ст}}$.

В момент извлечения стержня $l_{\text{от}}=l_{\text{ст}}$, тогда, приравнивая уравнения (6) и (7) получим:

$$l_{298\text{ст}} = l_{298\text{от}} \frac{1 - \alpha_{\text{ст}} \Delta T_{\text{ст}}}{1 - \alpha_{\text{от}} \Delta T_{\text{от}}} = l_{298\text{от}} K \quad (8)$$

$$\text{где } K = \frac{1 - \alpha_{\text{ст}} \Delta T_{\text{ст}}}{1 - \alpha_{\text{от}} \Delta T_{\text{от}}}, \quad (9)$$

$$\text{тогда, } \varepsilon = (K - 1) \cdot 100 \% \quad (10)$$

здесь K - коэффициент усадки, зависящий от состава сплава отливки и материала кокиля, а также интервала изменения температуры от извлечения стержня из отливки до нормальной температуры. Очевидно, что ΔT представляет среднее значение, так как температурное поле неоднородно. Поскольку $\alpha_{\text{от}}$ и $\alpha_{\text{ст}}$ - справочные или расчетные величины, то задача определения коэффициента линейной затрудненной усадки сводится к определению ΔT . Эту задачу можно решить экспериментально или моделированием процесса кристаллизации на ЭВМ.

Тем не менее даже приближенное определение ΔT дает возможность более точно назначать исполнительные размеры при проектировании оснастки. Анализируя формулу (8,9) видно, что усадка будет изменяться в зависимости от температуры кристаллизации, материалов кокиля и отливки. Варьируя температуру кокиля и время его разборки, можно повысить точность изготовления отливок.

В таблице 1 приведены результаты эксперимента и расчетов линейной усадки. Для эксперимента выбрана деталь, «обечайка», из сплава АК12. Температура заливки – 973 K, температура начала кристаллизации около 853 K. Удаление стержня производили при температуре 623 K, материал стержня –

сталь 20. При измерении отливок оказалось, что фактическая затрудненная усадка отливок меньше, чем установленная технологическим процессом. Расчетная усадка отливок имеет небольшое отклонение от номинального размера, устанавливаемого конструкторской документацией.

Таблица 1 - Результаты эксперимента по определению линейной усадки

Наименование	По технологии	Фактически	Отклонение	По расчету	Фактически	Отклонение
Линейная усадка, %	1,00	0,65	0,35	0,60	0,65	0,05
Внутренний размер отливки, мм	600	602,1	2,1	600	599,7	0,3
Размер стержня, мм	606	606		603,7	603,7	

На рисунке 4 приведен график изменения размеров отливки и стержня в процессе охлаждения, откуда видно, что после заливки кокиля сплавом (силумином) изменение размера отливки зависит от изменения размера стального стержня. Точка разветвления графиков изменения размеров при охлаждении (около 673 К) соответствует моменту извлечения стержня из отливки. После извлечения стержня отливка изменяет размеры в соответствии со скоростью охлаждения и КТР сплава.

При изучении алюминиевых сплавов установлено, что их температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) всегда выше, чем ТКЛР оснастки кокилей, которые традиционно изготавливаются из чугуна или различных сталей, а значит всегда создаются условия для затрудненной усадки и развития горячих трещин в отливках. Для уменьшения влияния затрудненной усадки на образование трещин необходимо применять материалы оснастки (стержня), имеющие ТКЛР, близкие значениям ТКЛР материала отливки. Необходимо также уметь создавать такие сплавы для оснастки и прогнозировать их ТКЛР.

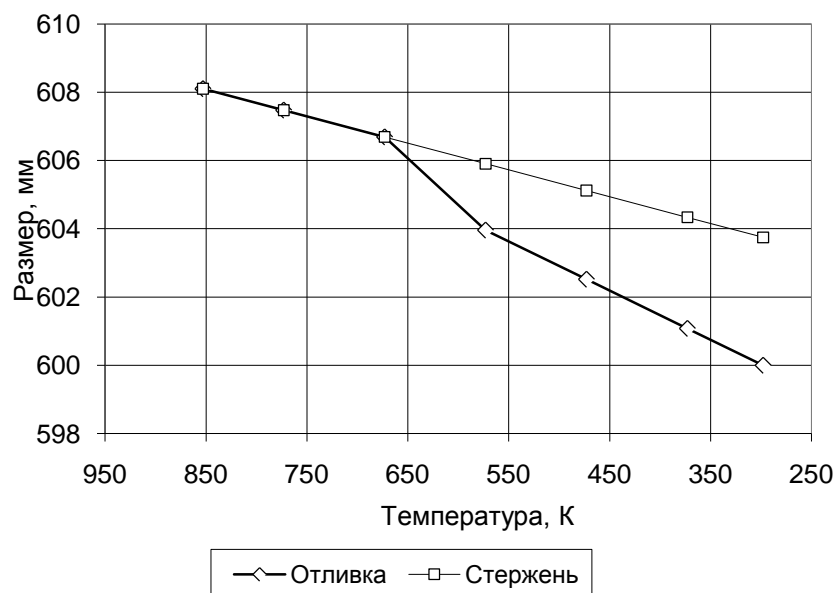


Рисунок 4 – Изменение размеров отливки и стержня, в процессе охлаждения в металлической форме

Для получения отливок с заданной точностью из литейных композиционных материалов (ЛКМ) необходимо знать величины линейной усадки.

Данные по линейной усадке отливок из ЛКМ, которые важно знать для получения отливок с необходимой точностью, в литературе недостаточно представлены. Поэтому экспериментально измерили линейную усадку изучаемых ЛКМ [24], составов Al-Al₂O₃. Оказалось, что линейная усадка уменьшается с ростом содержания дисперсных частиц (рис.4).

Результаты измерений и расчетов линейной усадки ЛКМ приведены на (рис.5). Экспериментальные и расчетные данные усадки для Al-Al₂O₃ отличаются, по абсолютной величине, до 0,1 %, т.е. практически совпадают. Поэтому далее рассчитали линейную усадку ЛКМ для Al-SiO₂.

Линейная усадка имеет тот же характер изменения, т.е. чем больше содержание частиц, тем меньше ТКЛР ЛКМ и меньше его линейная усадка. Более низкие значения линейной усадки ЛКМ системы Al-SiO₂, по сравнению с системой Al-Al₂O₃, связаны с соотношением $TКЛР_{SiO_2} < TКЛР_{Al_2O_3}$, в

соответствии с формулой (5). Экспериментальные значения линейной усадки для чистого алюминия, Al-Al₂O₃ 10 % и Al-Al₂O₃ 20 % ниже расчетных.

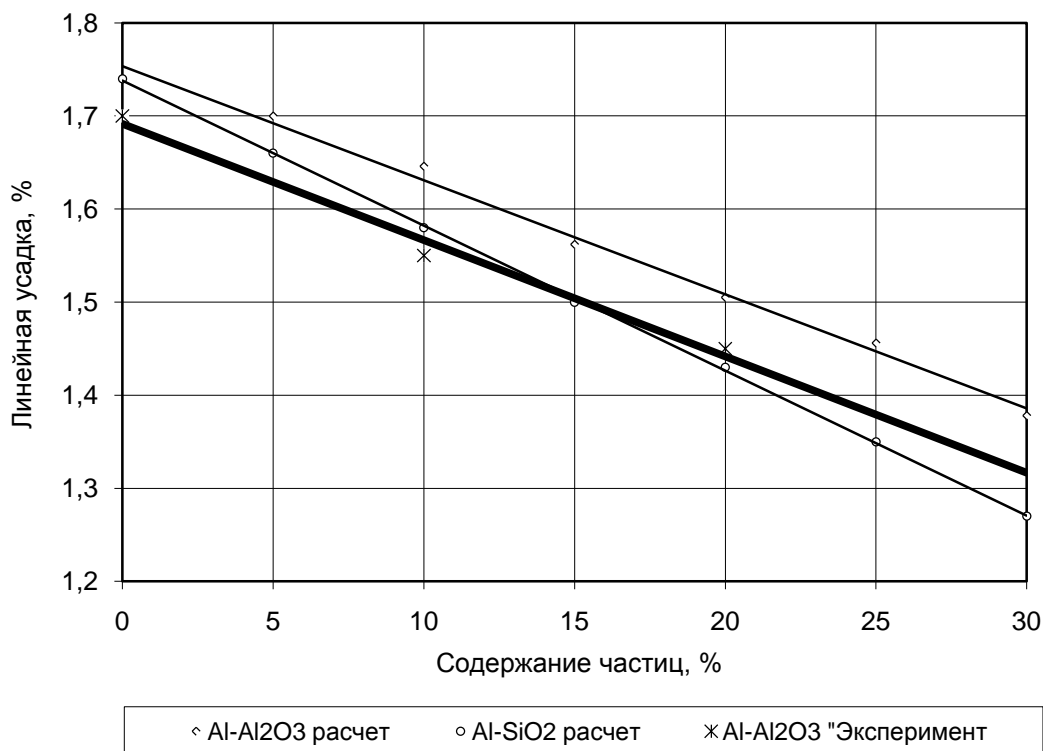


Рисунок 5 – Зависимость линейной усадки от содержания частиц в ЛКМ

Возможно, это вызвано затрудненной усадкой образцов из-за трения о стенки металлической формы в процессе охлаждения. Разность значений находится в пределах от 2,9 % для алюминия, до 4,5 % для Al-Al₂O₃ 20 %.

Результаты и выводы: 1) Полученная формула позволяет рассчитывать линейную усадку отливок, для повышения точности изготовления модельной и формообразующей оснастки. Определено, что линейная затрудненная усадка зависит от ТКЛР материалов, а также интервала охлаждения отливки и кокиля.

2) Получены расчетные данные зависимостей линейной усадки ЛКМ от содержания частиц в ЛКМ и от коэффициентов линейного расширения матрицы и частиц.

3) Данные экспериментальных и расчетных усадок ЛКМ практически одинаковы, т.е. линейную усадку ЛКМ можно рассчитывать до проведения экспериментальных измерений.

1.5 Расчетный метод определения ТКЛР

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) является важнейшей характеристикой металлов и сплавов, необходимой при анализе возникающих объемных термических напряжений, изменений размеров формы и отливок в процессе охлаждения. Обычно, величина ТКЛР определяется экспериментально. Для изучения зависимости ТКЛР от химического состава и температуры, а также анализа возможности разработки метода экспресс-расчета ТКЛР были изготовлены образцы и измерены ТКЛР сплавов различного химического состава на модели с никелевой основой (таблица 2).

Из приведенных результатов измерений видно, что в системе сплавов Ni-Fe-Cr с уменьшением концентрации хрома ТКЛР растет. Это можно объяснить аддитивностью ТКЛР от его состава. Если КТР Ni и Fe ($13,1$ и $11,9 \cdot 10^{-6}$, K^{-1}) близки по значению, то ТКЛР Cr ($4,2 \cdot 10^{-6}$, K^{-1}) значительно ниже, и при уменьшении его доли увеличивается суммарная доля Ni и Fe, которые увеличивают ТКЛР всего сплава.

Таблица 2 – Экспериментальные и справочные данные измерений ТКЛР

№ эксп	Химический состав				$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1} при температуре, K						
		Ni	Fe	Cr		393	473	573	673	753	873
Б-4	м.доля	0,5	0,35	0,15	α -экспер.	13,2	13,8	15,3	15,9	16,1	16,6
	C, %	51,7	34,5	13,7	α -справ.	12,7	13,4	14,7	15,4	15,8	16
Е-3	м.доля	0,1	0,72	0,18	α -экспер.	12,2	12,8	13,9	14,5	15,1	15,3
	C, %	10,6	72,6	16,8	α -справ.	12,3	13,1	14,3	15	15,3	15,6

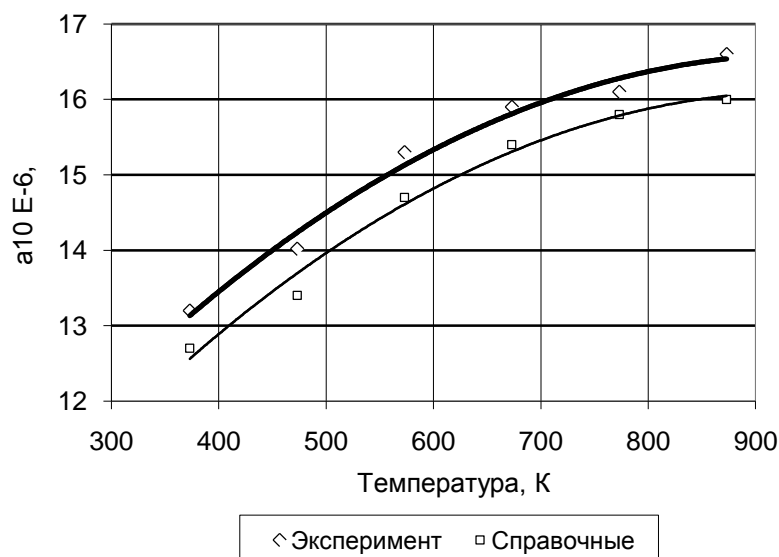


Рисунок 6 – Экспериментальные результаты и справочные данные ТКЛР системы Ni-Fe-Cr, состав Б-4

Справочные и экспериментальные данные ТКЛР отличаются не более чем на 3 %, причем графики экспериментальных значений на (рис.6) находятся выше, а на рисунке 2 ниже кривой справочных данных. Поэтому был проведен физико-химический анализ взаимосвязи ТКЛР сплава и его компонентов [25]. Воспользуемся известной формулой для определения объемного коэффициента термического расширения вещества:

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dT} \right), \quad (11)$$

где V – объем (будем рассматривать для одного моля вещества); T – температура.

В этом уравнении заменим объем моля вещества V через объем моля V_i компонентов и их мольной доли X_i в сплаве:

$$V = V_1 X_1 + V_2 X_2 + \dots + \Delta V_{см} = \sum_1^i V_i X_i + \Delta V_{см}, \quad (12)$$

где $\Delta V_{см}$ – объем смешения, или отклонение объема моля сплава от аддитивной величины при сплавлении компонентов.

Подставляя уравнение (2) в (1) и дифференцируя их получим:

$$\alpha = \frac{1}{V} \left[\frac{V_1 X_1}{V_1} \left(\frac{dV_1}{dT} \right)_i + \frac{V_2 X_2}{V_2} \left(\frac{dV_2}{dT} \right)_p + \dots + \frac{\Delta V_{см}}{\Delta V_{см}} \left(\frac{dV_{см}}{dT} \right)_p \right] \quad (13)$$

Очевидно, что в уравнении (3) имеем

$$\frac{dV_1}{V_1 dT} = \alpha_1 \quad (14)$$

т.е. объемный коэффициент термического расширения 1-го компонента сплава;

$$\frac{d\Delta V_{см}}{\Delta V_{см} dT} = \alpha_{см} \quad (15)$$

- изменение коэффициента термического расширения сплава за счет величины $\Delta V_{см}$.

Раскрыв скобки уравнения (3) и подставив в него (4) и (5), получим

$$\alpha = \alpha_1 V_1 X_1 + \alpha_2 V_2 X_2 + \dots + \frac{\Delta V_{см}}{V} \alpha = \sum_1^i \alpha_i V_i X_i + \frac{\Delta V_{см}}{V} \alpha_{см} \quad (16)$$

Учитывая, что для металлических систем $\frac{\Delta V_{см}}{V} \approx 10^{-3} - 10^{-4} \ll 1$, можно пренебречь последним слагаемым в уравнении (6), и получим

$$\alpha \cong \sum_1^i \alpha_i V_i X_i \quad (17)$$

- аддитивный ТКЛР для многокомпонентного сплава.

Известно, что объемный α и линейный $\alpha_{лин}$ ТКР сплава связаны простым отношением

$$\alpha = 3\alpha_{лин} \quad (18)$$

Поэтому уравнение (17) Применимо и для расчета температурного линейного коэффициента расширения многокомпонентного однофазного сплава:

$$\alpha_{\text{лин}} = \sum_1^i \alpha_{\text{лин}} V_i X_i \quad (19)$$

Далее введем новую величину и уточним расчет относительного объема Y_i компонента сплава:

$$Y_i = \frac{V_i X_i}{V} = \frac{V_i X_i}{\sum_1^i V_i X_i} \quad (20)$$

Введем массу M моля вещества и его плотность ρ :

$$V_i = \frac{M_i}{\rho_i} \quad (21)$$

Тогда мольную долю X_i компонента можно выразить через C , %:

$$X_i = \frac{C_i / M_i}{\sum_1^i C_i M_i} \quad (22)$$

или

$$X_i = \frac{C_1}{M \left(\frac{C_1}{M_1} + \frac{C_2}{M_2} + \dots + \frac{C_i}{M_i} \right)} \quad (23)$$

Подставив (21) и (23), в уравнения (19) и (20), получим:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 C_1}{\rho_1 \left(\frac{C_1}{\rho_1} + \frac{C_2}{\rho_2} + \dots + \frac{C_i}{\rho_i} \right)} + \frac{\alpha_2 C_2}{\rho_2 \left(\frac{C_1}{\rho_1} + \frac{C_2}{\rho_2} + \dots + \frac{C_i}{\rho_i} \right)} + \dots + \frac{\alpha_i C_i}{\rho_i \left(\frac{C_1}{\rho_1} + \frac{C_2}{\rho_2} + \dots + \frac{C_i}{\rho_i} \right)} \quad (24)$$

или в общем виде:

$$\alpha = \frac{\sum_1^i \frac{\alpha_i C_i}{\rho_i \sum_1^i \frac{C_i}{\rho_i}}}{\rho_i \sum_1^i \frac{C_i}{\rho_i}} \quad (25)$$

Таким образом, формула (25) позволяет рассчитать ТКЛР многокомпонентного сплава. На основании этого можно прогнозировать изменение размеров твердых тел различного химического состава в зависимости от температуры при нагреве или охлаждении. Для расчета необходимо знать химический состав сплава, плотность и коэффициенты термического расширения чистых компонентов. Анализ имеющейся информации показал большой разброс значений ТКЛР различных источников [25,26]. Поэтому для уточнения ТКЛР был проведен анализ методов измерения коэффициентов термического расширения металлов и проведены измерения ТКЛР наиболее применяемых металлов в производстве сплавов.

Для проведения измерений был выбран емкостной метод измерения ТКЛР. Этот метод не требует трудоемких специальных способов подготовки образцов и обеспечивает достаточную точность измерений.

Для уменьшения погрешности расчетных величин и создания расчетной базы на персональном компьютере (ПК) были измерены ТКЛР более 20 различных элементов, которые составляют большинство промышленных сплавов. Измерения проводили на емкостном dilatометре в диапазоне температур от 10 до 1000 К. Точность измерений ТКЛР чистых элементов, образующих большинство промышленных сплавов, составляла $10^{-8} - 10^{-9}$. В базе данных имеются также значения плотности при нормальной температуре, взятых из справочной литературы [27].

Для проведения расчетов была разработана программа на ПК. При расчете ТКЛР плотность пересчитывается в зависимости от заданной температуры и учитывается в формуле (25). Для расчета ТКЛР необходимо ввести химический состав сплава и температуру. Методика расчета опробована

на различных цветных и черных сплавах более 20 наименований. Расчетные ТКЛР отличаются от ТКЛР справочных на 3-8 %, в зависимости от типа сплава. В таблице 3 приведены экспериментальные, справочные и расчетные значения температурного коэффициента линейного расширения промышленных алюминиевых сплавов. Из таблицы следует, что данные по ТКЛР, расчетные и полученные из различных источников, отличаются между собой не более, чем на 5 %.

Поэтому расчетный метод получения ТКЛР, предложенный в настоящей работе, может применяться для изучения и прогнозирования свойств сплавов при нагреве и охлаждении. Его можно использовать для расчетов ТКЛР сплавов и литейных композиционных материалов (ЛКМ), для расчетов литейной усадки, внутренних напряжений и т.п.

Таблица 3 – Экспериментальные, справочные и расчетные ТКЛР

№ п/п	Марка сплава	Источник данных	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$ при температуре, К			
			373	473	573	673
1	АК9ч	Эксперимент	22,1	23,4	24	26,3
		Справочные	21,7	22,7	23,5	25,6
		Расчет	21,8	23,1	24,3	26,1
2	Амгблч	Эксперимент	25	26	26,9	29
		Справочные	24,5	25,6	26,4	28
		Расчет	24,3	25,7	27,2	28,6
3	АЛ10В	Эксперимент	22,7	24,8	26,1	27,8
		Справочные	22,3	24,4	25,9	26,9
		Расчет	22,5	23,8	25,7	27,3
4	Д20	Эксперимент	23,4	25,3	28,1	30,5
		Справочные	22,6	24,7	27,3	30,2
		Расчет	23,3	24,5	27,2	29,4
5	АМГ6	Эксперимент	25	26,1	27,5	29
		Справочные	24,7	25,5	26,5	27,9
		Расчет	24,3	25,7	27,2	28,7
6	Д16	Эксперимент	23,7	25,2	27,7	30,6
		Справочные	22,6	24,7	27,3	30,2
		Расчет	23,3	24,5	27,1	29,4

На рисунках 7 приведен график экспериментальных, справочных и расчетных данных ТКЛР промышленного алюминиевого сплава. Оценка погрешности экспериментальных данных равна 5 %.

Для проверки адекватности применения формулы (15) для расчета ТКЛР ЛКМ провели измерения ТКЛР образцов с содержанием частиц 20 % Al_2O_3 . Результаты представлены на рисунке 8. Экспериментальные и расчетные данные ЛКМ состава $Al-Al_2O_3$ 20 % отличаются не более чем на 6 %. Расчетные данные дают меньшие значения по сравнению с измеренными.

Обобщая экспериментальные и расчетные данные, можно утверждать, что, применяя формулу (25), можно без проведения трудоемких и дорогостоящих измерений получать ТКЛР расчетным методом для сплавов и ЛКМ.

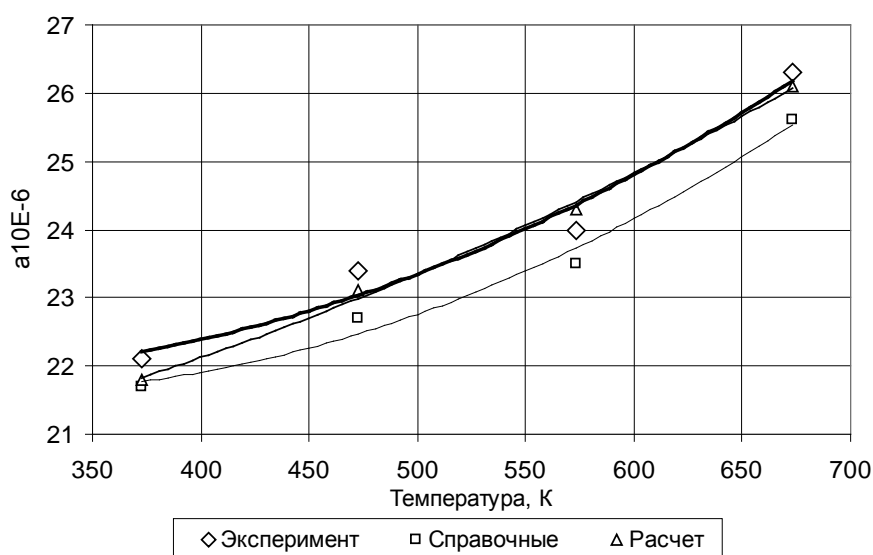


Рисунок 7 – Коэффициент линейного расширения сплава АК9ч

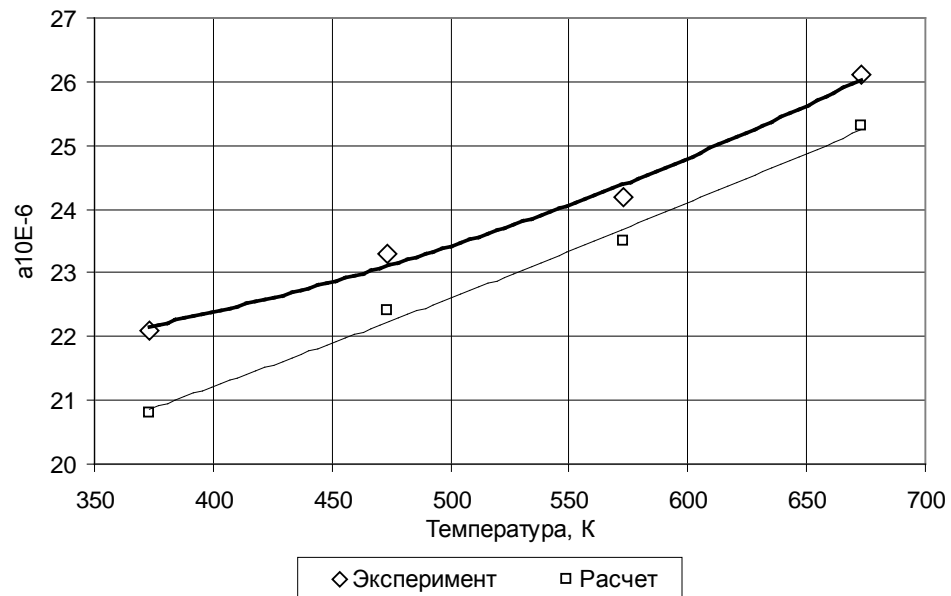


Рисунок 8 – Коэффициент линейного расширения ЛКМ состава Al-Al₂O₃ 20 %

Расчеты КТР исследованных ЛКМ в зависимости от состава и температуры приведены на рисунках 9,10.

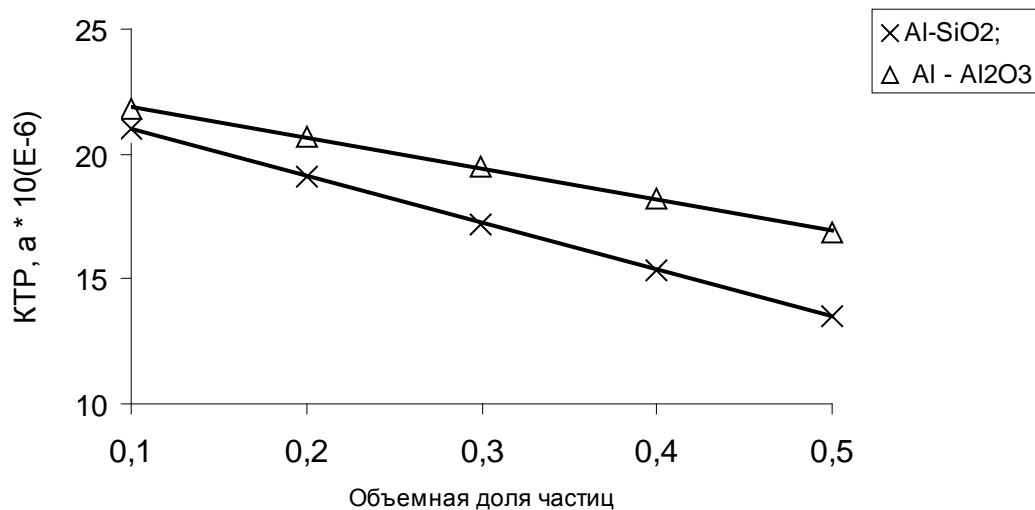


Рисунок 9 – Расчетные коэффициенты линейного расширения ЛКМ, при T=298 K, в зависимости от объемной доли частиц

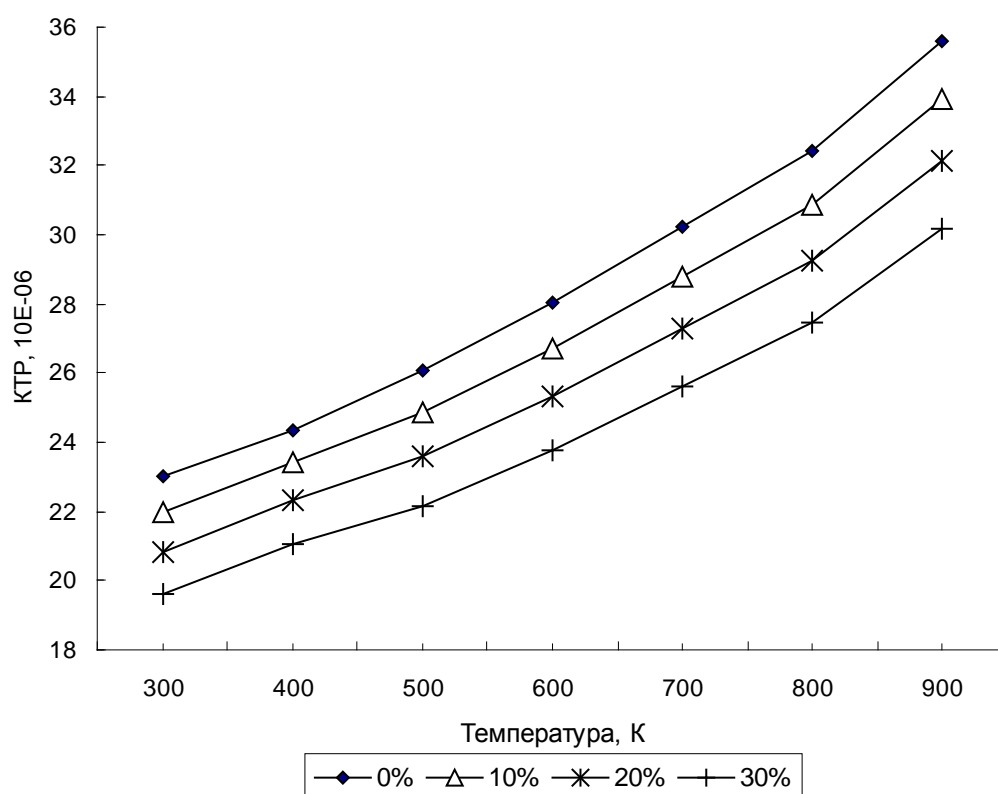


Рисунок 10 – Изменение коэффициента линейного расширения ЛКМ системы Al-Al₂O₃ от температуры и содержания частиц

Как видно из приведенных выше рисунков, при увеличении содержания частиц в ЛКМ ТКЛР снижается, причем ЛКМ с частицами SiO₂ имеет более низкий ТКЛР, по сравнению с ТКЛР ЛКМ с частицами Al₂O₃. Это можно объяснить, проанализировав формулу (25). Чем больше содержание частиц Al₂O₃ или SiO₂, тем больше происходит замещение доли алюминия с высоким ТКЛР и уменьшается его влияние. Вклад дисперсных частиц (имеющих более низкий ТКЛР по сравнению с алюминием) увеличивается, что приводит к уменьшению ТКЛР ЛКМ. Другие составляющие формулы, в данном случае плотность, имеют меньшее значение, так как плотности компонентов сплава незначительно отличаются между собой.

Результаты и выводы: 1) Получены экспериментальные данные по свойствам ТКЛР алюминиевых сплавов АК9ч, Амгблч, АЛ10В, Д16, Амгб, Д20. Установлено влияние вида и концентрации компонентов на ТКЛР сплава.

2) Предложена формула расчета ТКЛР сплава в зависимости от плотности, содержания и ТКЛР входящих в него компонентов.

3) Установлены зависимости ТКЛР от состава и температуры испытания ЛКМ.

1.6 Методы измерения ТКЛР

Измерительные возможности и перспективы развития дилатометрии

Изменение геометрических размеров под воздействием внешних условий, т.е. при изменении температуры, давления, электрического и магнитного полей, ионизирующих излучений и т.д. – фундаментальное свойство, присущее подавляющему большинству материалов. Изучением этих процессов занимается раздел физики, получивший название дилатометрии.

Основы метода измерений

Учёт теплового расширения необходим практически во всех современных отраслях техники и технологий, использующих точное сопряжение деталей, функционирующих при переменных температурах.

Исследования теплового расширения позволяют получать сведения о силах, действующих между атомами, а также оценивать анизотропию и ангармонизм* межатомного взаимодействия в твёрдых телах. Точные измерения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) необходимы также при фундаментальных исследованиях, например образования точечных дефектов или фазовых превращений в физике твёрдого тела, при решении вопросов прикладного характера, в частности изучении возможностей применения новых конструкционных материалов с заданными свойствами (прецизионных сплавов, оптических материалов, композитов и т.д.), материалов с различными ТКЛР, а также материалов, работающих в сложных температурных условиях.

Первые работы по изучению теплового расширения относятся к последней четверти позапрошлого столетия. Физо (*франц.* Fizeau) в 1862 г. применил интерференцию света для измерения удлинения образца при тепловом расширении [28]. В 1907 г. Хенинг (*англ.* Henning) предложил конструкцию прибора, в котором тепловое расширение веществ измерялось относительно изученного заранее теплового расширения кварцевого стекла. В России отдельные работы по изучению теплового расширения материалов выполнялись ещё в Главной палате мер и весов. В 1899 г. И. Лебедевым методом весового термометра измерялся температурный коэффициент объёмного расширения кварцевого стекла, необходимого для выполнения работ по созданию водородного термометра. П.Г. Стрелковым в 1953–1954 гг. была разработана конструкция дилатометра, пригодного для проведения относительных измерений ТКЛР в широком диапазоне температур .

Основы современных представлений о тепловом расширении тел были заложены Ферми, Френкелем, Грюнайzenом. В соответствии с предложенными ими моделями в основе теплового расширения лежит фундаментальная закономерность строения конденсированной материи: асимметрия сил притяжения и отталкивания между частицами (атомами, ионами), составляющими макроскопическое тело. Баланс сил определяет устойчивое расстояние между частицами в твёрдом теле, однако минимум потенциала в точке равновесия остается асимметричным, и при повышении температуры (и энергии частицы в минимуме) частица смещается в сторону более пологого края потенциальной ямы, что соответствует типичному случаю – расширению при нагревании. В отдельных случаях причинами изменения размеров могут являться структурные или фазовые переходы, происходящие при изменении температуры.

Величины ТКЛР большинства веществ в области комнатных температур отличаются друг от друга в пределах одного порядка величины. Универсальность этого свойства является отражением общих законов,

диктующих характер взаимодействий в конденсированных средах. Близость численных значений ТКЛР различных материалов и, как правило, слабая зависимость данной величины от чистоты и предыстории материалов дополнительно подчеркивают её фундаментальный характер и связь с основными константами материала и его внутренним строением. Таким образом, тепловое расширение является важной и информативной характеристикой твёрдых тел, которая связана с термодинамическими (свободной энергией, энтальпией) и структурными (фононным спектром, ангармонизмом решётки, дефектами) характеристиками материала [29].

Тепловое расширение принято описывать с помощью коэффициентов теплового линейного расширения для твёрдых тел и теплового объёмного расширения для жидких тел [29]. Для количественной характеристики теплового расширения твёрдых тел преимущественно используется ТКЛР, получивший название истинного (или дифференциального) и определяемый как:

$$\alpha = 1/L(T) \times (\delta L(T) / \delta T), \quad (26)$$

где $L(T)$ – длина тела при температуре T . Для удобства инженерных расчётов тепловое расширение тел также характеризуют интегральным (средним) ТКЛР в температурном интервале $(T_1 - T_0)$:

$$\alpha_{cp} = 1/L_0 [(L_1 - L_0) / (T_1 - T_0)] \quad (27)$$

где L_0, L_1 – длины тела при температурах T_0 и T_1 соответственно. В случае анизотропной среды температурные коэффициенты линейного расширения кристаллов всех кристаллографических классов, кроме кубического, зависят от направления относительно кристаллографических осей. В этом случае ТКЛР является тензорной величиной α_{ij} .

Тензорными называются величины, которые описываются в каждой системе координат несколькими числами (компонентами тензора). При введении координатной системы, помимо чисел, описывающих сам объект или физическое явление, появляются числа, описывающие его связь с выбранной системой координат. – *Прим. ред.*

Объёмное расширение по аналогии с линейным характеризуется дифференциальными и интегральными коэффициентами объёмного расширения β и $\beta_{\text{ср}}$.

Измерение ТКЛР материалов представляет собой совместное измерение удлинения исследуемого образца и изменения температуры, вызвавшего это удлинение. Приборы для измерения ТКЛР – дилатометры – разделяют по принципу действия на несколько групп: интерференционные; компараторные; рентгеновские; механические с толкателями, использующие различные способы регистрации перемещения толкателя; другие дилатометры с различными принципами действия, как правило, оптимизированные для специальных задач и использующие преимущественно в исследовательской практике (ёмкостные, лазерные и т.д.).

Объёмный метод

Объёмный пикнометрический метод позволяет непосредственно определять объёмный коэффициент теплового расширения. Принципиальная схема его показана на (рис.11). Дилатометрическая ячейка, как правило, выполнена из стекла и состоит из стакана 1 и капиллярной трубки 2. Исследуемый образец 3 помещают в ячейку через нижний конец стакана, после чего стакан запаивается. После этого дилатометрическая ячейка [29,30].

заполняется передающей жидкостью (чаще всего ртутью или этиловым спиртом, тщательно дегазированные). При изменении температуры объём образца меняется, что влечет за собой перемещение жидкости по капилляру. Температурный интервал, в котором можно применять метод, ограничен температурами затвердевания и кипения передающей жидкости и обычно

лежит в пределах 220 – 370 К. Чувствительность метода определяется диаметром капилляра и обычно не превышает 10^{-4} см. Преимущества данного метода по сравнению с остальными дилатометрическими методами: с его помощью можно проводить исследование теплового расширения порошкообразных образцов или образцов неправильной формы. Данные, полученные этим методом, можно использовать для определения температурной зависимости плотности исследуемого вещества (поэтому метод называют пикнометрическим.)

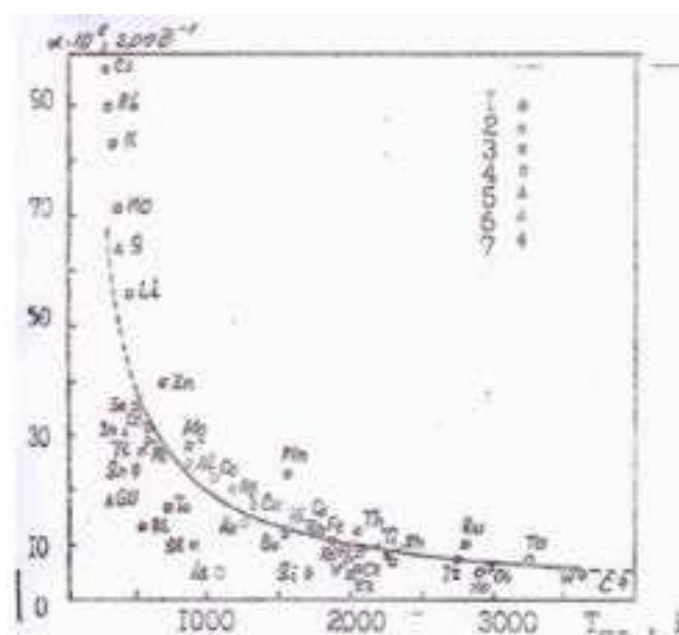


Рис. 11. Коэффициент теплового расширения элементов в зависимости от их температуры плавления: 1 – ОЦК; 2 – ГЦК; 3 – гексагональная структура; 4 – ромбоэдрическая структура; 5 – орторомбическая структура; 6 – объемноцентрированная тетрагональная; 7 – алмазная структура

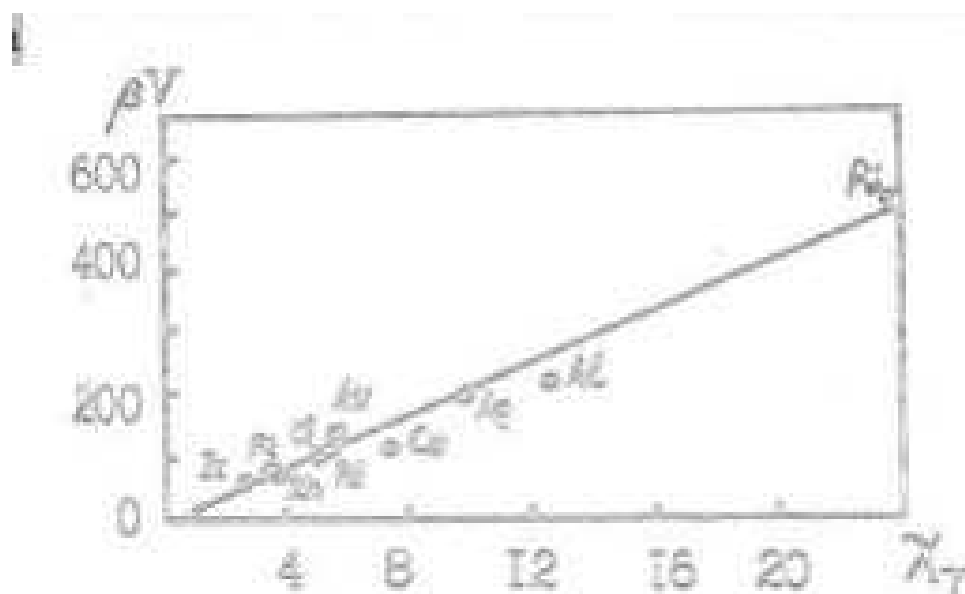


Рис. 12. Зависимость произведения от сжимаемости для металлов с гранецентрированной решеткой

Оптические методы

К ним относятся: интерференционный метод - классический метод исследования теплового расширения; метод оптического рычага, в котором при изменении длины образца нарушается равновесие оптического рычага, фиксируемое регистрирующим устройством, и др.

Чувствительным элементом в интерференционном методе является интерферометр, принципиальная схема которого приведена на (рис. 13.) Интерферометр состоит из 2 кварцевых или стеклянных пластин (1, 2), поверхности которых тщательно отполированы. Пластины разделены тремя образцами 3 из исследуемого материала[25]. Длина образцов подгоняется так, чтобы между пластинами образовался воздушный клин. Интерференционная картина возникает в результате наложения света, отраженного от нижней поверхности верхней пластины и от верхней поверхности нижней пластины. При изменении длины образца интерференционная картина смещается.

применение лазерной техники для получения строго монохроматического света повысило его чувствительность до $\sim 10^{-8}$. Основная трудность этого

метода заключается в необходимости точной обработки исследуемых образцов. В связи с этим предложен образец произвольной формы с 2 плоскопараллельными поверхностями, на который опирается кварцевый винт. С помощью винта задается нужный угол воздушного клина. Интерферометр и образец расположены на общей кварцевой основе.

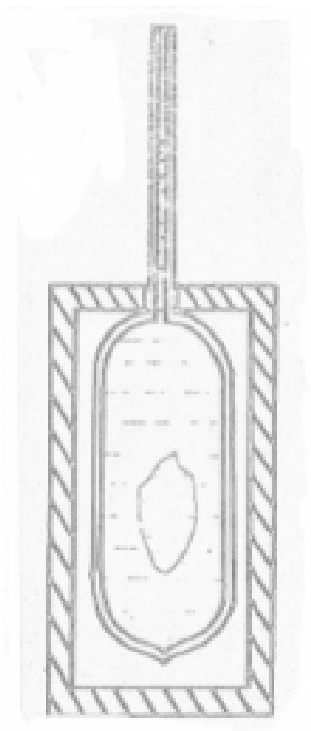


Рис. 13. Принципиальная схема объемного дилатометра

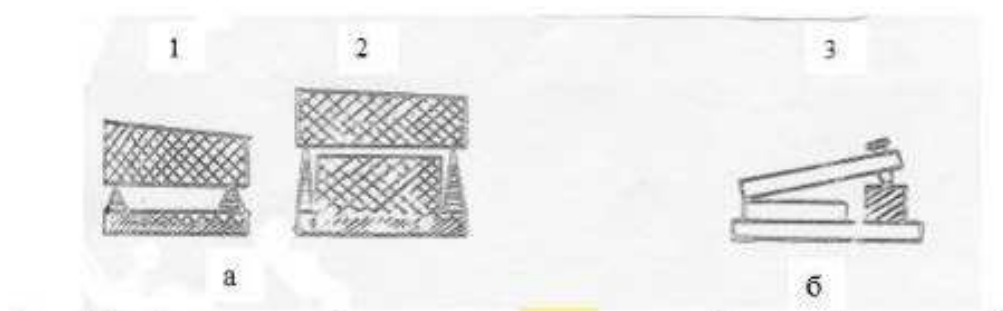


Рис. 14. Схемы интерференционных дилатометров: а) для абсолютных (1) и относительных (2) измерений б) с образцом произвольной формы

Кварцевые дилатометры

К кварцевым дилатометрам относится большая группа дилатометров, с помощью которых КТР веществ измеряется относительно теплового расширения плавленного кварца. Кварцевые дилатометры используются в широкой области температур: от 20 до 1200 К. Дилатометрическая ячейка (рис. 15) состоит из кварцевой трубы 1 и кварцевого толкателя 2. Исследуемый образец 3 зажимается между выступом трубы и толкателем. Ячейка помещается в термостатируемый объем. При изменении температуры удлинение образца передается толкателю, перемещение которого фиксируется каким-либо регистрирующим прибором, например, микроинтерферометром[28,29].

Емкостный дилатометр

Радиотехнический (емкостный дилатометр) метод получил широкое распространение для исследования теплового расширения твердых тел при низких температурах. Схема дилатометрической ячейки емкостного дилатометра показана на (рис. 11). Чувствительный элемент дилатометра – конденсатор, одна из пластин которого 1 закреплена неподвижно. Вторая, подвижная, пластина 2 соприкасается с исследуемым образцом 3 непосредственно через шток 4. При изменении температуры длина образца меняется, что ведет к перемещению подвижной пластины 2, в результате чего изменяется емкость конденсатора.

Основная экспериментальная трудность метода – необходимость изготавливать массивные образцы специальной формы. Это ограничивает

возможность применения метода при изучении теплового расширения труднообрабатываемых материалов и кристаллов малых размеров.

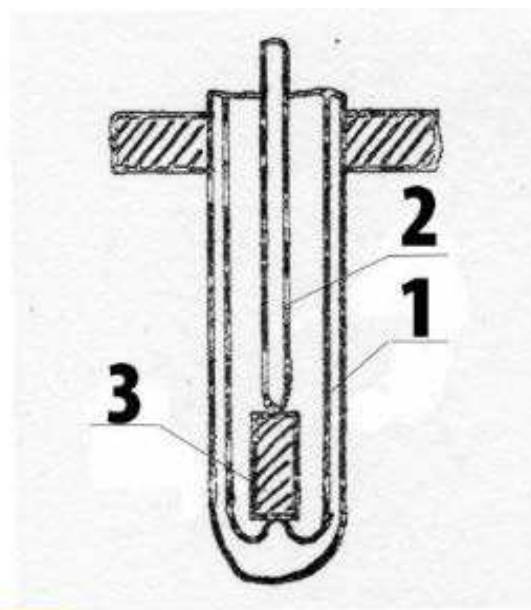


Рис. 15. Схема дилатометрической ячейки Хеннига

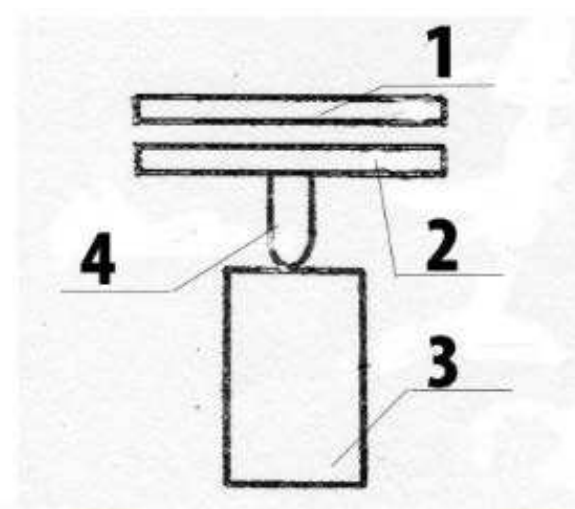


Рис. 16. Схема дилатометрической ячейки емкостного дилатометра

1.6.1 Разновидности дилатометров

Дилатометрами называют приборы, предназначенные для регистрации и измерения теплового расширения материалов и объемных (линейных) эффектов фазовых превращений. С помощью дилатометров тем и иным методом измеряется изменение длины образца или разности длин исследуемого и эталонного образцов в зависимости от температуры.

Для решения различных научных и практических задач разработано множество конструкций дилатометров, как простых, так и весьма сложных.

Ниже приведены краткие сведения об основных разновидностях этих приборов, применяемых в металлофизических исследованиях.

Механические дилатометры могут быть двух типов. В одних дилатометрах изменение длины образца преобразуется в поворот стрелки или в перемещение пера на бумаге с помощью рычажной системы. В других – изменение длины образца непосредственно измеряется с помощью механического индикатора часового типа.

Приборы первого типа устарели и в настоящее время почти не применяются.

Чувствительность механических дилатометров обычно не превышает 10^{-3} мм.

Оптические дилатометры чрезвычайно разнообразны по конструкции и принципу действия. В простейшем случае изменение длины образца определяется путем наблюдения за смещением его торца через микроскопические или телескопические устройства. Такие дилатометры называют также компараторными.

В интерференционных дилатометрах изменение длины образца преобразуется в смещение интерференционной картины, наблюдаемой с помощью микроскопа. Чувствительность этих дилатометров достигает 10^{-6} мм при использовании обычных источников света и повышается еще на порядок путем применения лазерного излучения, обладающего строгой монохроматичностью.

Фотоэлектрические дилатометры иногда классифицируют как оптические. В них изменение длины образца с помощью различных промежуточных устройств трансформируется в изменение освещенности фотоэлемента или фотосопротивления. Изменение силы тока в цепях этих элементов может быть усилено и записано тем или иным способом. Максимальная чувствительность фотоэлектрических дилатометров составляет 10^{-7} мм.

Емкостные дилатометры существенно различаются по конструкциям и электрическим схемам, но все они отличаются преобразованием изменения длины образца в изменение емкости конденсатора. Последнее, в свою очередь, преобразуется в изменение частоты переменного тока, измеряемое радиотехническими средствами. Чувствительность емкостных дилатометров может быть очень высокой и ограничивается лишь нестабильностью элементов измерительной схемы. Известны конструкции емкостных дилатометров с коэффициентом увеличения до 10^6 .

Индукционные дилатометры отличаются тем, что изменение длины образца воспринимается индуктивным датчиком перемещений, соединенным с измерительной схемой. Чувствительность индукционных дилатометров может быть очень высокой.

В *тензометрических дилатометрах* изменение длины образца сообщается упругому элементу с наклеенными на него тензометрическими датчиками. В упругой области изменение электросопротивления датчика прямо пропорционально его деформации. Чувствительность дилатометра определяется коэффициентом усиления измерительной аппаратуры.

Современные дилатометры фирмы «NETZSCH»

Дилатометры серии DIL 402 позволяют проводить измерения размеров образцов в зависимости от температуры или времени в широком температурном диапазоне в точно контролируемой атмосфере с высоким разрешением и точностью.

Фирмой выпускаются дилатометры горизонтальные с толкателем DIL 402 модификации DIL 402 C, DIL 402 PC и DIL 402E, которые представляют собой автоматизированный аппаратный комплекс: состоящий из измерительного блока, в состав которого входят устройство изменения температуры и измерительная система; системы контроля (для модификации DIL 402 E система контроля встроена в измерительный блок; персонального компьютера и вспомогательного оборудования.

Горизонтально расположенное устройство изменения температуры предназначено для обеспечения рабочего диапазона с программой измерений. Для дилатометра DIL 402 PC – это одна печь, для дилатометра модификации DIL402C – это три взаимозаменяемых печи (низкотемпературная от 180 0C до 500 0C, высокотемпературная от комнатной температуры до 1600 0C и высокотемпературная печь от комнатной температуры до 2000 0C), для модификации DIL 402 E – это три взаимозаменяемые печи (низкотемпературная от – 260 0C до 550 0C и две высокотемпературные (25) ... 650 ... 2800 0C). Температура исследуемого образца, в зависимости от рабочего диапазона температур, измеряется либо контактным датчиком температуры, либо с помощью пирометра.

Выводы по разделу :

1. С развитием электронной вычислительной техники и разработкой физических и математических моделей получения заготовок для машиностроения высокого качества и в короткие сроки, требуется создание банка теплофизических свойств, с обеспеченной высокой точностью. Это позволяет в конкурентно короткие сроки с применением средств моделирования производить подготовку производства новых изделий и повышение качества серийной продукции.

2. Известна роль литейной усадки в формировании размеров отливки, которая зависит от технологических параметров, природы сплава, а также от изменения размеров при нагреве и охлаждении.

3. Получение зависимостей теплофизических свойств от химического состава сплава имеет большой научный и практический интерес.

Цель данной работы:

Изучить влияние содержания кремния в силуминах на температурный коэффициент линейного расширения, для чего необходимо решить следующие задачи:

1. Изготовить силумины с различным содержанием кремния от 1 до 21 %;
2. Измерить температурный коэффициент линейного расширения сплавов;
3. Рассчитать литейную усадку условной отливки при литье в постоянную форму сплавов с различным содержанием кремния.

2 Методика эксперимента

2.1 Выбор химического состава сплавов

Для исследования зависимости ТКЛР от химического состава (содержания кремния) были выбраны 6 сплавов системы алюминий-кремний с подобием сплавам по ГОСТ 1583-93

Базовые составы сплавов приведены в табл.4

Таблица 4. Химический состав базовых сплавов

	Магний	Кремний	Марганец	Медь	Титан	Никель
АМг4К2М	4,5	1,3-2	0,6-0,9	0,7-1,0	0,10-0,25	0,002
АК5М2	0,2—0,85	4,0-6,0	0,2-0,8	1,5-3,5	00,5-0,20	-
АК7	0,2-0,55	6-8	0,2-0,6	-	-	-
АК9	0,25-0,45	8-12	0,2-0,5	-	-	-
АК12	0,1	10,0-13	0,5	-	-	-
АК21М	0,3-0,6	20-22	0,2-0,4	2,2-3,0	-	-

Модельные составы сплавов системы АL-SI приведены в табл. 5

Расчет шихты вели на 200 г сплава.

Таблица 5 Модельные составы сплавов системы АL-SI

№ п/п	Химический состав, %		Аналог сплава	Состав сплава в граммах	
	Al	Si		Al	Si
1	99,85	0,015	А85	198,8	1,2
2	98,5	1,5	АМг4К2М	197	3
3	95,0	5,0	АК5М2	190	10
4	91,5	8,5	АК8М	183	17
5	88,0	12,0	АК12	176	24
6	79,0	21,0	АК21М	158	42

2.2 Технология получения сплавов

Плавку вели в печи Таммана (рис. 17) в графитовом тигле следующим образом. Вначале загружался алюминий, после нагрева и расплавления которого при температуре 900 °С вводили кремний, после растворения. Контроль температуры производился термопарой ВР 5/20. При температуре 720°С производили разливку в кокиль (рис.18)



Рисунок 17– Внешний вид печи Таммана

В качестве противопригарного покрытия использовали раствор гашёной извести, которая наносилась кисточкой на рабочую поверхность, предварительно нагретую до температуры 200-250°С, с последующим нагревом под заливку до 300°С. (рис.18)

Перед окраской кокиль подогревают до 150-180.



а

б

Рисунок 18 – Металлический кокиль для заливки образцов:

а – в сборе; б – в разобранном виде

Из полученных литых образцов вытачивали на токарном станке образцы для определения ТКЛР диаметром 6 и длиной 25 мм. (рис.19).

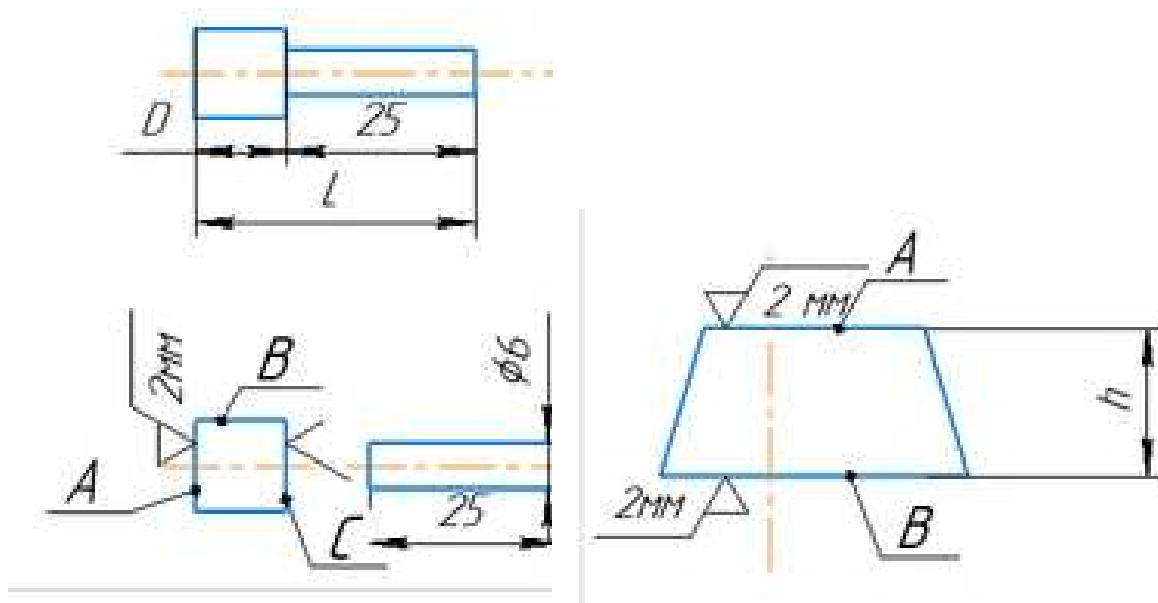


Рисунок 19 – эскизы образцов.

Металлографический анализ проводился посредством приготовления шлифов, их последующего травления и изучения на микроскопе Carl Zeiss AxioObserver A1m (рис.20).



Рисунок 20 – Микроскоп Carl Zeiss AxioObserver A1m

Стандартная металлографическая пробоподготовка включает в себя комплекс мероприятий при подготовке образцов для оптических исследований. Этапы пробоподготовки для металлографического анализа в современной лаборатории (Оборудование показано на рисунке):

1) Шлифовка производилась на специальном шлифовальном станке Saphir 520, с закреплением шлифовальной бумаги на вращающемся диске установки. Заточенный образец шлифуется на шлифовальной бумаге, до полного удаления рисок, с постепенным переходом от бумаги с абразивом №12-3 с зернистостью 150-25 мк до бумаги микронной зернистостью №М40-М5 с зернистостью от 40 до 8,5 мк. При переходе с одного номера зернистости на другой необходимо очищать образец от абразива и менять направление шлифовки на 90° ;

2) Полирование проводили на специальном станке Saphir 520. Окончательное полирование ведется на тонком мягком сукне (фетре), смачиваемом водой и специальными пастами, до полного уничтожения рисок и получения зеркальной поверхности, что занимает при хорошо отшлифованной поверхности 5-7 мин. После полирования шлиф промывают водой, затем сушат прикладывая его к фильтровальной бумаге.



Рисунок 21 – Комплекс оборудования для пробоподготовки

Измерение твёрдости образцов по Бринеллю проводилось на универсальном твердомере М4У.

Твердомер состоит из колонны (раммы), регулируемого по вертикали предметного столика, опорной плиты и системы контроля, а также, в зависимости от комплектации прибора, из механизмов оптического измерения (рис.21).

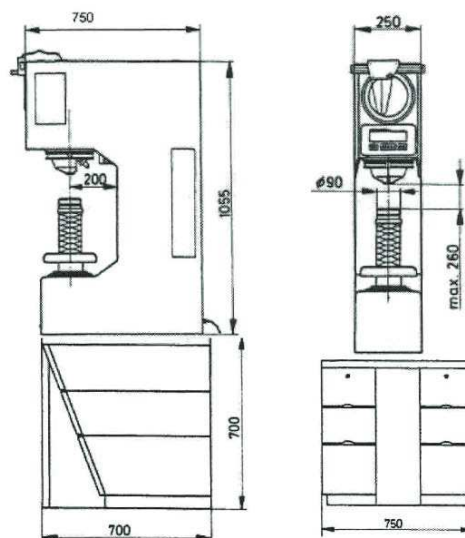


Рисунок 22 - Твердомер М4У G3

При испытании на твердость в образце под индентором возникает сложное напряженное состояние, которое характеризуется наибольшим

коэффициентом мягкости по сравнению с другими видами механических испытаний ($\alpha = t_{\max}/S_{n_{\max}} > 2$).

При стандартном измерении твердости по Бринеллю (ГОСТ 9012–59) стальной шарик диаметром D вдавливают в испытуемый образец под приложенной определенной время τ нагрузкой P .

После измерения индентор автоматически заменяется на объектив, а автоматически настраиваемое изображение отпечатка появляется на экране.

Дальнейшее измерение происходит с помощью измерительной линейки с измерительными линиями, которая функционирует вместе с электронной системой измерений.

Полученные данные преобразовываются электронной системой твердомера и значение твердости выводится на экран.

Измерения ТКЛР проводили на dilatометре DIL 402 C фирмы NESTH (рис 23).



Рисунок 23 DIL 402 C фирмы NESTH

Прибор работает в диапазоне 20-1650 °С. Получаемые данные обрабатываются компьютером и визуализируются на экране ПК в процессе измерений и могут выводиться на печать.

2.3 Изготовление шлифов

Обработка образцов происходила на шлифовальном станке от грубого к мелкому абразиву. Далее производилась обработка на шлифовальном станке с помощью фетровой ткани, пропитанной порошком Гоя с водой, после чего происходила обработка вручную с помощью алмазной пасты до металлического блеска. Далее было произведено травление с помощью раствора в составе:

HNO_3 – 1.6 мл.

H_3PO_4 – 36 мл.

CH_3COOH – 1.7 мл.

H_2O – 10 мл.

Дополнительно был разведен раствор на основе HF , воды и этилового спирта.

2.4 измерение ТКЛР полученных сплавов

Дилатометр DIL 402 С предназначен для измерения и регистрации изменений литейных размеров образца и представляет собой преобразователь смещения высокого разрешения (LVDT – Linear Variable Displacement Transducer) 25 нм/град, с максимальным диапазоном измерения 5000 мкм. Система контроля служит для поддержания заданной температуры исследуемого образца в соответствии с программой измерений и включает в себя контроллер термо-аналитической системы TASC 414, многостадийный программатор и контроллер с системой сбора данных. Исследуемый образец устанавливается в держатель, помещается в нагревательное устройство и производится запуск измерительной программы. На экран монитора выводятся все текущие экспериментальные и расчетные данные. Конструкция дилатометра позволяет проводить исследование образцов в различных средах (инертной, окислительной, восстановительной и в вакууме).

Программа учитывает расширение прободержателя в результатах измерения образца с расчетом d_l , d_l/l_0 , а так же физический альфа и технический альфа с выводом графиков измерений на экран монитора и печатающее устройство. Для измерения использовались образцы, обработанные на токарном станке диаметром : 6, длиной 25 мм.

Торцевые поверхности образца должны быть плоско параллельны. Измерения проводились в диапазоне от 30 до 400 °С, составляла 4 К в минуту.

3 Исследование влияния содержания кремния на физико-механические свойства сплавов

3.1 Измерение твердости образцов

Измерение твердости было проведено на твердомере Роквелла индентером диаметром равному: 3,175 предназначенного для алюминиевых сплавов с нагрузкой в 60 кг. Результаты приведены в таблице 6, результаты по шкале HRH.

Таблица 6 – результаты измерения твердости

Номер образца	Процентное содержание SI	Твердость HRH
1	0,15%	37
2	1,5%	60
3	5,5%	70
4	8,5%	77
5	12%	84
6	21%	92

Таким образом мы видим увеличение твердости при повышении содержания кремния в алюминии.

3.2 Исследование микроструктуры

После получения шлифов мы производили исследование микроструктуры с помощью микроскопа.

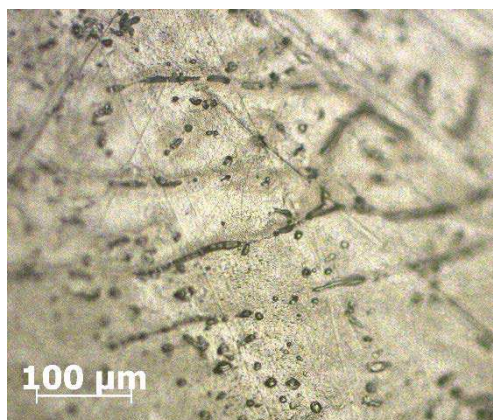
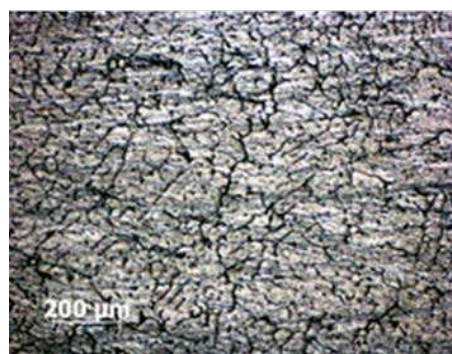
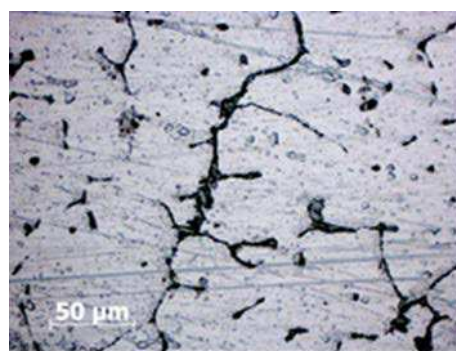


Рисунок 24 – 1 образец с содержанием Si 0,015%

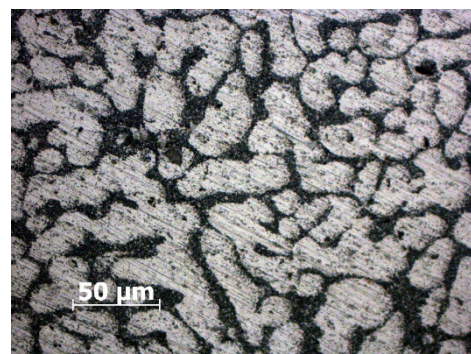
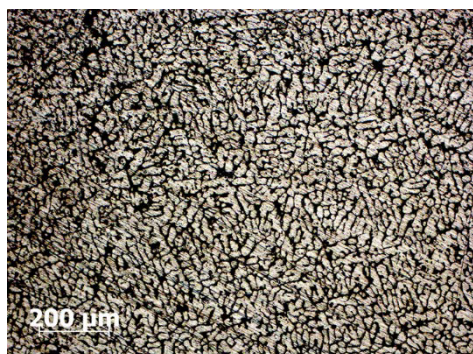


а)



б)

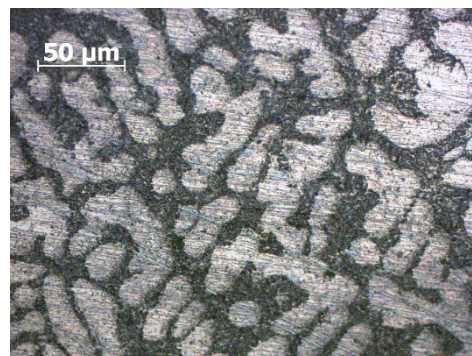
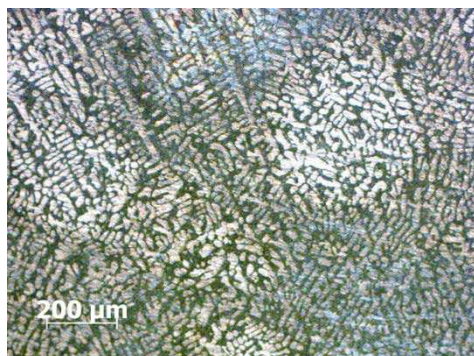
Рисунок 25 – образец 2, а,б,в содержание кремния 1,5 %



а)

б)

Рисунок 26 – образец 3 а, б с содержанием кремния 5,5 %

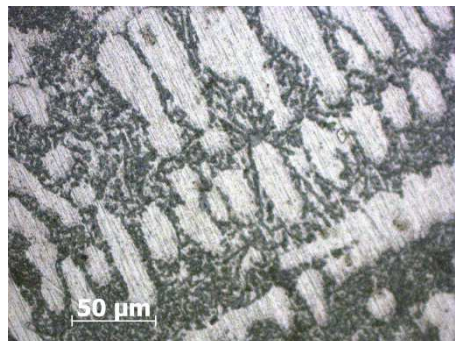
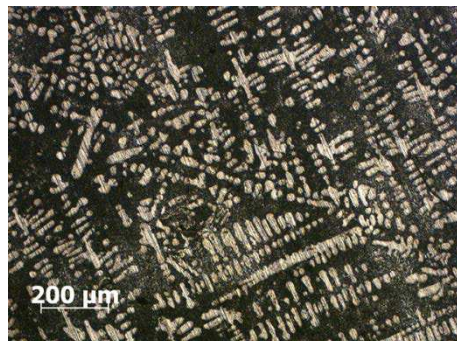


а)

б)

Рисунок 27 – образец 4 а, б с содержанием кремния 8,5%

Микроструктура сплава 5, с содержанием 12,0 % кремния кроме α - твердого раствора и эвтектики, имеет в своем составе грубоигольчатую фазу кремния, образованную при первичной кристаллизации, а также мелкокристаллическую, образованную при вторичной кристаллизации (рис.28).

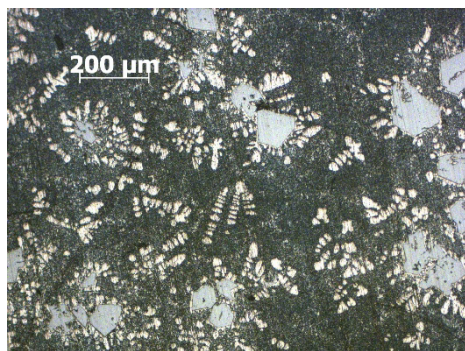


а)

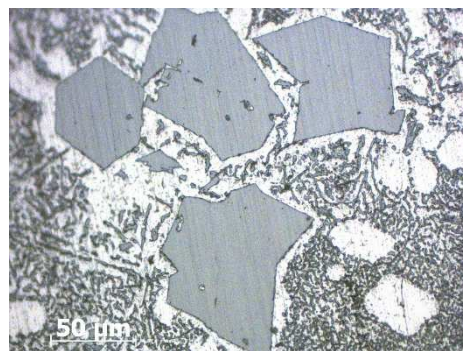
б)

Рисунок 28 – образец 5 а, б с содержанием кремния 12 %

На рис. 6 микроструктура сплава 6, содержащего 21 % кремния. Здесь можно увидеть первично закристаллизовавшийся кремний, эвтектика (α - твердый раствор алюминия+кремний), и мелкие кристаллы вторичной кристаллизации (α - твердый раствор алюминия + кремний).



а)



б)

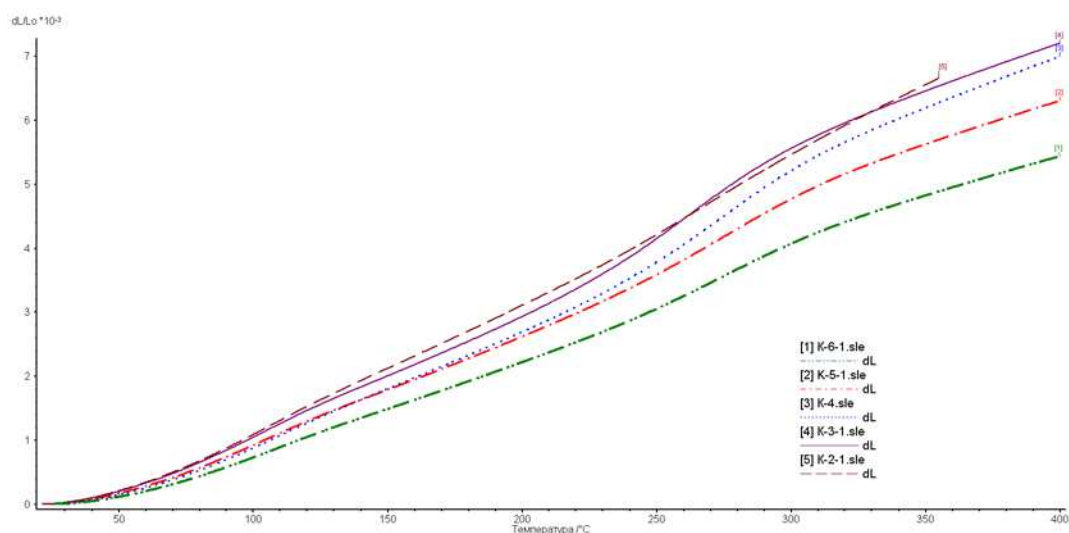
Рисунок 29 – образец б а, б с содержанием кремния 21 %

3.3 Измерения ТКЛР на dilatометре DIL 402

На рисунках 30-35 приведены результаты измерений ТКЛР образцов плавок 1-6. Для наглядности результатов графики представлены попарно в сторону увеличения содержания кремния от 0.15 до 21 %: 1-2; 2-3; 3-4; 4-5; 5-6.

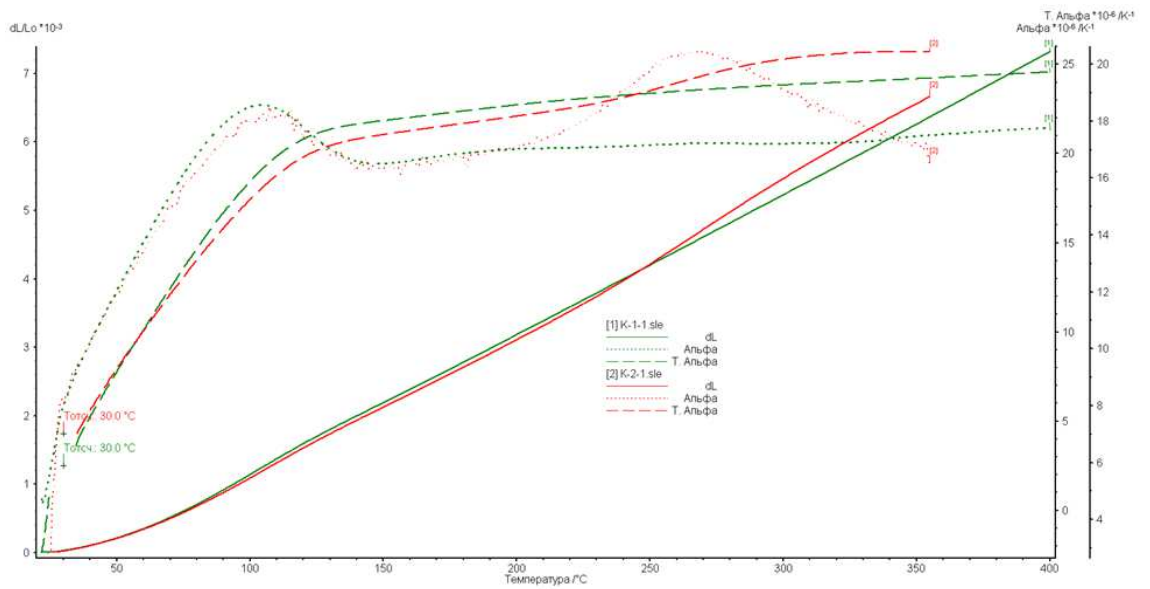
Для наглядности графики построены на основе сравнения образцов двух соседних сплавов, с учетом увеличения кремния: 2-3, 3-4, 4-5, 5-6. Анализируя сплавы (1-6) можно видеть, что с увеличением содержания кремния снижается ТКЛР, как физический, так и технический, что наглядно видно при сравнении кривых по dl/dl_0 (рис. 30-35).

Пики на кривой физической альфа зафиксированы при 120 °С и при 270 °С причиной этого может служить фазовое превращение в частности растворение примеси железа в алюминии и с образованием силицида железа, а пик при 270 °С связан с увеличением растворимости кремния в алюминии.



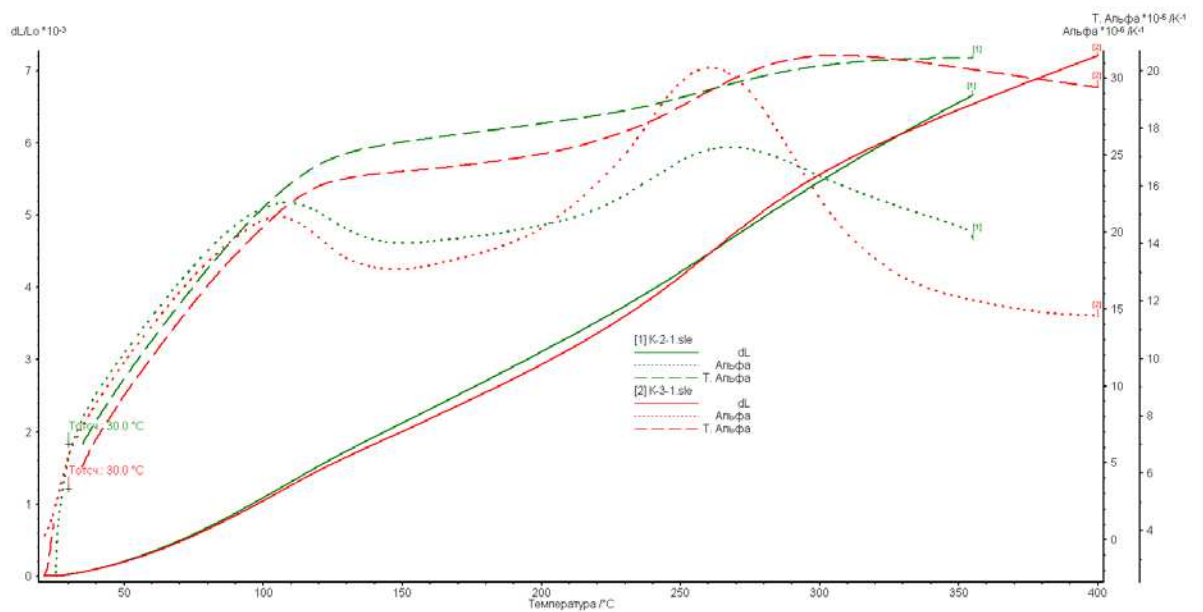
(2) – 1,5 % Si; (3) – 5,5 % Si %; (4) – 8,5% Si (5) – 12% Si, (6) – 21% Si

Рисунок 30. Изменение относительного удлинения при нагреве от 30 до 400 °С в зависимости от содержания кремния в сплаве



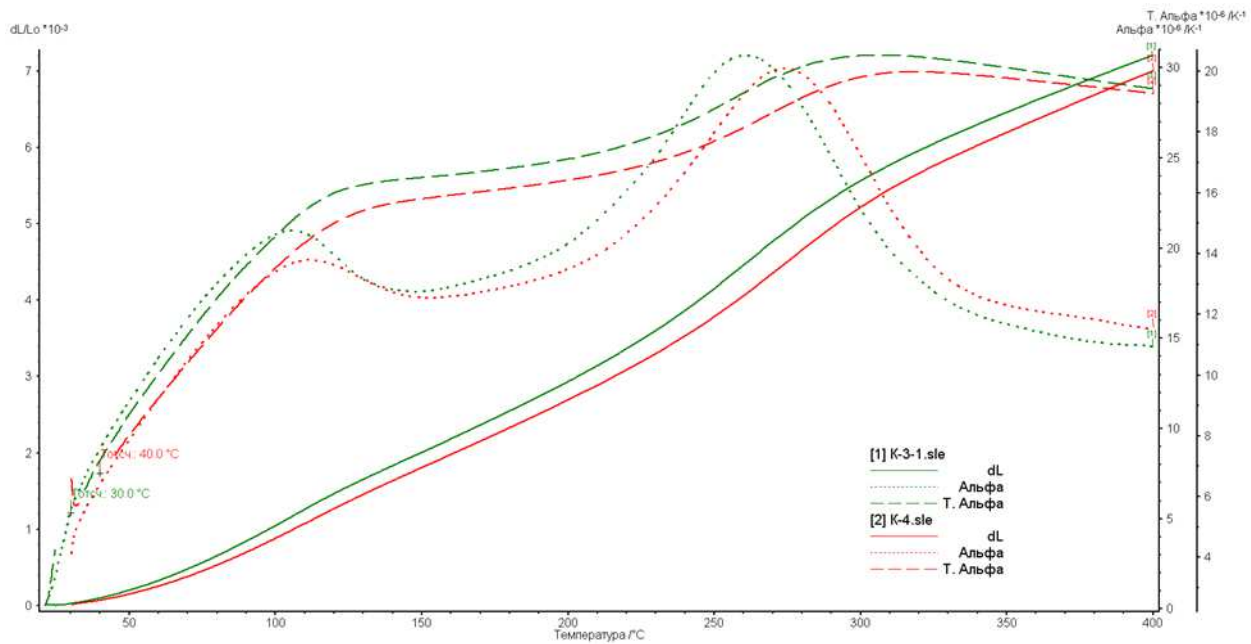
(1) – 0,15 % Si; (2) – 1,5 % Si

Рисунок 31 – Изменение относительного удлинения (dl/dl_0), физической («истинной») и технической величины ТКЛР при нагреве от 30 до 400 °С



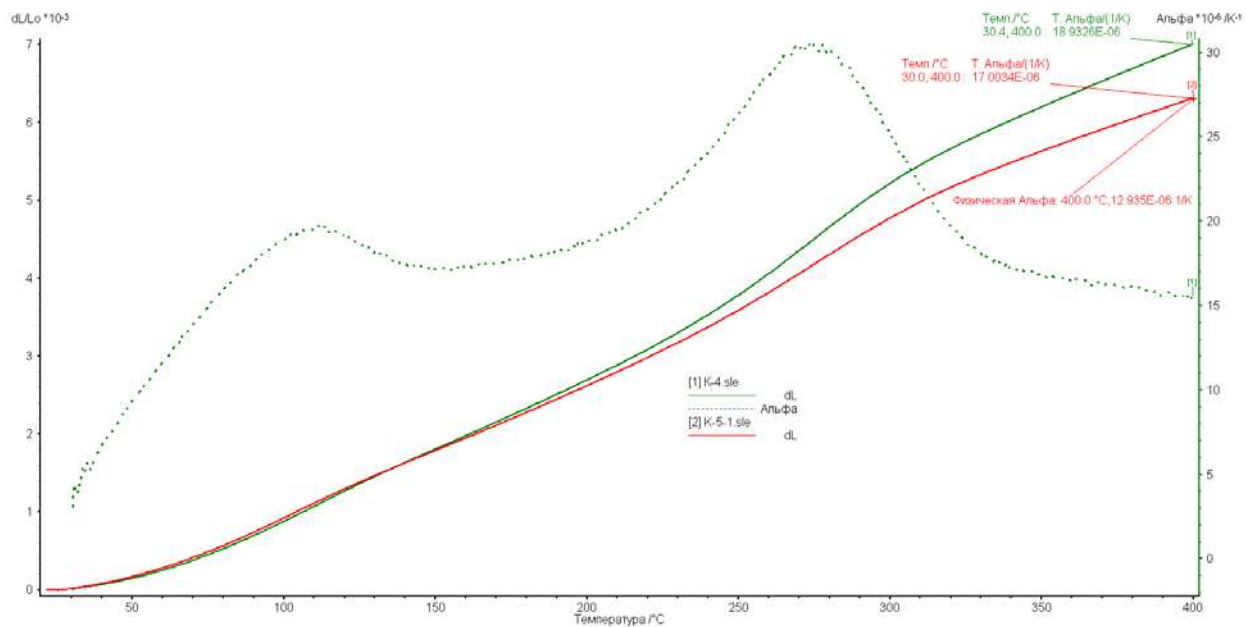
(2) – 1,5 % Si; (3) – 5,5 % Si

Рисунок 32 – Изменение относительного удлинения (dl/dl_0), физической («истинной») и технической величины ТКЛР при нагреве от 30 до 400 °С



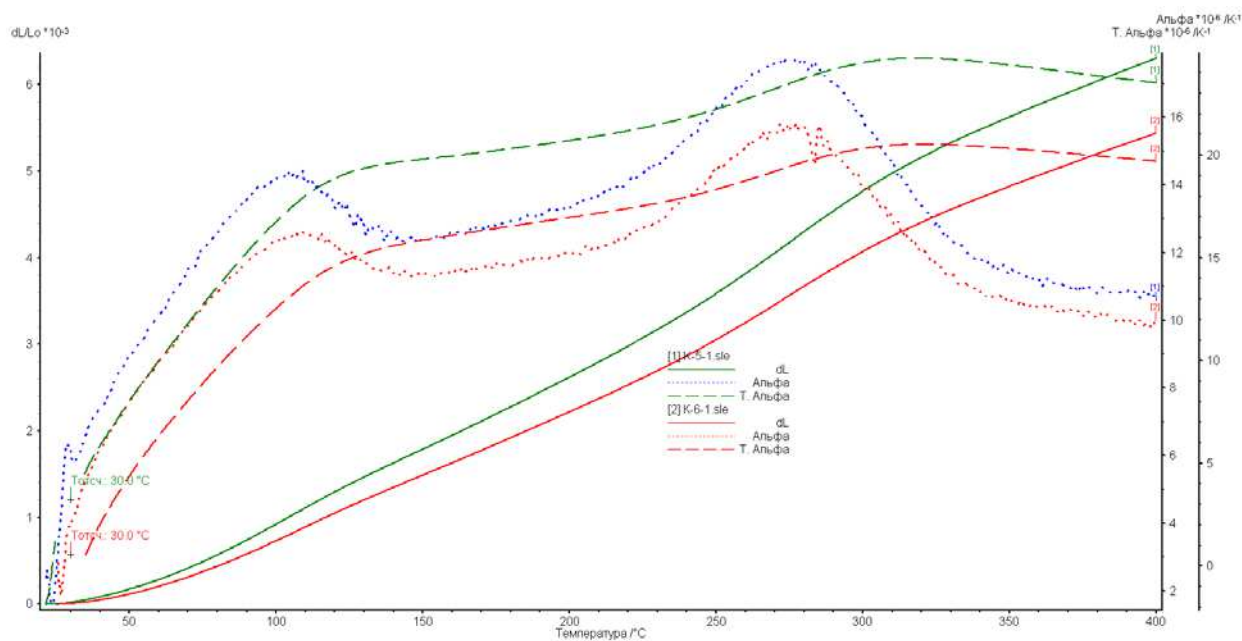
(3) – 5,5 % Si; (4) – 8,5 % Si

Рисунок 33 – Изменение относительного удлинения (dl/dl_0), физической («истинной») и технической величины ТКЛР при нагреве от 30 до 400 °С



(4) – 8,5 % Si; (5) – 12 % Si

Рисунок 34 – Изменение относительного удлинения (dl/dl_0), физической («истинной») и технической величины ТКЛР при нагреве от 30 до 400 °С



(5) – 12 % Si; (6) – 21 % Si

Рисунок 35 – Изменение относительного удлинения (dL/dL_0), физической («истинной») и технической величины ТКЛР при нагреве от 30 до 400 °С

Измерения образца 1, алюминия марки А 99 приведены на (рис. 30). С увеличением температуры от 30 до 400 °С, ТКЛР растет с 22,4 до 29,7 ($1/K \cdot 10^{-6}$). Для более наглядного представления измерений, графики результатов измерения сплавов совмещены попарно, в сторону увеличения кремния в модельных образцах сплавов. На рисунке х представлена термограмма измерения алюминия марки А85, на которой виден пик физической альфа при температуре около 120 °С. Аналогичные пики мы можем видеть и на других рисунках. При наложении графиков видно, что с увеличением в сплаве кремния до 21 %, ТКЛР заметно снижается. Наименьшие значения ТКЛР зафиксированы у сплава Ал-кремний, содержащего 21 % кремния. На (рис 35) показана зависимость dL/dL_0 от температуры, где наглядно представлена

закономерность снижения относительного удлинения от содержания кремния в сплаве – с увеличением кремния от 0 до 21 % оно уменьшается.

Известно, что кремний обладает низким ТКЛР, алюминий высоким (рис 36,37). Сплав двух компонентов позволяет получать материал с необходимыми свойствами. На кривых физической альфа имеется и второй пик около 270°C . Появление этих пиков связано со структурными, фазовыми превращениями в сплаве. Поскольку в алюминии А85 имеются примеси Fe и Si, то при нагревании возможен распад силицида железа, или изменениями растворимости в решетке алюминия. Вторым пиком ($264\text{--}270^{\circ}\text{C}$) характерен для образцов сплавов с кремнием (на термограмме А85 этого нет).

На всех рисунках видно, что физический альфа который на каких-то участках нагрева или охлаждения может аномально изменяться (рис. 30). Такое явление остается незамеченным и может приводить к ошибкам как в расчетах, так и в математических моделях.

3.4 Сравнительный анализ полученных данных

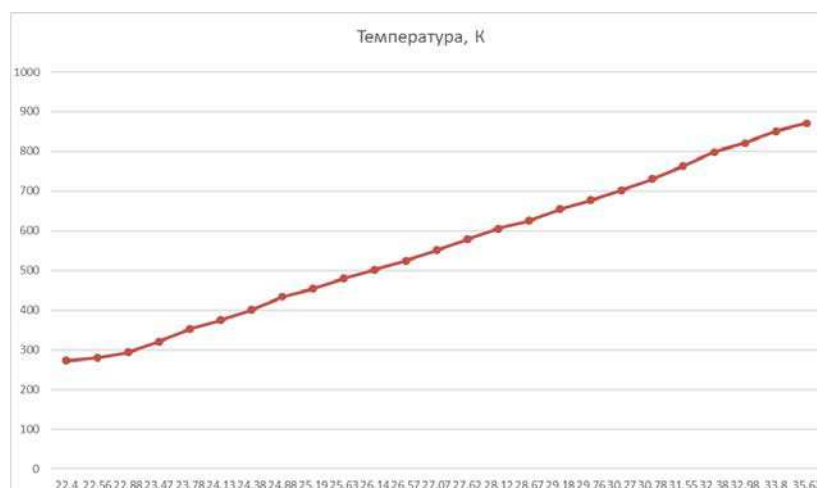


Рисунок 36 результаты измерения ТКЛР алюминия Марки ВЧ

На рисунках 36-37 приведены результаты измерения ТКЛР алюминия Марки ВЧ и кремния марки КР0.

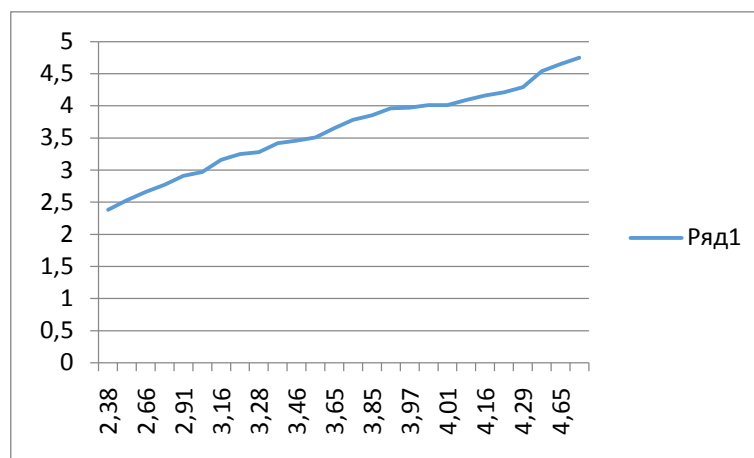


Рисунок 37 результаты измерения ТКЛР кремния Марки КР0

Как пример практического применения результаты измерений использованы для расчета литейной усадки, откуда видно, что усадка сплавов в условиях затвердевания металлической формы значительно меньше, чем дают справочные данные. На практике это приводит к снижению точности соответствия размеров литейной оснастки, ее доработок и увеличению продолжительности сроков постановки изделий на серийное производство.

Таблица 8 литейная усадка

№	Сплав	α от	α ст	$\Delta T_{от}$	$\Delta T_{ст}$	К	Литейная усадка %
1	AK5M2	20,43	17	520	400	1,004	0,4
2	AK7	19,52	17	520	400	1,004	0,4
3	AK9	19,34	17	520	400	1,004	0,4
4	AK12	16,99	17	520	400	1,002	0,2
5	AK21M	14,68	17	520	400	1,001	0,1

Основные результаты и выводы:

Выполнены исследования влияния кремния в модельных сплавах Al-Si, взятых на основе анализа промышленных сплавов, была исследована твердость и структура сплавов. Установлено, что вышеуказанное свойство фазового состава диаграммы состояния Al-Si.

Проведены измерения температурного коэффициента линейного расширения.

Зафиксированы численные значения относительного удлинения технического и физического ТКЛР, что было продемонстрировано на графиках

При увеличении от 1 до 21 % техническая альфа суммарно уменьшилась на 39%. Как пример практического применения результаты измерений использованы для расчета литейной усадки, откуда видно, что усадка сплавов в условиях затвердевания металлической формы значительно меньше, чем дают справочные данные, что приводит к повышению точности литейной оснастки и сокращению продолжительности сроков изделий.

Основные результаты и выводы:

1. Выполнен подбор аналогов модельных сплавов для проведения экспериментов. Использование двойных сплавов позволило обеспечить чистоту эксперимента по влиянию кремния на ТКЛР сплавов.

2. Исследование твердости модельных сплавов и их микроструктуры подтверждает корректность полученных образцов заявленному составу. Определено, что с увеличением содержания кремния меняется характер кристаллизации и состав фаз. Увеличение в составе сплава кремния приводит от первичной кристаллизации альфа-твердого раствора + эвтектика, к первичной кристаллизации кремния+эвтектика с фрагментами вторичной кристаллизации.

3. Проведены измерения температурного коэффициента линейного расширения.

Зафиксированы численные значения относительного удлинения, технического и физического ТКЛР, что было продемонстрировано на графиках

Измерения показали подобие графиков зависимостей ТКЛР от величины кремния в сплаве, который уменьшается при увеличении кремния в алюминии.

Так, ступенчатое увеличение содержания кремния от 1 до 21 % при каждом шаге уменьшает технический альфа на несколько %, а интегрально на 39% (показать таблицу и графики)

4. Как пример практического применения результаты измерений использованы для расчета литейной усадки, откуда видно, что усадка сплавов в условиях затвердевания металлической формы значительно меньше, чем дают справочные данные. На практике это приводит к снижению точности соответствия размеров литейной оснастки, ее доработок и увеличению продолжительности сроков постановки изделий на серийное производство.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Металлические примеси в алюминиевых сплавах / А. В. Курдюмов, С. В. Инкин, В. С. Чулков, Г. Г. Шадрин. – М.: Металлургия, 1988. – 143 с.
- 2 Кимстач Г. М. // Литейное производство. 1977. № 6. С. 5–6.
- 3 Шаров М. В., Пименов Ю. П. / Металловедение сплавов легких металлов. – М.: Наука, 1970. – С. 80–87.
- 4 Белов Н.А., Савченко С.В., Хван А.В. Фазовый состав и структура силуминов. – М.: МИСИС, 2008. – 282 с. Золоторевский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. – М.: МИСИС, 2005. – 376 с.
- 5 Водород и свойства сплавов алюминия с кремнием / В.К. Афанасьев, И.Н. Афанасьева, М.В. Попова и др. – Абакан: Хакасское кн. изд-во, 1998. – 192 с.
- 6 Афанасьев В.К., Горшенин А.В., Старостина М.А. Особенности влияния малых добавок кремния на линейное расширение алюминия // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 88, 89.
- 7 Черепанов А. И. Определение величины линейной усадки при литье в ко-киль на этапе проектирования технологии / А. И. Черепанов, Л. А. Оборин, В. В. Леонов //: Прогрессивная технология производства отливок из цветных металлов: Материалы семинара. - Киев, - 1990.
- 8 Черепанов А.И. Термические свойства литейных композиционных материалов. / А.И. Черепанов //: Диссертация на соискание ученой степени канд. тех. наук: ГОУ ВПО «КГАЦМиЗ», Красноярск, -2004.
- 9 Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов: Учебник для металлург. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Б.Г. Лившица. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.

- 10 *Металловедение и термическая обработка стали: Справочник.*– 3-е изд. Т.І. Методы испытаний и исследования / Под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. – М.: Металлургия, 1983.– Гл. 17. – 352 с.
- 11 Берг Л.Г. Введение в термографию / АН СССР, Казан. гос. ун-т им. В.И. Ульянова-Ленина. – 2-е изд., доп. – М.: Наука, 1969. – Гл. 1–4. – 395 с.
- 12 Чечерников В.И. Магнитные измерения. – 2-е изд. / Под ред. Е.И. Кондорского – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. – 387 с.
- 13 Апаев Б.А. Фазовый магнитный анализ сплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 280 с.
- 14 Физико-химические методы исследования металлургических процессов: Учебник для вузов/ Арсентьев П.П., Яковлев В.В., Крашенинников М.Г. и др. М.: Металлургия, 1988, 511с.
- 15 Растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный анализ. Аппаратура, принцип работы, применение/ Сост. Ю.А. Быков, С.Д. Карпухин, М.К. Бойченко и др. Электр. данные М.: МГТУ им. Н.Э Баумана, 2003. Режим доступа: <http://lab/bmstu.ru/rem/index/htm>
- 16 С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. Рентгенографический и электроннооптический анализ. М.: МИСИС, 1994.
- 17 Зубченко А. С., Колосков М. М., Каширский Ю. В. и др. Марочник сталей и сплавов. — Машиностроение, 2003. — С. 585. — 784 с.
- 18 Mary, T. A.; J. S. O. Evans; T. Vogt; A. W. Sleight (1996-04-05). “Negative Thermal Expansion from 0.3 to 1050 Kelvin in ZrW₂O₈”. *Science*. 272 (5258): 90
- 19 Murey.J.L Alloy Phase Diograme 1984.
- 20 *Металловедение алюминия и его сплавов: Справочник / Отв. ред. И. Н. Фридляндер.* 2-е изд. М., 1983; Альтман М. Б., Стромская Н. П. Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов. М., 1984;

21 Машиностроение: Энциклопедия. М., 2001. Т. II-3: Цветные металлы и сплавы / Ред.-сост. И. Н. Фридляндер, отв. ред. Е. Т. Долбенко.

22 Температурный коэффициент линейного расширения на портале Ti-temperatures.ru

23 Зубченко А. С., Колосков М. М., Каширский Ю. В. и др. Марочник сталей и сплавов. — Машиностроение, 2003. — С. 585. — 784 с.

Mary, T. A.; J. S. O. Evans; T. Vogt; A. W. Sleight (1996-04-05). “Negative

24 Thermal Expansion from 0.3 to 1050 Kelvin in ZrW_2O_8 ”. *Science*. **272** (5258): 90—

92. *Bibcode*:1996Sci...272...90M. *DOI*:10.1126/science.272.5258.90. Дата обращения 2008-02-20.

25 Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974. 294 с.

26 Свидетельство об утверждении типа средств измерений № 50103-12 от 01.06.2012: Анализаторы термомеханические серии EXSTAR TMA/SS 7000 модели TMA/SS 7100 и TMA/SS 7300. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2012.

27 Кравченко Н. С., Ревинская О. Г. Методы обработки результатов измерений и оценки

погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. 86 с.

28 Watanabe H., Yamada N., Okaji M. Linear thermal expansion coefficient of silicon from 293 to 1000 K // *International Journal of Thermophysics*. 2004. V. 25. N 1. P. 221 – 236.

29 LK5 glass type / Lytkarino Optical Glass Factory, JSC [Лыткаринский завод оптического стекла]: сайт компании. URL: http://lzos.ru/glass_pdf/LK5.pdf (дата обращения 01.03.2015).

30 Schott Borofloat 33. The versatile floated borosilicate glass – with an infinite number of applications / SCHOTT Technical Glass Solutions GmbH: сайт

компании.

URL:http://www.schott.com/borofloat/russian/download/borofloat_33_e.pdf (дата обращения 01.11.2014).

31 Каблов Е. Н., Гращенко Д. В., Исаева Н. В., Солнцев С. С., Севастьянов В. Г. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основестекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники //Стекло и керамика. 2012. № 4. С. 7–11.

32 Kablov E. N., Grashchenkov D. K, Isaeva N V. et al. Glass and ceramics based hightemperature composite materials for use in aviation technology // Glass and Ceram. 2012.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Материаловедение и технологии обработки материалов

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
В. И. Темных
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 2019 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Влияние содержания кремния в системе AL-SI на величину температурного
коэффициента линейного расширения

22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»
22.04.01.04 «Синтез и литье новых металлических материалов»

Научный
руководитель


подпись, дата

ДОЦЕНТ, К.Т.Н.
должность, ученая степень

Черепанов А.И.

Выпускник


подпись, дата

Калугин К.А.

Рецензент


подпись, дата

гл. специалист ООО «Сплав»
должность, ученая степень

Мусохранов Ю.М.

Красноярск 2019

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Материаловедение и технологии обработки материалов

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
В. И. Темных
подпись _____ инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2017г.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Студенту Калугину Кириллу Александровичу

Группа МТ 17-01М Направление (специальность): 22.04.01
«Материаловедение и технологии материалов» (22.04.01.04 «Синтез и литье
новых металлических материалов»)

Тема выпускной квалификационной работы: «Влияние содержания кремния
в системе Al-Si на величину температурного коэффициента линейного
расширения»

Утверждена приказом по университету № 15506/с от 25 октября 2017.

Руководитель ВКР: А.И. Черепанов, доцент, кандидат технических наук,
кафедра М и ТОМ.

Исходные данные для ВКР: Системы Al-Si, с процентными соотношениями
кремния: 0,15; 1,5; 5,5; 8,5; 12; 21. Значение ТКЛР для системы Al-Si.
Диаграммы состояния системы Al-Si.

Перечень разделов ВКР:

1. Анализ литературных данных
2. Методики и технология эксперимента
3. Экспериментальные исследования
4. Заключение и основные выводы по результатам исследований

Руководитель ВКР

подпись

А.И. Черепанов

Задание принял к исполнению

подпись

К.А. Калугин

«__» _____ 2017