

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЯ

Фролов М.С.

г. Воронеж, МБОУ «СОШ № 16», 11 класс

Руководитель: Рябцева П.В., г. Воронеж, МБОУ «СОШ № 16», учитель физики ВКК

Актуальность темы. Физика твердого тела – это раздел физики, изучающий структуру и свойства твердых тел. Научные данные о микроструктуре твердых веществ и о физических и химических свойствах составляющих их атомов необходимы для разработки новых материалов и технических устройств.

Исследователя, работающего в области физики твердого тела, интересуют такие материалы, как металлы и сплавы, полупроводники, диэлектрики и магнитные материалы. Многие из них относятся к кристаллическим веществам: их атомы расположены так, что образуют правильную трехмерную решетку – периодическую структуру. Нарушения идеальной периодичности могут быть обусловлены химическими примесями [4]. Во многих случаях подобными нарушениями структуры определяются физические свойства кристаллических твердых тел [13]. Управляя концентрацией подобных дефектов или целенаправленно создавая их, можно получать заданные свойства твердых тел.

К физическим свойствам твердых тел относятся механические, тепловые, электрические, магнитные и оптические свойства. Их изучают, наблюдая, как ведет себя образец при изменении температуры, давления или объема, в условиях механических напряжений, электрических и магнитных полей, введения примесей, а также под воздействием различных излучений [10].

Эта исследовательская работа связана с изучением наиболее распространенного в земной коре металла – алюминия, изучением его физических свойств и измерением теплоемкости, плотности, коэффициента термического расширения и твердости алюминия при введении различных типов примесей.

Цель исследования. Выяснение зависимости некоторых свойств алюминия от вида и количества легирующих элементов и примесей

Гипотеза. Введение легирующих элементов и примесей приводит к изменению физических свойств металла.

Задачи исследования:

1. Изучение литературы о нахождении алюминия в природе, способах его получения, физических свойствах и применении.

2. Изучение литературы о дефектах кристаллической решетки и их влиянии на физические свойства материалов.

3. Подготовка образцов с различным количеством легирующих элементов.

4. Разработка методик измерения и расчета удельной теплоемкости, плотности, коэффициента термического расширения.

5. Изучение методов измерения твердости металлов и расчета твердости материала.

6. Проведение экспериментов.

7. Проведение расчетов исследуемых величин и анализ результатов.

8. Интерпретация полученных результатов.

Алюминий и его свойства

В земной коре алюминия очень много: 8,6% по массе. Он занимает первое место среди всех металлов и третье среди других элементов (после кислорода и кремния) [12]. Крупнейшие месторождения алюминия находятся в Австралии, Бразилии, Гвинее и на Ямайке; промышленная добыча ведется и в других странах. Название алюминия происходит от латинского *alumen* (род. падеж *aluminis*). Алюминий можно восстановить из руд с помощью электричества и щелочных металлов.

В литературе описаны физические свойства алюминия [1]: плотность (2700 кг/м^3), температура плавления (660°C), теплопроводность (при 20°C составляет примерно $0,50 \text{ кал/см}\cdot\text{с}\cdot^\circ\text{C}$ и возрастает с увеличением чистоты металла),

Алюминий имеет очень высокую удельную теплоемкость ($\approx 890 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$). Удельная теплота плавления также очень высока ($\approx 380 \text{ кДж/кг}$). Отражательная способность алюминия сильно зависит от его чистоты.

По электропроводности алюминий находится на 4-м месте, уступая лишь серебру, меди и золоту, что при дешевизне алюминия имеет огромное практическое значение. Чистый алюминий – довольно мягкий металл [15], но когда алюминий образует сплавы, его твердость (свойство материала сопротивляться внедрению в него другого, более твердого тела) может возрасти в десятки раз.

На воздухе алюминий покрывается тонкой (около микрона), пленкой окиси

алюминия. Обладая высокой прочностью и химической инертностью, она защищает алюминий от дальнейшего окисления и определяет его высокие антикоррозионные свойства во многих средах [14]. Основное влияние на коррозионные свойства технического алюминия оказывает содержание железа.

Физико-химические, механические и технологические свойства алюминия очень сильно зависят от вида и количества примесей. Основными естественными примесями в алюминии являются железо и кремний. Железо, например, снижает электропроводность и коррозионную стойкость, ухудшает пластичность, но несколько повышает прочность алюминия [17].

В зависимости от степени очистки первичный алюминий разделяют на алюминий высокой и технической чистоты. Алюминий высокой чистоты получают дополнительной очисткой технического алюминия. ^[1] В специальных целях используется алюминий высокой чистоты. Для производства алюминиевых сплавов, кабельно-проводниковой продукции и проката используется технический алюминий.

Современный способ получения алюминия был открыт в 1886 году молодым американским исследователем Ч.М. Холлом [3]. Метод Холла позволил получать с помощью электричества сравнительно недорогой алюминий в больших масштабах. Сейчас же ежегодно получают более 15 млн. тонн алюминия. Производство требует больших затрат электроэнергии и экологически опасно, так как атмосферный воздух загрязняется летучими соединениями фтора.

Алюминий хорошо поддается обработке: ковке, штамповке, прокату, волочению, прессованию [10]. Из него делают электрические провода, детали конструкций, фольгу для пищевых продуктов, кухонную утварь и «серебряную» краску, широко используют в строительстве и авиационной технике. Алюминий очень хорошо отражает свет. Поэтому его используют для изготовления зеркал – методом напыления металла в вакууме.

В авиа- и машиностроении, при изготовлении строительных конструкций, используют значительно более твердые сплавы алюминия [16]. Один из самых известных – сплав алюминия с медью и магнием (дуралюмин) после закалки приобретает особую твердость и становится примерно в 7 раз прочнее чистого алюминия и почти втрое легче железа [4]. Широко распространены силумины – литейные сплавы алюминия с кремнием. Произво-

дятся также высокопрочные, криогенные и жаропрочные сплавы. [1] На изделия из алюминиевых сплавов легко наносятся защитные и декоративные покрытия. Легкость и прочность алюминиевых сплавов особенно пригодились в авиационной технике. В настоящее время четвертая часть всего алюминия идет на нужды строительства, столько же потребляет транспортное машиностроение, примерно 17% часть расходуется на упаковочные материалы и консервные банки, 10% используется в электротехнике.

Алюминий содержат также многие горючие и взрывчатые смеси: алюмотол (литая смесь тринитротолуола с порошком алюминия), аммонал (смесь аммиачной селитры, тринитротолуола и порошка алюминия). Пиротехнические составы также содержат порошкообразный алюминий. Алюминий нашел практическое применение в качестве ракетного топлива.

Широкое применение находят и соединения алюминия [3]. Оксид алюминия – огнеупорный и абразивный (наждак) материал, сырье для получения керамики. Из него также делают лазерные материалы, подшипники для часов, ювелирные камни (искусственные рубины).

Дефекты кристаллической решётки и их влияние на физические свойства материалов

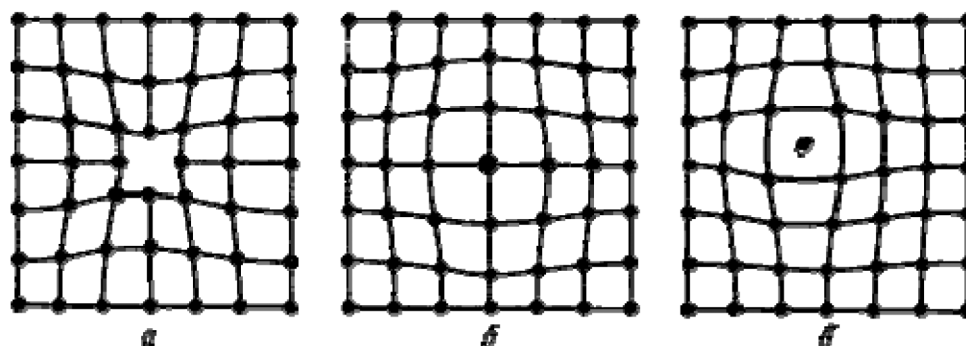
Идеальная кристаллическая решетка представляет собой многократное повторение элементарных кристаллических ячеек. Для реального металла характерно наличие большого количества дефектов строения, нарушающих периодичность расположения атомов в кристаллической решетке и оказывающих существенное влияние на свойства материала.

Различают три типа дефектов кристаллического строения: точечные, линейные и поверхностные [13]. Точечные дефекты характеризуются малыми размерами во всех трех измерениях. К точечным дефектам относятся:

а) свободные места в узлах кристаллической решетки – вакансии (дефекты Шоттки);

б) атомы, сместившиеся из узлов кристаллической решетки в межузельные промежутки – дислоцированные атомы (дефекты Френкеля);

в) атомы других элементов, находящиеся как в узлах, так и в межузельных промежутках кристаллической решетки – примесные атомы.



а – вакансия; б – примесный атом; в – дислоцированный атом

Точечные дефекты образуются в процессе кристаллизации под воздействием тепловых, механических, электрических воздействий, а также при облучении нейтронами, электронами, рентгеновскими лучами. Точечные дефекты повышают энергию кристалла, так как на образование каждого дефекта была затрачена определенная энергия. Важной особенностью точечных дефектов является их подвижность. Перескоки вакансий приводят к перемещению атомов, т. е. к самодиффузии примесных атомов замещения [13].

Наиболее важный вид линейных дефектов – дислокации (лат. dislocation – смещение). Дислокация – это дефекты кристаллического строения, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей. Теория дислокаций (30–е годы XX века) позволила объяснить природу прочности и пластичности металлов. Дислокации служат местом концентрации примесных ядер, в особенности примесей внедрения, так как это уменьшает искажения решетки. Примесные ядра образуют вокруг дислокации зону повышенной концентрации, которая мешает движению дислокаций и упрочняет металл. Дислокации влияют не только на прочность и пластичность, но и на другие свойства кристаллов. С увеличением плотности дислокаций возрастает напряжение, изменяются оптические свойства, повышается электросопротивление металла [9].

Автором работы были подготовлены образцы с различным количеством примесей для проведения исследований, разработана методика проведения экспериментов

по определению зависимости физических свойств алюминия от состава и количества примесей. Автор лично провёл все необходимые измерения, выполнил расчёты, проанализировал результаты, которые были опубликованы в Материалах VII, VIII, IX Воронежского областного конкурса юных исследователей в области химии, физике и информатики «Дерзай быть мудрым!» 2015–2017 г. (<http://vsuet.ru/konkurs-y-chemphys/index.asp>), а также высоко оценены (диплом I степени) на XXXIII конференции научного общества учащихся ВГУ (http://www.abitur.vsu.ru/sites/default/files/programm_nou2018.pdf).

2. Исследование зависимости физических свойств алюминия от примесей

2.1. Получение образцов алюминия с различными примесями

На предприятии ООО «Воронежторцветмет» автор познакомился с одним из способов получения алюминия – литьём из металллома. Он наблюдал следующие этапы этого процесса: поставку металллома из приёмных пунктов; загрузку в плавильную печь; переплавку лома; разлив расплавленного металла в специальные формы. Автор принял участие в процессе разлива жидкого алюминия в формы для получения образцов, предназначенных для дальнейших исследований (приложение 1).

2.2. Состав полученных образцов

Описанным выше способом получено 8 образцов с различным составом примесей. Состав полученных образцов представлен в таблице:

№	Марка	Состав
1	ПА-0	99,8% алюминия
2	АВ95	95% алюминия, 5% различные примеси
3	АВ-87	87% алюминия, 13% различные примеси
4	АК12	83% алюминия, 12% кремния, 5% различные примеси
5	АК5М2	82% алюминия, 15% кремния, 3% различные примеси
6	Д16	1,2% Mg, 5% Cu
7	АК9	9%Si, 3% прочие
8	АК7	7%Si, 3% прочие

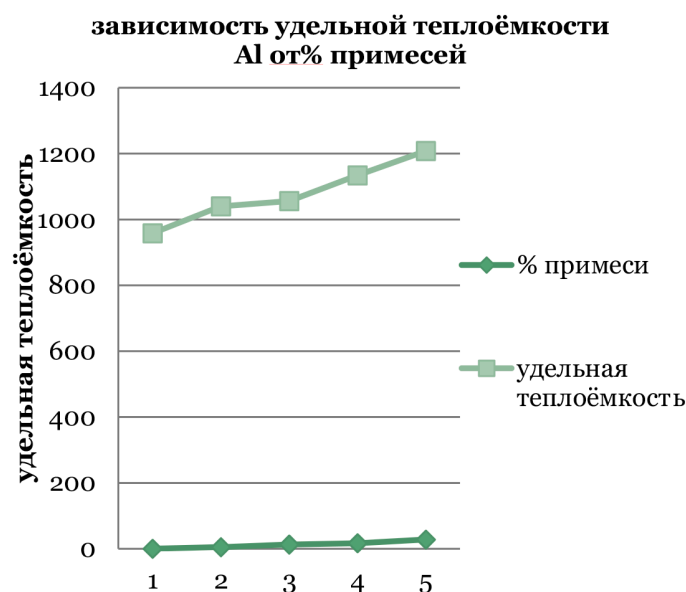
2.3. Измерение удельной теплоёмкости алюминия

Методика эксперимента включала измерение массы образцов при помощи рычажных весов, измерение начальной температуры образцов, измерение начальной температуры горячей воды, измерение температуры теплового равновесия после погружения образца в горячую воду (при-

ложение 2). Для проведения эксперимента использовались калориметр, термометры лабораторные, рычажные весы, набор гирь.

Расчёт удельной теплоёмкости алюминия (предположили, что всё количество теплоты, отданное горячей водой, идёт на нагревание образца) был выполнен по формуле $c = Q / m(t_2 - t_1)$. Результаты эксперимента представлены в таблице и диаграмме:

№	Марка	% примеси	Удельная теплоёмкость, Дж/кг °С
1	ПА-0	0,2	958
2	АВ95	5	1040
3	АВ-87	13	1056
4	АК12	17	1134
5	АК5М2	28	1208



Вывод: при увеличении процентного содержания примесей в алюминии возрастает его удельная теплоёмкость.

2.4. Измерение плотности алюминия

Методика эксперимента включала измерение массы образцов при помощи рычажных весов, измерение объёма образцов с помощью мерного стакана и мензурки (приложение 2). Расчёт плотности вещества проводился по формуле $\rho = m/V$. Для проведения эксперимента использовались рычажные весы, набор гирь, мензурка, мерный стакан.

Результаты эксперимента представлены в таблице:

№	Марка	% примеси	Плотность, кг/м ³
1	ПА-0	0,2 %	2452,4
2	АВ95	5 %	2464,2
3	АВ-87	13 %	2500,1
4	АК12	17 %	2435,9
5	АК5М2	18 %	2345,1

примеси кремния Si плотность алюминия начинает уменьшаться с ростом % примеси.

2.5. Измерение коэффициента термического расширения алюминия

Методика эксперимента включала измерение длины образца при комнатной температуре с помощью микрометра, нагревание образца до температуры 100°C и 200°C в духовке кухонной плиты, контроль температуры электронным термометром, измерение длины горячих образцов (приложение 3). Формула для расчёта коэффициента термического расширения $k = D/D_0$, где D_0 – длина холодного образца, D – длина нагретого образца.

Вывод: при увеличении процентного содержания примесей в алюминии возрастает его плотность. Но при введении в качестве

Результаты эксперимента представлены в таблицах:

При $t = 100^\circ\text{C}$

Марка	% примеси	D_0 , мм	D , мм	k
АВ95	5	120,365	120,531	1,0013708
АК7	12	12,415	120,652	1,0019515
АК5М5	18	119,390	120,090	1,0058631

При $t = 200^\circ\text{C}$

Марка	% примеси	D_0 , мм	D , мм	k
АВ95	5	120,365	120,650	1,0023677
АК7	12	12,415	120,780	1,0030311
АК5М5	18	119,390	120,340	1,0079571

Вывод: при увеличении процентного содержания примесей в алюминии возрастает его коэффициент термического расширения.

2.6. Определение твердости алюминия

Твердостью называется свойство материала оказывать сопротивление проникновению в него другого более твердого тела (индентора), не испытующего остаточной деформации [7]. Измерение твердости широко используется в исследовательских целях и как средство контроля качества свойств материалов в производстве. Учитывая неизбежный разброс значений твердости, обусловленный как ошибками измерения, так и неоднородностью механических свойств материала, испытаниям подвергается обычно несколько образцов, а на каждом образце делают несколько вдавливающих индентора [8].

Испытания на твердость позволяют определять механические свойства и в небольших объемах, допускают текущий контроль изделий в процессе производства и эксплуатации, не влияют на их работоспособность и, что особенно ценно, относятся к неразрушающим методам механических испытаний. В настоящее время существует около 30 разновидностей испытаний на твердость, но наибольшее распространение получили три из них – это методы измерения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу, а также метод измерения микротвердости. Оценивается твердость так называемыми числами твердости, размерность которых определяется принципом измерения [8].

2.6.1. Измерение твёрдости методом Бринелля

Алюминий имеет сравнительно низкую твердость, поэтому следует применять метод определения твердости по Бринеллю.

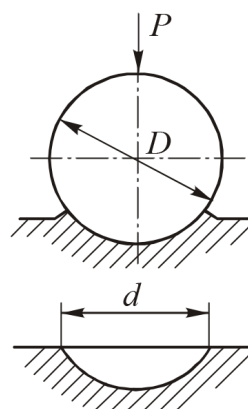
Твердость по Бринеллю (НВ) выражается отношением взятой нагрузки P к площади поверхности отпечатка F :

$$HB = \frac{P}{F}$$

Если вычислить поверхность отпечатка, имеющего форму шарового сегмента, то НВ определится формулой

$$HB = \frac{2P}{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

где P – приложенная нагрузка, кгс; D – диаметр шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм [8].



Для определения твёрдости методом Бринелля были подготовлены образцы резанием, зачисткой или обработкой наждачной бумагой так, чтобы их поверхности (испытуемая и опорная) были параллельны и не имели окалины, ржавчины и других неровностей, влияющих на результат испытания. Минимальная толщина образца должна быть не менее 10-кратной глубины отпечатка. Эксперимент проводился в лабораториях Воронежского государственного технического университета (приложение 4). Расчёты твёрдости по Бринеллю представлены в таблице.

№	Марка образца	Состав примеси	Диаметр шарика, мм	Сила надавливания	Диаметр воронки	НВ
1	АВ95	5% Различные	5	1,9	1,9	66
2	АК7	7%Si, 3% прочие	5	1,9	1,85	70
3	АК9	9%Si, 3% прочие	5	1,9	1,8	74
4	АК5М2	82% алюминия, 13% кремния, 5% разл. примеси	5	1,9	1,6	95
5	Д16	1,2%Mg, 5%Cu	5	1,9	15	107

Выводы: 1) На твёрдость алюминия влияют содержащиеся в нем легирующие элементы и примеси, а также их количество 2) Добавки кремния незначительно повышают твёрдость алюминия 3) Использование в качестве добавки меди значительно повышает твёрдость материала

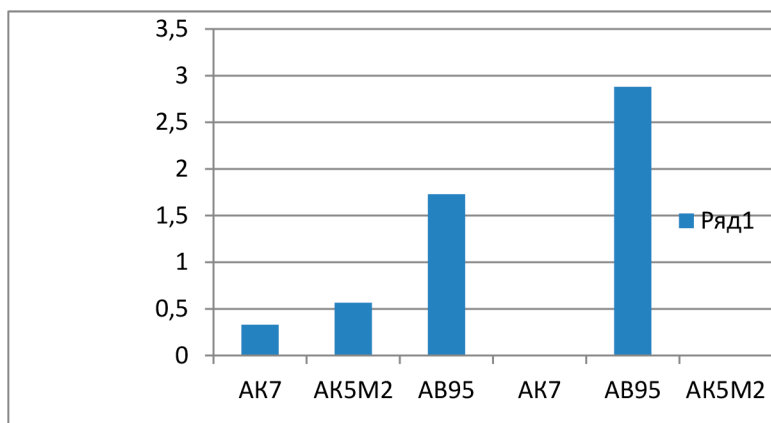
2.6.2. Измерение микротвёрдости

Определение микротвёрдости (твёрдости в микроскопически малых объемах) необходимо для тонких покрытий, отдельных структурных составляющих сплавов. [6] Прибор для определения микротвёрдости состоит из механизма для вдавливания алмазной пирамиды с небольшой нагрузкой и металлографического микроскопа. [17]

Для измерения микротвёрдости были подготовлены образцы методом ручной шлифовки. С помощью микротвердомера получены отпечатки индентора и их фотографии (приложение 4). Расчёт микротвёрдости проводился с помощью программы imagej.nih по формуле

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2}.$$

Результаты представлены на диаграмме.



Вывод: микротвёрдость менялась, но результаты трудно однозначно интерпретировать. Вероятно, требуется более качественная обработка поверхности с помощью химической полировки.

Заключение

Человечество всегда использовало и будет использовать твёрдые тела. Но если раньше физика твёрдого тела отставала от развития технологии, основанной на непосредственном опыте, то теперь положение

переменилось. Теоретические исследования приводят к созданию твёрдых тел, свойства которых совершенно необычны.

Получить же заданные свойства тел возможно только проведением многократных экспериментов, то есть методом проб и ошибок. Получение материалов с заданными механическими, магнитными, тепловыми, электрическими и другими свойствами – одно из основных направлений современной физики твёрдого тела и физики металлов. В данной исследовательской работе в результате ряда экспериментов была подтверждена гипотеза о зависимости физических свойств алюминия от количества легирующих элементов и примесей. Изменяя состав материала путём введения легирующих элементов и примесей, можно изменить кристаллическую решётку металла и получить материалы с заданными свойствами.

Результаты, полученные в работе, соответствуют зависимостям свойств алюминия от введённых примесей, описанным в литературе, [11] и могут применяться при объяснении ряда процессов, протекающих в строительных материалах, а также для выбора соответствующей марки алюминия для производства той или иной конструкции [2]

Приблизительно половина физиков мира работают сейчас в этой области – в области физики твёрдого тела.

Список литературы

1. Алюминий и его сплавы: Учебное пособие / Сост. А.Р. Луц, А.А. Суслина. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 81 с. ил.
2. Алюминий. Свойства и физическое металловедение: Справочник / Дж. Е. Хэтч. – М.: Металлургия, 1989.
3. Алюминиевые сплавы. Применение алюминиевых сплавов: Справочное руководство / И.В. Горынин и др. – М.: Металлургия, 1986.

4. Белов В.Д. Влияние магния и температуры заливки на структуру, механические и литейные свойства сплава системы Al-Mg / В.Д. Белов, В.А. Семенов // Цвет. металлургия: науч.-техн. и произв. журн. – 2004. – №2. – С. 41.

5. Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов». – М.: Металлургия, 1980.

6. Государственный стандарт СССР и определение микротвёрдости методом вдавливания алмазных наконечников ГОСТ 9450–76. – М.: Издательство стандартов, 1993.

7. Егоров Ю.П. Сборник методических указаний к выполнению лабораторных работ по курсу «Материаловедение». – Томск: изд-во Томского политехнического института, 2010.

8. Козловский А.Э., Бойцова В.В. Механические свойства материалов. Методы испытаний: Лабораторный практикум. – Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет, 2006.

9. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

10. Металловедение алюминия и его сплавов / под ред. И.Н. Фридляндера. – М.: Наука, 1971.

11. Металлургия алюминия. Борисоглебский Ю.В., Галевский Г.В. и др. – Новосибирск, «Наука». Сибирская издательская фирма РАН, 1999.

12. Популярная библиотека химических элементов. – М.: Наука, 1983.

13. Семёнова Г.В., Сушкова Т.П. Дефекты структуры и физические свойства кристаллов учебно-методическое пособие / Издательско-полиграфический центр ВГУ, 2007.

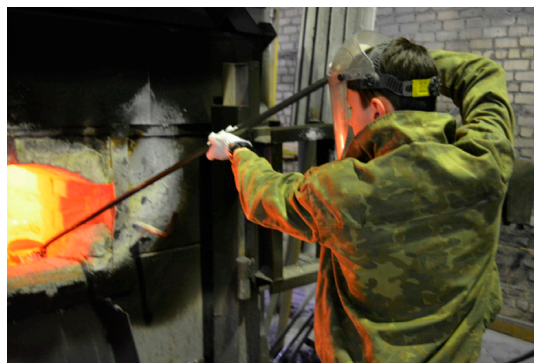
14. Тихонов В.Н. Аналитическая химия алюминия. – М.: Наука, 1971.

15. Телешов В.В. Влияние химического состава на прочность сплавов системы Al-Cu-Mg-Ag после нагрева при 180–210°C / В.В. Телешов, Д.А. Андреев, А.П. Головлева. Металловедение и терм. обр-ка: науч.-техн. и произв. журн. – 2006. – №3. – С. 9–17.

16. Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы в авиаракетной и ядерной технике // Вестник РАН. – 2004. – Т.74. – №12. – С. 1076–1081.

17. Чернышова Т.Г., Грибков С.П. Методические указания по лабораторному практикуму по физике металлов «Исследования микротвёрдости металлов». – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2000.

18. Химическая энциклопедия в 5 томах. Редакция / гл. ред. Кнуненд И.Л. – М., Советская энциклопедия, 1988.



Процесс плавления алюминия



Подготовка образцов



Приложение 1

Получение образцов для проведения экспериментов



Плавильная печь

Приложение 2

Проведение измерений для определения удельной теплоёмкости и плотности алюминия



Измерение массы образцов



Измерение температуры системы



Измерение объёма образцов

Приложение 3



Проведение измерений для расчёта КТР



*Измерение температуры образцов
Измерение длины образцов*

Приложение 4

Проведение измерений твёрдости и микротвёрдости в лабораториях ВГТУ



Измерение твёрдости по Бринеллю





Измерение микротвёрдости



Фотографии отпечатков индентора



Набор инденторов для измерения микротвёрдости