**МЕЖГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ДАННЫХ**

**О ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ И СВОЙСТВАХ**

**ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

УДК 669. /539.5 – 536.6/

**ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ**

#### АРМКО ЖЕЛЕЗО. НИКЕЛЬ. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ И УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР ОТ 300 К ДО 1000 К

#### ССД СНГ 372–2021 (ГСССД 372–2020)

(**ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ, ШИФР ТЕМЫ:** [**RU.3.009-20**](http://www.mgs.gost.ru/TKSUGGEST/mgsprogact.nsf/ByUNID/E336D4892C3CC6BF44257BCE003A3FE5?OpenDocument&CountryCode=RU&ViewName=ByMTCOfSelectedCountry&Category=RU%20180&Start=1&Count=12)**21)**

РАЗРАБОТАНЫ Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК-180 «Межгосударственная служба стандартных справочных данных»

ВНЕСЕНЫ Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии

АВТОРЫ: д.ф.-м.н. Д.К. Палчаев, д.ф.-м.н. Ж.Х. Мурлиева, к.ф.-м.н. М.Э. Исхаков, С.Х. Гаджимагомедов

СОГЛАСОВАНЫ С национальными органами по стандартизации стран СНГ:

РЕКОМЕНДОВАНЫ Научно-технической комиссией по метрологии Межгосударственного Совета по стандартизации, метрологии и сертификации

ПРИНЯТЫ Евразийским советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 2021 г., № –2021)

УДК 669. /539.5 – 536.6/

**МЕЖГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ДАННЫХ**

**О ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ И СВОЙСТВАХ**

**ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

|  |  |
| --- | --- |
| **Таблицы стандартных справочных данных** |  |
| Армко железо. Никель. температурный коэффициент линейного расширения и удельное электрическое сопротивление в диапазоне температур от 300 К до 1000 К | **ССД СНГ**  **372–2021**  **ГСССД**  **372–2020** |
| **Tables of Standard Reference Data** |  |
| Armco iron. Nickel. The temperature coefficient of linear expansion and electrical resistivity in the temperature range from 300 K to 1000 K | **SSD CNG**  **372–2021**  **GSSSD**  **372–2020** |

**АННОТАЦИЯ**

В таблицах стандартных справочных данных представлены данные о температурном коэффициенте линейного расширения (ТКЛР) металлов железо, никель в диапазоне температур от 300 К до 1000 К, полученные на кварцевом дилатометре, реализующем измерения ТКЛР, и данные об удельном электрическом сопротивлении, определяемые четырехзондовым методом на постоянном токе. Суммарная расширенная неопределенность данных о ТКЛР не превышает 8 %. Суммарная расширенная неопределенность данных об удельном электрическом сопротивлении составляет 1,2 %.

Расширенная неопределенность получена путем умножения стандартной неопределенности на коэффициент охвата k = 2, соответствующий уровню доверия 95 % при допущении нормального распределения. Оценивание неопределенности проведено в соответствии с ГОСТ Р 34100.3–2017 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.

**СОДЕРЖАНИЕ**

1. Основная часть 6

2. Экспериментальная аппаратура и методика измерений 9

3. Объекты исследования 14

4. Стандартные справочные данные о температурном коэффициенте линейного расширения и электросопротивлении Армко железа и никеля 15

Приложение А 18

5. Оценка неопределенности измеряемых величин 25

6. Оценка достоверности данных 29

Список литературы 32

**1. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

В таблицах представлены стандартные справочные данные о температурном коэффициенте линейного расширения (ТКЛР) металлов Армко железа и никеля в диапазоне температур (300...1000) К, полученные на кварцевом дилатометре [1], реализующем измерения ТКЛР, и данные об удельном электрическом сопротивлении, определяемые четырехзондовым методом на постоянном токе (Приложение А).

Тепловое (линейное) расширение – деформация, вызванная изменением температуры. Температурный коэффициент линейного расширения представляет относительное изменение линейного размера тела при изменении температуры на один градус. Приведенные таблицы рассчитаны по уравнениям, отображающим зависимость ТКЛР от температуры.

Относительное удлинение (тепловая деформация) определяется формулой:

|  |  |
| --- | --- |
| *ΔL (Т – То) / LТо = (LТ - LТо) /LТо,* | (1) |

где: *Т*0 – начальная температура (20 оС), при которой определялись размеры образца;

*L*0 – размер образца при температуре

*LТ* – размер образца при температуре *T*;

Δ*L*– удлинение образца в интервале температуры (*Т* – *T*0);

*T*- конечная температура интервала.

Средний ТКЛР в интервале температуры *(Т – Т0)* (интегральный) определяется как:

|  |  |
| --- | --- |
| *αср(Т – T0)* = (1/ *L*0 )×Δ*L*/(*Т* – *T*0) | (2) |

Полученные значения *αср(Т – T0)* относились к температуре Т.

Значения истинного (дифференциального) ТКЛР (*α*) рассчитывались путем нахождения аппроксимирующего полинома L = *f*(*T*) и его дифференцирования. Расчетная формула для истинного ТКЛР имеет вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

Поправки, учитывающие тепловое расширение кварца (см. Приложение А) вводились непосредственно в программу для расчетов.

Значения электросопротивления рассчитывались по формуле

|  |  |
| --- | --- |
| , | (4) |

где *S* и p – площадь сечения и длина рабочего участка образца (расстояние между потенциальными зондами) соответственно; *U*x и *U*0 – падения напряжения, на образце и эталонном сопротивлении *R*0, соответственно, *αср* – коэффициент теплового расширения образца в интервале температур Δ*T*=*T*–*T*0, здесь *T*0 – температура, при которой определялись размеры образца.

Стандартные справочные данные для образцов Армко железа и никеля, востребованные в ряде отраслей техники, представлены в актуальных для практического применения интервалах температур (300–1100) *К* и (300-1050) *К* соответственно, для которых нет надежных аттестованных данных.

В таблицах 1 представлены стандартные справочные значения среднего αср(Т – T0) и истинного ТКЛР, а также удельного электросопротивления образцов. В окончательных таблицах приведены термодинамические значения температуры *(Т, К).* Температура, при которой определялся начальный размер образцов, составляла 20 *оС*. Начальная температура при измерениях температурных зависимостей была разная – как правило, примерно 30 *оС*. Температурные зависимости Δ*L* после исследований экстраполировались к значению при 20 *оС*. Для каждого состава проводились три серии измерений «нагрев – охлаждение», итого получали шесть температурных зависимостей. Каждая серия представляла собой температурные зависимости длины образца и электросопротивления при нагреве и охлаждении. Температуры, а следовательно, и значения при этих температурах не были одними и теми же. Поэтому в каждой серии (после получения температурных зависимостей) проводилось усреднение значений *(Т, α, ρ)*, следующим образом:

В 1-й серии измерений значения температур близких в процессах нагрева и охлаждения, а следовательно и значения α, ρ при соответствующих температурах усреднялись:

(*T*i наг+ *T*iохл)/2=*T*i сред1, (*L*i наг+ *L*iохл)/2=*L*i сред1, (*ρ*i наг+ *ρ*iохл)/2=*ρ*i сред1

Пример:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Т наг, К | Т охл, К | L наг, мм | Lохл, мм | ρ·108 наг, Ом·м | ρ·108 охл, Ом·м | Тср, К | Lср, мм | ρ·108ср, Ом·м |
| 324,65 | 337,90 | 70,1040 | 70,1130 | 11,840 | 11,962 | 331,28 | 70,1085 | 11,901 |
| 334,15 | 347,90 | 70,1090 | 70,1210 | 12,514 | 12,760 | 341,03 | 70,1150 | 12,637 |
| 364,40 | 357,40 | 70,1330 | 70,1305 | 13,027 | 13,949 | 360,90 | 70,1317 | 13,488 |

Аналогичные расчеты проводились таким же образом для 2-х последующих серий.

2-я серия измерений:

(*T*i наг+ *T*iохл)/2=*T*i сред2, (*L*i наг+ *L*iохл)/2=*L*i сред2, (*ρ*i наг+ *ρ*iохл)/2=*ρ*i сред2

3-я серия измерений:

(*T*i наг+ *T*i охл)/2=*T*i сред3, (*L*i наг+ *L*i охл)/2=*L*i сред3, (*ρ*i наг+ *ρ*iохл)/2=*ρ*i сред3

Далее усреднялись значения параметров для 3-х серий и получались окончательные значения для данного образца:

(*T*i сред1+ *T*i сред2+ *T*i сред3)/3=*T*i сред температура для данного образца, усреднённая по 3-м сериям;

(*L*i сред1+ *L*i сред2+ *L*i сред3)/3=*L*i сред длина для данного образца, усреднённая по 3-м сериям;

(*ρ*i сред1+ *ρ*i сред2+ *ρ*i сред3)/3=*ρ*i сред электросопротивление для данного образца, усреднённая по 3-м сериям.

Экспериментальные данные *(Т, α, ρ)* после вышеуказанных усреднений приведены в таблице 3. Для получения ССД о ТКЛР *(αср и α),* приведенных в таблицах 1-2, находился аппроксимирующий полином *L=f(T)*, результат его дифференцирования представлялся также полиномом. Для каждого значения температуры *Ti*, к которой относились значения *αср(Т – T0)* и , определялись значения *L*i и (*LТ* - *L*0), так же (∂*L*/∂*T*)i для расчетов по формулам (2) и (3) соответственно.

###### **2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ**

Большинство экспериментальных методов определения теплового расширения основано на том, что изменение объема или длины образца ставится в соответствие с некоторым легко измеряемым физическим параметром, существенно зависящим от длины образца [2]. Измерение удлинения образца с ростом температуры в настоящей работе осуществлялось кварцевым дилатометром с фотоэлектрическим датчиком регистрации смещения. Отличительной особенностью нашей установки является то, что наряду с измерением ТКЛР образца, одновременно измеряется также его электросопротивление четырехзондовым методом на постоянном токе [1]. Температура измерялась хромель-алюмелевыми термопарами (таблицы перевода из [3]). Поправки на использованные термопары определялись путем их градуировки по температурам плавления чистых металлов – алюминия, кадмия, свинца и индия.

На рисунке 1 приведена форма образца с плоскопараллельными торцами с обозначенными токовводами и термопарами. Образец 1 (см. вставку на рис.1), устанавливается между основанием кварцевой трубы 2 и скругленной поверхностью толкателя 4. Толкатель центрируется в кварцевой трубе двумя кольцами: кварцевым 5 и фторопластовым 6. Ячейка герметизируется трубой 3. Эти трубы крепятся вакуумным зажимом 7 к основанию 8 через переходник 9. Медный блок 10 с торцевыми нагревателями 11 служит для выравнивания температуры вдоль образца. Провода 12 от нагревателей соединяются к терморегулятору (PTC 10) 13 для поддержания температуры или изменения ее с определенной скоростью.

В качестве индикатора перемещения [1] используется фотоэлектрический датчик от усилителя типа Ф117 14. Фотодатчик снабжен коромыслом 15 с шестью осями, на котором закреплено зеркальце 16. Варьированием размерами плеч коромысла (выбор нужной оси коромысла) можно изменять диапазон измеряемого перемещения, что необходимо для измерений образцов с различными значениями ТКЛР (от 10-7 *К*-1 до 10-4 *К*-1). Датчик перемещения крепится к основанию через микрометрическое устройство 17, обеспечивающее выбор необходимого уровня выходного сигнала. Линейное перемещение толкателя алюминиевой иглой 18 передается коромыслу и преобразуется в угловое перемещение. Поворот зеркальца на оси коромысла приводит к перераспределению света на фоторезисторах 19. Фоторезисторы вместе с источником питания АКИП-1125 20, соединяются к сканерной плате 2001-SCAN мультиметра (Keithley 2002) 21, позволяющей одновременно измерять до десяти сигналов.

Температура образца измеряется хромель-алюмелевыми (ТХА) термопарами. Одноименные провода термопар используются в качестве потенциальных зондов 22. К концам образца крепятся токовые электроды 23. Провода термопар и токовых электродов изолируются и выводятся наружу через толкатель. Вторые концы термопар поддерживаются при температуре t=0о*С* в сосуде Дьюара 24. Сигналы с термопар, потенциальных зондов и эталонного сопротивления *R*0 (Р310), соединенного последовательно с образцом, подаются через сканерную плату 2001-SCAN на мультиметр. Для измерения сопротивления по 4-х проводной системе используется соответствующая функция цифрового мультиметра. Он в авторежиме обеспечивает ток через образец и измерение падения напряжения на рабочем участке образца. Реле 25, управляемое фазочувствительным нановольтметром (SR830) 26, коммутирует ток через образец. Все измерительные приборы экранированными кабелями (7000-1 и 7000-2) соединяются к порту (GPIB-USB) 27, а потом к компьютеру 28, где управляющая программа написана в среде графического программирования LabView.

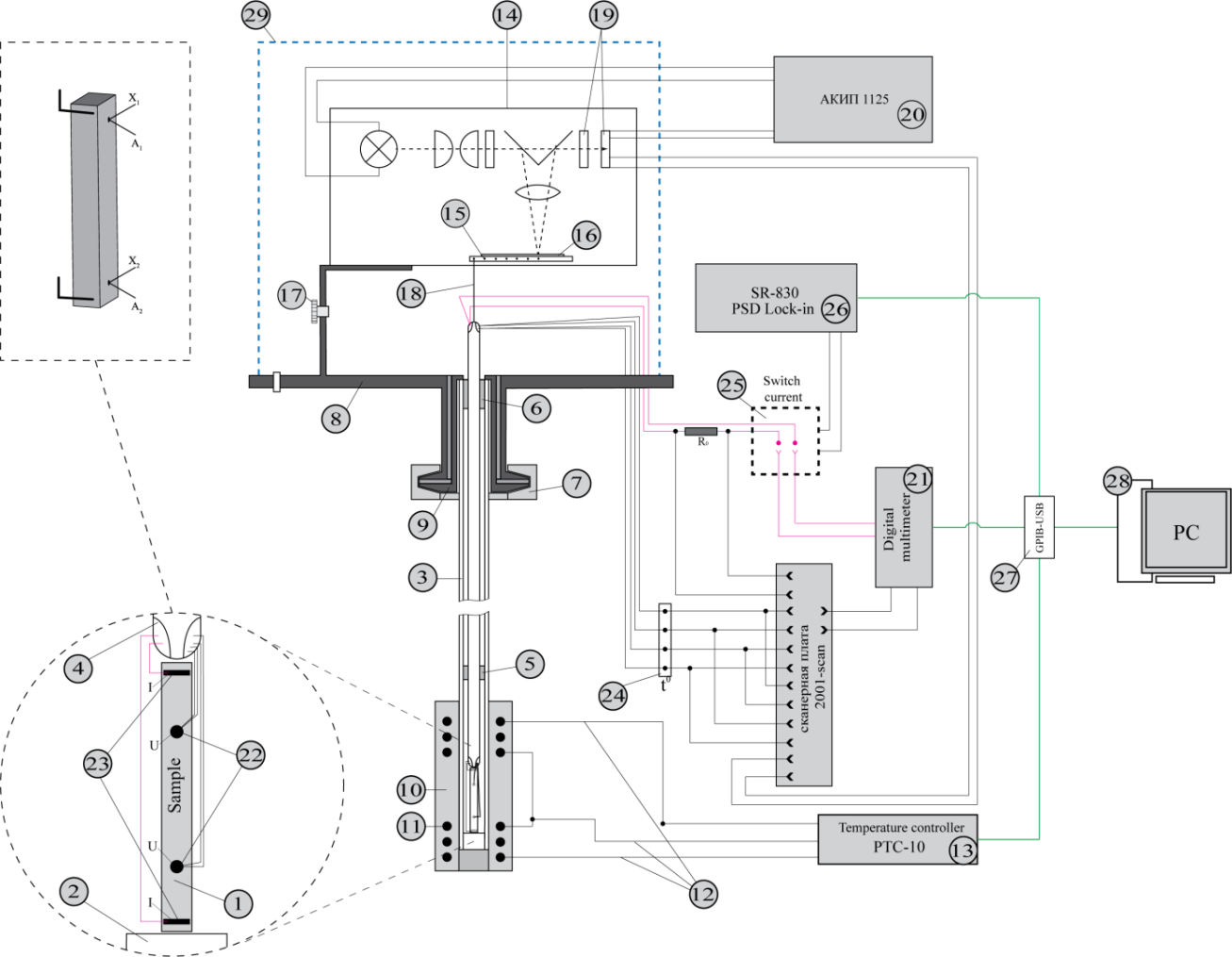
****

Рисунок 1 – Электрическая схема автоматизированной установки [1] для комплексного исследования электросопротивления и теплового расширения материалов в интервале температур 80-1000 *К*. На вставке сверху показана форма образца; снизу – расположение проводов термопар и токовых электродов

Установка позволяет определять ТКЛР и *ρ* в интервале температур (80-1000) *К* в вакууме или среде инертного газа. Для определения значений измеряемых параметров при начальной температуре, близкой к –19 о*С*, рабочая часть ячейки помещается в сосуд Дьюара с жидким азотом, а затем – в медный блок нагревателя, обеспечивающего общий нагрев до 1000 *К*. Напряжение на выходе датчика 14 калибруется с помощью микрометрического устройства 16 с ценой деления 2⋅10-6 м. Коэффициент преобразования фотодатчика составляет 10 *В*/мм. Максимальное значение перемещения 0,5 мм–5 мм, измеряемое датчиком (зависит от размера плеча коромысла), определяется участком, на котором зависимость выходного напряжения от перемещения линейна. Предельная погрешность измерения перемещения, определяемая стабильно регистрируемым значением напряжения (5⋅10-4 В) на выходе датчика, составляет ~5⋅10-8 м. При измерениях температурной зависимости удлинения образца расширенная неопределенность этого параметра возрастает вследствие случайных отклонений от значений полученных при градуировке до ±2⋅10-7 м

Собственный ход установки оценивался с помощью образца из плавленого кварца. При измерениях в стационарном и динамическом режимах (0,05 *К*/с) ход установки в интервале температур (273-1000) *К* близок к нулю без заметного гистерезиса результатов при нагревании и охлаждении. Подавляющая часть погрешности оценки ТКЛР [1] определяется, величиной измеряемого удлинения образца Δ*L*, значение которой составляет ~5 % для образов с параметрами ТКЛР порядка 10⋅10-6 1/*К*, длиной *L* ≈ 5⋅10-2 м, температурного интервала ≈ 20 *К*. С повышением значений ТКЛР и интервала температур эта погрешность снижается до 1% и менее.

Систематическая погрешность, связанная с градуировкой фотоэлектрической системы регистрации на линейном участке в 500 мкм зависимости *U* = *f***(**L) составляет ≤ 0,5 % при использовании системы перемещения с ценой деления 2 мкм. Вклад в погрешность при расширении кварцевой трубки длиной (*L*i кварца), возникающий из-за разницы длин ампулы и толкателя, значительно меньше инструментальной погрешности определения L. Поскольку погрешность значения Δ*α*i кварца [2] оценивается на уровне 10%, а доля этой поправки, при оценках ТКЛР образца порядка 10⋅10-6 1/*К*, составляет ~10%, то погрешность **** при введении этой поправки, не превышает 1%. Рекомендуемые в [2] численные значения нами вводятся непосредственно в программу для расчетов.

Таким образом, погрешность определения α на установке не превышает (1-5) % при температурах (273-1000) *К*, соответственно, для материалов с низким тепловым расширением. Для металлов с минимальным ТКЛР порядка ~ 20⋅10-6 1/*К* погрешность измерений снижается до 2,5 % и не изменялась при повышении температуры, несмотря на повышение ТКЛР, из-за нестабильности контактов образца с кварцевой трубой 3 и толкателем 4. Остаточная деформации, возникающая под действием веса толкателя при исследованиях металлов, снижалась (практически) до пренебрежимо малой величины путем подпружинивания толкателя. Для расчета ТКЛР экспериментальные данные подвергались регрессивному анализу, и устанавливалась наилучшая степень аппроксимирующего полинома, описывающего температурную зависимость длины образца. Погрешностью, возникающей при аппроксимации (критерий Фишера [4]), можно было пренебречь.

Тепловое расширение в некотором интервале температур характеризуется средним ТКЛР (*αср*), а при данной температуре *Т* – истинным (*α*). Значения *αср* рассчитываются по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (5) |

где **Δ***L* – измерение длины тела при изменении температуры на Δ*Т*, которое обычно соответствует интервалу (0 ÷ Т) о*С* или (20 ÷ Т) о*С*. Значения *αср* необходимы при инженерных расчетах, например, при подсчете изменения размеров тела, вследствие термического расширения или при оценке термостойкости материалов. Для выявления структурных изменений в исследуемом образце, или для установления связи между различными параметрами твердого тела с его тепловым расширением, необходимо пользоваться дифференциальным значением α, рассчитываемым по формуле

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

где *L*=*L*0 ± ∆*L* – длина образца при некоторой температуре *Т*, здесь *L*0 – исходная длина образца, ∂*L*/∂*Т* – производная функции *L*=*f*(*T*) при той же температуре *Т*. Необходимая точность измерения *α* и *αср* достигается всесторонним учетом систематических погрешностей, появляющихся вследствие отклонений условий эксперимента от идеальных при выводе формул (5) и (6). Например, неоднородность образца может привести к систематической погрешности, поэтому при исследованиях необходимо было предварительно оценить однородность образца измерением его плотности при комнатной температуре после неоднократных переплавок, или измерением плотности различных образцов из слитка одной плавки. Однородность образца определялась так же измерениями удельного электросопротивления на его различных участках. Систематическая погрешность, возникающая из-за неоднородности температурного поля в образце, исключалась установлением нулевого градиента вдоль образца. Погрешность определения производной d*L*/d*T* складывается из погрешности неопределенности измерения изменения длины образца с температурой и температуры отнесения *Т*.

### **3. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Никельмарки Н-30 (99,999% Ni).

[Предел текучести](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB_%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%83%D1%87%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B8) 120 МПа, предел прочности 450МПа , модуль Юнга 205 ГПа, относительное удлинение 35-40% , [ударная вязкость](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%B4%D0%B0%D1%80%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B2%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) 1,5-2 МДж/м² , HB 600-800 МПа. Плотность 8900 кг/м3 , температура плавления 1455°*С*.

Армко железо.

Общее содержание примесей в Армко железе около 0,16 %, в том числе не более 0,025% углерода; 0,035 % марганца; 0,05 % кремния; 0,015 % фосфора, 0,025 % серы; 0,05 % меди. Технически чистое железо получают в мартеновских и электрических плавильных печах при удлинении процесса выгорания примесей. Общее содержание примесей около 0,16%, в том числе: не более 0,025% C; 0,035% [Mn](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%80%D0%B3%D0%B0%D0%BD%D0%B5%D1%86); 0,05% [Si](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%BD%D0%B8%D0%B9); 0,015% [P](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%81%D1%84%D0%BE%D1%80); 0,025% [S](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D1%80%D0%B0); 0,05% [Cu](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D0%B4%D1%8C). Плотность 7850 кг/м3, температура плавления 1539°С, [предел текучести](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB_%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%83%D1%87%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B8) 120 МН/м², предел прочности 260 МН/м², относительное сужение 60%, относительное удлинение 30%, [ударная вязкость](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%B4%D0%B0%D1%80%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B2%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) 2 МДж/м², HB = 420 МН/м². Размер образца Lобр=70,1 мм = 70,1·10-3 м.

4. СТАНДАРТНЫЕ СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ О ТЕМПЕРАТУРНОМ КОЭФФИЦИЕНТЕ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИИ АРМКО ЖЕЛЕЗА И НИКЕЛЯ

Таблица 1 – Стандартные справочные данные о температурном коэффициенте линейного расширения и электросопротивлении Армко железа и никеля.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Армко железо | | | |  | Никель | | | |
| T,K | αср⋅106,  K-1 | α⋅106,  K-1 | ρ⋅108,  Ом⋅м | T,K | αср⋅106,  K-1 | α⋅106,  K-1 | ρ⋅108,  Ом⋅м |
| 300 | 10,02 | 9,42 | 10,882 | 300 | 12,80 | 12,80 | 6,2058 |
| 310 | 10,17 | 9,66 | 11,268 | 310 | 12,78 | 12,78 | 6,6969 |
| 320 | 10,31 | 9,90 | 11,679 | 320 | 12,77 | 12,77 | 7,1808 |
| 330 | 10,45 | 10,13 | 12,115 | 330 | 12,77 | 12,76 | 7,6596 |
| 340 | 10,59 | 10,36 | 12,574 | 340 | 12,77 | 12,77 | 8,1354 |
| 350 | 10,72 | 10,58 | 13,056 | 350 | 12,77 | 12,78 | 8,6100 |
| 360 | 10,84 | 10,80 | 13,561 | 360 | 12,77 | 12,80 | 9,0854 |
| 370 | 10,96 | 11,02 | 14,087 | 370 | 12,78 | 12,82 | 9,5637 |
| 380 | 11,08 | 11,23 | 14,634 | 380 | 12,79 | 12,86 | 10,046 |
| 390 | 11,19 | 11,43 | 15,202 | 390 | 12,81 | 12,91 | 10,536 |
| 400 | 11,30 | 11,64 | 15,790 | 400 | 12,83 | 12,96 | 11,035 |
| 410 | 11,40 | 11,83 | 16,398 | 410 | 12,85 | 13,03 | 11,545 |
| 420 | 11,50 | 12,02 | 17,025 | 420 | 12,88 | 13,10 | 12,067 |
| 430 | 11,60 | 12,21 | 17,670 | 430 | 12,91 | 13,19 | 12,605 |
| 440 | 11,69 | 12,39 | 18,333 | 440 | 12,95 | 13,29 | 13,159 |
| 450 | 11,78 | 12,57 | 19,014 | 450 | 12,98 | 13,40 | 13,732 |
| 460 | 11,87 | 12,74 | 19,713 | 460 | 13,03 | 13,52 | 14,326 |
| 470 | 11,95 | 12,91 | 20,429 | 470 | 13,07 | 13,65 | 14,942 |
| 480 | 12,03 | 13,07 | 21,161 | 480 | 13,12 | 13,80 | 15,584 |
| 490 | 12,11 | 13,23 | 21,910 | 490 | 13,17 | 13,96 | 16,252 |
| 500 | 12,18 | 13,38 | 22,676 | 500 | 13,23 | 14,13 | 16,950 |
| 510 | 12,23 | 13,53 | 23,457 | 510 | 13,29 | 14,32 | 17,678 |
| 520 | 12,28 | 13,67 | 24,254 | 520 | 13,35 | 14,52 | 18,439 |
| 530 | 12,33 | 13,81 | 25,067 | 530 | 13,42 | 14,73 | 19,235 |
| 540 | 12,37 | 13,95 | 25,896 | 540 | 13,49 | 14,96 | 20,068 |
| 550 | 12,42 | 14,08 | 26,740 | 550 | 13,57 | 15,21 | 20,940 |
| 560 | 12,47 | 14,20 | 27,599 | 560 | 13,65 | 15,46 | 21,853 |
| 570 | 12,52 | 14,32 | 28,475 | 570 | 13,73 | 15,74 | 22,809 |

*Продолжение таблицы 1*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Армко железо | | | |  | Никель | | | |
| T,K | αср⋅106,  K-1 | α⋅106,  K-1 | ρ⋅108,  Ом⋅м | T,K | αср⋅106,  K-1 | α⋅106,  K-1 | ρ⋅108,  Ом⋅м |
| 580 | 12,58 | 14,44 | 29,366 | 580 | 13,82 | 16,03 | 23,810 |
| 590 | 12,63 | 14,55 | 30,272 | 590 | 13,91 | 16,34 | 24,858 |
| 600 | 12,68 | 14,66 | 31,194 | 600 | 14,00 | 16,66 | 25,956 |
| 610 | 12,73 | 14,76 | 32,132 | 610 | 14,10 | 17,00 | 27,104 |
| 620 | 12,79 | 14,85 | 33,086 | 620 | 14,20 | 17,36 | 28,306 |
| 630 | 12,84 | 14,95 | 34,055 | 630 | 14,31 | 17,74 | 29,272 |
| 650 | 12,95 | 15,12 | 36,044 | 650 | 14,53 | 17,08 | 30,104 |
| 660 | 13,00 | 15,19 | 37,063 | 660 | 14,58 | 16,70 | 30,514 |
| 670 | 13,06 | 15,27 | 38,099 | 670 | 14,60 | 16,33 | 30,920 |
| 680 | 13,11 | 15,33 | 39,153 | 680 | 14,62 | 15,96 | 31,323 |
| 690 | 13,17 | 15,40 | 40,224 | 690 | 14,65 | 15,58 | 31,722 |
| 700 | 13,22 | 15,46 | 41,313 | 700 | 14,68 | 15,51 | 32,118 |
| 710 | 13,28 | 15,51 | 42,421 | 710 | 14,70 | 15,58 | 32,511 |
| 720 | 13,33 | 15,56 | 43,548 | 720 | 14,73 | 15,65 | 32,900 |
| 730 | 13,38 | 15,60 | 44,694 | 730 | 14,75 | 15,71 | 33,285 |
| 740 | 13,43 | 15,64 | 45,859 | 740 | 14,78 | 15,78 | 33,668 |
| 750 | 13,49 | 15,68 | 47,046 | 750 | 14,81 | 15,85 | 34,047 |
| 760 | 13,54 | 15,71 | 48,253 | 760 | 14,84 | 15,92 | 34,422 |
| 770 | 13,59 | 15,73 | 49,482 | 770 | 14,87 | 15,99 | 34,795 |
| 780 | 13,64 | 15,76 | 50,733 | 780 | 14,90 | 16,07 | 35,163 |
| 790 | 13,69 | 15,77 | 52,007 | 790 | 14,93 | 16,14 | 35,529 |
| 800 | 13,73 | 15,78 | 53,304 | 800 | 14,96 | 16,22 | 35,891 |
| 810 | 13,78 | 15,79 | 54,626 | 810 | 14,99 | 16,29 | 36,250 |
| 820 | 13,83 | 15,79 | 55,973 | 820 | 15,02 | 16,37 | 36,605 |
| 830 | 13,87 | 15,79 | 57,345 | 830 | 15,05 | 16,45 | 36,957 |
| 840 | 13,91 | 15,78 | 58,744 | 840 | 15,08 | 16,53 | 37,305 |
| 850 | 13,96 | 15,77 | 60,170 | 850 | 15,12 | 16,62 | 37,650 |
| 860 | 14,00 | 15,75 | 61,625 | 860 | 15,15 | 16,71 | 37,992 |
| 870 | 14,04 | 15,73 | 63,109 | 870 | 15,18 | 16,79 | 38,330 |
| 880 | 14,07 | 15,70 | 64,622 | 880 | 15,22 | 16,88 | 38,665 |
| 890 | 14,11 | 15,67 | 66,167 | 890 | 15,25 | 16,98 | 38,997 |
| 900 | 14,14 | 15,64 | 67,744 | 900 | 15,29 | 17,07 | 39,325 |
| 910 | 14,18 | 15,60 | 69,354 | 910 | 15,32 | 17,17 | 39,650 |
| 920 | 14,21 | 15,55 | 70,998 | 920 | 15,36 | 17,27 | 39,971 |
| 930 | 14,24 | 15,50 | 72,678 | 930 | 15,39 | 17,38 | 40,289 |
| 940 | 14,26 | 15,45 | 74,393 | 940 | 15,43 | 17,48 | 40,604 |
| 950 | 14,29 | 15,39 | 76,147 | 950 | 15,47 | 17,59 | 40,915 |

*Окончание таблицы 1*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Армко железо | | | |  | Никель | | | |
| T,K | αср⋅106,  K-1 | α⋅106,  K-1 | ρ⋅108,  Ом⋅м | T,K | αср⋅106,  K-1 | α⋅106,  K-1 | ρ⋅108,  Ом⋅м |
| 960 | 14,31 | 15,32 | 77,938 | 960 | 15,51 | 17,71 | 41,223 |
| 970 | 14,33 | 15,25 | 79,770 | 970 | 15,55 | 17,82 | 41,528 |
| 980 | 14,35 | 15,18 | 81,642 | 980 | 15,58 | 17,94 | 41,829 |
| 990 | 14,37 | 15,10 | 83,557 | 990 | 15,62 | 18,07 | 42,126 |
| 1000 | 14,38 | 15,02 | 85,516 | 1000 | 15,66 | 18,19 | 42,421 |
| 1010 | 14,39 | 14,93 | 87,519 | 1010 | 15,70 | 18,32 | 42,712 |
| 1020 | 14,40 | 14,84 | 89,569 | 1020 | 15,75 | 18,46 | 42,999 |
| 1030 | 14,41 | 14,74 | 91,666 | 1030 | 15,79 | 18,60 | 43,283 |
| 1040 | 14,41 | 14,64 | 93,813 | 1040 | 15,83 | 18,74 | 43,564 |
| 1050 | 14,41 | 14,53 | 96,010 | 1050 | 15,87 | 18,89 | 43,841 |
| – | – | – | – | 1060 | 15,91 | 19,04 | 44,115 |
| – | – | – | – | 1070 | 15,96 | 19,20 | 44,386 |
| – | – | – | – | 1080 | 16,00 | 19,36 | 44,653 |
| – | – | – | – | 1090 | 16,05 | 19,52 | 44,917 |
| – | – | – | – | 1100 | 16,09 | 19,70 | 45,177 |

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

(справочное)

Таблицы экспериментальных данных о температурном коэффициенте линейного расширения и электросопротивлении Армко железа и никеля приведены в Таблице А.1.

Таблица А.1 –Экспериментальные данные о ТКЛР (*α*) и электросопротивлении (*ρ*) Армко железа и никеля

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Армко железо | | |  | Никель | | |
| T,K | α⋅106, K-1 | ρ⋅108,Ом⋅м |  | T,K | α⋅106, K-1 | ρ⋅108,Ом⋅м |
| 331,28 | 10,153 | 11,901 | 310 | 12,78 | 6,67 |
| 341,03 | 10,377 | 12,637 | 330 | 12,76 | 7,63 |
| 360,90 | 10,819 | 13,488 | 350 | 12,78 | 8,57 |
| 379,40 | 11,214 | 14,852 | 370 | 12,82 | 9,52 |
| 388,78 | 11,407 | 15,128 |  | 390 | 12,91 | 10,48 |
| 403,15 | 11,696 | 15,687 | 400 | 12,96 | 10,98 |
| 413,03 | 11,889 | 16,439 | 420 | 13,1 | 12,00 |
| 428,15 | 12,175 | 17,428 | 440 | 13,29 | 13,09 |
| 437,65 | 12,349 | 18,218 | 460 | 13,52 | 14,24 |
| 447,90 | 12,532 | 18,732 | 480 | 13,8 | 15,49 |
| 458,28 | 12,712 | 19,892 |  | 500 | 14,13 | 16,84 |
| 467,40 | 12,866 | 20,23 | 520 | 14,52 | 18,31 |
| 477,78 | 13,036 | 20,864 | 540 | 14,96 | 19,92 |
| 487,15 | 13,186 | 21,467 | 560 | 15,47 | 21,69 |
| 499,15 | 13,371 | 22,474 | 580 | 16,03 | 23,62 |
| 507,40 | 13,495 | 23,116 |  | 600 | 16,66 | 25,74 |
| 517,52 | 13,642 | 23,984 | 620 | 17,36 | 28,06 |
| 527,03 | 13,775 | 24,67 | 630 | 17,74 | 29,01 |
| 537,03 | 13,911 | 25,548 | 631 | 17,7847 | 29,05 |
| 547,15 | 14,044 | 26,259 | 632 | 17,7474 | 29,09 |
| 559,28 | 14,197 | 27,286 | 633 | 17,7101 | 29,13 |
| 567,15 | 14,292 | 27,906 | 634 | 17,6728 | 29,18 |
| 579,53 | 14,436 | 28,896 | 635 | 17,6355 | 29,22 |
| 586,03 | 14,508 | 29,575 | 636 | 17,5982 | 29,26 |
| 595,90 | 14,615 | 30,625 | 637 | 17,5609 | 29,30 |
| 605,03 | 14,709 | 31,329 | 638 | 17,5236 | 29,34 |
| 619,65 | 14,852 | 32,688 | 639 | 17,4863 | 29,38 |

*Продолжение таблицы А1*

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Армко железо | | |  | Никель | | |
| T, K | α⋅106, K-1 | ρ⋅108,Ом⋅м |  | T,K | α⋅106, K-1 | ρ⋅108,Ом⋅м |
| 629,15 | 14,939 | 33,679 |  | 640 | 17,449 | 29,42 |
| 638,53 | 15,022 | 34,573 | 641 | 17,4117 | - |
| 648,40 | 15,104 | 35,617 | 642 | 17,3744 | - |
| 667,15 | 15,246 | 37,47 | 643 | 17,3371 | - |
| 678,90 | 15,327 | 38,72 | 644 | 17,2998 | - |
| 686,65 | 15,377 | 39,36 | 645 | 17,2625 | - |
| 697,03 | 15,439 | 40,742 | 650 | 17,076 | 29,82 |
| 705,15 | 15,485 | 41,539 | 668 | 16,4046 | - |
| 714,78 | 15,534 | 42,521 | 688 | 15,6586 | - |
| 724,28 | 15,578 | 43,715 | 700 | 15,211 | 31,79 |
| 738,40 | 15,637 | 45,173 | 750 | 15,85375 | 33,67 |
| 748,65 | 15,673 | 46,387 | 763 | 15,91182 | - |
| 755,40 | 15,694 | 47,213 | 800 | 16,26 | 35,47 |
| 772,40 | 15,738 | 49,331 | 820 | 16,39 | 36,16 |
| 780,03 | 15,754 | 50,056 | 840 | 16,54 | 36,84 |
| 791,90 | 15,773 | 51,3 |  | 850 | 16,7 | 37,17 |
| 798,78 | 15,779 | 52,721 | 860 | 16,87 | 37,50 |
| 809,90 | 15,787 | 54,156 | 880 | 17,06 | 38,16 |
| 818,40 | 15,789 | 55,44 | 900 | 17,26 | 38,79 |
| 827,15 | 15,787 | 56,632 | 920 | 17,47 | 39,42 |
| 837,90 | 15,780 | 57,885 | 940 | 17,7 | 40,02 |
| 846,78 | 15,771 | 59,108 |  | 950 | 17,95 | 40,32 |
| 855,90 | 15,757 | 60,338 | 960 | 18,2 | 40,62 |
| 865,90 | 15,737 | 61,927 | 980 | 18,47 | 41,20 |
| 874,40 | 15,716 | 62,983 | 1000 | 18,75 | 41,77 |
| 883,90 | 15,689 | 64,588 | 1020 | 19,05 | - |
| 893,28 | 15,659 | 66,033 | 1040 | 19,36 | - |
| 902,40 | 15,625 | 67,012 | 1050 | 19,68 | 43,12 |
| 912,53 | 15,583 | 68,32 | 1060 | 19,78 | - |
| 920,40 | 15,547 | 70,183 | 1080 | 19,76 | - |
| 931,15 | 15,493 | 71,817 | 1100 | 19,78 | 44,39 |
| 944,65 | 15,418 | 74,256 | – | – | – |
| 952,40 | 15,371 | 75,334 | – | – | – |
| 966,28 | 15,280 | 77,72 | – | – | – |
| 976,53 | 15,207 | 79,777 | – | – | – |
| 985,53 | 15,138 | 82,211 | – | – | – |

*Окончание таблицы А1*

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Армко железо | | |  | Никель | | |
| T, K | α⋅106, K-1 | ρ⋅108,Ом⋅м |  | T,K | α⋅106, K-1 | ρ⋅108,Ом⋅м |
| 993,65 | 15,074 | 83,185 |  | – | – | – |
| 1004,90 | 14,979 | 85,01 | – | – | – |
| 1015,65 | 14,883 | 86,706 | – | – | – |
| 1023,53 | 14,809 | 89,16 | – | – | – |
| 1033,15 | 14,716 | 90,769 | – | – | – |
| 1041,65 | 14,629 | 93,428 | – | – | – |

На рисунках 2-11 приведены температурные зависимости электросопротивления и ТКЛР для Армко железа никеля, и полиномы, описывающие данные α, *αср* и ρ из табл. 1-3.



Рисунок 2 – Экспериментальные данные о температурной зависимости

дифференциального ТКЛР никеля и аппроксимирующие полиномы

Уравнения, описывающие температурные зависимости дифференциального ТКЛР (*α*) никеля в соответствующих интервалах температур.

*α*˖106= 14,82198 - 0.00596·T – 2,0295510-5·T2 + 5,88968·10-8·T3 (300-630) K

*α*˖106= 41,321 – 0,0373·T (630-690) K

*α*˖106 = 19,86357 – 0,01628·T + 1,46316·10-5·T2 (700-1100) K



Рисунок 3 – Экспериментальные данные о температурной зависимости среднего ТКЛР никеля и аппроксимирующие полиномы

Уравнения, описывающие температурные зависимости среднего ТКЛР (*αср*) никеля в соответствующих интервалах температур.

*αср*˖106 = 14,9283 – 1,26548·10-2·T + 1,85172·10-5·T2 (300-650) K

*αср*˖106 = 14,0559 – 8,0402·10-4·T + 2,41209·10-5·T2 (660-1100) K



Рисунок 4 **–** Экспериментальные данные температурной зависимости электросопротивления никеля и аппроксимирующие полиномы

Уравнения, описывающие температурные зависимости электросопротивления (ρ) никеля в соответствующих интервалах температур.

ρ˖108 = -21,63126 + 0,16585·T – 3,42787·10-4·T2 + 3,29914·10-7·T3 (300-620) K

ρ˖108 = -3,73306 + 0,063·T – 1,75002·10-5·T2 + 8,3522·10-14·T3 (630-1100) K



Рисунок 5 –Экспериментальные данные о температурной зависимости дифференциального ТКЛР Армко железа и аппроксимирующий полином

Уравнение, описывающее температурную зависимость дифференциального ТКЛР (α) Армко железа во всем интервале температур.

*α***˖**106= - 0,08234 + 0,03876·T - 2,36552·10-5·T2



Рисунок 6 – Экспериментальные данные температурной зависимости среднего ТКЛР Армко железа и аппроксимирующие полиномы

Уравнения, описывающие температурные зависимости среднего ТКЛР (*αср*) в соответствующих интервалах температур.

*αср*˖106 = 2,65553 + 0,03575·T – 4,32205·10-5·T2 + 1,96467·10-8·T3  (300-500) K

*αср*˖106 = 12,96673 - 0.010,67·T + 2,43377·10-5·T2 – 1,22576·10-8·T3  (510-1050) K



Рисунок 7 – Экспериментальные данные температурной зависимости электросопротивления Армко железа и аппроксимирующий полином

Уравнение, описывающее температурную зависимость электросопротивления (ρ) Армко железа в соответствующем интервале температур.

ρ˖108=15,98008– 0,09012·T + 3,17782·10-4·T2 – 2,85874·10-7·T3 + 1,26538·10-10·T4

**5. ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН**

Неопределенности определения результатов измерения αср, α, ρ рассчитываемых по формулам (2), (3) и (4) в каждой серии измерений соответствующих параметров вычислялись стандартные неопределенности измерений по типу А и типу В (согласно РМГ29-2013 и [5]).

**Расчет неопределенности по типу А**

Стандартная неопределенность измерения длины образца L=L0≈80мм, определяемая микрометром: 0,01мм при температуре T0 (начальная температура ≈ 20 °С) рассчитывалась по формуле

|  |  |
| --- | --- |
| где x > 10 |  |

и в 6 сериях измерений не превышала = 0,007 мм.

При этом относительная стандартная неопределенность = 1·10-4.

Стандартная неопределенность измерения длины образца L= Li ≈ 80 мм, пренебрежимо мало отличающейся от L0, в тех же 6 сериях измерений не превышает = 0,007мм. При этом максимальная относительная стандартная неопределенность = 1·10-4.

Стандартная неопределенность измерения (микрометром с ценой деления 0,01мм) длины рабочего участка (L = Lр ≈ 70мм, начальная температура T0 ≈ 20 °С) между головками термопар на образце, где измеряется разность потенциалов, рассчитывался по формуле

|  |  |
| --- | --- |
| где x > 10 |  |

Эта неопределенность в 6 сериях измерений не превышала = 0,007 мм. Однако головки термопар имеют конечные размеры 0,2 мм. При этом однозначность расстояния между электрическими контактами будет определяться размером головки термопары, значение которой на превышает: = 0, 2мм.

При этом относительная стандартная неопределенность = 3·10-3.

Стандартная неопределенность измерения (микрометром 0,01мм) диаметра рабочего участка образца D ≈ 4мм (при начальной температуре T0  ≈ 20 °С), на котором определялась разность потенциалов, рассчитывался по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| где x > 10 |  |

Эта неопределенность в 6 сериях измерений не превышала = 0,01мм

При этом относительная стандартная неопределенность оценки D составляет: = 2,5·10-3

**Расчет неопределенности по типу B**

Неопределенность измерения удлинения образца при определении αср на установке составляла = 2·10-4 мм. Относительная стандартная неопределенность измерения удлинения образца 4·10-2 (при увеличении значений измерения , при определении αср неопределенность уменьшается). Неопределенность оценки абсолютной температуры отнесения (при измерениях αср, α, ρ), так же интервала температур при оценке αср и α хромель –алюмелевыми градуированными термопарами, составляла 0,04 К.

При этом максимальная относительная стандартная неопределенность определения температуры при оценке αср и α составляла 1,5·10-4 (при увеличении интервала температур и температуры отнесения эта неопределённость уменьшается).

Неопределенность измерения удлинения образца при оценке α на установке составляла = 2·10-4 мм. Относительная стандартная неопределенность измерения удлинения образца при этом будет: 4·10-2.

Неопределенность оценки напряжения прецизионным мультиметром Keithley 2002 в измеряемом диапазоне до 200 мВ составляет = 1·10-8 В. Поскольку Rx≈R0, то неопределённость оценки напряжения на эталонном сопротивлении и образце будут одного порядка.

При этом максимальная относительная стандартная неопределенность измерения напряжения порядка 1 мВ на образце и эталонном сопротивлении составляет: 1·10-5 .

Относительная неопределенность, использованного нами эталонного сопротивления (класса точности 0,01), согласно ГОСТ 23737-79 составляет:

1·10-4.

Суммарная стандартная неопределенность измерения αср

= = 0,04 (или 4 % и меньше при повышении температуры)

Суммарная стандартная неопределенность измерения α

==0,04 (или 4%).

Суммарная стандартная неопределенность измерения ρ

= 0,006 (или 0,6%)

Максимальная относительная стандартная неопределенность оценки поправки 1+αсрΔТ на изменение сопротивления составляет

(или 4 %)

∆LT = Lр·αср(T)·∆T

Максимальное значение удлинения составляет:

∆LT ≈ 70·18·10-6·700≈1мм, что составляет 1,4% от исходного размера образца 1,4%.

Учет этой части в формуле (4) дает:

Ход установки (для введения поправки в значения ТКЛР) определялся по кварцевому стержню и образцу из меди [6]. Контрольные измерения на меди марки М0, цинке марки Ч и нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т показали, что отклонения результатов измерения укладываются в коридор ошибок, не превышающий величины рассчитанных неопределенностей [1].

Для доверительной вероятности Р = 0,95 коэффициент охвата k = 2. Вычисление расширенной неопределенности измерения дает:

для αср (или ≈ 8% и меньше при повышении температуры).

для α (или ≈ 8%).

для (или ≈ 1,2%).

6. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ДАННЫХ

Оценка достоверности полученных данных о ТКЛР и электросопротивлению никеля и Армко железа осуществлялась многократным повторением измерений ТКЛР и электросопротивления в выбранном температурном диапазоне, с последующей совместной обработкой большого числа серий измерений. Сравнение с литературными данными по электросопротивлению и ТКЛР для никеля проведено в диапазоне температур (300-1100) К и для Армко железа - в диапазоне температур (300-1050) К. Ниже приведены графики температурных зависимостей электросопротивления и ТКЛР никеля и Армко железа.



Рисунок 8 –Экспериментальные данные температурных зависимостей ТКЛР никеля

△- наши данные; ○- [7]; ■- [2].



Рисунок 9 – Экспериментальные данные температурных зависимостей электросопротивления никеля. △- наши данные; ●- [8]; ○- [9]; □- [10]



Рисунок 10 –Экспериментальные данные температурных зависимостей ТКЛР Армко железа △- наши данные; ○- [11]; ■- [2]



Рисунок11 –Экспериментальные данные о температурных зависимостях электросопротивления Армко железа. △-наши данные; ●- [13]; ○- [11]; □- [13]; + [14]

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Палчаев Д.К., Мурлиева Ж.Х., Исхаков М.Э. Методика экспериментального определения электросопротивленияи теплового расширения твердых тел в диапазоне температур от 80 К до 1000 К // Методика ГСССД МЭ 241-2015. Росс. научно-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия. Деп. в ФГУП “СТАНДАРТИНФОРМ” 25. 09. 2015 г., № 234а – 2015 кк).
2. Новикова С.И. Тепловое расширение твёрдых тел. – М.: Наука, 1974.– 291 с.
3. Чистяков, В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
4. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высшая школа. 1982. –224 с.
5. ГОСТ Р 34100.3 – 2017 / Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.
6. Abdulagatov I.M., Murlieva Zh.Kh., Palchaev D.K., Kazbekov K.K., Maangalov M.M. Thermal Expansion and Kinetic Coefficients of Crystals // J. Phys. and Chem. Solids. – 2007. – V. 68. – Р. 1713-1720.
7. T.G. Kollie, Phys. Rev. B 1611 (1977) 4872.
8. M.V. Kamalakar, Ph.D. Thesis, Jadavpur University, Kolkata, 2009.
9. E.A. Bel’skaya,V.E.Peletsky, Nickel. The electrical resistivity in the temperature range 200-1500 K: Standard Reference Data, Moscow, 1985.
10. O.A. Shmatko, Y.A. Usov, Electric and Magnetic Properties of Metals and Alloys (Handbook), Naukova Dumka, Kiev,1987.
11. M.I. Laubitz, Canad. J. Phys. 38 (1960) 887.
12. H.R. Shanks, A.H. Klein, G.C. Danielson, J. Appl. Phys. 38 (1967) 2885.
13. V.S. Gumenuk, V.V. Lebedev, ФММ (Russian) 8 (1959) 223.
14. T.W. Watson, D.R. Flynn, H.E. Robinson, J. Res. NBS-C. Engineering and Instrumentation 71 (1967) 285.