ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 8.940— 2017

Государственная система обеспечения единства измерений

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ. СТАНДАРТНЫЕ СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Медно-цинковые сплавы. Температурный коэффициент линейного расширения и удельное электрическое сопротивление в диапазоне от 300 К до 2/3 температуры плавления

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2019

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Главным научным метрологическим центром «Стандартные справочные данные о физических константах и свойствах веществ и материалов» (ГНМЦ «ССД»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 180 «Стандартные справочные данные о физических константах и свойствах веществ и материалов»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 декабря 2017 г. № 2077-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

5 ПЕРЕИЗДАНИЕ. Март 2019 г.

Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (www.gost.ru)

© Стандартинформ, оформление, 2018, 2019

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Общие положения 1
Приложение А (справочное) Экспериментальные данные 19
Библиография 41

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственная система обеспечения единства измерений

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ. СТАНДАРТНЫЕ СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Медно-цинковые сплавы. Температурный коэффициент линейного расширения и удельное электрическое сопротивление в диапазоне от 300 К до 2/3 температуры плавления

State system for ensuring the uniformity of measurements. National standard. Standard reference data. Copper-zinc alloys. Temperature coefficient of linear expansion and electrical resistivity for the temperature range from 300 K to 2/3 temperature of melting

Дата введения — 2018—03—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на стандартные справочные данные (ССД) о температурном коэффициенте линейного расширения (ТКЛР) и электрических сопротивлений.

Настоящий стандарт предназначен для использования ССД о ТКЛР медно-цинковых сплавов в диапазоне от 300 К до 2/3 температуры плавления, измерения которого выполнены на кварцевом дилатометре [1], и данных об удельном электрическом сопротивлении, определяемых четырехзондовым методом на постоянном токе (см. приложение А).

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использована нормативная ссылка на следующий стандарт:

ГОСТ 34100.3/ISO/IEC Guide 98-3:2008 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «На-циональные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесяч-ного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана дати-рованная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Общие положения

Тепловое (линейное) расширение — деформация, вызванная изменением температуры. ТКЛР представляет собой относительное изменение линейного размера при изменении температуры на 1 К. ССД о ТКЛР представлены в виде таблиц и рассчитаны по уравнениям, отображающим зависимость ТКЛР от значений температуры (ГОСТ 34100.3).

Издание официальное

Относительное удлинение (тепловую деформацию) ΔL вычисляют по формуле

$$\Delta L = \Delta L_{(T-T_o)} / L_{T_o} = (L_T - L_{T_o}) / L_{T_o}, \quad (1)$$

где $\Delta L_{(T-T_o)}$ — удлинение в интервале температуры $(T - T_o)$, м;

T — конечная температура интервала, К;

T_o — начальная температура, при которой определялись размеры образца L, К;

L_{T_o} — размер образца при температуре T_o, м;

L_T — размер образца при температуре T, м.

Средний (интегральный) ТКЛР в интервале температуры $(T - T_o)$ $\bar{\alpha}_{(T-T_o)}$, $К^{-1}$ вычисляют по формуле

$$\bar{\alpha}_{(T-T_o)} = (1 / L_{T_o}) \cdot \Delta L_{(T-T_o)} / (T - T_o). \quad (2)$$

Полученные значения $\bar{\alpha}_{(T-T_o)}$ относились к значениям температуры T.

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

$$\alpha_i = (\delta L / \delta T) \cdot (1 / L_i). \quad (3)$$

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

Значения электросопротивления ρ вычислялись по формуле

$$\rho = (1 + \bar{\alpha}\Delta T) \cdot \frac{SU_x R_0}{U_0 l_p}, \quad (4)$$

где $\bar{\alpha}$ — коэффициент теплового расширения образца в интервале температуры $\Delta T = T - T_o$;

$\Delta T = T - T_o$ — интервал температуры;

S — площадь сечения рабочего участка образца;

U_x и U_0 — падения напряжения на образце и эталонном сопротивлении R_0 соответственно;

R_0 — эталонное сопротивление;

l_p — длина рабочего участка образца (расстояние между потенциальными зондами).

ССД для образцов α-, β-, γ-, ε-латуней и механических смесей $\alpha + \beta$, $\beta + \gamma$, $\gamma + \varepsilon$, $\varepsilon + \eta$ системы «медь—цинк», востребованные в ряде отраслей техники, представлены в актуальном для практического применения интервале температур от 300 до 1000 К, для которого отсутствуют надежные аттестованные данные.

В таблицах 1—10 приведены стандартные справочные значения среднего $\bar{\alpha}_{(T-T_o)}$ и истинного ТКЛР, а также удельного электросопротивления образцов соответствующих составов. Соотношения меди и цинка в сплавах представлены в весовых процентах. При составлении окончательных таблиц приведены термодинамические значения температуры, К. Температура, при которой определялся начальный размер образцов, составляла 293,15 К. Начальная температура при измерениях температурных зависимостей была, как правило, 303,15 К. Температурные зависимости ΔL после исследований экстраполировались к значению при температуре 293,15 К. Для каждого состава проводились три серии измерений «нагрев—охлаждение», итого шесть температурных зависимостей. Каждая серия представляла собой температурные зависимости длины образца и электросопротивления при нагреве и охлаждении. После получения температурных зависимостей проводилось усреднение значений (T, L, ρ) в каждой серии следующим образом:

1-я серия измерений:

$(T_{i\,наг} + T_{i\,охл})/2 = T_{i\,сред1}$;

$(L_{i\,наг} + L_{i\,охл})/2 = L_{i\,сред1}$;

$(\rho_{i\,наг} + \rho_{i\,охл})/2 = \rho_{i\,сред1}$.

Пример

$T_{наг}$	$T_{охл}$	$L_{наг}$	$L_{охл}$	$R_{наг}$	$R_{охл}$	$T_{ср}$	$L_{сред}$	$R_{сред}$
20	**22**	**70**	**74**	**0,36**	**0,38**	**21**	**72**	**0,37**
30	**33**	**82**	**86**	**0,41**	**0,43**	**31,5**	**84**	**0,42**
40	**41**	**91**	**95**	**0,52**	**0,55**	**40,5**	**93**	**0,535**

Расчеты проводились аналогичным образом для двух последующих серий.

2-я серия измерений:

$(T_{i\,наг} + T_{i\,охл})/2 = T_{i\,сред2}$;

$(L_{i\,наг} + L_{i\,охл})/2 = L_{i\,сред2}$;

$(\rho_{i\,наг} + \rho_{i\,охл})/2 = \rho_{i\,сред2}$.

3-я серия измерений:

$(T_{i\,наг} + T_{i\,охл})/2 = T_{i\,сред3}$;

$(L_{i\,наг} + L_{i\,охл})/2 = L_{i\,сред3}$;

$(\rho_{i\,наг} + \rho_{i\,охл})/2 = \rho_{i\,сред3}$.

Далее значения трех серий усреднялись, и окончательные значения для данного образца следующие:

$(T_{i\,сред1} + T_{i\,сред2} + T_{i\,сред3})/3 = T_{i\,сред}$ — температура для данного образца, усредненная по трем сериям;

$(L_{i\,сред1} + L_{i\,сред2} + L_{i\,сред3})/3 = L_{i\,сред}$ — длина для данного образца, усредненная по трем сериям;

$(\rho_{i\,сред1} + \rho_{i\,сред2} + \rho_{i\,сред3})/3 = \rho_{i\,сред}$ — электросопротивление для данного образца, усредненное по трем сериям.

Для получения ССД о ТКЛР ($\bar{\alpha}$ и α), приведенных в таблицах 1—10, использовался аппроксимирующий полином $L = f(T)$, результат его дифференцирования представлялся также полиномом. Для каждого значения температуры T_i, к которой относились значения $\bar{\alpha}_{(T-T_o)}$ и α_i, вычислялись значения L_i, $(L_{T_i} - L_{T_o})$ и $(\delta L / \delta T)_i$ по формулам (2) и (3) соответственно.

Таблица 1 — α-латунь (7 % Zn + 93 % Cu)

T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
300	16,29	16,38	0,0389
310	16,33	16,46	0,0397
320	16,36	16,53	0,0404
330	16,40	16,60	0,0412
340	16,44	16,68	0,0419
350	16,48	16,75	0,0427
360	16,52	16,83	0,0435
370	16,56	16,90	0,0442
380	16,60	16,98	0,0449
390	16,64	17,05	0,0457
400	16,68	17,12	0,0465
410	16,72	17,20	0,0473
420	16,76	17,27	0,0481
430	16,79	17,35	0,0489

Продолжение таблицы 1

T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
440	16,83	17,42	0,0496
450	16,87	17,50	0,0504
460	16,91	17,57	0,0512
470	16,95	17,64	0,0520
480	16,99	17,72	0,0528
490	17,03	17,79	0,0536
500	17,07	17,87	0,0544
510	17,11	17,94	0,0553
520	17,15	18,01	0,0561
530	17,19	18,09	0,0569
540	17,22	18,16	0,0577
550	17,26	18,24	0,0585
560	17,30	18,31	0,0593
570	17,34	18,39	0,0602
580	17,38	18,46	0,0610
590	17,42	18,53	0,0618
600	17,46	18,61	0,0627
610	17,50	18,68	0,0635
620	17,54	18,76	0,0644
630	17,58	18,83	0,0652
640	17,62	18,90	0,0661
650	17,65	18,98	0,0669
660	17,69	19,05	0,0678
670	17,73	19,13	0,0686
680	17,77	19,20	0,0695
690	17,81	19,28	0,0704
700	17,85	19,35	0,0712
710	17,89	19,42	0,0721
720	17,93	19,50	0,0729
730	17,97	19,57	0,0739
740	18,01	19,65	0,0748
750	18,05	19,72	0,0756
760	18,08	19,80	0,0765
770	18,12	19,87	0,0774
780	18,16	19,94	0,0783

Окончание таблицы 1

T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
790	18,20	20,02	0,0792
800	18,24	20,09	0,0801
810	18,28	20,17	0,0810
820	18,32	20,24	0,0819
830	18,36	20,31	0,0829
840	18,40	20,39	0,0838
850	18,44	20,46	0,0847
860	18,48	20,54	0,0856
870	18,51	20,61	0,0865
880	18,55	20,69	0,0875
890	18,59	20,76	0,0885
900	18,63	20,83	0,0893
910	18,67	20,91	0,0903
920	18,71	20,98	0,0912

Таблица 2 — α-латунь (19,6 % Zn + 80,4 % Cu)

T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
300	16,69	16,86	0,0566
310	16,74	16,95	0,0575
320	16,79	17,05	0,0584
330	16,84	17,14	0,0593
340	16,89	17,23	0,0601
350	16,94	17,32	0,0610
360	16,99	17,41	0,0619
370	17,04	17,51	0,0628
380	17,09	17,60	0,0637
390	17,14	17,69	0,0646
400	17,19	17,78	0,0655
410	17,24	17,87	0,0664
420	17,29	17,96	0,0673
430	17,34	18,06	0,0682
440	17,39	18,15	0,0691
450	17,44	18,24	0,0701
460	17,49	18,33	0,0710
470	17,54	18,42	0,0719
480	17,59	18,51	0,0729

Продолжение таблицы 2

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
490	17,64	18,61	0,0738
500	17,69	18,70	0,0748
510	17,74	18,79	0,0757
520	17,79	18,88	0,0767
530	17,83	18,97	0,0777
540	17,88	19,07	0,0786
550	17,93	19,16	0,0796
560	17,98	19,25	0,0806
570	18,03	19,34	0,0816
580	18,08	19,43	0,0826
590	18,13	19,52	0,0836
600	18,18	19,62	0,0846
610	18,23	19,71	0,0856
620	18,28	19,80	0,0866
630	18,33	19,89	0,0876
640	18,38	19,98	0,0886
650	18,43	20,08	0,0896
660	18,48	20,17	0,0907
670	18,53	20,26	0,0917
680	18,58	20,35	0,0927
690	18,63	20,44	0,0938
700	18,68	20,53	0,0948
710	18,73	20,63	0,0959
720	18,78	20,72	0,0969
730	18,83	20,81	0,0980
740	18,88	20,90	0,0991
750	18,93	20,99	0,1002
760	18,98	21,09	0,1013
770	19,03	21,18	0,1023
780	19,08	21,27	0,1034
790	19,13	21,36	0,1045
800	19,18	21,45	0,1056
810	19,23	21,54	0,1067
820	19,28	21,64	0,1079
830	19,33	21,73	0,1090
840	19,38	21,82	0,1101

Окончание таблицы 2

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
850	19,43	21,91	0,1112
860	19,48	22,00	0,1123
870	19,53	22,10	0,1135
880	19,58	22,19	0,1146
890	19,63	22,28	0,1158
900	19,68	22,37	0,1169
910	19,73	22,46	0,1181
920	19,78	22,55	0,1192

Таблица 3 — α-латунь (30,5 % Zn + 69,5 % Cu)

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
300	13,84	17,21	0,0632
310	14,10	17,31	0,0641
320	14,35	17,41	0,0651
330	14,59	17,51	0,0660
340	14,83	17,61	0,0670
350	15,05	17,71	0,0680
360	15,27	17,80	0,0689
370	15,47	17,90	0,0699
380	15,67	18,00	0,0709
390	15,87	18,10	0,0719
400	16,05	18,20	0,0729
410	16,23	18,29	0,0739
420	16,40	18,39	0,0749
430	16,57	18,49	0,0759
440	16,72	18,59	0,0769
450	16,87	18,69	0,0779
460	17,02	18,79	0,0789
470	17,16	18,88	0,0799
480	17,29	18,98	0,0810
490	17,42	19,08	0,0820
500	17,54	19,18	0,0831
510	17,66	19,28	0,0841
520	17,77	19,37	0,0852
530	17,88	19,47	0,0862
540	17,98	19,57	0,0873

Окончание таблицы 3

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
550	18,08	19,67	0,0884
560	18,17	19,77	0,0894
570	18,26	19,87	0,0905
580	18,35	19,96	0,0916
590	18,43	20,06	0,0926
600	18,50	20,16	0,0938
610	18,58	20,26	0,0949
620	18,65	20,36	0,0959
630	18,72	20,45	0,0970
640	18,78	20,55	0,0982
650	18,85	20,65	0,0993
660	18,91	20,75	0,1004
670	18,97	20,85	0,1015
680	19,02	20,95	0,1026
690	19,08	21,04	0,1038
700	19,13	21,14	0,1049
710	19,18	21,24	0,1060
720	19,23	21,34	0,1072
730	19,28	21,44	0,1084
740	19,33	21,54	0,1095
750	19,37	21,63	0,1107
760	19,42	21,73	0,1118
770	19,47	21,83	0,1130
780	19,51	21,93	0,1142
790	19,56	22,03	0,1154
800	19,61	22,12	0,1166
810	19,65	22,22	0,1177
820	19,70	22,32	0,1189
830	19,75	22,42	0,1201
840	19,80	22,52	0,1214
850	19,85	22,62	0,1226
860	19,90	22,71	0,1238
870	19,95	22,81	0,1250
880	20,01	22,91	0,1262
890	20,06	23,01	0,1275

Таблица 4 — β-латунь (46,1 % Zn + 53,9 % Cu)

T, К	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
300	17,71	17,44	0,0433
310	17,82	17,63	0,0444
320	17,92	17,82	0,0456
330	18,02	18,01	0,0467
340	18,12	18,21	0,0479
350	18,21	18,40	0,0491
360	18,30	18,59	0,0503
370	18,38	18,78	0,0516
380	18,46	18,98	0,0528
390	18,54	19,17	0,0541
400	18,62	19,36	0,0554
410	18,70	19,55	0,0567
420	18,77	19,74	0,0580
430	18,85	19,94	0,0594
440	18,93	20,13	0,0607
450	19,00	20,32	0,0621
460	19,08	20,51	0,0635
470	19,15	20,71	0,0649
480	19,23	20,90	0,0663
490	19,32	21,09	0,0677
500	19,40	21,28	0,0692
510	19,49	21,48	0,0706
520	19,58	21,67	0,0721
530	19,67	21,86	0,0736
540	19,77	22,17	0,0752
550	19,87	22,36	0,0767
560	19,98	22,52	0,0783
570	20,09	22,66	0,0798
580	20,21	22,80	0,0814
590	20,33	22,97	0,0830
600	20,46	23,17	0,0847
610	20,60	23,43	0,0863
620	20,75	23,77	0,0879
630	20,90	24,20	0,0896
640	21,06	24,74	0,0913

Окончание таблицы 4

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
650	21,23	25,41	0,0931
660	21,41	26,23	0,0948
670	21,60	27,21	0,0968
680	21,80	28,38	0,0992
690	22,01	29,76	0,1016
700	22,23	31,35	0,1043
710	22,46	33,19	0,1073
720	22,71	39,08	0,1106
730	22,96	33,06	0,1144
740	23,23	28,70	0,1177
750	23,38	24,87	0,1195
760	23,39	25,03	0,1213
770	23,41	25,19	0,1231
780	23,43	25,35	0,1249
790	23,46	25,52	0,1267
800	23,49	25,68	0,1285
810	23,53	25,84	0,1303
820	23,57	26,00	0,1320
830	23,62	26,16	0,1338
840	23,67	26,33	0,1356
850	23,73	26,49	0,1373
860	23,79	26,65	0,1391
870	23,87	26,81	0,1408
880	23,94	26,98	0,1426
890	24,03	27,14	0,1443
900	24,12	27,30	0,1460
910	24,22	27,46	0,1477
920	24,32	27,62	0,1495

Таблица 5 — γ-латунь (65,1 % Zn + 34,9 % Cu)

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
300	16,50	17,58	0,0828
310	16,84	18,05	0,0841
320	17,17	18,50	0,0855
330	17,49	18,93	0,0869
340	17,80	19,35	0,0886

Продолжение таблицы 5

T, К	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
350	18,09	19,76	0,0903
360	18,37	20,14	0,0921
370	18,63	20,51	0,0939
380	18,89	20,87	0,0959
390	19,13	21,21	0,0979
400	19,36	21,53	0,0999
410	19,58	21,83	0,1021
420	19,80	22,12	0,1043
430	20,00	22,39	0,1066
440	20,19	22,65	0,1089
450	20,37	22,89	0,1113
460	20,54	23,11	0,1136
470	20,71	23,32	0,1161
480	20,86	23,51	0,1185
490	21,01	23,69	0,1210
500	21,15	23,84	0,1235
510	21,29	23,98	0,1260
520	21,42	24,11	0,1285
530	21,54	24,22	0,1310
540	21,65	24,31	0,1336
550	21,76	24,39	0,1361
560	21,87	24,45	0,1386
570	21,97	24,49	0,1411
580	22,06	—	—
590	22,15	24,55	0,1458
600	22,24	24,75	0,1482
610	22,32	24,94	0,1506
620	22,40	25,12	0,1530
630	22,48	25,28	0,1554
640	22,56	25,43	0,1578
650	22,63	25,56	0,1603
660	22,70	25,68	0,1627
670	22,77	25,79	0,1651
680	22,84	25,89	0,1675

Окончание таблицы 5

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
690	22,91	25,97	0,1699
700	22,98	26,04	0,1724
710	23,05	26,09	0,1748
720	23,12	26,14	0,1773
730	23,20	26,17	0,1797
740	23,27	26,18	0,1822
750	23,34	26,18	0,1846

Таблица 6 — ε-латунь (82,6 % Zn + 17,4 % Cu)

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
300	22,18	22,60	0,1765
310	22,41	22,90	0,1791
320	22,64	23,19	0,1817
330	22,85	23,47	0,1844
340	23,06	23,75	0,1873
350	23,25	24,02	0,1901
360	23,43	24,28	0,1931
370	23,60	24,53	0,1961
380	23,77	24,77	0,1992
390	23,92	25,01	0,2024
400	24,07	25,24	0,2056
410	24,20	25,46	0,2088
420	24,33	25,67	0,2122
430	24,45	25,88	0,2156
440	24,57	26,08	0,2190
450	24,67	26,27	0,2225
460	24,77	26,45	0,2261
470	24,87	26,63	0,2297
480	24,96	26,79	0,2333
490	25,04	26,95	0,2370
500	25,12	27,10	0,2407
510	25,19	27,25	0,2445
520	25,26	27,39	0,2483
530	25,32	27,51	0,2521
540	25,38	27,64	0,2560

Окончание таблицы 6

T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
550	25,44	27,75	0,2599
560	25,50	27,86	0,2638
570	25,55	27,95	0,2678
580	25,60	28,04	0,2717
590	25,64	28,13	0,2757
600	25,69	28,20	0,2797

Таблица 7 — $\alpha + \beta$ (~ 41,8 % Zn + 58,2 % Cu)

T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
300	16,06	14,76	0,0635
310	16,21	15,30	0,0645
320	16,36	15,80	0,0655
330	16,51	16,29	0,0666
340	16,66	16,75	0,0677
350	16,80	17,18	0,0687
360	16,94	17,59	0,0698
370	17,08	17,98	0,0709
380	17,22	18,34	0,0721
390	17,35	18,68	0,0732
400	17,49	18,99	0,0744
410	17,62	19,28	0,0755
420	17,75	19,54	0,0767
430	17,88	19,78	0,0779
440	18,00	20,00	0,0790
450	18,12	20,19	0,0802
460	18,25	20,36	0,0814
470	18,37	20,50	0,0826
480	18,48	20,62	0,0839
490	18,60	20,71	0,0851
500	18,71	20,78	0,0863
510	18,82	20,82	0,0875
520	18,93	20,84	0,0887
530	19,04	—	—
540	19,14	—	—
550	19,25	20,90	0,0924

Окончание таблицы 7

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
560	19,35	20,90	0,0937
570	19,45	20,94	0,0950
580	19,54	21,04	0,0963
590	19,64	21,19	0,0976
600	19,73	21,39	0,0989
610	19,82	21,64	0,1003
620	19,91	21,95	0,1016
630	20,00	22,31	0,1029
640	20,08	22,72	0,1043
650	20,17	23,18	0,1057
660	20,25	23,69	0,1072
670	20,32	24,26	0,1086
680	20,40	24,88	0,1101
690	20,48	25,54	0,1116
700	20,55	26,27	0,1131
710	20,62	27,04	0,1147
720	20,69	—	—
730	20,75	—	—
740	20,82	22,80	0,1200
750	20,88	22,85	0,1214
760	20,94	22,89	0,1228
770	21,00	22,93	0,1242
780	21,06	22,97	0,1256
790	21,11	23,02	0,1271
800	21,16	23,06	0,1286
810	21,21	23,10	0,1301
820	21,26	23,14	0,1317
830	21,31	23,18	0,1333
840	21,35	23,23	0,1349
850	21,39	23,27	0,1365
860	21,43	23,31	0,1381
870	21,47	23,35	0,1398
880	21,51	23,40	0,1415
890	21,54	23,44	0,1432

Таблица 8 — β + γ (~ 53,0 % Zn + 47,0 % Cu)

T, К	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
300	18,26	16,73	0,0759
310	18,38	17,18	0,0778
320	18,50	17,61	0,0797
330	18,62	18,03	0,0817
340	18,75	18,43	0,0837
350	18,87	18,81	0,0858
360	18,99	19,18	0,0879
370	19,11	19,53	0,0900
380	19,24	19,87	0,0922
390	19,36	20,18	0,0944
400	19,48	20,49	0,0967
410	19,60	20,77	0,0990
420	19,72	21,04	0,1014
430	19,85	21,30	0,1038
440	19,97	21,53	0,1062
450	20,09	21,76	0,1087
460	20,21	21,96	0,1112
470	20,34	22,15	0,1138
480	20,46	22,32	0,1164
490	20,58	22,48	0,1191
500	20,70	22,62	0,1218
510	20,82	22,74	0,1245
520	20,95	22,85	0,1273
530	21,07	22,94	0,1301
540	—	—	—
550	21,28	23,56	0,1357
560	21,40	24,46	0,1389
570	21,54	25,33	0,1424
580	21,70	26,17	0,1460
590	21,88	27,00	0,1499
600	22,08	27,80	0,1540
610	22,30	28,58	0,1583
620	22,54	29,33	0,1628
630	22,78	30,06	0,1676
640	23,04	30,77	0,1725

Окончание таблицы 8

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
650	23,30	31,46	0,1776
660	23,58	32,12	0,1830
670	23,85	32,77	0,1885
680	24,13	33,38	0,1943
690	24,41	33,98	0,2003
700	24,69	34,55	0,2065
710	24,96	35,10	0,2129
720	25,23	35,63	0,2195
730	25,49	36,14	0,2264
740	25,74	36,62	0,2334
750	25,98	37,08	0,2407
760	—	—	—
770	26,13	26,28	0,2459
780	26,15	26,35	0,2480
790	26,17	26,42	0,2500
800	26,19	26,49	0,2521
810	26,21	26,56	0,2541
820	26,23	26,63	0,2561
830	26,25	26,70	0,2581
840	26,27	26,77	0,2601
850	26,29	26,84	0,2620

Таблица 9 — $\gamma + \varepsilon$ (~ 73,3 % Zn + 26,7 % Cu)

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
300	22,18	22,06	0,0757
310	22,41	22,47	0,0775
320	22,64	22,84	0,0793
330	22,85	23,19	0,0811
340	23,06	23,51	0,0829
350	23,25	23,81	0,0847
360	23,43	24,08	0,0866
370	23,60	24,34	0,0884
380	23,77	24,57	0,0903
390	23,92	24,78	0,0922
400	24,07	24,97	0,0940

Окончание таблицы 9

T, К	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
410	24,20	25,15	0,0959
420	24,33	25,31	0,0978
430	24,45	25,45	0,0998
440	24,57	25,58	0,1017
450	24,67	25,70	0,1036
460	24,78	25,80	0,1056
470	24,87	25,90	0,1075
480	24,96	25,98	0,1095
490	25,04	26,06	0,1115
500	25,12	26,13	0,1135
510	25,19	26,19	0,1155
520	25,26	26,25	0,1175
530	25,32	26,31	0,1196
540	25,38	26,36	0,1216
550	25,44	26,42	0,1237
560	25,50	26,47	0,1257
570	25,55	26,52	0,1278
580	—	—	—
590	25,65	26,64	0,1320
600	25,69	26,70	0,1341
610	25,74	26,77	0,1362
620	25,78	26,84	0,1384
630	25,82	26,93	0,1405
640	25,87	27,02	0,1427
650	25,91	27,12	0,1448
660	25,96	27,24	0,1470
670	26,00	27,37	0,1492
680	26,05	27,51	0,1514
690	26,10	27,66	0,1536
700	26,15	27,84	0,1559
710	26,20	28,03	0,1581
720	26,25	28,23	0,1604
730	26,31	28,46	0,1626
740	26,37	28,71	0,1649

Таблица 10 — ε + η (~ 87,8 % Zn + 12,2 % Cu)

T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
300	22,75	22,87	0,0711
310	23,01	23,16	0,0730
320	23,25	23,45	0,0749
330	23,48	23,74	0,0769
340	23,70	24,03	0,0789
350	23,91	24,32	0,0809
360	24,10	24,61	0,0830
370	24,29	24,90	0,0851
380	24,46	25,19	0,0872
390	24,63	25,48	0,0894
400	24,78	25,77	0,0916
410	24,93	26,06	0,0938
420	25,08	26,35	0,0960
430	25,21	26,64	0,0983
440	25,35	26,93	0,1006
450	25,47	27,22	0,1029
460	25,60	27,52	0,1053
470	25,72	27,81	0,1078
480	25,84	28,10	0,1102
490	25,96	28,39	0,1127
500	26,08	28,68	0,1152
510	26,20	28,97	0,1177
520	26,32	29,26	0,1203
530	26,44	29,55	0,1229
540	26,57	29,84	0,1255
550	26,70	30,13	0,1282
560	26,83	30,42	0,1309
570	26,97	30,71	0,1337
580	27,11	31,00	0,1364
590	27,27	31,29	0,1392
600	27,43	31,58	0,1421
610	27,60	31,87	0,1449

Приложение А
(справочное)

Экспериментальные данные

А.1 Химический состав и геометрические размеры образцов системы Cu—Zn

В 2017 г. проведены обширные систематические исследования медно-цинковых сплавов (латуней), изготовленных на основе меди ОСЧ 11-4 ($Sb < 6 \cdot 10^{-4}$ %; $Pb < 2 \cdot 10^{-4}$ %; $Sn < 2 \cdot 10^{-4}$ %; $As < 4 \cdot 10^{-4}$ %; $Bi < 3 \cdot 10^{-4}$ %; $Zn < 4 \cdot 10^{-4}$ %; $Mn < 3 \cdot 10^{-4}$ %; $Mg < 3 \cdot 10^{-4}$ %; $Si < 3 \cdot 10^{-4}$ %; $Ni < 6 \cdot 10^{-4}$ %; $Fe < 5 \cdot 10^{-4}$ %), цинка марки Ч ($Fe < 2 \cdot 10^{-2}$ %; $As < 1 \cdot 10^{-4}$ %).

Данные, приведенные в таблицах 1—10, получены по результатам измерений, выполненных на установке, реализующей одновременно метод кварцевого дилатометра (измерение ТКЛР) и удельного сопротивления (четырехзондовый метод) на одних и тех же образцах [1].

Для разработки ССД отобраны результаты исследований образцов 10 составов [2], изготовленных путем сплавления навесок для обеспечения соответствующих концентраций, количественный состав которых приведен в таблице А.1.

Таблица А.1 — Химический состав и геометрические размеры образцов системы Cu—Zn

Фаза	Химический состав (навески)		Химический анализ		Рентгено-флуоресцентный анализ		Диаметр образца d, мм	Длина образца L, мм	Расстояние между термопарами l_p, мм
	Zn %	Cu %	Zn %	Cu %	Zn %	Cu %			
α	10	90	7	93	12,17	87,56	4,44	94,06	58,60
	20	80	19,6	80,4	20,67	79,09	4,43	89,51	63,62
	30	70	30,5	69,5	32,66	66,41	5,16	94,32	73,96
$\alpha+\beta$	40	60	41,8	58,2	42,38	56,71	4,99	88,94	71,20
β	48,5	51,5	46,1	53,9	43,22	56,16	4,38	80,51	60,53
$\beta+\gamma$	55	45	53	47	49,21	50,79	5,44	60,15	45,10
γ	61	39	65,1	34,9	65,20	33,39	8,37	14,78	10,85
$\gamma+\varepsilon$	80	20	73,3	26,7	76,73	22,34	5,49	93,52	69,18
ε	86	14	82,6	17,4	81,9	17,1	5,04	39,64	23,09
$\varepsilon+\eta$	90	10	87,8	12,2	87,96	12,02	4,94	45,40	29,70

Согласно данным таблицы А.1, результаты этих анализов имеют некоторые различия. При интерпретации исследованных свойств за основу принимают данные, полученные химическим анализом. Это связано с тем, что метод рентгено-флюоресцентного анализа предполагает градуировку по образцам, состав которых определяют путем химического анализа. Преимуществом рентгено-флюоресцентного метода является лишь возможность экспресс-анализа большого количества образцов.

А.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 [3]. Измерение удлинения образца в твердом состоянии с ростом температуры осуществлялось кварцевым дилатометром с фотоэлектрическим датчиком регистрации смещения. Отличительной особенностью данной установки является то, что наряду с измерением ТКЛР образца измеряют также его электросопротивление четырехзондовым методом на постоянном токе [1]. Для измерения температуры использованы хромель-алюмелевые термопары (таблицы перевода приведены в [4]). Поправки на использованные термопары определялись путем их градуировки по температурам плавления чистых металлов: алюминия, кадмия, свинца и индия.

Образец *1* (см. рисунок А.1), имеющий плоскопараллельные торцы, устанавливают между основанием *2* кварцевой трубы *3* и скругленной поверхностью толкателя *4*. Толкатель центрируется в кварцевой трубе двумя

кольцами — кварцевым *5* и фторопластовым *6*. У основания этой трубы вырезано прямоугольное окно для установки образца. Ячейка герметизирована трубой *7*. Трубы *3* и *7* крепят к основанию *8* через инваровую муфту *9* и водоохлаждаемую муфту *10* соответственно. Медный блок *11* с торцевыми нагревателями *12* служит для выравнивания температуры вдоль образца. Нагреватели *12* запитаны от источника *13* и обеспечены системой перераспределения мощности. В качестве индикатора перемещения использован фотоэлектрический датчик *14* от усилителя типа Ф117. Фотодатчик снабжен коромыслом *15*, на оси которого закреплено зеркальце. Датчик перемещения крепят к основанию *8* через микрометрическое устройство *16*, обеспечивающее установку необходимого уровня выходного сигнала. Линейное перемещение толкателя инваровой иглой передается коромыслу и преобразуется в угловое перемещение. Поворот зеркальца на оси коромысла приводит к перераспределению света на фоторезисторах *18*. Фоторезисторы вместе с источником питания *19* образуют электрический мост, выходное напряжение которого регистрируется цифровым вольтметром *20* или самописцем.

Температура образца измерена хромель-алюмелевыми термопарами *21*. Одноименные провода термопар использованы в качестве потенциальных зондов. К концам образца крепят токовые электроды *22*. Провода термопар и токовых электродов изолированы и выведены наружу через толкатель. Вторые концы термопар поддерживаются при температуре *T* в сосуде Дьюара. Сигналы с термопар, потенциальных зондов и эталонного сопротивления R_0, соединенного последовательно с образцом, подаются на пакетный переключатель $П_1$, а с него — на потенциометр *23*. Переключатель $П_2$ коммутирует ток через образец, а $П_3$ изменяет полярность сигнала, подаваемого на потенциометр. Питание цепи «образец — эталонное сопротивление» осуществлено от стабилизированного источника постоянного тока *24*.

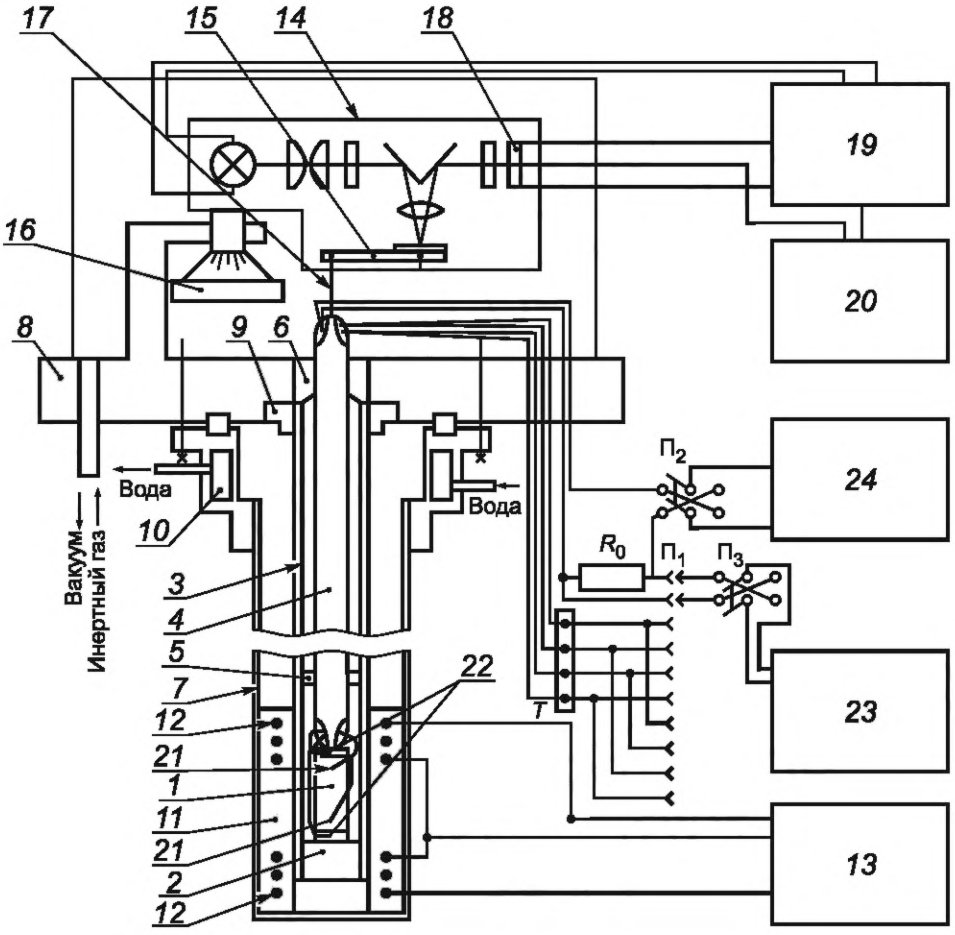

Рисунок А.1 — Электрическая схема установки комплексного исследования электросопротивления и теплового расширения металлов

Установка позволяет определять ТКЛР и ρ в интервале температур от 300 К до 1000 К в вакууме или среде инертного газа. Напряжение на выходе датчика *14* калибруется с помощью микрометрического устройства *16* с ценой деления $2 \cdot 10^{-6}$ м. Коэффициент преобразования фотодатчика составляет 10 В/мм. Максимальное значение перемещения 0,5 мм, измеряемое датчиком, определено участком, на котором зависимость выходного напряжения от перемещения линейна. Предельная погрешность измерения перемещения, определяемая стабильно реги-

стрируемым значением напряжения ($5 \cdot 10^{-4}$ В) на выходе датчика, составляет ~ $5 \cdot 10^{-8}$ м. Когда максимальное значение перемещения превышает 0,5 мм, фотодатчик заменяют датчиком перемещения часового типа с ценой деления 1 мкм и максимальным ходом 1,1 мм. Собственный ход установки оценивают 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. Предельная погрешность оценки ТКЛР [1] зависит в основном от величины измеряемого удлинения образца ΔL, значение которого при ТКЛР порядка $10 \cdot 10^{-6}$ 1/К, длине L образца $5 \cdot 10^{-2}$ м и интервалах температур ΔT = 20 К может быть определено с погрешностью ~ 5 %. С повышением значения ТКЛР и интервала температур эта погрешность снижается до 1 % и менее. Нижний предел погрешности ограничен случайной погрешностью, характерной при высокотемпературных измерениях.

Расчет погрешностей проводят по ГОСТ Р 54500.3. Систематическая погрешность, связанная с градуировкой фотоэлектрической системы регистрации [зависимость $U = f(L)$] на линейном участке длиной в 500 мкм прибором с ценой деления 2 мкм, составляет ≤ 0,5 %. Погрешность из-за введения поправки на расширение кварцевой трубки длиной, равной длине образца $\Delta L_i + \Delta L_{i\ \text{кварца}}$, значительно менее инструментальной погрешности определения ΔL_i. Поскольку погрешность значения $\Delta\alpha_{i\ \text{кварца}}$ [5] оценивают на уровне 10 %, а доля этой поправки при оценках ТКЛР образца порядка 10^{-6} 1/К составляет ~ 10 %, то погрешность $\Delta\alpha_{\text{кварца}}/\alpha$ при введении этой поправки не превышает 1 %. Рекомендуемые численные значения $\Delta L_{i\ \text{кварца}}$ введены непосредственно в программу для выполнения расчетов.

Таким образом, погрешность определения α на установке не превышает от 1 % до 5 % при температуре от 273 К до 1000 К соответственно для материалов с низким тепловым расширением. Минимальный ТКЛР при измерениях металлов составлял $20 \cdot 10^{-6}$ 1/К. В этом случае погрешность измерений снижалась 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 деформация, 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), можно пренебречь.

Тепловое расширение в некотором интервале температур характеризуется средним ТКЛР $\bar{\alpha}$, а при данной температуре T — истинным α. Значения $\bar{\alpha}$ вычисляют по формуле

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta L}{L\Delta T} = \frac{L_2 - L_1}{(T_2 - T_1)L_1}, \qquad \textbf{(A.1)}$$

где ΔL — измерение длины тела при изменении температуры на ΔT, которое обычно соответствует интервалу от 273,15 К до T К или от 293,15 К до T К. Значения $\bar{\alpha}$ 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 использовать дифференциальное значение α, вычисляемое по формуле

$$\alpha = \delta L/\delta T, \qquad \text{(A.2)}$$

где $L = (L_0 \pm \Delta L)$ — длина образца при некоторой температуре T;

L_0 — исходная длина образца;

$\delta L/\delta T$ — производная функции $L = f(T)$ при той же температуре T.

Необходимая точность измерения α и $\bar{\alpha}$ достигается всесторонним учетом систематических погрешностей, появляющихся вследствие отклонений условий эксперимента от идеальных при вычислениях по формулам (А.1) и (А.2). Например, неоднородность образца может приводить к систематической погрешности, поэтому при исследованиях латуней необходимо предварительно оценить однородность образца измерением его плотности при комнатной температуре после неоднократных переплавок или измерением плотности различных образцов из слитка одной плавки. Однородность определялась также измерениями удельного электросопротивления на различных участках образца. Систематическая погрешность, возникающая из-за неоднородности температурного поля в образце, исключалась установлением нулевого градиента вдоль образца. Погрешность определения производной $\delta L/\delta T$ складывается из погрешности определения изменения длины образца с температурой и значения температуры отнесения T.

А.3 Объекты исследования

Компонентами полученных сплавов служили Zn чистотой 99,99 и Cu чистотой 99,999. В кварцевую ампулу *1* (см. рисунок А.2), дно которой представляло собой воронку с тонким капилляром на конце, сначала помещалась навеска Zn, а затем навеска Cu *2* соответствующего образца сплава. Ампула закрывалась пробкой *3* из активированного угля такой длины, чтобы заполнялось оставшееся пустое пространство. Нагревателем *4* вдоль ампулы снизу вверх создавался градиент температуры более чем 100 К, в результате чего Cu нагревалась более чем Zn. Это обеспечивало хорошую растворимость Cu в расплаве Zn без окисления последнего. После встряхивания ампу-

лы с расплавом Cu с Zn при температуре на ~ 50 К более температуры кристаллизации дно ампулы прокалывалось острием стержня из нержавеющей стали. Расплав при этом заливался в следующую ампулу *5*, предварительно прогретую нагревателем *6* до температуры кристаллизации этого сплава. Образец в ампуле *5* затем медленно охлаждался в теплоизолированном блоке *7*. Из этого образца на токарном станке вытачивалось изделие в форме (см. рисунок А.2), удобной для исследований. В изделии просверливались отверстия для токовводов и штифтов из нержавеющей стали для крепления термопар.

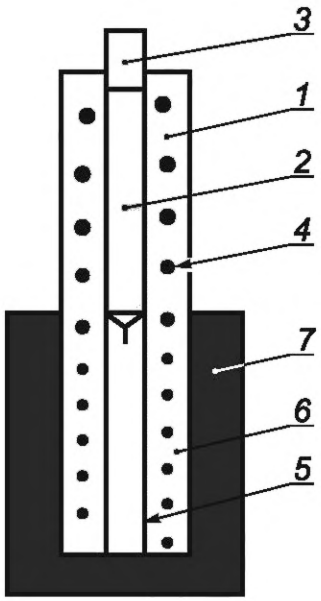

Рисунок А.2 — Устройство для изготовления образца

Головки термопар приваривались к штифтам искровой сваркой. Хороший контакт образца с токовводами обеспечивался путем вчеканивания медных проводов в отверстия для токовводов. Некоторые образцы латуней, содержащих γ-фазу, и образцы, богатые цинком, изготавливались литьем в гипсовую форму, в которой предусматривались перемычки, обеспечивающие наличие в изделии отверстий для токовводов и штифтов для приварки термопар (см. рисунок А.3).

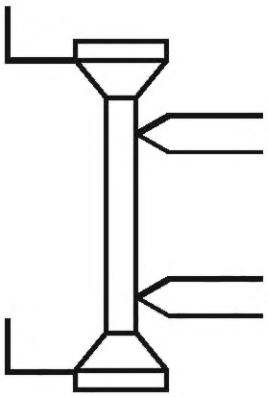

Рисунок А.3 — Образец для исследований электросопротивления и теплового расширения

Медь растворялась в жидком цинке уже при температурах, незначительно превышающих температуру плавления цинка — 693 К. Получение образцов осуществлялось в два этапа:

1) сплавы выдерживались в жидком состоянии в течение 5—10 мин при непрерывном встряхивании ампулы, а затем охлаждались до затвердевания;

2) полученные заготовки сплавов переворачивались и переплавлялись повторно для повышения однородности. Оптимальные длина и диаметр образца согласно оценкам, учитывающим особенности эксперимента, находились в пределах $1{,}4 \cdot 10^{-2} < l_p < 9{,}5 \cdot 10^{-2}$ м и $d = (0{,}44—0{,}84)\ 10^{-2}$ м соответственно. Отбор пробы (стружку) для химического анализа осуществлялся по длине и глубине рабочего участка каждой заготовки при изготовлении

образца формы на токарном станке (см. рисунок А.3). Химический анализ проводился стандартным химическим методом на электрофотоколориметре (КФК-2). Рентгено-флюоресцентный анализ тех же образцов проводился по трем точкам на поверхности рабочего участка после измерений свойств. Погрешность анализа ограничивалась точностью весов (точность — ±1 мг) и не превышала 1 %.

А.4 Экспериментальные данные

Для обеспечения надежного электрического контакта термопар с образцом при высоких температурах в нем просверливались отверстия, куда зачеканивались штифты из нержавеющей стали, к которым приваривались головки хромель-алюмелевых термопар. Рабочая длина образца — это расстояние между головками термопар, диаметры которых не превышали 0,3 мм. Результаты экспериментальных измерений ТКЛР и ρ образцов согласно [2] приведены в таблицах А.2—А.11.

Таблица А.2 — Результаты $\bar{\alpha}$, α и ρ для α-латуни (7 % Zn + 93 % Cu)

T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
306,0	16,31	16,41	0,03956
316,3	16,35	16,49	0,04025
326,3	16,39	16,57	0,04109
336,3	16,43	16,64	0,04172
346,3	16,47	16,72	0,04259
356,2	16,51	16,79	0,04322
368,5	16,55	16,89	0,04422
375,2	16,58	16,94	0,0446
384,3	16,62	17,00	0,04541
396,6	16,66	17,10	0,04627
405,0	16,70	17,16	0,04703
415,0	16,74	17,23	0,04768
425,7	16,78	17,31	0,04862
436,3	16,82	17,39	0,04926
446,2	16,86	17,47	0,05026
456,6	16,90	17,55	0,05089
466,4	16,94	17,62	0,05172
475,5	16,97	17,69	0,05234
486,3	17,01	17,77	0,05334
497,6	17,06	17,85	0,05411
505,2	17,09	17,91	0,05486
516,8	17,13	18,00	0,05551
525,4	17,17	18,06	0,0565
536,8	17,21	18,15	0,05718
545,8	17,25	18,21	0,05802
556,0	17,29	18,29	0,05867

Окончание таблицы А.2

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
566,0	17,33	18,36	0,05956
573,5	17,36	18,42	0,06032
586,3	17,41	18,51	0,06116
595,3	17,44	18,58	0,06181
606,2	17,48	18,66	0,06271
616,8	17,52	18,74	0,0636
626,2	17,56	18,81	0,06444
636,0	17,60	18,88	0,06536
646,2	17,64	18,96	0,06609
655,7	17,68	19,03	0,06691
666,2	17,72	19,11	0,06782
676,0	17,76	19,18	0,06856
683,9	17,79	19,24	0,06931
695,8	17,83	19,32	0,07026
706,8	17,88	19,41	0,07134
717,0	17,92	19,48	0,07229
725,3	17,95	19,54	0,07304
736,0	17,99	19,62	0,0738
748,3	18,04	19,71	0,07501
757,0	18,07	19,78	0,07557
765,9	18,11	19,84	0,07658
776,5	18,15	19,92	0,0773
785,7	18,19	19,99	0,07825
796,0	18,23	20,06	0,07906
807,8	18,27	20,15	0,08006
817,2	18,31	20,22	0,08084
826,5	18,35	20,29	0,0816
837,6	18,39	20,37	0,08255
846,3	18,42	20,43	0,08327
857,7	18,47	20,51	0,08439
865,8	18,50	20,57	0,08501
876,0	18,54	20,65	0,08608
886,2	18,58	20,72	0,08675
895,6	18,62	20,79	0,08792

Таблица А.3 — Результаты $\bar{\alpha}$, α и ρ для α-латуни (19,6 % Zn + 80,4 % Cu)

T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
306,2	16,72	16,90	0,0567
316,8	16,77	17,00	0,05774
326,3	16,82	17,09	0,05842
336,4	16,87	17,19	0,05946
346,3	16,92	17,28	0,0601
355,9	16,97	17,37	0,06121
365,9	17,02	17,46	0,06182
377,2	17,07	17,57	0,06307
385,9	17,12	17,65	0,06361
397,7	17,18	17,76	0,06497
406,5	17,22	17,84	0,06537
415,8	17,27	17,92	0,06655
426,3	17,32	18,02	0,06715
437,1	17,37	18,12	0,06845
445,4	17,41	18,20	0,06889
457,6	17,47	18,31	0,07031
466,7	17,52	18,40	0,07084
477,0	17,57	18,49	0,07195
485,8	17,61	18,57	0,07253
496,5	17,67	18,67	0,07371
507,0	17,72	18,77	0,07444
516,0	17,76	18,85	0,07551
525,9	17,81	18,94	0,0762
536,6	17,87	19,04	0,0775
545,4	17,91	19,12	0,07804
556,5	17,97	19,23	0,07942
565,7	18,01	19,31	0,08007
576,9	18,07	19,41	0,08147
586,4	18,12	19,50	0,0821
597,6	18,17	19,60	0,08345
606,0	18,21	19,68	0,08406

Окончание таблицы А.3

T, К	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
616,1	18,26	19,77	0,08532
625,8	18,31	19,86	0,08597
637,7	18,37	19,97	0,08744
646,8	18,42	20,06	0,08809
657,3	18,47	20,15	0,08943
667,2	18,52	20,24	0,09025
676,3	18,56	20,33	0,09131
684,2	18,60	20,40	0,09187
696,9	18,67	20,51	0,09343
705,9	18,71	20,60	0,09408
716,7	18,77	20,70	0,09538
725,9	18,81	20,78	0,09616
736,8	18,87	20,88	0,09743
745,9	18,91	20,96	0,09809
756,7	18,97	21,06	0,0995
765,7	19,01	21,14	0,10014
776,7	19,07	21,24	0,1016
785,9	19,11	21,32	0,10232
797,3	19,17	21,43	0,10376
806,8	19,22	21,51	0,10443
818,6	19,28	21,62	0,10605
826,4	19,31	21,69	0,10662
836,3	19,36	21,78	0,10795
846,4	19,41	21,87	0,10873
855,7	19,46	21,96	0,11002
866,2	19,51	22,05	0,111
877,1	19,57	22,15	0,11258
886,2	19,61	22,23	0,11312
896,3	19,66	22,32	0,11446
906,9	19,72	22,42	0,11527
917,5	19,77	22,51	0,11689
926,2	19,81	22,59	0,11756

Таблица А.4 — Результаты $\bar{\alpha}$, α и ρ для α-латуни (30,5 % Zn + 69,5 % Cu)

T, К	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
334,4	14,70	17,54	0,06621
342,9	14,89	17,62	0,06709
352,4	15,10	17,72	0,06787
362,4	15,32	17,82	0,06875
372,2	15,52	17,91	0,06965
381,8	15,71	18,01	0,07066
391,8	15,90	18,11	0,07161
400,9	16,07	18,20	0,07232
410,3	16,23	18,29	0,07349
419,4	16,39	18,38	0,07428
429,8	16,56	18,49	0,07523
439,8	16,72	18,59	0,07626
450,0	16,88	18,69	0,07733
459,9	17,02	18,79	0,07831
469,9	17,16	18,88	0,07914
479,7	17,29	18,98	0,08018
490,0	17,42	19,08	0,08122
499,8	17,54	19,18	0,08223
509,8	17,66	19,28	0,08324
519,7	17,77	19,38	0,08416
529,3	17,87	19,47	0,08527
539,4	17,97	19,57	0,08632
549,2	18,07	19,67	0,0874
558,7	18,16	19,76	0,08831
569,0	18,25	19,86	0,08947
578,5	18,33	19,96	0,09036
588,3	18,41	20,05	0,0914
597,8	18,49	20,14	0,09253
606,3	18,55	20,23	0,09324
616,7	18,63	20,33	0,09445
626,3	18,69	20,42	0,0956
636,7	18,76	20,53	0,09641
646,0	18,82	20,62	0,09782
655,3	18,88	20,71	0,0986
664,7	18,94	20,80	0,09924

Окончание таблицы А.4

T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
674,4	18,99	20,90	0,10063
684,0	19,04	20,99	0,10244
693,4	19,10	21,08	0,10287
703,5	19,15	21,18	0,10356
712,4	19,19	21,27	0,10498
722,3	19,24	21,36	0,10588
732,2	19,29	21,46	0,10679
743,5	19,34	21,57	0,10859
750,5	19,38	21,64	0,1091
761,3	19,43	21,74	0,11061
769,3	19,46	21,82	0,11126
778,8	19,51	21,91	0,11201
787,9	19,55	22,00	0,11336
797,4	19,59	22,09	0,11469
806,3	19,64	22,18	0,11545
818,7	19,69	22,30	0,11692
828,4	19,74	22,40	0,11821
836,4	19,78	22,47	0,11902
844,4	19,82	22,55	0,11945
852,5	19,86	22,63	0,12089
858,4	19,89	22,69	0,1214
863,3	19,92	22,73	0,12194
872,7	19,97	22,82	0,12272
881,8	20,02	22,91	0,12419

Таблица А.5 — Результаты $\bar{\alpha}$, α и ρ для β-латуни (46,1 % Zn + 53,9 % Cu)

T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
312,7	17,85	17,68	0,04608
322,7	17,95	17,87	0,04469
332,4	18,05	18,06	0,04747
342,2	18,14	18,25	0,0475
352,7	18,23	18,45	0,04853
361,4	18,31	18,62	0,04977
371,2	18,39	18,81	0,04967
381,2	18,47	19,00	0,05269

Продолжение таблицы А.5

T, К	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
390,7	18,55	19,18	0,05308
400,2	18,62	19,37	0,05524
419,2	18,77	19,73	0,0585
428,9	18,84	19,92	0,05944
437,7	18,91	20,09	0,06033
449,2	18,99	20,31	0,06186
459,2	19,07	20,50	0,06322
468,9	19,15	20,69	0,06411
479,2	19,23	20,88	0,06446
488,9	19,31	21,07	0,06693
498,9	19,39	21,26	0,06846
528,7	19,66	21,83	0,07331
538,4	19,75	22,02	0,07351
548,4	19,85	22,21	0,07568
557,7	19,95	22,39	0,0769
596,9	20,42	23,47	0,08295
606,7	20,55	23,72	0,08423
616,7	20,70	24,04	0,08592
625,9	20,84	24,41	0,08779
645,2	21,15	25,49	0,09149
654,4	21,31	26,19	0,0938
663,7	21,48	27,02	0,09536
673,4	21,67	28,06	0,09721
682,7	21,85	29,21	0,09937
687,7	21,96	29,90	0,10006
692,4	22,06	30,61	0,10161
697,2	22,17	31,38	0,10276
701,7	22,27	32,15	0,10406
711,2	22,49	33,94	0,10654
715,9	22,60	34,92	0,10888
720,9	22,73	36,02	0,11072
725,7	22,85	37,12	0,11155
730,2	22,97	38,23	0,11314
734,9	23,09	30,53	0,11437

Окончание таблицы А.5

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
739,9	23,23	28,54	0,11577
744,4	23,35	27,11	0,11639
758,4	23,39	25,00	0,11948
767,9	23,41	25,16	0,12079
772,7	23,42	25,24	0,12133
777,4	23,43	25,31	0,11968
786,7	23,45	25,46	0,12329
791,2	23,46	25,54	0,12694
810,2	23,53	25,85	0,12749
819,4	23,57	26,00	0,13241
828,7	23,61	26,15	0,12966
838,4	23,66	26,31	0,13209
847,7	23,72	26,46	0,13386
857,2	23,78	26,61	0,13537
866,7	23,84	26,77	0,13605
875,9	23,91	26,92	0,13978
885,2	23,99	27,06	0,14146
894,7	24,07	27,22	0,14196
903,9	24,16	27,37	0,1435
913,2	24,25	27,51	0,14528
922,2	24,34	27,66	0,14581
931,4	24,45	27,81	0,1484

Таблица А.6 — Результаты $\overline{\alpha}$, α и ρ для γ-латуни (65,1 % Zn + 34,9 % Cu)

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
313,3	16,95	18,20	0,08412
324,0	17,30	18,67	0,0859
333,5	17,60	19,08	0,0877
343,4	17,90	19,49	0,0899
353,4	18,18	19,89	0,09066
363,3	18,46	20,27	0,09297
373,2	18,72	20,63	0,09473
383,5	18,97	20,99	0,09792
393,0	19,20	21,31	0,09877

Окончание таблицы А.6

T, К	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
402,8	19,43	21,62	0,10007
413,5	19,66	21,94	0,10213
424,2	19,88	22,24	0,10383
433,3	20,06	22,48	0,10729
443,3	20,25	22,73	0,10951
454,0	20,44	22,98	0,11195
463,0	20,59	23,18	0,11392
473,2	20,76	23,38	0,11685
483,7	20,92	23,58	0,11944
493,2	21,06	23,74	0,12208
502,9	21,19	23,89	0,12465
513,8	21,34	24,03	0,1276
523,0	21,45	24,15	0,12924
534,3	21,59	24,26	0,13244
543,5	21,69	24,34	0,13453
553,5	21,80	24,41	0,13645
562,9	21,89	24,46	0,13899
573,4	22,00	24,51	0,14144
593,7	22,18	24,63	0,14786
604,5	22,28	24,84	0,14922
613,3	22,35	25,00	0,15109
623,6	22,43	25,18	0,15489
633,3	22,51	25,33	0,15597
643,3	22,58	25,47	0,15813
653,4	22,65	25,61	0,1614
662,0	22,72	25,71	0,16343
673,2	22,80	25,83	0,16591
683,9	22,87	25,92	0,16808
693,3	22,94	26,00	0,17046
702,2	23,00	26,05	0,17263
713,3	23,08	26,11	0,17607
723,8	23,15	26,15	0,17771
733,8	23,22	26,17	0,18027
744,2	23,30	26,18	0,18274

Таблица А.7 — Результаты $\bar{\alpha}$, α и ρ для ε-латуни (82,6 % Zn + 17,4 % Cu)

T, К	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
309,2	22,06	22,88	0,17749
319,3	22,29	23,17	0,17991
329,0	22,49	23,45	0,1827
339,0	22,70	23,72	0,18549
348,9	22,90	23,99	0,18857
359,3	23,10	24,26	0,19156
369,0	23,28	24,51	0,19449
378,0	23,44	24,73	0,1971
389,1	23,64	24,99	0,2006
399,3	23,81	25,22	0,20356
410,1	23,99	25,46	0,20664
419,0	24,13	25,65	0,20968
429,0	24,28	25,86	0,21283
439,7	24,43	26,07	0,21624
450,1	24,57	26,27	0,2198
460,9	24,72	26,47	0,22316
469,3	24,82	26,61	0,22655
479,3	24,94	26,78	0,22989
489,0	25,05	26,94	0,23384
499,0	25,16	27,09	0,23747
509,6	25,26	27,24	0,24155
520,4	25,37	27,39	0,24549
530,3	25,45	27,52	0,24936
539,6	25,53	27,63	0,25253
549,3	25,60	27,74	0,2562
559,3	25,67	27,85	0,26
569,4	25,74	27,95	0,26397
578,7	25,79	28,04	0,26695
589,7	25,85	28,13	0,27136
599,5	25,89	28,20	0,27489

Таблица А.8 — Результаты $\bar{\alpha}$, α и ρ для $\alpha + \beta$ смеси (~ 41,8 % Zn + 58,2 % Cu)

T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
313,5	16,27	15,48	0,06491
324,0	16,42	16,00	0,06619
333,1	16,56	16,43	0,0665
340,5	16,66	16,77	0,06766
352,8	16,84	17,30	0,06867
362,1	16,97	17,67	0,06988
371,9	17,11	18,05	0,07086
381,3	17,24	18,39	0,07234
391,3	17,37	18,72	0,07365
402,0	17,51	19,05	0,07475
410,9	17,63	19,30	0,07584
421,2	17,76	19,57	0,07691
430,6	17,88	19,79	0,07795
440,3	18,01	20,00	0,07909
450,3	18,13	20,19	0,08008
460,1	18,25	20,35	0,08143
469,8	18,36	20,49	0,08241
480,3	18,49	20,62	0,08378
490,2	18,60	20,71	0,08503
500,0	18,71	20,78	0,08615
510,2	18,82	20,82	0,08723
520,2	18,93	20,84	0,0891
549,5	19,24	20,90	0,09231
559,3	19,34	20,89	0,0938
569,0	19,44	20,93	0,09464
578,7	19,53	21,02	0,09624
588,4	19,62	21,16	0,09751
597,5	19,71	21,33	0,09846
607,7	19,80	21,58	0,10012
617,3	19,89	21,86	0,10094
627,0	19,97	22,19	0,10252
636,5	20,05	22,56	0,10407
645,8	20,13	22,97	0,10522
655,5	20,21	23,45	0,1065
665,3	20,29	23,98	0,10772

Окончание таблицы А.8

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
674,5	20,36	24,52	0,10907
684,0	20,43	25,14	0,11072
688,8	20,47	25,46	0,11145
693,8	20,50	25,81	0,11251
698,0	20,53	26,11	0,11266
702,7	20,57	26,46	0,11357
708,3	20,61	26,90	0,11432
741,1	20,83	22,81	0,11993
745,5	20,85	22,83	0,12106
751,5	20,89	22,85	0,12166
755,8	20,92	22,87	0,12224
760,8	20,95	22,89	0,12251
765,5	20,97	22,91	0,12368
773,3	21,02	22,94	0,12531
778,3	21,05	22,96	0,12591
783,1	21,07	22,98	0,12609
792,2	21,12	23,02	0,12751
801,7	21,17	23,06	0,12886
811,3	21,22	23,10	0,13014
820,7	21,26	23,14	0,13159
830,3	21,31	23,18	0,13324
839,5	21,35	23,22	0,13483
849,0	21,39	23,26	0,13649
857,7	21,42	23,30	0,13785
867,5	21,46	23,34	0,13923
877,2	21,50	23,38	0,14109
886,0	21,53	23,42	0,14263

Таблица А.9 — Результаты $\overline{\alpha}$, α и ρ для смеси $\beta + \gamma$ (~ 53,0 % Zn + 47,0 % Cu)

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
338,3	18,73	18,36	0,08348
348,0	18,84	18,74	0,08546
357,5	18,96	19,09	0,08699
367,2	19,08	19,43	0,08951
376,9	19,20	19,76	0,09136
386,2	19,31	20,06	0,09388

Продолжение таблицы А.9

T, К	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
396,2	19,43	20,37	0,09592
405,7	19,55	20,65	0,09804
415,3	19,67	20,92	0,1005
425,3	19,79	21,18	0,10255
435,0	19,91	21,42	0,10473
445,2	20,03	21,65	0,10753
455,2	20,15	21,86	0,10996
465,4	20,28	22,07	0,11248
475,2	20,40	22,24	0,115
484,8	20,52	22,40	0,11788
495,4	20,65	22,56	0,12045
500,3	20,71	22,62	0,12189
505,3	20,77	22,69	0,12306
509,9	20,82	22,74	0,12441
515,2	20,89	22,80	0,12583
520,2	20,95	22,85	0,12732
524,9	21,01	22,90	0,12882
529,9	21,07	22,94	0,13015
549,8	21,28	23,54	0,13582
554,4	21,33	23,96	0,13728
559,5	21,39	24,41	0,13913
564,2	21,45	24,82	0,14065
569,3	21,53	25,26	0,14222
578,6	21,68	26,05	0,1457
588,3	21,85	26,86	0,14872
598,2	22,05	27,66	0,1534
607,8	22,25	28,41	0,15628
618,0	22,49	29,18	0,16134
627,2	22,71	29,86	0,16591
636,5	22,95	30,53	0,17003
646,2	23,20	31,20	0,17531
655,8	23,46	31,85	0,18074
665,0	23,71	32,45	0,18605
674,8	23,99	33,06	0,19104
684,2	24,25	33,64	0,19724
693,5	24,51	34,18	0,20358

Окончание таблицы А.9

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
703,1	24,77	34,73	0,20955
712,5	25,03	35,24	0,2152
717,6	25,16	35,51	0,21763
722,7	25,30	35,77	0,22148
726,8	25,41	35,98	0,22502
731,7	25,53	36,22	0,22731
736,2	25,64	36,44	0,23061
741,0	25,76	36,67	0,23352
745,8	25,88	36,89	0,23626
771,7	26,13	26,30	0,24629
776,2	26,14	26,33	0,24697
780,9	26,15	26,36	0,24844
787,9	26,16	26,41	0,24949
797,4	26,18	26,48	0,25155
806,7	26,20	26,54	0,25317
816,0	26,22	26,61	0,25537
826,2	26,24	26,68	0,25764
833,1	26,25	26,72	0,25875
839,3	26,27	26,77	0,25952
848,9	26,29	26,83	0,26195

Таблица А.10 — Результаты $\overline{\alpha}$, α и ρ для смеси $\gamma + \varepsilon$ (~ 73,3 % Zn + 26,7 % Cu)

T, K	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
344,8	23,15	23,65	0,08309
354,7	23,33	23,94	0,08443
363,7	23,50	24,18	0,08614
373,8	23,67	24,43	0,08828
382,2	23,80	24,61	0,08927
392,5	23,96	24,83	0,09164
402,7	24,10	25,02	0,09445
411,3	24,22	25,17	0,09526
420,9	24,34	25,32	0,09685
430,5	24,46	25,46	0,09855
441,9	24,59	25,60	0,10175
452,0	24,69	25,72	0,10187

Окончание таблицы А.10

T, К	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
461,7	24,79	25,82	0,10518
481,7	24,97	25,99	0,10814
491,6	25,05	26,07	0,11066
501,8	25,13	26,14	0,11251
512,2	25,21	26,21	0,11511
522,0	25,27	26,26	0,11604
531,7	25,33	26,32	0,11888
541,5	25,39	26,37	0,12013
551,3	25,45	26,42	0,12263
561,1	25,50	26,47	0,12364
571,1	25,55	26,52	0,12626
590,7	25,65	26,64	0,13038
600,2	25,69	26,70	0,13184
609,1	25,73	26,76	0,13367
618,6	25,77	26,83	0,13626
629,1	25,82	26,92	0,138
638,5	25,86	27,00	0,13992
648,0	25,90	27,10	0,14134
657,5	25,94	27,21	0,14315
668,2	25,99	27,34	0,14744
677,0	26,03	27,46	0,14803
686,0	26,07	27,60	0,15017
695,8	26,12	27,76	0,15194
705,0	26,17	27,93	0,15454
715,3	26,23	28,13	0,15575
723,6	26,27	28,31	0,15787
733,5	26,33	28,54	0,16099

Таблица А.11 — Результаты $\overline{\alpha}$, α и ρ для смеси $\varepsilon + \eta$ (~ 87,8 % Zn + 12,2 % Cu)

T, К	$\overline{\alpha} \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6$, $К^{-1}$	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
324,7	23,36	23,57	0,07572
334,9	23,59	23,87	0,07762
344,3	23,79	24,15	0,07977
354,0	23,99	24,43	0,0812
363,2	24,16	24,70	0,08467

Окончание таблицы А.11

T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, K^{-1}	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
373,5	24,35	25,00	0,0858
383,5	24,52	25,29	0,08835
392,8	24,67	25,57	0,09002
402,4	24,82	25,85	0,09234
414,1	24,99	26,19	0,09469
422,7	25,11	26,44	0,09632
431,3	25,23	26,69	0,0983
441,4	25,36	26,99	0,10203
451,8	25,50	27,29	0,10268
462,5	25,63	27,60	0,10582
471,5	25,74	27,86	0,10758
481,4	25,86	28,15	0,11021
490,7	25,97	28,42	0,11295
499,7	26,07	28,68	0,11521
509,7	26,19	28,97	0,11803
522,0	26,34	29,33	0,12124
532,0	26,47	29,61	0,12334
541,5	26,58	29,89	0,12564
551,2	26,71	30,17	0,12895
560,9	26,84	30,45	0,13037
570,3	26,97	30,72	0,1338
580,0	27,12	31,00	0,13648
590,5	27,28	31,30	0,13938
598,7	27,41	31,53	0,14136
608,5	27,57	31,82	0,14556
619,1	27,76	32,12	0,14711

В таблицах А.2—А.11 приведены данные, полученные после усреднения значений, полученных по трем сериям измерений «нагрев — охлаждение» для каждого образца (см. раздел 2).

А.5 Метод обработки экспериментальных данных

Достоверность данных подтверждена совпадением результатов многократных измерений для каждого из сплавов. Предельная погрешность измерения $\Delta L/L$ определяется чувствительностью индикатора (ценой одного деления); погрешность $\Delta T/T$ — погрешностью определения напряжения на концах термопары потенциометром $\Delta U/U$ и погрешностью термопары $\Delta\varepsilon/\varepsilon$. Последняя, в свою очередь, зависит от чувствительности термопары и погрешности градуировки. При использовании стандартных проводов для термопар и таблиц градуированных данных можно ограничиться расчетом погрешности $\Delta U/U$. Путем многократного определения микрометром длины образца L_0 систематическая погрешность ее оценки может быть переведена в случайную. Известно, что измеряемая величина L_0 лежит в интервале значений $L_0 + \Delta x$ и $L_0 - \Delta x$, причем L_0 распределена около среднего значения L по нормальному закону, где Δx — цена деления нониуса. Предельная погрешность $\Delta x = 2\sigma x$. Основным источником случайной погрешности при измерениях теплового расширения является погрешность $\sigma\Delta L/\Delta L$, которая будет определена воспроизводимостью данных измерений ΔL при одной и той же температуре. Ее не следует путать с $\Delta L/L$,

т. к. она определена не только предельной погрешностью прибора, но и погрешностью, обусловленной неидеальностью подгонки деталей ячейки и контакта этих деталей с образцом.

Предельную случайную погрешность при определении α вычисляют по формуле

$$\frac{\delta_\alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta L}}{\Delta L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{L_0}\right)^2} \ . \qquad (A.3)$$

Предельную систематическую погрешность вычисляют по формуле

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} + \frac{2\sigma_{ост}}{L} \ . \qquad \textbf{(A.4)}$$

Верхнюю границу суммарной погрешности Σ_α вычисляют путем сложения систематической и случайной погрешностей

$$\Sigma_\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\delta_\alpha}{\alpha} \ . \qquad (A.5)$$

Оценка погрешности ТКЛР по формуле (А.5) в области температур от ~ 300 К до 1000 К приводит к значениям не более 7 % (при длине образца не менее 10 см) и менее 5 % соответственно. При значениях ТКЛР ниже $5 \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$ погрешность будет выше.

Чувствительность к изменению электросопротивления ограничена в основном неточностью определения падения напряжения на образце. Потенциометр обеспечивает достаточно высокую точность измерений, однако значения напряжений, измеренных хромелевыми и алюмелевыми проводами термопар, как правило, расходятся в четвертом знаке и носят случайный характер, вследствие чего эти результаты усредняются. Таким образом, чув-ствительность будет определена величиной несовпадения напряжений, измеряемых хромелевыми и алюмелевы-ми проводами, которая составляет примерно 10^{-6} В. В твердом состоянии минимально измеряемое напряжение —10^{-3} В. Чувствительность вычисляют по формуле

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx \frac{\Delta U}{1{,}4U} \ , \qquad (A.6)$$

которая составляет $5 \cdot 10^{-4}$. Коэффициент 1,4 в формуле (А.6) введен ввиду усреднения измеряемых напряжений.

Значения электросопротивления ρ вычисляют по формуле

$$\rho = (1 + \bar{\alpha}\Delta T) \cdot \frac{SU_x R_0}{U_0 l_p} \ , \qquad \textbf{(A.7)}$$

где $\bar{\alpha}$ — коэффициент теплового расширения образца в интервале температур $\Delta T = T - T_o$;

$\Delta T = T - T_o$ — интервал температур;

S — площадь сечения рабочего участка образца;

U_x — падение напряжения на образце;

U_0 — падение напряжения на эталонном сопротивлении R_0;

R_0 — эталонное сопротивление;

l_p — длина рабочего участка образца (расстояние между потенциальными зондами).

При потенциометрических измерениях с коммутацией тока контактными явлениями и сопротивлением измерительных проводов можно пренебречь. Измерение распределения температур вдоль образца тремя термопарами и введение соответствующих поправок позволяют существенно снизить систематическую погрешность из-за температурной неоднородности образца. Метод исключения систематической погрешности, которая может быть обусловлена неоднородностью образца, описан выше. Предельная систематическая погрешность будет складываться из погрешностей эталонного сопротивления R_0 и погрешностей измерения напряжений U_x и U_0 потенциометром. Погрешностью определения $\bar{\alpha}$ при расчете можно пренебречь, т. к. в формуле (А.7) выражение в скобках является поправкой, тогда

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx \frac{\Delta R}{R} + 2\frac{\Delta U}{U} \ , \qquad (A.8)$$

где величина $\Delta R/R$ соответствует значению класса точности, указанному на самом образцовом сопротивлении R_0;

ΔU — рассчитывается по формуле, приведенной в описании потенциометра;

U — измеряемое напряжение.

Систематическая погрешность, возникающая при определении геометрии образца, может быть переведена в случайную путем многократного определения как сечения ($S = \pi r^2$), так и длины рабочего участка образца l. Еще одним источником случайной ошибки является невоспроизводимость данных измерения U_x и U_0 при одном и том же значении температуры, которая может быть оценена путем многократных измерений или по дисперсии данных на экспериментальной зависимости электросопротивления ρ от температуры T.

Предельную случайную погрешность при измерениях вычисляют по формуле

$$\frac{d\rho}{\rho} = 2\sqrt{2\left(\frac{\sigma_{\overline{U}}}{U}\right)^2 + 2\left(\frac{\sigma_{\overline{x}}}{x}\right)^2 + 2\left(\frac{\sigma_{\overline{x}}}{U}\right)^2}\ . \qquad (A.9)$$

Предельная суммарная погрешность измерения электросопротивления не превышает 0,5—1 %. Систематическая погрешность по сравнению со случайной пренебрежимо мала. Случайная погрешность устанавливается погрешностью определения длины рабочего участка образца, которая в варианте, приведенном на рисунке А.3, снижается до 0,1 % при толщине зондов 0,05 мм, систематические и случайные погрешности рассчитывались в соответствии с [7].

Ход установки (для введения поправки в значения ТКЛР) определялся по кварцевому стержню и образцу из меди. Контрольные измерения на Cu марки М0, Zn марки Ч и нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т показали, что отклонения результатов измерения не превышают величины рассчитанных погрешностей [1].

А.6 Оценка достоверности данных

Оценка достоверности полученных данных о ТКЛР медно-цинковых сплавов 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 проведено только для β-латуни близкого состава согласно [8] (см. рисунок А.12).

При низких температурах значения совпадают, а в неупорядоченной фазе, например при 900 К, различаются на ~ 4 %. Такой процент расхождений выше температуры фазового перехода β-латуни может быть связан с неидентичностью количественного состава образцов (в [8] содержание Zn — 48 %, а в настоящем стандарте — 46,1 %).

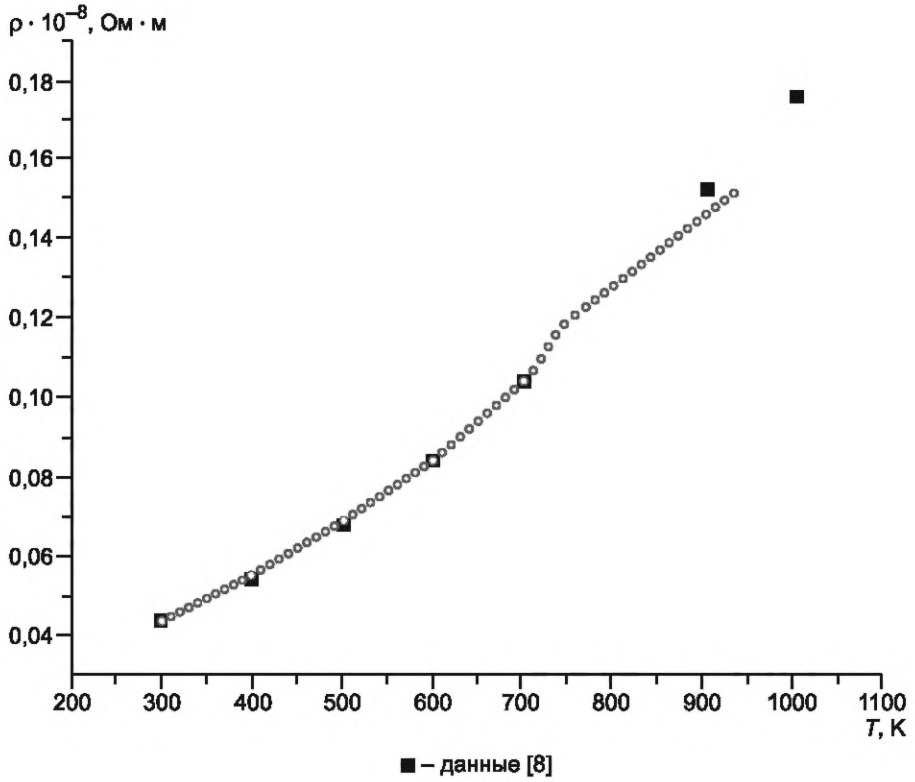

Рисунок А.4 — Сравнение данных об электросопротивлении β-латуни настоящего стандарта с данными [8] в диапазоне температур от 300 К до 1000 К

Библиография

[1] ГСССД МЭ 208—2013. Методика одновременных исследований электросопротивления и теплового расширения твердых тел // Палчаев Д.К., Мурлиева Ж.Х., Исхаков М.Э.

[2] Мурлиева Ж.Х., Палчаев Д.К., Фараджева М.П., Черных Д.Г. Температурная зависимость электросопротивления сплавов, обусловленная динамическим и статическим беспорядками // Теплофизика высоких температур. 2012, т. 50, № 4, с. 1—10

[3] Абдулагатов И.М., Мурлеева Ж.Х., Палчаев Д.К., Казбеков К.К., Маангалов М.М. Тепловое расширение и кинетические коэффициенты кристаллов // Журнал физики и химии твердого тела (Thermal Expansion and Kinetic Coefficients of Crystals // J. Phys. and Chem. Solids), 2007. 1713—1720 с.

[4] Чистяков В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.

[5] Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974. 291 с.; Чистяков В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.

[6] Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высшая школа. 1982. 224 с.

[7] Сергеев О.А. Метрологические основы теплофизических измерений. М.: Стандарты, 1972. 156 с.

[8] Шматко О.А., Усов Ю.В. Электрические и магнитные свойства металлов и сплавов // Справочник. Киев: Наукова думка, 1987. 582 с.

УДК 669./539/5-536.6:006.354 ОКС 17.020

Ключевые слова: стандартные справочные данные, вещества, материалы, свойства, неопределенность

Редактор *Л.С. Зимилова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *А.Н. Золотаревой*

Сдано в набор 13.03.2019. Подписано в печать 29.04.2019. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 5,12. Уч.-изд. л. 4,83.
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандартов

Создано в единичном исполнении ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» для комплектования Федерального информационного фонда стандартов, 117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
www.gostinfo.ru info@gostinfo.ru

IDS R 8.940-2017