

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА
СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ
(ГСССД)

УДК 669. /539.5 – 536.6/

ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

МЕДНО-ЦИНКОВЫЕ СПЛАВЫ. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ
ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ И УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ
СОПРОТИВЛЕНИЕ В ДИАПАЗОНЕ ОТ 300 до $2/3$ ТЕМПЕРАТУРЫ
ПЛАВЛЕНИЯ, К

ГСССД 324 - 2017

(ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ, тема [RU.3.009-2018](#))

РАЗРАБОТАНЫ ФГУП «ВНИИМС» с участием специалистов ФГБОУ ВО Дагестанского государственного университета (д.ф.-м.н. Д.К. Палчаев, д.ф.-м.н. Ж.Х. Мурлиева, к.ф.-м.н. М.Э. Исхаков)

РЕКОМЕНДОВАНЫ к утверждению Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно - исследовательский институт метрологической службы» (ФГУП «ВНИИМС»)

ОДОБРЕНЫ экспертной комиссией в составе:

к.т.н. Петухова В.А. ,д.ф.- м.н. Ивлиева А.Д., к.ф.- м.н. Покрасина М.А., к.т.н. Попова П.В.

ПОДГОТОВЛЕНЫ к утверждению Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно - исследовательский институт метрологической службы» (ФГУП «ВНИИМС»)

УТВЕРЖДЕНЫ Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии **«31» октября 2017 г. (протокол № 98 - пр)**

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА
СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ**

Таблицы стандартных справочных данных

Медно-цинковые сплавы. Температурный коэффициент линейного расширения и удельное электрическое сопротивление в диапазоне от 300 до $2/3$ температуры плавления, К.	ГСССД 324 - 2017
---	---------------------

Tables of Standard Reference Data

Copper-zinc alloys. Temperature coefficient of linear expansion and electrical resistivity temperature range from 300 to $2/3$ T_{Melting} , K	GSSSD 324 - 2017
---	---------------------

ДЕПОНИРОВАННАЯ РУКОПИСЬ

УДК 669. /539.5 – 536.6/

Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 324 - 2017. Медно-цинковые сплавы. Температурный коэффициент линейного расширения и удельное электрическое сопротивление в диапазоне от 300 до 2/3 температуры плавления, К / Д.К. Палчаев, Ж.Х. Мурлиева, М.Э. Исхаков ; Всеросс. науч.–исслед. институт метрологической службы. 2017. - 41 с. : Ил. - Библиогр. 8 назв. - Рус. - 7 назв. Деп. в ФГУП «ВНИИМС» 31.10.2017 г., № 903 - 2017 кк.

В таблицах представлены стандартные справочные данные о температурном коэффициенте линейного расширения медно-цинковых сплавов в диапазоне от 300 до 2/3 температуры плавления, К, полученные на кварцевом dilatометре, реализующем абсолютное измерение ТКЛР, и данные об удельном электрическом сопротивлении, определяемые четырехзондовым методом на постоянном токе. Стандартные справочные данные о ТКЛР и электросопротивлении медно-цинковых сплавов могут быть использованы при синтезе новых материалов, в том числе и наноразмерных.

Авторы :  Д.К. Палчаев
 Ж.Х. Мурлиева
 М.Э. Исхаков

Содержание

1. Основная часть	6
Приложение А (<i>справочное</i>)	15
2. Экспериментальная аппаратура и методика измерений	16
3. Объекты исследования	21
4. Экспериментальные данные	23
5. Метод обработки экспериментальных данных	36
6. Оценка достоверности данных	40
7. Список литературы	41

1. Основная часть

В таблицах представлены стандартные справочные данные о температурном коэффициенте линейного расширения (ТКЛР) медно-цинковых сплавов, в диапазоне от 300 до 2/3 температуры плавления, К, полученные на кварцевом dilatометре [1], реализующем измерение ТКЛР, и данные об удельном электрическом сопротивлении, определяемые четырехзондовым методом на постоянном токе (см. Приложение А). Настоящие таблицы стандартных справочных данных (ССД) распространяются на ТКЛР и удельное электрическое сопротивление медно-цинковых сплавов различных концентраций в диапазоне температуры от 300 до 1000 К.

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:

$$\Delta L_{(T-T_0)} / L_{T_0} = (L_T - L_{T_0}) / L_{T_0}, \quad (1)$$

где: T_0 – начальная температура (20°C), при которой определялись размеры образца.

L_{T_0} – размер образца при температуре T_0 ;

L_T – размер образца при температуре T ;

$\Delta L_{(T-T_0)}$ – удлинение в интервале температуры $(T - T_0)$;

T – конечная температура интервала.

Средний ТКЛР в интервале температуры $T - T_0$ (интегральный) определяется как:

$$\bar{\alpha}_{T-T_0} = (1 / L_{T_0}) \times \Delta L_{(T-T_0)} / (T - T_0) \quad (2)$$

Полученные значения $\bar{\alpha}_{T-T_0}$ относились к температуре T .

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

$$\alpha_i = (\partial L / \partial T) \times 1 / L_i \quad (3)$$

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

Значения электросопротивления рассчитывались по формуле

$$\rho = \frac{S}{\lambda_p} \frac{U_x R_0}{U_0} (1 + \bar{\alpha} \Delta T) \quad (4)$$

где S и λ_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, $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплового расширения образца в интервале температур $\Delta T = T - T_0$, здесь T_0 – температура, при которой определялись размеры образца.

Стандартные справочные данные 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 300–1000К, для которого нет надежных аттестованных данных.

В таблицах 1-10 приведены стандартные справочные значений среднего $\bar{\alpha}_{T-T_0}$ и истинного ТКЛР, а так же удельного электросопротивления образцов соответствующих составов. Соотношения меди и цинка в сплавах представлены в весовых процентах. При составлении окончательных таблиц приведены термодинамические значения температуры (Т,К). Температура, при которой определялся начальный размер образцов, составляла 20°C. Начальная температура при измерениях температурных зависимостей была разная – как правило, примерно 30°C градусов. Температурные зависимости ΔL после исследований экстраполировались к значению при 20°C. Для каждого состава проводились три серии измерений «нагрев – охлаждение», итог получали

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:

1я серия измерений

$$(T_{i \text{ наг}} + T_{i \text{ охл}})/2 = T_{i \text{ сред1}}, \quad (L_{i \text{ наг}} + L_{i \text{ охл}})/2 = L_{i \text{ сред1}}, \quad (\rho_{i \text{ наг}} + \rho_{i \text{ охл}})/2 = \rho_{i \text{ сред1}}$$

Пример :

$T_{\text{наг}}$	$T_{\text{охл}}$	$L_{\text{наг}}$	$L_{\text{охл}}$	$R_{\text{наг}}$	$R_{\text{охл}}$	$T_{\text{ср}}$	$L_{\text{ср}}$	$R_{\text{ср}}$
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

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

2я серия измерений

$$(T_{i \text{ наг}} + T_{i \text{ охл}})/2 = T_{i \text{ сред2}}, \quad (L_{i \text{ наг}} + L_{i \text{ охл}})/2 = L_{i \text{ сред2}}, \quad (\rho_{i \text{ наг}} + \rho_{i \text{ охл}})/2 = \rho_{i \text{ сред2}}$$

3я серия измерений

$$(T_{i \text{ наг}} + T_{i \text{ охл}})/2 = T_{i \text{ сред3}}, \quad (L_{i \text{ наг}} + L_{i \text{ охл}})/2 = L_{i \text{ сред3}}, \quad (\rho_{i \text{ наг}} + \rho_{i \text{ охл}})/2 = \rho_{i \text{ сред3}}$$

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

$$(T_{i \text{ сред1}} + T_{i \text{ сред2}} + T_{i \text{ сред3}})/3 = T_{i \text{ сред}} \quad \text{температура для данного образца усреднённая по 3м сериям}$$

$$(L_{i \text{ сред1}} + L_{i \text{ сред2}} + L_{i \text{ сред3}})/3 = L_{i \text{ сред}} \quad \text{длина для данного образца усреднённая по 3м сериям}$$

$$(\rho_{i \text{ сред1}} + \rho_{i \text{ сред2}} + \rho_{i \text{ сред3}})/3 = \rho_{i \text{ сред}} \quad \text{электросопротивление для данного образца усреднённая по 3м сериям}$$

В таблицах Приложения А2 –А11 приведены экспериментальные данные (T , L , ρ) в результате таких усреднений. Для получения ССД данных ТКЛР ($\bar{\alpha}$ и α), приведенных в таблицах 1-10 находился аппроксимирующий полином

$L=f(T)$, результат его дифференцирования представлялся также полиномом. Для каждого значения температуры T_i , к которой относились значения $\bar{\alpha}_{T_i-T_0}$ и α_i определялись значения L_i , $(L_{T_i} - L_{T_0})$ и $(\partial L/\partial T)_i$ для расчетов по формулам (2) и (3) соответственно.

Таблица 1				Таблица 2			
α -латунь (7% Zn + 93% Cu)				α -латунь (19,6% Zn + 80,4% Cu)			
T, K	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$	T, K	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$
300	16,29	16,38	0,0389	300	16,69	16,86	0,0566
310	16,33	16,46	0,0397	310	16,74	16,95	0,0575
320	16,36	16,53	0,0404	320	16,79	17,05	0,0584
330	16,40	16,60	0,0412	330	16,84	17,14	0,0593
340	16,44	16,68	0,0419	340	16,89	17,23	0,0601
350	16,48	16,75	0,0427	350	16,94	17,32	0,0610
360	16,52	16,83	0,0435	360	16,99	17,41	0,0619
370	16,56	16,90	0,0442	370	17,04	17,51	0,0628
380	16,60	16,98	0,0449	380	17,09	17,60	0,0637
390	16,64	17,05	0,0457	390	17,14	17,69	0,0646
400	16,68	17,12	0,0465	400	17,19	17,78	0,0655
410	16,72	17,20	0,0473	410	17,24	17,87	0,0664
420	16,76	17,27	0,0481	420	17,29	17,96	0,0673
430	16,79	17,35	0,0489	430	17,34	18,06	0,0682
440	16,83	17,42	0,0496	440	17,39	18,15	0,0691
450	16,87	17,50	0,0504	450	17,44	18,24	0,0701
460	16,91	17,57	0,0512	460	17,49	18,33	0,0710
470	16,95	17,64	0,0520	470	17,54	18,42	0,0719
480	16,99	17,72	0,0528	480	17,59	18,51	0,0729
490	17,03	17,79	0,0536	490	17,64	18,61	0,0738
500	17,07	17,87	0,0544	500	17,69	18,70	0,0748
510	17,11	17,94	0,0553	510	17,74	18,79	0,0757
520	17,15	18,01	0,0561	520	17,79	18,88	0,0767
530	17,19	18,09	0,0569	530	17,83	18,97	0,0777
540	17,22	18,16	0,0577	540	17,88	19,07	0,0786
550	17,26	18,24	0,0585	550	17,93	19,16	0,0796
560	17,30	18,31	0,0593	560	17,98	19,25	0,0806
570	17,34	18,39	0,0602	570	18,03	19,34	0,0816
580	17,38	18,46	0,0610	580	18,08	19,43	0,0826
590	17,42	18,53	0,0618	590	18,13	19,52	0,0836
600	17,46	18,61	0,0627	600	18,18	19,62	0,0846
610	17,50	18,68	0,0635	610	18,23	19,71	0,0856
620	17,54	18,76	0,0644	620	18,28	19,80	0,0866
630	17,58	18,83	0,0652	630	18,33	19,89	0,0876
640	17,62	18,90	0,0661	640	18,38	19,98	0,0886
650	17,65	18,98	0,0669	650	18,43	20,08	0,0896
660	17,69	19,05	0,0678	660	18,48	20,17	0,0907
670	17,73	19,13	0,0686	670	18,53	20,26	0,0917
680	17,77	19,20	0,0695	680	18,58	20,35	0,0927
690	17,81	19,28	0,0704	690	18,63	20,44	0,0938
700	17,85	19,35	0,0712	700	18,68	20,53	0,0948
710	17,89	19,42	0,0721	710	18,73	20,63	0,0959
720	17,93	19,50	0,0729	720	18,78	20,72	0,0969
730	17,97	19,57	0,0739	730	18,83	20,81	0,0980
740	18,01	19,65	0,0748	740	18,88	20,90	0,0991
750	18,05	19,72	0,0756	750	18,93	20,99	0,1002
760	18,08	19,80	0,0765	760	18,98	21,09	0,1013
770	18,12	19,87	0,0774	770	19,03	21,18	0,1023
780	18,16	19,94	0,0783	780	19,08	21,27	0,1034
790	18,20	20,02	0,0792	790	19,13	21,36	0,1045
800	18,24	20,09	0,0801	800	19,18	21,45	0,1056
810	18,28	20,17	0,0810	810	19,23	21,54	0,1067
820	18,32	20,24	0,0819	820	19,28	21,64	0,1079
830	18,36	20,31	0,0829	830	19,33	21,73	0,1090
840	18,40	20,39	0,0838	840	19,38	21,82	0,1101
850	18,44	20,46	0,0847	850	19,43	21,91	0,1112
860	18,48	20,54	0,0856	860	19,48	22,00	0,1123
870	18,51	20,61	0,0865	870	19,53	22,10	0,1135
880	18,55	20,69	0,0875	880	19,58	22,19	0,1146
890	18,59	20,76	0,0885	890	19,63	22,28	0,1158
900	18,63	20,83	0,0893	900	19,68	22,37	0,1169
910	18,67	20,91	0,0903	910	19,73	22,46	0,1181
920	18,71	20,98	0,0912	920	19,78	22,55	0,1192
				930	19,83	22,65	0,1204

Таблица 3				Таблица 4			
α -латунь (30,5% Zn + 69,5 % Cu)				β -латунь (46,1% Zn + 53,9 % Cu)			
T, K	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$	T, K	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$
300	13,84	17,21	0,0632	300	17,71	17,44	0,0433
310	14,10	17,31	0,0641	310	17,82	17,63	0,0444
320	14,35	17,41	0,0651	320	17,92	17,82	0,0456
330	14,59	17,51	0,0660	330	18,02	18,01	0,0467
340	14,83	17,61	0,0670	340	18,12	18,21	0,0479
350	15,05	17,71	0,0680	350	18,21	18,40	0,0491
360	15,27	17,80	0,0689	360	18,30	18,59	0,0503
370	15,47	17,90	0,0699	370	18,38	18,78	0,0516
380	15,67	18,00	0,0709	380	18,46	18,98	0,0528
390	15,87	18,10	0,0719	390	18,54	19,17	0,0541
400	16,05	18,20	0,0729	400	18,62	19,36	0,0554
410	16,23	18,29	0,0739	410	18,70	19,55	0,0567
420	16,40	18,39	0,0749	420	18,77	19,74	0,0580
430	16,57	18,49	0,0759	430	18,85	19,94	0,0594
440	16,72	18,59	0,0769	440	18,93	20,13	0,0607
450	16,87	18,69	0,0779	450	19,00	20,32	0,0621
460	17,02	18,79	0,0789	460	19,08	20,51	0,0635
470	17,16	18,88	0,0799	470	19,15	20,71	0,0649
480	17,29	18,98	0,0810	480	19,23	20,90	0,0663
490	17,42	19,08	0,0820	490	19,32	21,09	0,0677
500	17,54	19,18	0,0831	500	19,40	21,28	0,0692
510	17,66	19,28	0,0841	510	19,49	21,48	0,0706
520	17,77	19,37	0,0852	520	19,58	21,67	0,0721
530	17,88	19,47	0,0862	530	19,67	21,86	0,0736
540	17,98	19,57	0,0873	540	19,77	22,17	0,0752
550	18,08	19,67	0,0884	550	19,87	22,36	0,0767
560	18,17	19,77	0,0894	560	19,98	22,52	0,0783
570	18,26	19,87	0,0905	570	20,09	22,66	0,0798
580	18,35	19,96	0,0916	580	20,21	22,80	0,0814
590	18,43	20,06	0,0926	590	20,33	22,97	0,0830
600	18,50	20,16	0,0938	600	20,46	23,17	0,0847
610	18,58	20,26	0,0949	610	20,60	23,43	0,0863
620	18,65	20,36	0,0959	620	20,75	23,77	0,0879
630	18,72	20,45	0,0970	630	20,90	24,20	0,0896
640	18,78	20,55	0,0982	640	21,06	24,74	0,0913
650	18,85	20,65	0,0993	650	21,23	25,41	0,0931
660	18,91	20,75	0,1004	660	21,41	26,23	0,0948
670	18,97	20,85	0,1015	670	21,60	27,21	0,0968
680	19,02	20,95	0,1026	680	21,80	28,38	0,0992
690	19,08	21,04	0,1038	690	22,01	29,76	0,1016
700	19,13	21,14	0,1049	700	22,23	31,35	0,1043
710	19,18	21,24	0,1060	710	22,46	33,19	0,1073
720	19,23	21,34	0,1072	720	22,71	39,08	0,1106
730	19,28	21,44	0,1084	730	22,96	33,06	0,1144
740	19,33	21,54	0,1095	740	23,23	28,70	0,1177
750	19,37	21,63	0,1107	750	23,38	24,87	0,1195
760	19,42	21,73	0,1118	760	23,39	25,03	0,1213
770	19,47	21,83	0,1130	770	23,41	25,19	0,1231
780	19,51	21,93	0,1142	780	23,43	25,35	0,1249
790	19,56	22,03	0,1154	790	23,46	25,52	0,1267
800	19,61	22,12	0,1166	800	23,49	25,68	0,1285
810	19,65	22,22	0,1177	810	23,53	25,84	0,1303
820	19,70	22,32	0,1189	820	23,57	26,00	0,1320
830	19,75	22,42	0,1201	830	23,62	26,16	0,1338
840	19,80	22,52	0,1214	840	23,67	26,33	0,1356
850	19,85	22,62	0,1226	850	23,73	26,49	0,1373
860	19,90	22,71	0,1238	860	23,79	26,65	0,1391
870	19,95	22,81	0,1250	870	23,87	26,81	0,1408
880	20,01	22,91	0,1262	880	23,94	26,98	0,1426
890	20,06	23,01	0,1275	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
				930	24,43	27,79	0,1512

Таблица 5				Таблица 6			
γ-латунь (65,1% Zn + 34,9% Cu)				ε-латунь (82,6% Zn + 17,4% Cu)			
T, К	$\bar{\alpha} \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$	T, К	$\bar{\alpha} \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$
300	16,50	17,58	0,0828	300	22,18	22,60	0,1765
310	16,84	18,05	0,0841	310	22,41	22,90	0,1791
320	17,17	18,50	0,0855	320	22,64	23,19	0,1817
330	17,49	18,93	0,0869	330	22,85	23,47	0,1844
340	17,80	19,35	0,0886	340	23,06	23,75	0,1873
350	18,09	19,76	0,0903	350	23,25	24,02	0,1901
360	18,37	20,14	0,0921	360	23,43	24,28	0,1931
370	18,63	20,51	0,0939	370	23,60	24,53	0,1961
380	18,89	20,87	0,0959	380	23,77	24,77	0,1992
390	19,13	21,21	0,0979	390	23,92	25,01	0,2024
400	19,36	21,53	0,0999	400	24,07	25,24	0,2056
410	19,58	21,83	0,1021	410	24,20	25,46	0,2088
420	19,80	22,12	0,1043	420	24,33	25,67	0,2122
430	20,00	22,39	0,1066	430	24,45	25,88	0,2156
440	20,19	22,65	0,1089	440	24,57	26,08	0,2190
450	20,37	22,89	0,1113	450	24,67	26,27	0,2225
460	20,54	23,11	0,1136	460	24,77	26,45	0,2261
470	20,71	23,32	0,1161	470	24,87	26,63	0,2297
480	20,86	23,51	0,1185	480	24,96	26,79	0,2333
490	21,01	23,69	0,1210	490	25,04	26,95	0,2370
500	21,15	23,84	0,1235	500	25,12	27,10	0,2407
510	21,29	23,98	0,1260	510	25,19	27,25	0,2445
520	21,42	24,11	0,1285	520	25,26	27,39	0,2483
530	21,54	24,22	0,1310	530	25,32	27,51	0,2521
540	21,65	24,31	0,1336	540	25,38	27,64	0,2560
550	21,76	24,39	0,1361	550	25,44	27,75	0,2599
560	21,87	24,45	0,1386	560	25,50	27,86	0,2638
570	21,97	24,49	0,1411	570	25,55	27,95	0,2678
580	22,06	--	--	580	25,60	28,04	0,2717
590	22,15	24,55	0,1458	590	25,64	28,13	0,2757
600	22,24	24,75	0,1482	600	25,69	28,20	0,2797
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				
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 7				Таблица 8			
$\alpha+\beta$ (~ 41,8% Zn + 58,2% Cu)				$\beta+\gamma$ (~53,0% Zn + 47,0% Cu)			
T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6, K^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$	T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6, K^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$
300	16,06	14,76	0,0635	300	18,26	16,73	0,0759
310	16,21	15,30	0,0645	310	18,38	17,18	0,0778
320	16,36	15,80	0,0655	320	18,50	17,61	0,0797
330	16,51	16,29	0,0666	330	18,62	18,03	0,0817
340	16,66	16,75	0,0677	340	18,75	18,43	0,0837
350	16,80	17,18	0,0687	350	18,87	18,81	0,0858
360	16,94	17,59	0,0698	360	18,99	19,18	0,0879
370	17,08	17,98	0,0709	370	19,11	19,53	0,0900
380	17,22	18,34	0,0721	380	19,24	19,87	0,0922
390	17,35	18,68	0,0732	390	19,36	20,18	0,0944
400	17,49	18,99	0,0744	400	19,48	20,49	0,0967
410	17,62	19,28	0,0755	410	19,60	20,77	0,0990
420	17,75	19,54	0,0767	420	19,72	21,04	0,1014
430	17,88	19,78	0,0779	430	19,85	21,30	0,1038
440	18,00	20,00	0,0790	440	19,97	21,53	0,1062
450	18,12	20,19	0,0802	450	20,09	21,76	0,1087
460	18,25	20,36	0,0814	460	20,21	21,96	0,1112
470	18,37	20,50	0,0826	470	20,34	22,15	0,1138
480	18,48	20,62	0,0839	480	20,46	22,32	0,1164
490	18,60	20,71	0,0851	490	20,58	22,48	0,1191
500	18,71	20,78	0,0863	500	20,70	22,62	0,1218
510	18,82	20,82	0,0875	510	20,82	22,74	0,1245
520	18,93	20,84	0,0887	520	20,95	22,85	0,1273
530	19,04	--	--	530	21,07	22,94	0,1301
540	19,14	--	--	540	--	--	--
550	19,25	20,90	0,0924	550	21,28	23,56	0,1357
560	19,35	20,90	0,0937	560	21,40	24,46	0,1389
570	19,45	20,94	0,0950	570	21,54	25,33	0,1424
580	19,54	21,04	0,0963	580	21,70	26,17	0,1460
590	19,64	21,19	0,0976	590	21,88	27,00	0,1499
600	19,73	21,39	0,0989	600	22,08	27,80	0,1540
610	19,82	21,64	0,1003	610	22,30	28,58	0,1583
620	19,91	21,95	0,1016	620	22,54	29,33	0,1628
630	20,00	22,31	0,1029	630	22,78	30,06	0,1676
640	20,08	22,72	0,1043	640	23,04	30,77	0,1725
650	20,17	23,18	0,1057	650	23,30	31,46	0,1776
660	20,25	23,69	0,1072	660	23,58	32,12	0,1830
670	20,32	24,26	0,1086	670	23,85	32,77	0,1885
680	20,40	24,88	0,1101	680	24,13	33,38	0,1943
690	20,48	25,54	0,1116	690	24,41	33,98	0,2003
700	20,55	26,27	0,1131	700	24,69	34,55	0,2065
710	20,62	27,04	0,1147	710	24,96	35,10	0,2129
720	20,69	--	--	720	25,23	35,63	0,2195
730	20,75	--	--	730	25,49	36,14	0,2264
740	20,82	22,80	0,1200	740	25,74	36,62	0,2334
750	20,88	22,85	0,1214	750	25,98	37,08	0,2407
760	20,94	22,89	0,1228	760	--	--	--
770	21,00	22,93	0,1242	770	26,13	26,28	0,2459
780	21,06	22,97	0,1256	780	26,15	26,35	0,2480
790	21,11	23,02	0,1271	790	26,17	26,42	0,2500
800	21,16	23,06	0,1286	800	26,19	26,49	0,2521
810	21,21	23,10	0,1301	810	26,21	26,56	0,2541
820	21,26	23,14	0,1317	820	26,23	26,63	0,2561
830	21,31	23,18	0,1333	830	26,25	26,70	0,2581
840	21,35	23,23	0,1349	840	26,27	26,77	0,2601
850	21,39	23,27	0,1365	850	26,29	26,84	0,2620
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 9				Таблица 10			
$\gamma+\varepsilon$ (~ 73,3% Zn + 26,7% Cu)				$\varepsilon+\eta$ (~ 87,8% Zn + 12,2% Cu)			
T, K	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$	T, K	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$
300	22,18	22,06	0,0757	300	22,75	22,87	0,0711
310	22,41	22,47	0,0775	310	23,01	23,16	0,0730
320	22,64	22,84	0,0793	320	23,25	23,45	0,0749
330	22,85	23,19	0,0811	330	23,48	23,74	0,0769
340	23,06	23,51	0,0829	340	23,70	24,03	0,0789
350	23,25	23,81	0,0847	350	23,91	24,32	0,0809
360	23,43	24,08	0,0866	360	24,10	24,61	0,0830
370	23,60	24,34	0,0884	370	24,29	24,90	0,0851
380	23,77	24,57	0,0903	380	24,46	25,19	0,0872
390	23,92	24,78	0,0922	390	24,63	25,48	0,0894
400	24,07	24,97	0,0940	400	24,78	25,77	0,0916
410	24,20	25,15	0,0959	410	24,93	26,06	0,0938
420	24,33	25,31	0,0978	420	25,08	26,35	0,0960
430	24,45	25,45	0,0998	430	25,21	26,64	0,0983
440	24,57	25,58	0,1017	440	25,35	26,93	0,1006
450	24,67	25,70	0,1036	450	25,47	27,22	0,1029
460	24,78	25,80	0,1056	460	25,60	27,52	0,1053
470	24,87	25,90	0,1075	470	25,72	27,81	0,1078
480	24,96	25,98	0,1095	480	25,84	28,10	0,1102
490	25,04	26,06	0,1115	490	25,96	28,39	0,1127
500	25,12	26,13	0,1135	500	26,08	28,68	0,1152
510	25,19	26,19	0,1155	510	26,20	28,97	0,1177
520	25,26	26,25	0,1175	520	26,32	29,26	0,1203
530	25,32	26,31	0,1196	530	26,44	29,55	0,1229
540	25,38	26,36	0,1216	540	26,57	29,84	0,1255
550	25,44	26,42	0,1237	550	26,70	30,13	0,1282
560	25,50	26,47	0,1257	560	26,83	30,42	0,1309
570	25,55	26,52	0,1278	570	26,97	30,71	0,1337
580	--	--	--	580	27,11	31,00	0,1364
590	25,65	26,64	0,1320	590	27,27	31,29	0,1392
600	25,69	26,70	0,1341	600	27,43	31,58	0,1421
610	25,74	26,77	0,1362	610	27,60	31,87	0,1449
620	25,78	26,84	0,1384	620	27,78	32,16	0,1479
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				

Приложение А

(справочное)

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

Данные, приведенные в таблицах 1-10, получены по результатам измерений, выполненных в ДГУ на установке, реализующей одновременно метод кварцевого дилатометра (измерение ТКЛР) и удельного сопротивления (4-х зондовый метод) на одних и тех же образце [1].

Для разработки ССД были отобраны результаты исследований образцов

Фаза	Химический состав (навески)		Химический анализ		Рентгено флюорисцентный анализ		Диаметр образца d, mm	Длина образца L, mm	Расстояние между термопарами ℓ_p , mm
	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
$\gamma+\epsilon$	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
$\epsilon+\eta$	90	10	87,8	12,2	87,96	12,02	4,94	45,40	29,70

10 составов [2], изготовленных путем сплавления навесок для обеспечения соответствующих концентраций, количественный состав которых приведен в таблице А1.

Таблица А1- Химический состав и геометрические размеры образцов системы Cu-Zn

Как видно из таблицы А1, результаты этих анализов несколько различаются. При интерпретации исследованных свойств за основу принимались данные, полученные химическим анализом. Это оправдано тем, что метод рентгено-флюорисцентного анализа предполагает градуировку по образцам, состав которых определяется, в конечном итоге, путем химического анализа. Преимуществом рентгено-флюорисцентного метода является лишь возможность экспресс - анализа большого количества образцов.

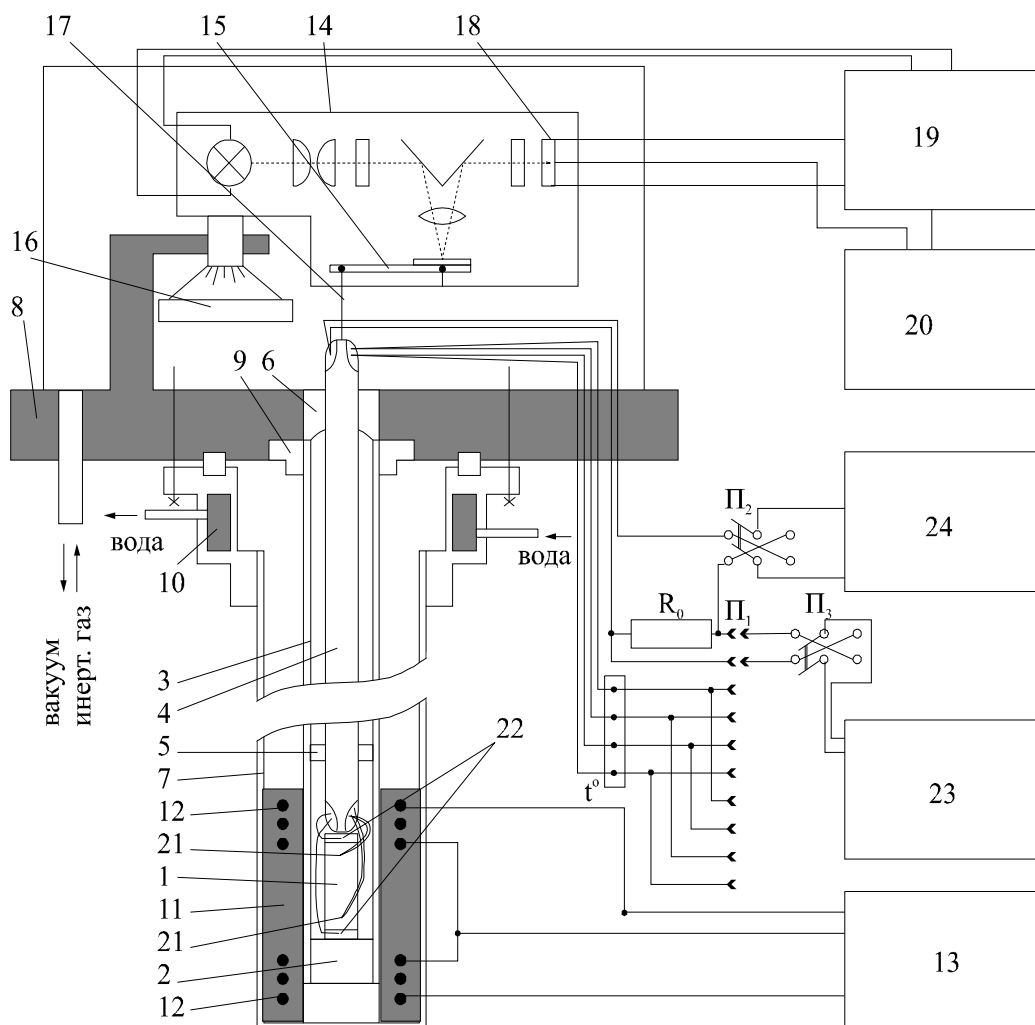
2. Экспериментальная аппаратура и методика измерений

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 в настоящей работе осуществлялось кварцевым dilatометром с фотоэлектрическим датчиком регистрации смещения. Отличительной особенностью нашей установки является то, что наряду с измерением ТКЛР образца, измеряется также его электросопротивление четырехзондовым методом на постоянном токе [1]. Для измерения температуры использовались хромель-алюмелевые термопары (таблицы перевода из [4]). Поправки на использованные термопары определялись путем их градуировки по температурам плавления чистых металлов – алюминия, кадмия, свинца и индия.

Образец 1 (см. рис. А1), имеющий плоскопараллельные торцы, устанавливается 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 герметизируется трубой 7. Трубы 3 и 7 крепятся 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 запитываются от источника 13 и обеспечены системой перераспределения мощности. В качестве индикатора перемещения используется фотоэлектрический датчик 14 от усилителя типа Ф117. Фотодатчик снабжен коромыслом 15, на оси которого закреплено зеркальце. Датчик перемещения крепится 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 измеряется хромель-алюмелевыми термопарами 21. Одноименные провода термопар используются в качестве потенциальных зондов. К концам образца крепятся токовые электроды 22. Провода термопар и токовых электродов изолируются и выводятся 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 П1, а с него на потенциометр 23. Переключатель П2 коммутирует ток через образец, а П3 изменяет полярность сигнала, подаваемого на потенциометр. Питание цепи “образец - эталонное сопротивление” осуществляется от стабилизированного источника постоянного тока 24.



Установка позволяет определять ТКЛР и ρ в интервале температур от 300 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, определяется участком, на котором зависимость выходного напряжения от перемещения линейна. Предельная погрешность измерения перемещения, определяемая стабильно регистрируемым значением напряжения ($5 \cdot 10^{-4}$ В) на выходе датчика, составляет $\sim 5 \cdot 10^{-8}$ м. Когда максимальное значение перемещения превышало 0,5 мм, фотодатчик заменялся датчиком перемещения часового типа с ценой деления 1 мкм и максимальным ходом 1,1 мм. 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. 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 температурных интервалах 20 К может быть определено с погрешностью $\sim 5\%$. С повышением значения ТКЛР и интервала температур эта погрешность снижается до 1% и менее. Нижний предел погрешности ограничивается случайной погрешностью, характерной высокотемпературным измерениям.

Систематическая погрешность, связанная с градуировкой (зависимость $U = f(L)$) фотоэлектрической системы регистрации на линейном участке в 500 мкм прибором с ценой деления 2 мкм составляет $\leq 0,5\%$. Погрешность из-за введения поправки на расширение кварцевой трубки длиной, равной длине образца $\Delta L_i + \Delta L_{i \text{ кварца}}$ значительно меньше инструментальной погрешности определения ΔL_i . Поскольку погрешность значения $\Delta \alpha_{i \text{ кварца}}$ [5] оценивается на уровне 10%, а доля этой поправки, при оценках ТКЛР образца порядка 10^{-6} 1/К, составляет $\sim 10\%$, то погрешность $\Delta \alpha_{\text{кварца}} / \alpha$ при введении этой поправки, в этом случае, не превышает 1%. Рекомендуемые в [5] численные значения $\Delta L_{i \text{ кварца}}$ 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. 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 трубкой 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 [6]), можно было пренебречь.

Тепловое расширение в некотором интервале температур характеризуется средним ТКЛР ($\bar{\alpha}$), а при данной температуре T - истинным (α). Значения $\bar{\alpha}$ рассчитываются по формуле:

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta L}{L \Delta T} = \frac{L_2 - L_1}{(T_2 - T_1)L_1} \quad (A1)$$

где ΔL – измерение длины тела при изменении температуры на ΔT , которое обычно соответствует интервалу $0^\circ\text{C} \div T^\circ\text{C}$ или $20^\circ\text{C} \div T^\circ\text{C}$. 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 пользоваться дифференциальным значением α , рассчитываемым по формуле

$$\alpha = \frac{\partial L}{L \partial T} \quad (A2)$$

где $L=L_0 \pm \Delta L$ – длина образца при некоторой температуре T , здесь L_0 – исходная длина образца, $\partial L/\partial T$ – 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 выводе формул (A1) и (A2). Например, неоднородность образца может привести к систематической погрешности, поэтому при исследованиях латуней 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 определялась так же 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 dL/dT складывается из погрешности определения изменения длины образца с температурой и температуры отнесения T .

3. Объекты исследования

Компонентами полученных сплавов служили Zn чистотой 99,99 и Cu чистотой 99,999. В кварцевую ампулу 1 (см. рис. А2), дно которого представляло собой воронку с тонким капилляром на конце, сначала помещалось навеска цинка а затем навеска меди 2 соответствующего образца сплава. Ампула закрывалась пробкой 3 из активированного угля, такой длины, чтобы заполняла, оставшееся пустое пространство. Нагревателем 4 вдоль ампулы снизу-вверх создавался градиент температуры более чем 100 К, в результате чего медь был нагрет больше чем цинк. Это обеспечивало хорошую растворимость меди в расплаве цинка без окисления последнего. После встряхивания ампулы с расплавом меди с цинком, при температуре на $\sim 50\text{K}$ больше 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 слава. Образец в ампуле 5 затем медленно охлаждался в теплоизолированном блоке 7. Из этого образца на токарном станке вытачивалось изделие в форме (см. рис. А3) удобное для исследований. В этом изделии просверливались отверстия для токовводов и штифтов из нержавеющей стали для крепления термопар. Головки термопар приваривались к штифтам искровой сваркой. Это обеспечивало хороший электрический контакт потенциальных (алюмелевые и хромелевые провода термопар) зондов с образцом. Хороший контакт образца с токовводами обеспечивался путем вчеканивания медных проводов в отверстия для токовводов. Некоторые

образцы латуни, содержащих γ -фазу, и образцы, богатые цинком, изготавливались литьем в гипсовую форму, в которой предусматривались перемычки, обеспечивающие наличие в изделии (см. рис. 3.) отверстий для тоководов и штифтов для приварки термопар.

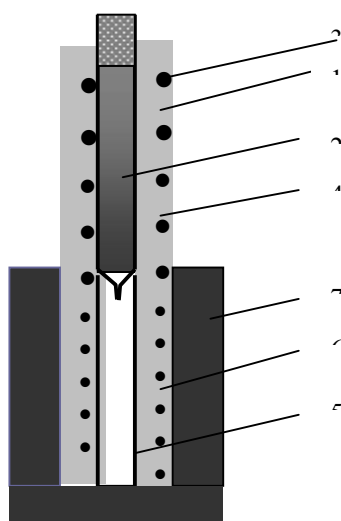


Рис. А2. Устройство для приготовления

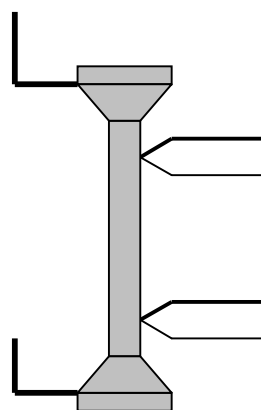


Рис. А3. Образец для (in situ) исследований электросопротивления и теплового расширения

Медь растворялась в жидком цинке уже при температурах незначительно превышающих температуру плавления цинка (693K). Получение образцов осуществлялось в два этапа: 1) сплавы выдерживались в жидком состоянии в течение 5-10 минут 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 $d = (0,44 \div 0,84) \cdot 10^{-2}$ м соответственно. Отбор пробы (стружку) для химического анализа проводился по длине и глубине рабочего участка каждой заготовки при изготовлении образца формы (см. рис. А3) на токарном станке. Химический

анализ проводился стандартным химическим методом на электрофотокориметре (КФК-2). Рентгено-флюорисцентный 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%.

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. За рабочую длину образца принималось расстояние между головками термопар, диаметры которых не превышали 0.3 мм. Результаты экспериментальных измерений ТКЛР и ρ образцов [2] приведены в таблицах А2-А11.

Таблица А2 — Результаты $\alpha_{\text{ср}}$, α и ρ для α -латуни (7% Zn + 93% Cu)				Таблица А3 — Результаты $\alpha_{\text{ср}}$, α и ρ для α -латуни (19,6% Zn + 80,4% Cu)			
T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$	T, K	$\bar{\alpha} \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$
306,0	16,31	16,41	0,03956	306,2	16,72	16,90	0,0567
316,3	16,35	16,49	0,04025	316,8	16,77	17,00	0,05774
326,3	16,39	16,57	0,04109	326,3	16,82	17,09	0,05842
336,3	16,43	16,64	0,04172	336,4	16,87	17,19	0,05946
346,3	16,47	16,72	0,04259	346,3	16,92	17,28	0,0601
356,2	16,51	16,79	0,04322	355,9	16,97	17,37	0,06121
368,5	16,55	16,89	0,04422	365,9	17,02	17,46	0,06182
375,2	16,58	16,94	0,0446	377,2	17,07	17,57	0,06307
384,3	16,62	17,00	0,04541	385,9	17,12	17,65	0,06361
396,6	16,66	17,10	0,04627	397,7	17,18	17,76	0,06497
405,0	16,70	17,16	0,04703	406,5	17,22	17,84	0,06537
415,0	16,74	17,23	0,04768	415,8	17,27	17,92	0,06655
425,7	16,78	17,31	0,04862	426,3	17,32	18,02	0,06715
436,3	16,82	17,39	0,04926	437,1	17,37	18,12	0,06845
446,2	16,86	17,47	0,05026	445,4	17,41	18,20	0,06889
456,6	16,90	17,55	0,05089	457,6	17,47	18,31	0,07031
466,4	16,94	17,62	0,05172	466,7	17,52	18,40	0,07084
475,5	16,97	17,69	0,05234	477,0	17,57	18,49	0,07195
486,3	17,01	17,77	0,05334	485,8	17,61	18,57	0,07253
497,6	17,06	17,85	0,05411	496,5	17,67	18,67	0,07371
505,2	17,09	17,91	0,05486	507,0	17,72	18,77	0,07444
516,8	17,13	18,00	0,05551	516,0	17,76	18,85	0,07551
525,4	17,17	18,06	0,0565	525,9	17,81	18,94	0,0762
536,8	17,21	18,15	0,05718	536,6	17,87	19,04	0,0775
545,8	17,25	18,21	0,05802	545,4	17,91	19,12	0,07804
556,0	17,29	18,29	0,05867	556,5	17,97	19,23	0,07942
566,0	17,33	18,36	0,05956	565,7	18,01	19,31	0,08007
573,5	17,36	18,42	0,06032	576,9	18,07	19,41	0,08147
586,3	17,41	18,51	0,06116	586,4	18,12	19,50	0,0821
595,3	17,44	18,58	0,06181	597,6	18,17	19,60	0,08345
606,2	17,48	18,66	0,06271	606,0	18,21	19,68	0,08406
616,8	17,52	18,74	0,0636	616,1	18,26	19,77	0,08532
626,2	17,56	18,81	0,06444	625,8	18,31	19,86	0,08597
636,0	17,60	18,88	0,06536	637,7	18,37	19,97	0,08744
646,2	17,64	18,96	0,06609	646,8	18,42	20,06	0,08809
655,7	17,68	19,03	0,06691	657,3	18,47	20,15	0,08943
666,2	17,72	19,11	0,06782	667,2	18,52	20,24	0,09025
676,0	17,76	19,18	0,06856	676,3	18,56	20,33	0,09131
683,9	17,79	19,24	0,06931	684,2	18,60	20,40	0,09187
695,8	17,83	19,32	0,07026	696,9	18,67	20,51	0,09343
706,8	17,88	19,41	0,07134	705,9	18,71	20,60	0,09408
717,0	17,92	19,48	0,07229	716,7	18,77	20,70	0,09538
725,3	17,95	19,54	0,07304	725,9	18,81	20,78	0,09616
736,0	17,99	19,62	0,0738	736,8	18,87	20,88	0,09743
748,3	18,04	19,71	0,07501	745,9	18,91	20,96	0,09809
757,0	18,07	19,78	0,07557	756,7	18,97	21,06	0,0995
765,9	18,11	19,84	0,07658	765,7	19,01	21,14	0,10014
776,5	18,15	19,92	0,0773	776,7	19,07	21,24	0,1016
785,7	18,19	19,99	0,07825	785,9	19,11	21,32	0,10232
796,0	18,23	20,06	0,07906	797,3	19,17	21,43	0,10376
807,8	18,27	20,15	0,08006	806,8	19,22	21,51	0,10443
817,2	18,31	20,22	0,08084	818,6	19,28	21,62	0,10605
826,5	18,35	20,29	0,0816	826,4	19,31	21,69	0,10662
837,6	18,39	20,37	0,08255	836,3	19,36	21,78	0,10795
846,3	18,42	20,43	0,08327	846,4	19,41	21,87	0,10873
857,7	18,47	20,51	0,08439	855,7	19,46	21,96	0,11002
865,8	18,50	20,57	0,08501	866,2	19,51	22,05	0,111
876,0	18,54	20,65	0,08608	877,1	19,57	22,15	0,11258
886,2	18,58	20,72	0,08675	886,2	19,61	22,23	0,11312
895,6	18,62	20,79	0,08792	896,3	19,66	22,32	0,11446
906,4	18,66	20,87	0,08862	906,9	19,72	22,42	0,11527
916,1	18,70	20,94	0,08978	917,5	19,77	22,51	0,11689
				926,2	19,81	22,59	0,11756

Таблица А4 — Результаты α_{cp} , α и ρ для α -латуни (30,5% Zn + 69,5% Cu)				Таблица А5 — Результаты α_{cp} , α и ρ для β -латуни (46,1% Zn + 53,9% Cu)			
Т,К	$\bar{\alpha} \cdot 10^6, K^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, Ом \cdot м$	Т,К	$\bar{\alpha} \cdot 10^6, K^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, Ом \cdot м$
334,4	14,70	17,54	0,06621	312,7	17,85	17,68	0,04608
342,9	14,89	17,62	0,06709	322,7	17,95	17,87	0,04469
352,4	15,10	17,72	0,06787	332,4	18,05	18,06	0,04747
362,4	15,32	17,82	0,06875	342,2	18,14	18,25	0,0475
372,2	15,52	17,91	0,06965	352,7	18,23	18,45	0,04853
381,8	15,71	18,01	0,07066	361,4	18,31	18,62	0,04977
391,8	15,90	18,11	0,07161	371,2	18,39	18,81	0,04967
400,9	16,07	18,20	0,07232	381,2	18,47	19,00	0,05269
410,3	16,23	18,29	0,07349	390,7	18,55	19,18	0,05308
419,4	16,39	18,38	0,07428	400,2	18,62	19,37	0,05524
429,8	16,56	18,49	0,07523	419,2	18,77	19,73	0,0585
439,8	16,72	18,59	0,07626	428,9	18,84	19,92	0,05944
450,0	16,88	18,69	0,07733	437,7	18,91	20,09	0,06033
459,9	17,02	18,79	0,07831	449,2	18,99	20,31	0,06186
469,9	17,16	18,88	0,07914	459,2	19,07	20,50	0,06322
479,7	17,29	18,98	0,08018	468,9	19,15	20,69	0,06411
490,0	17,42	19,08	0,08122	479,2	19,23	20,88	0,06446
499,8	17,54	19,18	0,08223	488,9	19,31	21,07	0,06693
509,8	17,66	19,28	0,08324	498,9	19,39	21,26	0,06846
519,7	17,77	19,38	0,08416	528,7	19,66	21,83	0,07331
529,3	17,87	19,47	0,08527	538,4	19,75	22,02	0,07351
539,4	17,97	19,57	0,08632	548,4	19,85	22,21	0,07568
549,2	18,07	19,67	0,0874	557,7	19,95	22,39	0,0769
558,7	18,16	19,76	0,08831	596,9	20,42	23,47	0,08295
569,0	18,25	19,86	0,08947	606,7	20,55	23,72	0,08423
578,5	18,33	19,96	0,09036	616,7	20,70	24,04	0,08592
588,3	18,41	20,05	0,0914	625,9	20,84	24,41	0,08779
597,8	18,49	20,14	0,09253	645,2	21,15	25,49	0,09149
606,3	18,55	20,23	0,09324	654,4	21,31	26,19	0,0938
616,7	18,63	20,33	0,09445	663,7	21,48	27,02	0,09536
626,3	18,69	20,42	0,0956	673,4	21,67	28,06	0,09721
636,7	18,76	20,53	0,09641	682,7	21,85	29,21	0,09937
646,0	18,82	20,62	0,09782	687,7	21,96	29,90	0,10006
655,3	18,88	20,71	0,0986	692,4	22,06	30,61	0,10161
664,7	18,94	20,80	0,09924	697,2	22,17	31,38	0,10276
674,4	18,99	20,90	0,10063	701,7	22,27	32,15	0,10406
684,0	19,04	20,99	0,10244	711,2	22,49	33,94	0,10654
693,4	19,10	21,08	0,10287	715,9	22,60	34,92	0,10888
703,5	19,15	21,18	0,10356	720,9	22,73	36,02	0,11072
712,4	19,19	21,27	0,10498	725,7	22,85	37,12	0,11155
722,3	19,24	21,36	0,10588	730,2	22,97	38,23	0,11314
732,2	19,29	21,46	0,10679	734,9	23,09	30,53	0,11437
743,5	19,34	21,57	0,10859	739,9	23,23	28,54	0,11577
750,5	19,38	21,64	0,1091	744,4	23,35	27,11	0,11639
761,3	19,43	21,74	0,11061	758,4	23,39	25,00	0,11948
769,3	19,46	21,82	0,11126	767,9	23,41	25,16	0,12079
778,8	19,51	21,91	0,11201	772,7	23,42	25,24	0,12133
787,9	19,55	22,00	0,11336	777,4	23,43	25,31	0,11968
797,4	19,59	22,09	0,11469	786,7	23,45	25,46	0,12329
806,3	19,64	22,18	0,11545	791,2	23,46	25,54	0,12694
818,7	19,69	22,30	0,11692	810,2	23,53	25,85	0,12749
828,4	19,74	22,40	0,11821	819,4	23,57	26,00	0,13241
836,4	19,78	22,47	0,11902	828,7	23,61	26,15	0,12966
844,4	19,82	22,55	0,11945	838,4	23,66	26,31	0,13209
852,5	19,86	22,63	0,12089	847,7	23,72	26,46	0,13386
858,4	19,89	22,69	0,1214	857,2	23,78	26,61	0,13537
863,3	19,92	22,73	0,12194	866,7	23,84	26,77	0,13605
872,7	19,97	22,82	0,12272	875,9	23,91	26,92	0,13978
881,8	20,02	22,91	0,12419	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 А6 — Результаты α_{cp} , α и ρ для γ -латуни (65,1% Zn + 34,9% Cu)				Таблица А7 — Результаты α_{cp} , α и ρ для ϵ -латуни (82,6% Zn + 17,4% Cu)			
Т, К	$\bar{\alpha} \cdot 10^6, K^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$	Т, К	$\bar{\alpha} \cdot 10^6, K^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$
313,3	16,95	18,20	0,08412	309,2	22,06	22,88	0,17749
324,0	17,30	18,67	0,0859	319,3	22,29	23,17	0,17991
333,5	17,60	19,08	0,0877	329,0	22,49	23,45	0,1827
343,4	17,90	19,49	0,0899	339,0	22,70	23,72	0,18549
353,4	18,18	19,89	0,09066	348,9	22,90	23,99	0,18857
363,3	18,46	20,27	0,09297	359,3	23,10	24,26	0,19156
373,2	18,72	20,63	0,09473	369,0	23,28	24,51	0,19449
383,5	18,97	20,99	0,09792	378,0	23,44	24,73	0,1971
393,0	19,20	21,31	0,09877	389,1	23,64	24,99	0,2006
402,8	19,43	21,62	0,10007	399,3	23,81	25,22	0,20356
413,5	19,66	21,94	0,10213	410,1	23,99	25,46	0,20664
424,2	19,88	22,24	0,10383	419,0	24,13	25,65	0,20968
433,3	20,06	22,48	0,10729	429,0	24,28	25,86	0,21283
443,3	20,25	22,73	0,10951	439,7	24,43	26,07	0,21624
454,0	20,44	22,98	0,11195	450,1	24,57	26,27	0,2198
463,0	20,59	23,18	0,11392	460,9	24,72	26,47	0,22316
473,2	20,76	23,38	0,11685	469,3	24,82	26,61	0,22655
483,7	20,92	23,58	0,11944	479,3	24,94	26,78	0,22989
493,2	21,06	23,74	0,12208	489,0	25,05	26,94	0,23384
502,9	21,19	23,89	0,12465	499,0	25,16	27,09	0,23747
513,8	21,34	24,03	0,1276	509,6	25,26	27,24	0,24155
523,0	21,45	24,15	0,12924	520,4	25,37	27,39	0,24549
534,3	21,59	24,26	0,13244	530,3	25,45	27,52	0,24936
543,5	21,69	24,34	0,13453	539,6	25,53	27,63	0,25253
553,5	21,80	24,41	0,13645	549,3	25,60	27,74	0,2562
562,9	21,89	24,46	0,13899	559,3	25,67	27,85	0,26
573,4	22,00	24,51	0,14144	569,4	25,74	27,95	0,26397
593,7	22,18	24,63	0,14786	578,7	25,79	28,04	0,26695
604,5	22,28	24,84	0,14922	589,7	25,85	28,13	0,27136
613,3	22,35	25,00	0,15109	599,5	25,89	28,20	0,27489
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 А8 — Результаты $\alpha_{\text{ср}}$, α и ρ для $\alpha+\beta$ смеси (~ 41,8% Zn + 58,2% Cu)				Таблица А9 — Результаты $\alpha_{\text{ср}}$, α и ρ для смеси $\beta+\gamma$ (~53,0% Zn + 47,0% Cu)			
T, K	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$	T, K	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$
313,5	16,27	15,48	0,06491	338,3	18,73	18,36	0,08348
324,0	16,42	16,00	0,06619	348,0	18,84	18,74	0,08546
333,1	16,56	16,43	0,0665	357,5	18,96	19,09	0,08699
340,5	16,66	16,77	0,06766	367,2	19,08	19,43	0,08951
352,8	16,84	17,30	0,06867	376,9	19,20	19,76	0,09136
362,1	16,97	17,67	0,06988	386,2	19,31	20,06	0,09388
371,9	17,11	18,05	0,07086	396,2	19,43	20,37	0,09592
381,3	17,24	18,39	0,07234	405,7	19,55	20,65	0,09804
391,3	17,37	18,72	0,07365	415,3	19,67	20,92	0,1005
402,0	17,51	19,05	0,07475	425,3	19,79	21,18	0,10255
410,9	17,63	19,30	0,07584	435,0	19,91	21,42	0,10473
421,2	17,76	19,57	0,07691	445,2	20,03	21,65	0,10753
430,6	17,88	19,79	0,07795	455,2	20,15	21,86	0,10996
440,3	18,01	20,00	0,07909	465,4	20,28	22,07	0,11248
450,3	18,13	20,19	0,08008	475,2	20,40	22,24	0,115
460,1	18,25	20,35	0,08143	484,8	20,52	22,40	0,11788
469,8	18,36	20,49	0,08241	495,4	20,65	22,56	0,12045
480,3	18,49	20,62	0,08378	500,3	20,71	22,62	0,12189
490,2	18,60	20,71	0,08503	505,3	20,77	22,69	0,12306
500,0	18,71	20,78	0,08615	509,9	20,82	22,74	0,12441
510,2	18,82	20,82	0,08723	515,2	20,89	22,80	0,12583
520,2	18,93	20,84	0,0891	520,2	20,95	22,85	0,12732
549,5	19,24	20,90	0,09231	524,9	21,01	22,90	0,12882
559,3	19,34	20,89	0,0938	529,9	21,07	22,94	0,13015
569,0	19,44	20,93	0,09464	549,8	21,28	23,54	0,13582
578,7	19,53	21,02	0,09624	554,4	21,33	23,96	0,13728
588,4	19,62	21,16	0,09751	559,5	21,39	24,41	0,13913
597,5	19,71	21,33	0,09846	564,2	21,45	24,82	0,14065
607,7	19,80	21,58	0,10012	569,3	21,53	25,26	0,14222
617,3	19,89	21,86	0,10094	578,6	21,68	26,05	0,1457
627,0	19,97	22,19	0,10252	588,3	21,85	26,86	0,14872
636,5	20,05	22,56	0,10407	598,2	22,05	27,66	0,1534
645,8	20,13	22,97	0,10522	607,8	22,25	28,41	0,15628
655,5	20,21	23,45	0,1065	618,0	22,49	29,18	0,16134
665,3	20,29	23,98	0,10772	627,2	22,71	29,86	0,16591
674,5	20,36	24,52	0,10907	636,5	22,95	30,53	0,17003
684,0	20,43	25,14	0,11072	646,2	23,20	31,20	0,17531
688,8	20,47	25,46	0,11145	655,8	23,46	31,85	0,18074
693,8	20,50	25,81	0,11251	665,0	23,71	32,45	0,18605
698,0	20,53	26,11	0,11266	674,8	23,99	33,06	0,19104
702,7	20,57	26,46	0,11357	684,2	24,25	33,64	0,19724
708,3	20,61	26,90	0,11432	693,5	24,51	34,18	0,20358
741,1	20,83	22,81	0,11993	703,1	24,77	34,73	0,20955
745,5	20,85	22,83	0,12106	712,5	25,03	35,24	0,2152
751,5	20,89	22,85	0,12166	717,6	25,16	35,51	0,21763
755,8	20,92	22,87	0,12224	722,7	25,30	35,77	0,22148
760,8	20,95	22,89	0,12251	726,8	25,41	35,98	0,22502
765,5	20,97	22,91	0,12368	731,7	25,53	36,22	0,22731
773,3	21,02	22,94	0,12531	736,2	25,64	36,44	0,23061
778,3	21,05	22,96	0,12591	741,0	25,76	36,67	0,23352
783,1	21,07	22,98	0,12609	745,8	25,88	36,89	0,23626
792,2	21,12	23,02	0,12751	771,7	26,13	36,30	0,24629
801,7	21,17	23,06	0,12886	776,2	26,14	26,33	0,24697
811,3	21,22	23,10	0,13014	780,9	26,15	26,36	0,24844
820,7	21,26	23,14	0,13159	787,9	26,16	26,41	0,24949
830,3	21,31	23,18	0,13324	797,4	26,18	26,48	0,25155
839,5	21,35	23,22	0,13483	806,7	26,20	26,54	0,25317
849,0	21,39	23,26	0,13649	816,0	26,22	26,61	0,25537
857,7	21,42	23,30	0,13785	826,2	26,24	26,68	0,25764
867,5	21,46	23,34	0,13923	833,1	26,25	26,72	0,25875
877,2	21,50	23,38	0,14109	839,3	26,27	26,77	0,25952
886,0	21,53	23,42	0,14263	848,9	26,29	26,83	0,26195

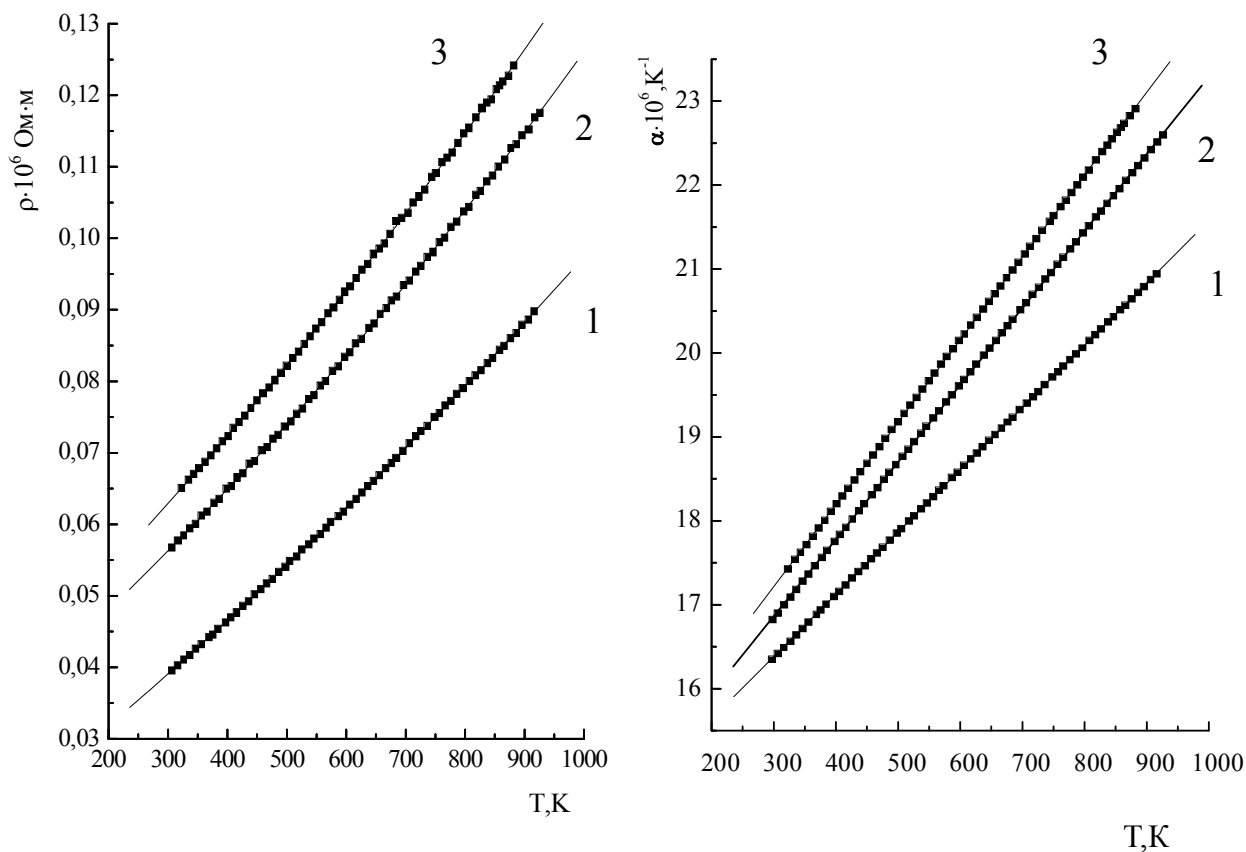


Рис. А4 — Температурные зависимости электросопротивления (ρ) и ТКЛР (α) для α - латуней: 1) $\sim 7\% \text{ Zn} + 93\% \text{ Cu}$; 2) $\sim 19.6\% \text{ Zn} + 80.4\% \text{ Cu}$; 3) $\sim 30.5\% \text{ Zn} + 69.5\% \text{ Cu}$.

$$\rho(30\%) = 0,03697 + 7,99086 \cdot 10^{-5} \cdot T + 2,15618 \cdot 10^{-8} \cdot T^2$$

$$\rho(20\%) = 0,0329 + 7,1361 \cdot 10^{-5} \cdot T + 2,17976 \cdot 10^{-8} \cdot T^2$$

$$\rho(10\%) = 0,01835 + 6,48649 \cdot 10^{-5} \cdot T + 1,41778 \cdot 10^{-8} \cdot T^2$$

$$\bar{\alpha}(10\%) = 15,11329 + 0,00391 \cdot T$$

$$\bar{\alpha}(20\%) = 15,19028 + 0,00499 \cdot T$$

$$\bar{\alpha}(30\%) = 1,02604 + 0,06201 \cdot T - 7,37463 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 3,15811 \cdot 10^{-8} \cdot T^3$$

$$\alpha(30\%) = 14,26826 + 0,00982 \cdot T$$

$$\alpha(20\%) = 14,10854 + 0,00918 \cdot T$$

$$\alpha(10\%) = 14,15618 + 0,00742 \cdot T$$

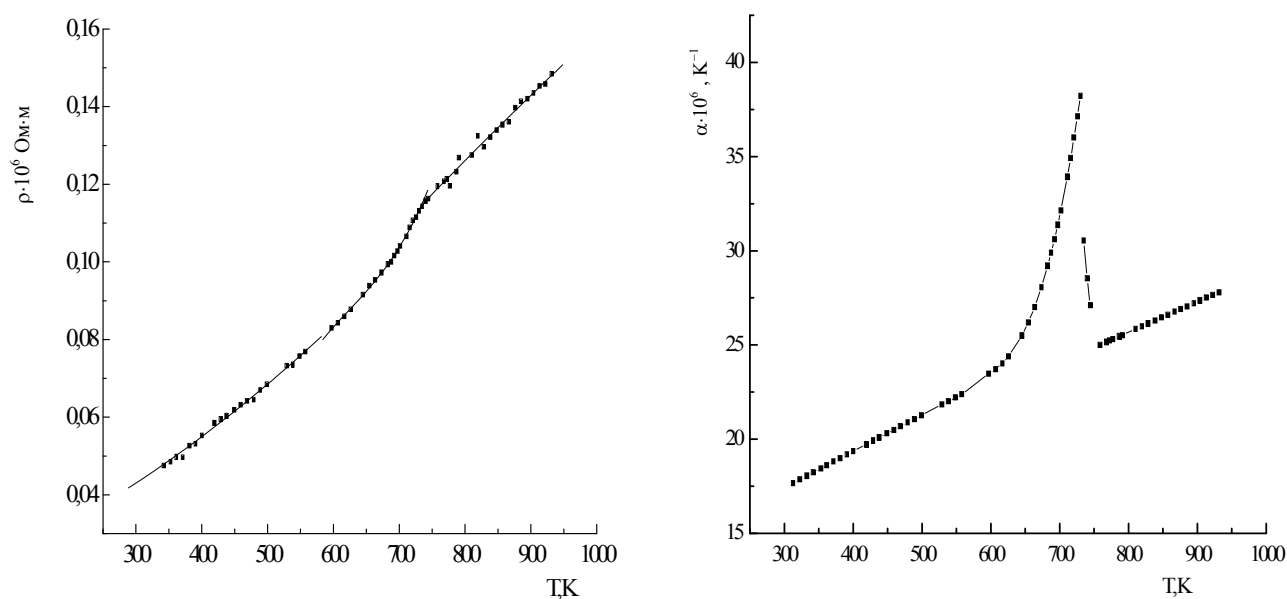


Рис. А5 — Температурные зависимости электросопротивления и ТКЛР β -латуни (~46,1 % Zn +53,9 % Cu).

$$\rho = 0,01668 + 6,40304 \cdot 10^{-5} \cdot T + 7,92716 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \quad 300-530\text{K}$$

$$\rho = -1,37149 + 0,00665 \cdot T - 1,03659 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 5,53506 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 \quad 540-720\text{K}$$

$$\rho = -3,385 + 0,00926 \cdot T - 6,1217 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad 720-740\text{K}$$

$$\rho = -0,03432 + 2,29667 \cdot 10^{-4} \cdot T - 3,63779 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \quad 750-930\text{K}$$

$$\bar{\alpha} = 9,97687 + 0,04668 \cdot T - 9,06589 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 6,99731 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 \quad 300-740\text{K}$$

$$\bar{\alpha} = 20,70877 + 0,02385 \cdot T - 5,08544 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 3,17376 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 \quad 750-930\text{K}$$

$$\alpha = 11,66835 + 0,01923 \cdot T \quad 300-530\text{K}$$

$$\alpha = -544,92393 + 2,96579 \cdot T - 0,00519 \cdot T^2 + 3,04176 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 \quad 540-720\text{K}$$

$$\alpha = 4824,57884 - 12,60812 \cdot T + 0,00828 \cdot T^2 \quad 720-740\text{K}$$

$$\alpha = 12,7017 + 0,01622 \cdot T \quad 750-930\text{K}$$

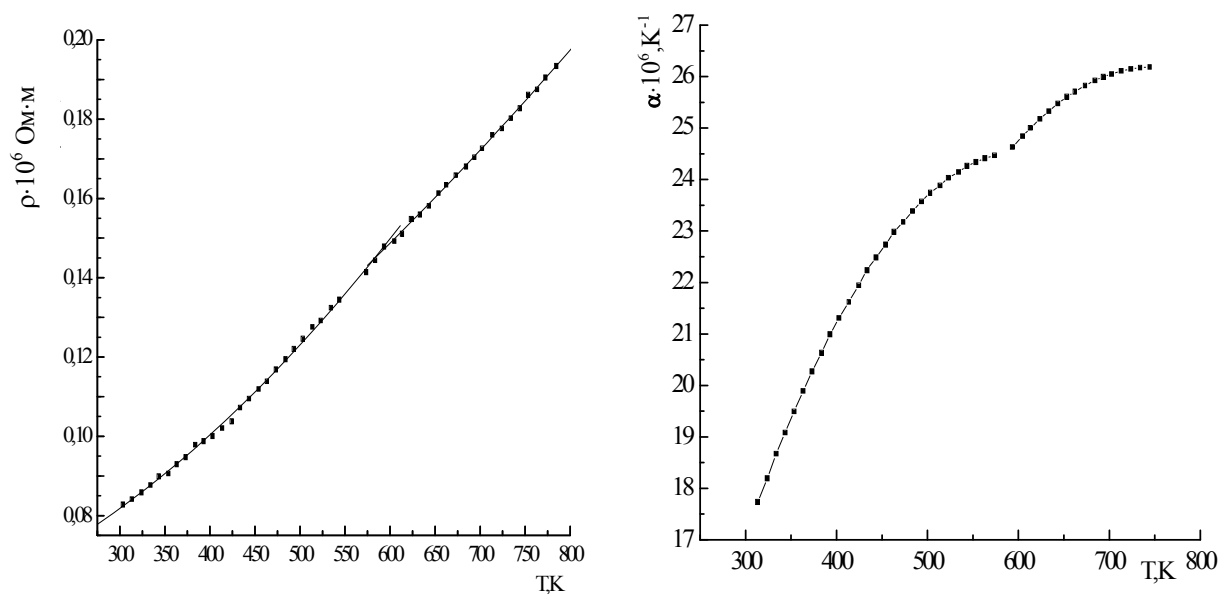


Рис. А6 - Температурные зависимости электросопротивления и ТКЛР γ -латуни (~65.1 % Zn +34.9 % Cu)

$$\rho = 0,1182 - 4,3385 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1,2946 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 8,2177 \cdot 10^{-10} \cdot T^3 \quad 300-570\text{K}$$

$$\rho = 0,00906 + 2,23573 \cdot 10^{-4} \cdot T + 8,38819 \cdot 10^{-9} \cdot T^2 \quad 580-750\text{K}$$

$$\bar{\alpha} = -2,23431 + 0,09513 \cdot T - 1,27389 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 6,13628 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 \quad 300-750\text{K}$$

$$\alpha = -4,08798 + 0,09675 \cdot T - 8,17763 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \quad 300-570\text{K}$$

$$\alpha = -10,91699 + 0,09939 \cdot T - 6,65644 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \quad 580-750\text{K}$$

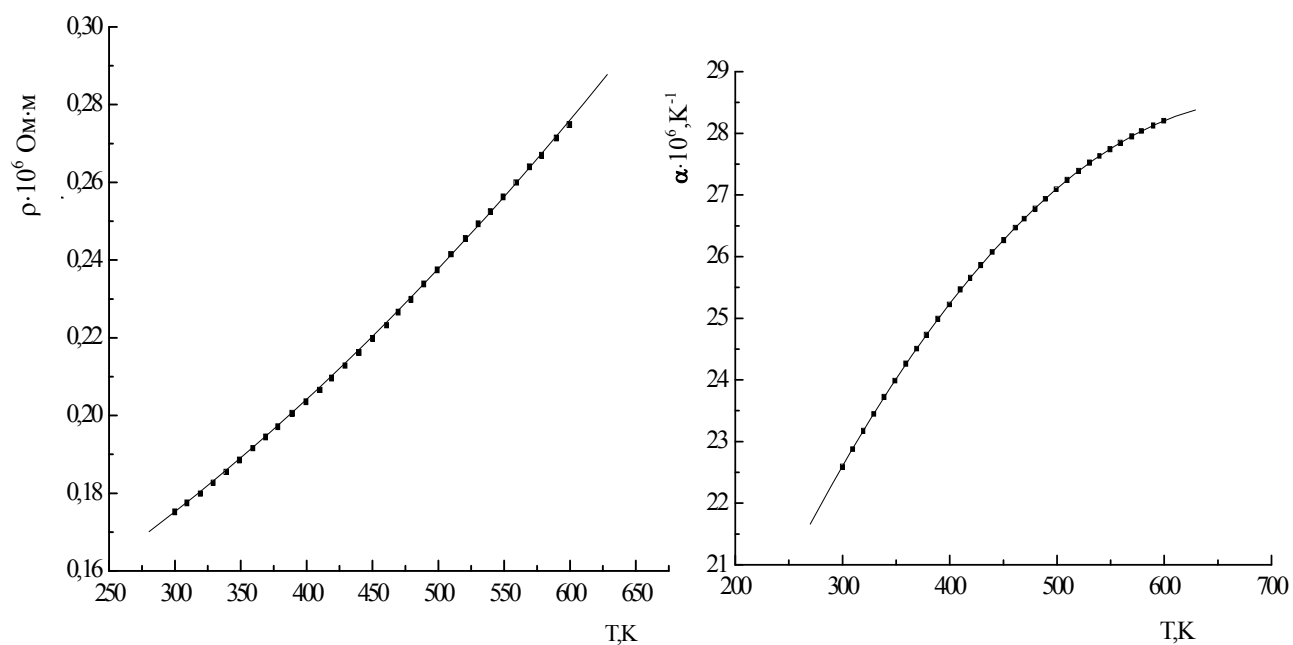


Рис. А7 - Температурные зависимости электросопротивления и ТКЛР ϵ -латуни (~82,6 % **Zn** + 17,4 % **Cu**)

$$\rho = 0,14859 - 1,02326 \cdot 10^{-4} \cdot T + 7,53276 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 3,83909 \cdot 10^{-10} \cdot T^3 \quad 300-600\text{K}$$

$$\bar{\alpha} = 7,87029 + 0,07647 \cdot T - 1,13959 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 6,00148 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 \quad 300-600\text{K}$$

$$\alpha = 10,0805 + 0,05327 \cdot T - 3,84438 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \quad 300-600\text{K}$$

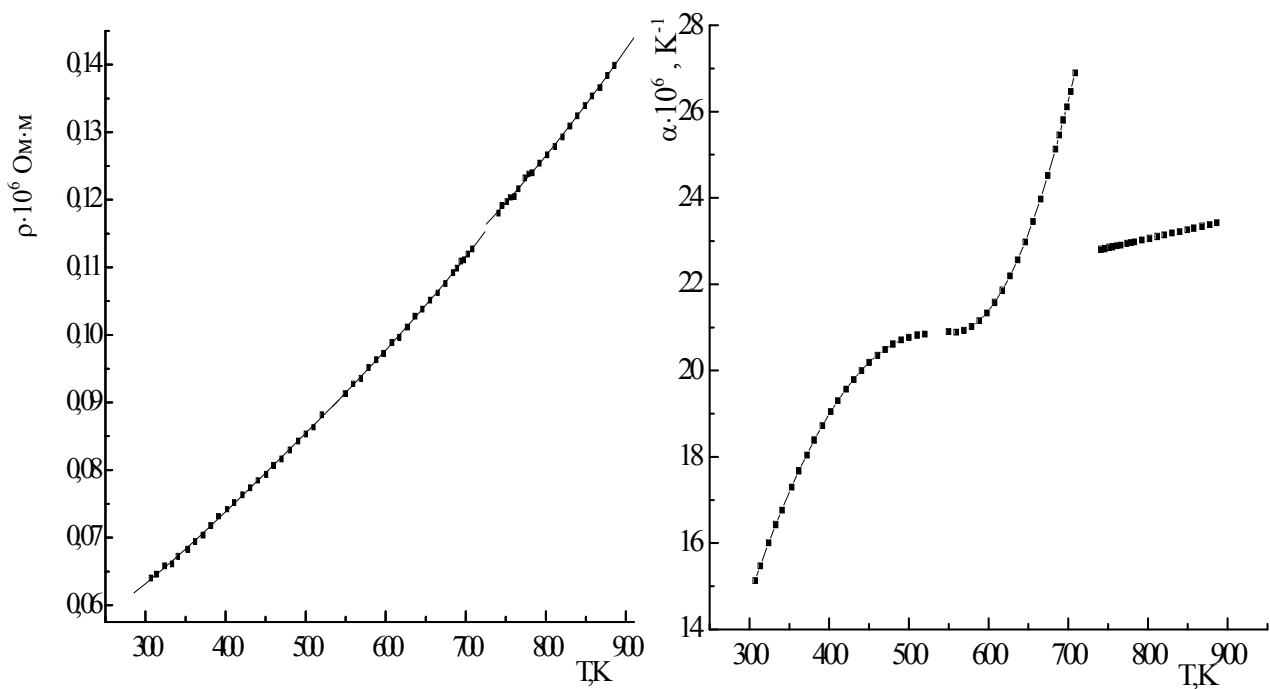


Рис. А8 - Температурные зависимости электросопротивления и ТКЛР твердого раствора $(\alpha+\beta) \sim 41,8 \% \text{ Zn} + 58,2 \% \text{ Cu}$.

$$\rho = 0,0477 - 9,3326 \cdot 10^{-6} \cdot T + 2,5423 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 1,6886 \cdot 10^{-10} \cdot T^3 \quad 300-530\text{K}$$

$$\rho = -0,0385 + 4,6009 \cdot 10^{-4} \cdot T - 6,1153 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 3,7203 \cdot 10^{-10} \cdot T^3 \quad 540-720\text{K}$$

$$\rho = 0,0889 - 5,1167 \cdot 10^{-5} \cdot T + 1,2268 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \quad 720-740\text{K}$$

$$\bar{\alpha} = 10,56433 + 0,02137 \cdot T - 1,01532 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \quad 750-930\text{K}$$

$$\alpha = -12,5420 + 0,12759 \cdot T - 1,219 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 \quad 300-520\text{K}$$

$$\alpha = 101,3074 - 0,28915 \cdot T + 2,59926 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 \quad 550-710\text{K}$$

$$\alpha = 19,6736 + 0,00423 \cdot T \quad 740-890\text{K}$$

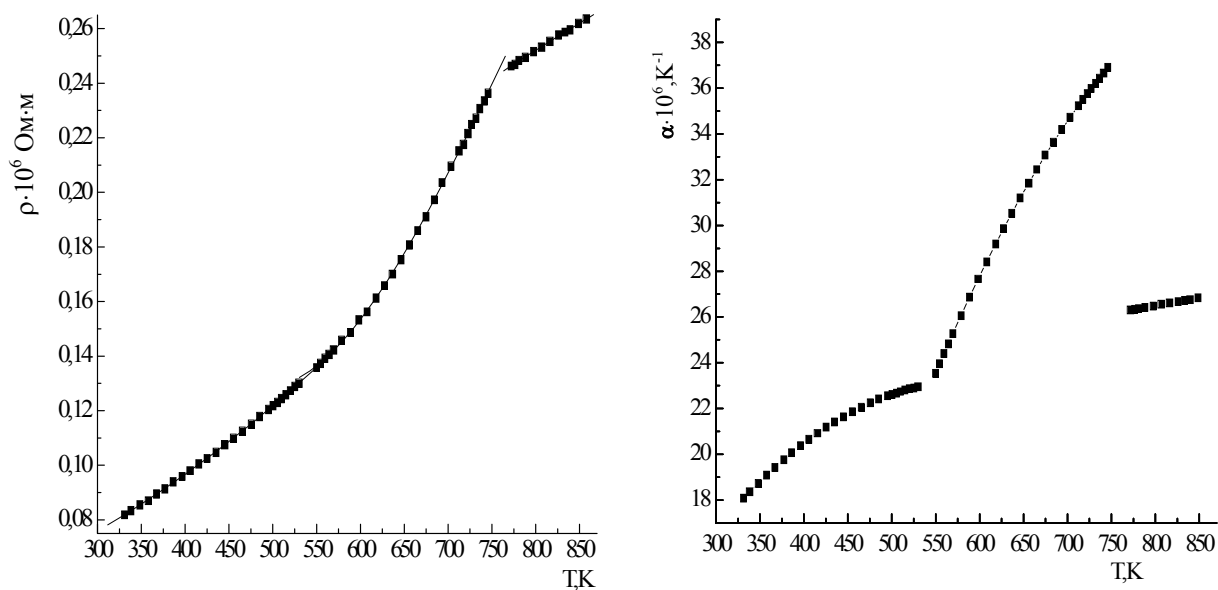


Рис. А9 - Температурные зависимости электросопротивления и ТКЛР
твёрдого раствора ($\beta+\gamma$) ~ 53,0 % Zn + 47,0 %Cu .

$$\rho = 0,03867 + 6,1316 \cdot 10^{-5} \cdot T + 2,04696 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \quad 300-530K$$

$$\rho = 0,2705 - 8,03731 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1,01041 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad 550-750K$$

$$\rho = 0,03602 + 3,34904 \cdot 10^{-4} \cdot T - 8,91417 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \quad 770-850K$$

$$\bar{\alpha} = 14,59179 + 0,01222 \cdot T \quad 300-530K$$

$$\bar{\alpha} = 113,49206 - 0,44878 \cdot T + 6,99124E-4 \cdot T^2 - 3,41777E-7 \cdot T^3 \quad 550-750K$$

$$\bar{\alpha} = 24,58849 + 0,002 \cdot T \quad 770-850K$$

$$\alpha = -4,33157 + 0,09463 \cdot T - 8,14599 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \quad 300-530K$$

$$\alpha = -60,58906 + 0,21566 \cdot T - 1,13916 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 \quad 550-750K$$

$$\alpha = 20,93153 + 0,00695 \cdot T \quad 770-850K$$

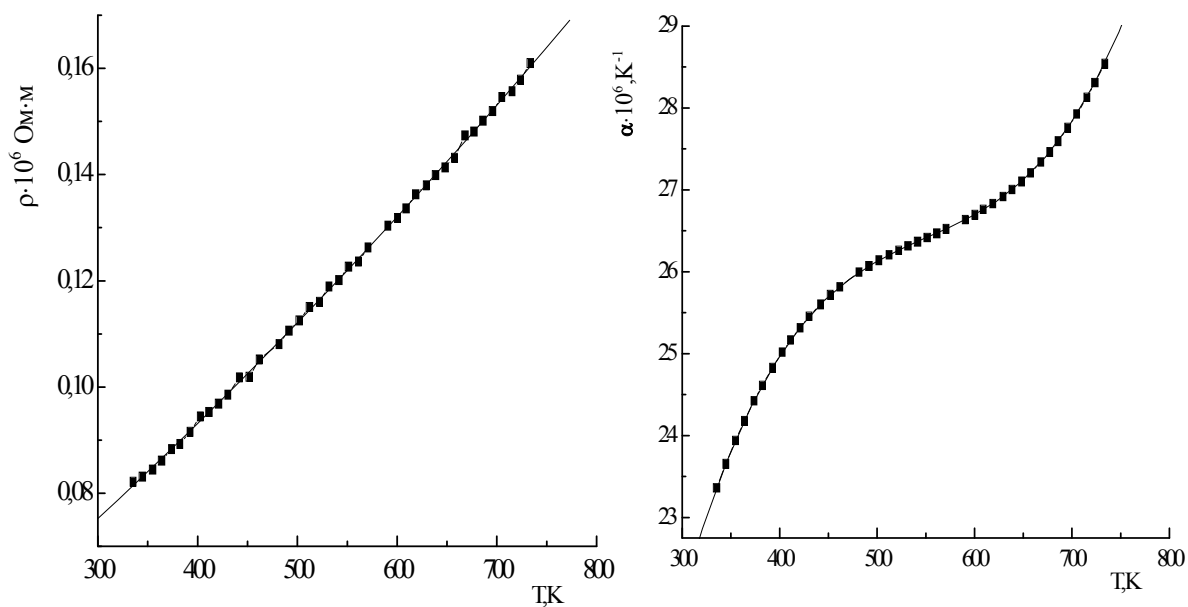


Рис. А10 — Температурные зависимости электросопротивления и ТКЛР твердого раствора $\gamma+\epsilon$ ($\sim 73,3\%$ Zn + $26,7\%$ Cu).

$$\rho = 0,02752 + 1,43673 \cdot 10^{-4} \cdot T + 5,09471 \cdot 10^{-8} \cdot T^2$$

$$\bar{\alpha} = 7,87068 + 0,07647 \cdot T - 1,13957 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 6,00143 \cdot 10^{-8} \cdot T^3$$

$$\alpha = -8,74404 + 0,18109 \cdot T - 3,19269 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 1,93176 \cdot 10^{-7} \cdot T^3$$

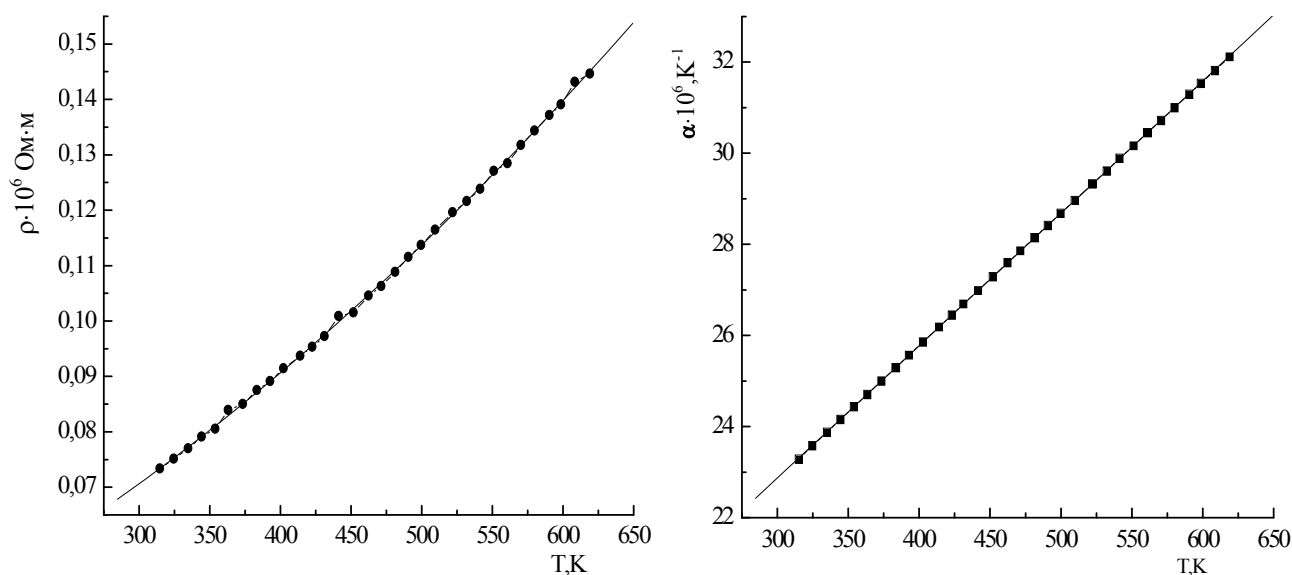


Рис. А11 □ Температурные зависимости электросопротивления и ТКЛР твердого раствора смеси $\epsilon+\eta$ (~ 87,8 % Zn +12,2 % Cu).

$$\rho = 0,02864 + 9,46881 \cdot 10^{-5} \cdot T + 1,5088 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$$

$$\bar{\alpha} = 4,13042 + 0,10936 \cdot T - 1,97835 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 1,33806 \cdot 10^{-7} \cdot T^3$$

$$\alpha = 14,1569 + 0,02904 \cdot T$$

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 $\Delta T/T$ определяется погрешностью определения напряжения на концах термопары потенциометром $\Delta U/U$ и погрешностью термопары $\Delta \epsilon/\epsilon$. 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 длины

образца L_0 микрометром систематическую 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 распределено около среднего значения L по нормальному закону. Здесь 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 определяться воспроизводимостью данных измерений ΔL при одной и той же температуре. Ее не следует путать с $\Delta L/L$, т.к. она определяется не только предельной погрешностью прибора, но и погрешностью, обусловленной не идеальностью подгонки деталей ячейки и контакта этих деталей с образцом.

Предельная случайная погрешность при определении α рассчитывалась по формуле

$$\frac{\delta_\alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta L}}{\Delta L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{L_0}\right)^2} \quad (A3)$$

Предельная систематическая погрешность определялась по формуле

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} + \frac{2\sigma_{\text{ост}}}{L} \quad (A4)$$

Верхняя граница суммарной ошибки $\Sigma\alpha$ определялась путем сложения систематической и случайной погрешностей

$$\Sigma_\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\delta_\alpha}{\alpha} \quad (A5)$$

Оценка погрешности ТКЛР по (A5) в области температур от ~ 300 до 1000K приводит к значениям – не более 7% (при длине образца не менее 10 см) и менее 5 % соответственно. При значениях ТКЛР ниже $5 \cdot 10^{-6}\text{K}^{-1}$ 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, чувствительность будет определяться величиной несовпадения напряжений, измеряемых хромелевыми и алюмелевыми проводами, которая составляет примерно 10^{-6} В. В твердом состоянии минимально измеряемое напряжение 10^{-3} В. Чувствительность вычисляется по формуле

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx \frac{\Delta U}{1,4U} \quad (A6)$$

и составляет $5 \cdot 10^{-4}$. Коэффициент 1,4 в формуле (A6) вводится ввиду усреднения измеряемых напряжений.

Значения электросопротивления рассчитывались по формуле

$$\rho = \frac{S}{\lambda_p} \frac{U_x R_0}{U_0} (1 + \bar{\alpha} \Delta T) \quad (A7)$$

где S и λ_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, $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплового расширения образца в интервале температур $\Delta T = T - T_0$, здесь T_0 – температура, при которой определялись размеры образца. 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, позволяет 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 (A7) выражение в скобках является поправкой, тогда

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta R_0}{R} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta U}{U} \approx \frac{\Delta R_0}{R_0} + 2 \frac{\Delta U}{U}, \quad (A8)$$

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 λ . 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 ρ от T . Предельная случайная погрешность при измерениях рассчитывалась по формуле

$$\frac{d\rho}{\rho} = 2 \sqrt{2 \left(\frac{\sigma_{\bar{U}}}{U} \right)^2 + 2 \left(\frac{\sigma_{\bar{x}}}{U} \right)^2 + 2 \left(\frac{\sigma_{\bar{x}}}{U} \right)^2}. \quad (A9)$$

Предельная суммарная погрешность измерения электросопротивления не превышает 0,5-1 %. Систематическая погрешность по сравнению со случайной пренебрежимо мала. Основной вклад в случайную погрешность вносится погрешностью определения длины рабочего участка образца, которая в варианте, приведенном на рис. А3, снижается до 0,1% при толщине зондов 0,05 мм. Систематические и случайные погрешности рассчитывались по рекомендациям автора работы [7].

Ход установки (для введения поправки в значения ТКЛР) определялся по кварцевому стержню и образцу из меди. 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 погрешностей [1].

6. Оценка достоверности данных

Оценка достоверности полученных данных по ТКЛР медь-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 [8] (см. рис. A12). Для остальных сплавов сравнение с данными других авторов не проводились ввиду их отсутствия.

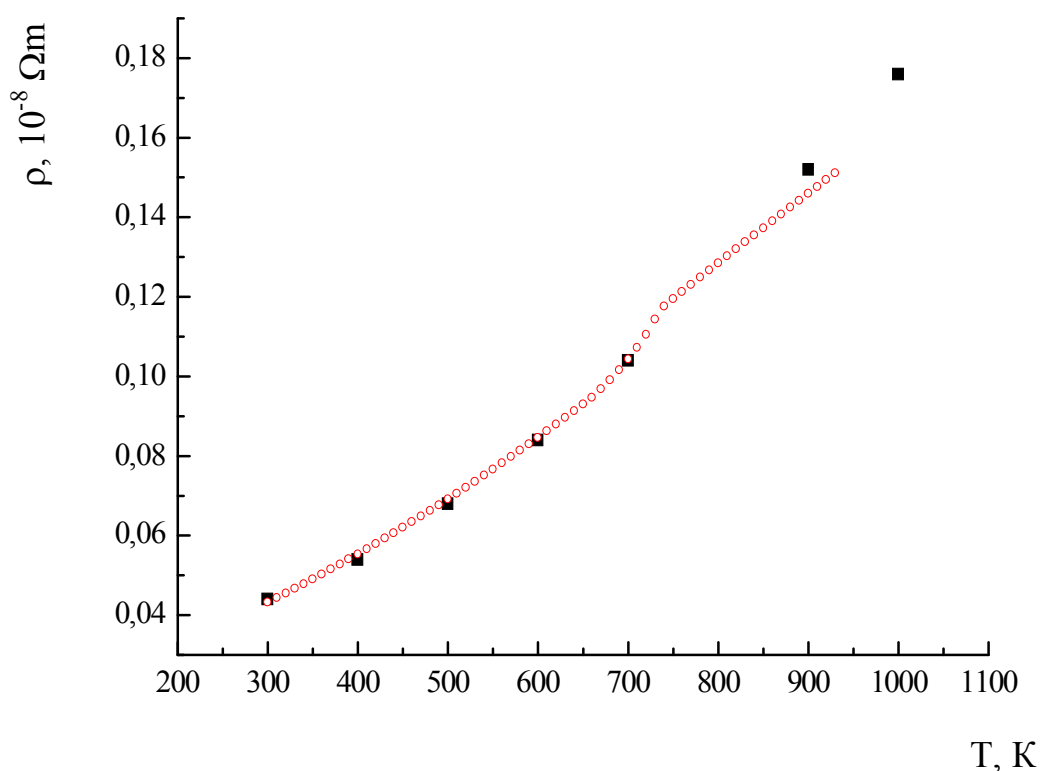


Рис. A12 — Сравнение рекомендуемых для ССД данных (о) по ρ β -латуни в диапазоне температур от 300 до 1000 К с литературными данными

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

7. Список литературы

1. Палчаев Д.К., Мурлиева Ж.Х., Исхаков М.Э. Методика одновременных исследований электросопротивления и теплового расширения твердых тел // Методика ГСССД МЭ 208-2013. Росс. научно-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия. Деп. в ФГУП “СТАНДАРТИНФОРМ” 20. 03. 2013 г., № 901а - 2013 кк.).
2. Мурлиева Ж.Х., Палчаев Д.К., Фараджеева 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. 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. – P. 1713-1720.
4. Чистяков, В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
5. Новикова С.И. Тепловое расширение твёрдых 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.