

## Высокочастотные омические потери бериллия и его сплава с алюминием

Н. Н. Пренцлау

*Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины,  
Украина, 310164, г. Харьков, пр. Ленина, 47  
E-mail: dmitriev@ilt.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 11 марта 1999 г.

Исследовано поверхностное сопротивление бериллия различной чистоты, а также его сплава с алюминием (50%Be–50%Al) в температурном интервале 4,2–300 К и частотном диапазоне 0– $10^{10}$  Гц. Показано, что в пределах температурного интервала (в окрестности 77 К), где бериллий является гиперпроводником на постоянном токе, поверхностное сопротивление чистого бериллия и сплава минимальны по сравнению с другими металлами и, в частности, с алюминием. Температурная зависимость поверхностного сопротивления бериллия и его сплава удовлетворительно описывается классическими формулами электродинамики.

Досліджено поверхневий опір берилію різної чистоти, а також його сплава з алюмінієм (50%Be–50%Al) в температурному інтервалі 4,2–300 К та частотному діапазоні 0– $10^{10}$  Гц. Показано, що в межах температурного інтервалу (поблизу 77 К), де берилій виявляється гіперпровідником при постійному струмі, поверхневий опір чистого берилія і сплава мінімальні у порівнянні з іншими металлами і, зокрема, з алюмінієм. Температурна залежність поверхневого опору берилія та його сплава задовільно описується класичними формулами електродинаміки.

PACS: 72.15.Eb, 72.30.+q

### Введение

Аномально высокая температура Дебая  $\Theta$  бериллия ( $\Theta(\text{Be}) \cong 1160$  К) является причиной того, что в окрестности 77 К его удельное сопротивление на постоянном токе  $\rho$  в 5–8 раз ниже, чем  $\rho$  таких металлов с высокой электропроводностью, как серебро, медь, алюминий. В то же время при комнатных и гелиевых температурах  $\rho(\text{Be}) > \rho(\text{Ag}, \text{Al}, \text{Cu})$  [1–3]. Поскольку поверхностное сопротивление металлов  $R_s$  зависит от  $\rho$  как в области классического  $R_{s(c)}$ , так и в области аномального  $R_{s(an)}$  скин-эффекта [4–6], естественно предположить, что аналогично удельному сопротивлению в некотором температурном интервале  $T_1 > 77 \text{ К} > T_2$   $R_s(\text{Be})$  также будет ниже  $R_s(\text{Ag}, \text{Al}, \text{Cu})$ . Однако в литературе отсутствуют сведения о высокочастотных свойствах как самого бериллия, так и его сплавов, например, с алюминием [7], а приведенная в [4–6] функциональная зависимость между  $\rho(T)$  и  $R_s(T)$  справедлива не для всех соединений. Для некоторых из них она не выполняется из-за

особенностей на температурно-частотной зависимости их поверхностного сопротивления [8–10]. Поэтому к настоящему времени вопрос о гиперпроводимости на высоких частотах бериллия и его сплава остается открытым.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований сопротивления бериллия чистотой 99,98% в диапазоне частот 0– $10^{10}$  Гц; бериллия чистотой 99,97 и 99,96%, а также сплава 50% Be–50% Al на частоте  $10^9$  Гц в температурном интервале 4,2–300 К. Измеренные значения сопротивлений приведены в сравнении с  $\rho$  и  $R_s$  алюминия марки А9995. Из [5,6] известно, что при аномальном скин-эффекте поверхностное сопротивление чистого алюминия  $R_{s(an)}(\text{Al})$  может быть ниже  $R_{s(an)}(\text{Cu}, \text{Ag})$ , поэтому он и выбран в качестве эталона для сравнения.

### Образцы и методика измерений

Исследовались образцы алюминия и бериллия, изготовленные в виде прутков диаметром 1,5–3,5 мм, а сплав алюминий–бериллий (АВ) —

в виде фольги толщиной 0,1 мм. На постоянном токе измерения проводились мостовым методом, а на переменном — резонаторным. Измерения проводили в криостате в парах гелия, температура изменялась от 4,2 до 300 К. Перед измерениями образцы отжигались в вакууме  $5 \cdot 10^{-7}$  мм рт.ст. в течение четырех часов при температурах: бериллий — 900 К, алюминий — 700 К. После отжига поверхность исследуемых образцов Ве обрабатывалась химической полировкой. Образцы сплава Al-Ве не отжигались и не полировались.

### Экспериментальные результаты

Измеренные значения удельных сопротивлений исследуемых материалов на постоянном токе приведены в таблице.

Таблица

Удельные сопротивления исследуемых материалов

Материал образца	$\rho(300)$	$\rho(4,2)$	$\rho(300)/\rho(4,2)$
	Ом·м		
Ве99,98	$4 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-10}$	200
Ве99,97	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$2,9 \cdot 10^{-10}$	155
Ве99,96	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-10}$	115
A9995	$2,75 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-11}$	550
AB50	$3,75 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	35

П р и м е ч а н и е:  $\rho(\text{Al})/\rho(\text{Ве}99,98) = 6$  при  $T = 77$  К

На рис. 1 приведена температурная зависимость удельного сопротивления  $\rho(\text{Al})$  алюминия (кривая 1), а также образцов бериллия  $\rho(\text{Ве})$  чистотой 99,98, 99,97 и 99,96% (кривые 2, 3 и 4 соответственно). Кривыми 5–12 представлены температурные зависимости поверхностного сопротивления бериллия чистотой 99,98% (четные кривые) и алюминия (нечетные) для частот: 5, 6 —  $10^7$  Гц; 7, 8 —  $10^8$  Гц; 9, 10 —  $10^9$  Гц и 11, 12 —  $10^{10}$  Гц соответственно. Из рисунка следует, что так же, как и на постоянном токе, в интервале температур  $T_1$ – $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ) омические потери  $R_s(\text{Ве}) < R_s(\text{Al})$ . Обнаружено, что для одного и того же образца бериллия на всех частотах измерения  $T_1 = \text{const}$ , а  $T_2$  уменьшается с увеличением частоты. Поэтому с повышением частоты интервал температур  $T_1$ – $T_2$  расширяется (рис. 1), отношение же  $R_s(\text{Al})/R_s(\text{Ве})$  при  $T < T_2$  повышается, а при  $T_2 < T < T_1$  снижается.

Концентрация примесей в бериллии сказывается как на его удельном, так и на поверхностном сопротивлении. Были

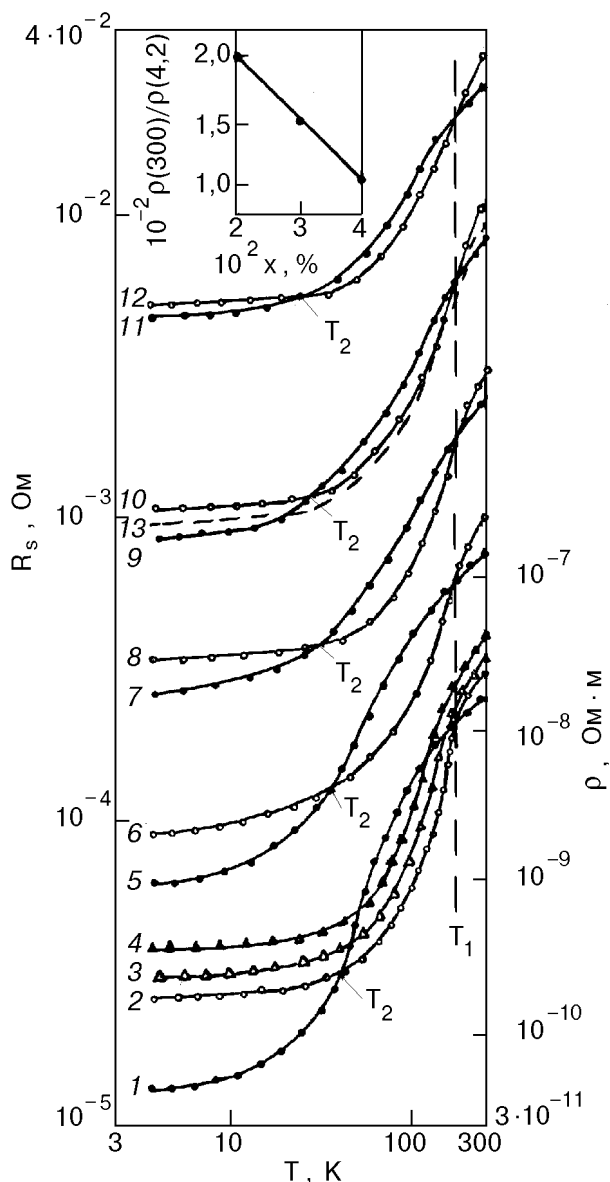


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления алюминия A9995 (1) и бериллия различной чистоты, %: 99,98 (2), 99,97 (3) и 99,96 (4) (в логарифмическом масштабе). Температурные зависимости поверхностного сопротивления алюминия и бериллия чистотой 99,98% на частотах:  $10^7$  Гц — 5 (Al), 6 (Ве);  $10^8$  Гц — 7 (Al), 8 (Ве);  $10^9$  Гц — 9 (Al), 10 (Ве);  $10^{10}$  Гц — 11 (Al), 12 (Ве). 13 — расчетное значение  $R_s(T)(\text{Ве})$  на частоте  $10^9$  Гц. На вставке — концентрационная зависимость отношения  $\rho(300)/\rho(4,2)$  бериллия.

установлены следующие закономерности. С увеличением концентрации примесей удельное сопротивление бериллия увеличивается во всем температурном интервале (рис. 1). На вставке рис. 1 приведена зависимость  $\rho(300)/\rho(4,2)$  измеряемых образцов бериллия от концентрации примеси  $x$  в них в процентном отношении. В образцах бериллия с  $x_1 > x_2$  отношение  $\rho(x_1)/\rho(x_2)$  при 300 К меньше, чем при 4,2 К. С повышением  $x$  уменьшается также температура

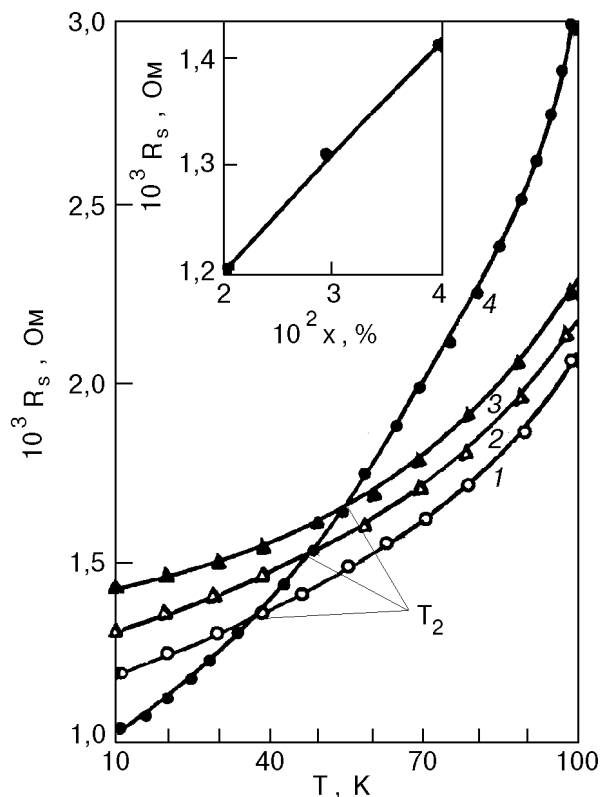


Рис. 2. Температурная зависимость поверхностного сопротивления бериллия различной чистоты, %: 99,98 (1), 99,97 (2), 99,96 (3) и алюминия (4) на частоте  $10^9$  Гц. На вставке – концентрационная зависимость  $R_s$  бериллия на частоте  $10^9$  Гц и  $T = 10$  К.

$T_1$  и повышается  $T_2$  (рис. 1). Таким образом, с увеличением концентрации примесей диапазон температур  $T_1$ – $T_2$  уменьшается. Указанное относится также и к поверхностному сопротивлению. При этом  $T_1$  постоянна для образца с данной концентрацией примесей во всем частотном диапазоне (на рисунках не показано), а  $T_2 \propto x$ . На рис. 2 приведена температурная зависимость поверхностного сопротивления бериллия различной чистоты: 99,98% (кривая 1), 99,97% (кривая 2) и 99,96% (кривая 3), измеренная на частоте  $10^9$  Гц. Для сравнения показана температурная зависимость  $R_s$  алюминия, измеренная на этой же частоте (кривая 4). На вставке рис. 2 приведена зависимость поверхностного сопротивления бериллия от концентрации примесей в нем на частоте  $10^9$  Гц при  $T = 10$  К.

На рис. 3,а (кривая 1) приведена температурная зависимость удельного сопротивления сплава алюминий–бериллий, а кривой 2 показана зависимость  $\rho(T)$  алюминия. На рис. 3,б представлена температурная зависимость отношения  $R_s$  сплава к  $R_s$  алюминия

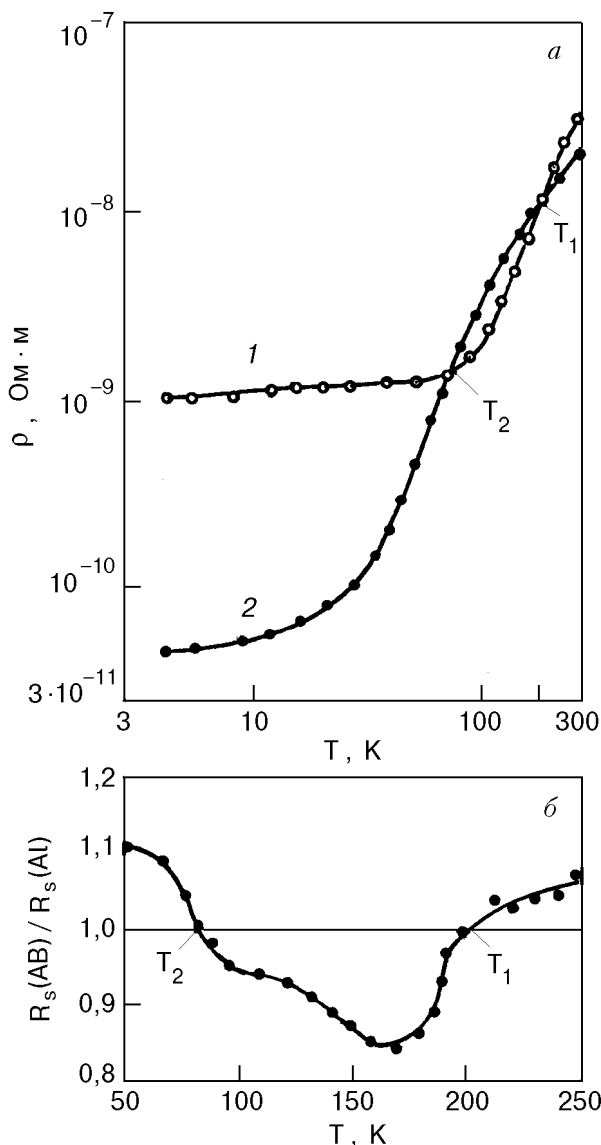


Рис. 3. Температурная зависимость удельного сопротивления сплава алюминий–бериллий (1) и алюминия (2) (в логарифмическом масштабе) (а). Температурная зависимость отношения  $R_s$  сплава к  $R_s$  алюминия на частоте  $10^9$  Гц (б).

на частоте  $10^9$  Гц в температурном интервале 50–250 К.

### Обсуждение результатов

Значения удельного сопротивления бериллия и алюминия в температурном интервале 300–4,2 К близки к значениям  $\rho(T)$  этих металлов, приведенным другими авторами (см., например, [1–3,11]), а полученное при 77 К отношение  $\rho(\text{Al})/\rho(\text{Be})$ , равное 6, также близко к значениям, приведенным, например, в [1,2]. Таким образом, поверхностное сопротивление бериллия исследовалось на образцах с типичными для этого металла параметрами, измеренными на постоянном токе.

Из [3] следует, что удельное сопротивление  $\rho(\text{Be})$  можно представить, согласно правилу Маттисена, как сумму остаточного  $\rho_0$  и зависящего от температуры  $\rho_e$  удельных сопротивлений, при этом компоненту  $\rho_e$  можно с достаточной степенью точности описать уравнением Грюнайзена — Блоха [12].

При  $x_1 > x_2$   $\{\rho(x_1)/\rho(x_2)\}_{(300)} < \{\rho(x_1)/\rho(x_2)\}_{(4,2)}$ , что характерно как для бериллия [3], так и для других металлов, и объясняется правилом Маттисена. При высоких температурах компонента  $\rho_e$ , обусловленная электрон-фононным рассеянием, преобладает над компонентой остаточного удельного сопротивления  $\rho_0$ . Поэтому  $\rho(x_1)$  и  $\rho(x_2)$  слабо зависят от примесей, а следовательно, отличаются незначительно. При низких температурах зависящая от температуры компонента  $\rho_e$ , согласно уравнению Грюнайзена — Блоха, мала по сравнению с остаточным сопротивлением  $\rho_0$ , которое практически линейно увеличивается с повышением концентрации примеси (рис. 1, вставка). Поэтому при низких температурах  $\rho(\text{Be})$  в основном обусловлено именно остаточным сопротивлением, т.е. сопротивлением, зависящим от примесей.

Для бериллия при температурах ниже 300 К справедливо соотношение  $T/\Theta(\text{Be}) < 0,5$ , т.е. в этой области температур наблюдается сильная зависимость  $\rho(\text{Be})(T)$ , с понижением температуры стремящаяся к зависимости  $\rho(\text{Be}) \propto T^5$ . В то же время для алюминия вблизи 300 К отношение  $T/\Theta(\text{Al}) > 0,5$ , поэтому  $\rho(\text{Al}) \propto T$  ( $\Theta(\text{Al}) = 420$  К). Таким образом, в окрестности 300 К  $\partial\rho(\text{Be})/\partial T > \partial\rho(\text{Al})/\partial T$ . Поскольку при  $T = 300$  К  $\rho(\text{Al})$  и  $\rho(\text{Be})$  отличаются незначительно, то уже при температуре  $T_1 \sim 200$  К  $\rho(\text{Be})$  становится равным  $\rho(\text{Al})$ , а при  $T < T_1$   $\rho(\text{Be}) < \rho(\text{Al})$ .

При температурах ниже 100 К  $\partial\rho(\text{Be})/\partial T$  постепенно уменьшается, и с понижением температуры удельное сопротивление бериллия определяется остаточным  $\rho_0$  (т.е.  $\partial\rho(\text{Be})/\partial T = 0$ ). Однако в этом температурном интервале уже для алюминия выполняется условие  $T/\Theta(\text{Al}) < 0,5$ , т.е. для алюминия может быть  $\rho(\text{Al}) \propto T^5$ , а следовательно,  $\partial\rho(\text{Al})/\partial T > \partial\rho(\text{Be})/\partial T$ . Поэтому при некоторой температуре  $T_2$   $\rho(\text{Be})$  становится равным  $\rho(\text{Al})$ , а при  $T < T_2$  снова  $\rho(\text{Be}) > \rho(\text{Al})$  (рис. 1). Таким образом, условие  $\rho(\text{Be})/\rho(\text{Al}) < 1$  выполняется в интервале температур  $T_1 - T_2$ .

Температурная зависимость поверхностного сопротивления бериллия может быть описана известными формулами электродинамики как в

области классического скин-эффекта, так и аномального. На рис. 1 (кривая 13) приведена температурная зависимость  $R_s$  Be чистотой 99,98% на частоте  $10^9$  Гц, полученная расчетом по формулам Зондгеймера и Чемберса [4–6].

Из анализа температурных зависимостей  $R_s$  алюминия и бериллия, рассчитанных по выражениям из [5], можно заключить, что при  $T \geq 170$  К в обоих металлах классический скин-эффект существует на всех частотах измерения, а при  $T \geq 70$  К — на частотах до  $10^7$  Гц. Отсюда следует, что, во-первых, для одного и того же образца на всех измеряемых частотах, включая постоянный ток,  $T_1 = \text{const}$ , потому что она соответствует области температур классического скин-эффекта. С повышением  $x$  удельное сопротивление бериллия при высоких температурах растет, хотя и в меньшей степени, чем при низких. Поэтому равенство  $\rho(\text{Be})$  и  $\rho(\text{Al})$  будет иметь место при более низкой температуре, т.е. с ростом  $x$   $T_1$  снижается.

Во-вторых, объяснимо значение отношения  $R_{s(\text{Al})}/R_{s(\text{Be})} \approx 2-2,5$  при  $T = 77$  К на частотах  $\sim 10^7$  Гц (рис. 1), так как при этой температуре  $\rho(\text{Al})/\rho(\text{Be}) = 6$ , а  $R_{s(\text{cl})} \propto \rho^{1/2}$ .

Согласно [5], в области аномального скин-эффекта поверхностное сопротивление металла  $R_{s(\text{an})}$  можно представить в виде  $R_{s(\text{an})} = R_0 + R_s(\rho)$ . Здесь  $R_0 \propto (A f^2)^{1/3}$  — предельно минимальное значение  $R_{s(\text{an})}$ , не зависящее от  $\rho$ ;  $A$  — отношение скорости Ферми к концентрации носителей;

$$R_s(\rho) \propto A^2 f^{(0,3;0,4)} \rho^{(0,82;1,1)}.$$

(Показатели степени 0,4 и 0,82 относятся к зеркальному отражению электронов от поверхности металла, а 0,3 и 1,1 — к диффузному).

Отметим, что величина  $A$  для бериллия меньше, чем для всех остальных металлов, а поэтому  $R_0(\text{Be})/R_0(\text{Al}) < 1$ . Тем не менее при  $T < T_2$  из-за значительной величины отношений  $\rho(\text{Be})/\rho(\text{Al})$ , а следовательно, и  $R_s(\rho)(\text{Be})/R_s(\rho)(\text{Al})$  выполняется условие  $R_{s(\text{an})}(\text{Be}) > R_{s(\text{an})}(\text{Al})$ .

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

Поскольку для любого металла при аномальном скин-эффекте и  $T = \text{const}$   $\partial R_0/\partial f > \partial R_s(\rho)/\partial f$ , то с повышением частоты его  $R_0$  растет быстрее, чем  $R_s(\rho)$ . Следовательно, с увеличением частоты отношение  $R_0/R_s(\rho)$  будет расти, т.е.  $R_{s(\text{an})}$  будет в большей степени стремиться к значению  $R_0$ . А так как  $R_0(\text{Be}) < R_0(\text{Al})$ , то с повышением частоты  $R_{s(\text{an})}(\text{Al})/R_{s(\text{an})}(\text{Be})$  при  $T < T_2$  увеличивается, а

$T_2$  снижается, что и видно на рис. 1. Укажем, что, согласно расчетам по уравнениям Чемберса [5], в образцах особо чистого или монокристаллического бериллия с отношением  $\rho(300)/\rho(4,2) \approx 3 \cdot 10^3$  [3] при любой температуре ниже  $T_1$  независимо от величины остаточного сопротивления алюминия на частотах  $\approx 10^{10}$  Гц должно выполняться соотношение  $R_s(\text{Be}) < R_s(\text{Al})$ . В этом случае понятие температуры  $T_2$  теряет смысл.

При повышении частоты уменьшается толщина скин-слоя. Однако температурная зависимость длины свободного пробега остается такой же. Поэтому температура начала проявления аномального скин-эффекта (т.е. температура, при которой становятся равными глубина скин-слоя и длина свободного пробега) увеличивается (на частотах  $\sim 10^{10}$  Гц до 70 К для алюминия и до 100 К для бериллия). Это означает, что при тех температурах, где отношение  $\rho(\text{Al})/\rho(\text{Be})$  максимально, на высоких частотах имеет место аномальный скин-эффект, из-за которого ослабляется влияние  $\rho$  на поверхностное сопротивление Al и Be. Поэтому при  $T_2 < T < T_1$  с повышением частоты  $R_{s(\text{an})}(\text{Be})/R_{s(\text{an})}(\text{Al})$  увеличивается, стремясь к единице.

Так же, как и в [3], в измеряемых образцах наблюдается близкая к линейной зависимость удельного сопротивления бериллия от концентрации примесей в нем (рис. 1, вставка). При этом полученная экспериментально зависимость  $R_s(x)$  в области аномального скин-эффекта также близка к линейной (рис. 2, вставка), что следует из [5].

Как и для бериллия различной чистоты, для сплава бериллий–алюминий существует интервал температур  $T_1$ – $T_2$ , в котором  $\rho$  сплава меньше  $\rho$  алюминия (рис. 3,а).

Остаточное удельное сопротивление сплава намного больше, чем  $\rho(\text{Al})$ , однако, как следует из [3], температура, при которой преобладает остаточное сопротивление  $\rho$  для бериллия с примесями, выше этой же температуры для более чистого бериллия. По-видимому, это и является причиной того, что для сплава также имеется интервал температур  $T_1$ – $T_2$ , при этом  $T_2$  сплава выше, чем чистого бериллия.

При высоких частотах также существует температурный интервал, в пределах которого  $R_s$  сплава меньше  $R_s$  алюминия (рис. 3,б). Однако ход температурной зависимости  $R_s(T)$  в пределах  $T_1$ – $T_2$  не монотонный, как в чистом бериллии. Возможно, это связано с многофазностью сплава,

в котором, согласно [7], существует хрупкая бериллиевая фаза, а также алюминиево-бериллиевая эвтектика.

## Выводы

Экспериментально установлено, что так же, как и на постоянном токе, поверхностное сопротивление  $R_s$  бериллия различной чистоты и его сплава с алюминием в пределах некоторого температурного интервала  $T_1$ – $T_2$  минимально по сравнению с  $R_s$  других металлов. При этом поверхностное сопротивление бериллия может быть в 1,5–2,5 раза ниже поверхностного сопротивления алюминия, а температурная и частотная зависимости  $R_s$  бериллия и его сплава удовлетворительно описываются классическими выражениями электродинамики.

Мне приятно посвятить эту работу памяти академика Б. И. Веркина, о котором я и мои коллеги сохраняем благодарную память.

В заключение приношу благодарность проф. В. М. Дмитриеву за интерес к работе и полезные обсуждения.

1. Г. Е. Плетенецкий, Г. С. Кошкарёв, И. И. Папилов, Г. Ф. Тихинский, *Изв. АН СССР. Металлы* № 3, 907 (1979).
2. Г. Г. Свалов, Д. И. Белый, *Сверхпроводники и криорезистивные провода*, Энергия, Москва (1976).
3. И. И. Папилов, Г. Ф. Тихинский, *Физическое металловедение бериллия*, Атомиздат, Москва (1968).
4. G. E. H. Reiter and E. H. Sondheimer. *Pros. Roy. Soc. A195*, 336 (1948).
5. R. G. Chambers, *Pros. Roy. Soc. A215*, 481 (1952).
6. Ф. Ф. Менде, И. Н. Бондаренко, А. В. Трубицын, *Сверхпроводящие и охлаждаемые резонансные системы*, Наукова думка, Киев (1976).
7. Энциклопедический словарь. *Физика твердого тела*, В. Г. Барьяхтар (гл. ред.) (1998).
8. P. Lunkenheimer, A. Loidl, C. Tome-Rosa, and H. Adrian. *Physica C201*, 13 (1992).
9. В. М. Дмитриев, М. Н. Офицеров, Н. Н. Пренцлау, К. Рогачки, В. Садовски, *ФНТ* 21, 906 (1995).
10. A. Behrooz and A. Zettl, *Solid State Commun.* 70, 1059 (1989).
11. Г. Е. Плетенецкий, Г. Ф. Тихинский, *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Общая и ядерная физика*, вып. 6(6), 70 (1978).
12. M. A. Mitchel. *J. Appl. Phys.* 46, 4742 (1975).

## High frequency ohmic loss of beryllium and its alloy with aluminium

N. N. Prentslau

The surface resistance of Be of different purity and its alloy with Al (50%Be–50%Al) is investigated at temperatures ranged from 4,2 to 300 K in the

---

0–10<sup>10</sup> Hz frequency region. It is shown that within the temperature range (in the vicinity of 77 K) where beryllium is a dc hyperconductor, its surface resistance and the surface resistance of the alloy are minimum compared to that of other metals, in particular, of aluminium. The temperature dependence

of the surface resistance of Be and its alloys is well described by the classical formulae of electrodynamics.