

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

П. С. Попель, Д. А. Ягодин, А. Г. Мозговой, М. А. Покрасин, Экспериментальное исследование скорости звука в расплавленных свинце, висмуте и их взаимном эвтектическом сплаве при высоких температурах, *ТВТ*, 2010, том 48, выпуск 2, 198–205

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 34.239.153.44

2 ноября 2024 г., 23:39:50



УДК 534.221:546.815.86.815'86

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В РАСПЛАВЛЕННЫХ СВИНЦЕ, ВИСМУТЕ И ИХ ВЗАИМНОМ ЭВТЕКТИЧЕСКОМ СПЛАВЕ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© 2010 г. П. С. Попель*, Д. А. Ягодин*, А. Г. Мозговой**, М. А. Покрасин***

*Уральский государственный педагогический университет, г. Екатеринбург

**Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

***Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

Поступила в редакцию 20.06.2009 г.

Импульсно-фазовым методом измерена скорость звука в жидких свинце, висмуте и свинец-висмутовой эвтектике в диапазоне от температуры плавления до 1380 К. Чистота исследованных металлов составляла не менее 99.99 мас. %. Доверительная погрешность результатов экспериментов не превышала 0.3%. Полученные опытные данные сравниваются с имеющимися в литературе.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время Росатом РФ разрабатывает основные положения стратегии развития атомной энергетики России на период до 2050 г., а Российская академия наук – дорожную карту инновационного развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. В соответствии с этими основополагающими документами ядерным реакторам на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями в их первом контуре придается важное значение в структуре большой энергетики страны. Так, планируется создать и ввести в эксплуатацию несколько блоков быстрых реакторов типа БН-800 и БРЕСТ-300 с натриевым и свинцовым теплоносителями соответственно, а вместо выработавших свой ресурс и выводимых из эксплуатации водо-водяных ядерных реакторов на тепловых нейтронах типа ВВЭР-440 предполагается устанавливать моноблочные ядерные реакторы на быстрых нейтронах типа СВБР 75/100 со свинец-висмутовым теплоносителем.

Поэтому экспериментальное исследование теплофизических свойств тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ), таких, как свинец, висмут и их взаимный двойной сплав эвтектического состава (44.5 мас. % Pb + 55.5 мас. % Bi [1]), температура плавления которого составляет 398,1 К по Международной температурной шкале 1990 г. (МТШ-90) [2], и разработка на их основе рекомендуемых справочных данных представляют большой интерес для проектировщиков и создателей быстрых реакторов-бридеров. При этом наиболее информативным свойством среди них является скорость звука в конденсированной фазе. Действительно, по скорости звука в жидкоме-

таллических теплоносителях можно рассчитать их трудноопределимые опытным путем изотермическую сжимаемость и отношение теплоемкостей при постоянном давлении и объеме в расплавленном состоянии.

Однако скорость звука в жидких ТЖМТ изучена до сих пор недостаточно полно, а в справочных изданиях, появившихся в литературе за последние годы, она либо вообще не рассматривается [3], либо ей уделяется мало внимания [4]. В связи с этим для составления более точных и надежных справочных данных о скорости звука в расплавленных ТЖМТ была исследована ее температурная зависимость для жидких свинца, висмута и свинец-висмутовой эвтектики в диапазоне от температуры плавления до ~1400 К.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Скорость звука в металлических расплавах исследовалась импульсно-фазовым методом на опытной установке, принципиальная схема, измерительная ячейка и конструкция которой представлены на рис. 1 и 2. Этот метод измерения является абсолютным, так как не требует какой-нибудь предварительной калибровки. Он основывается на определении длины волны λ и частоты f звука, а скорость звука рассчитывается по следующей формуле:

$$a = \lambda f. \quad (1)$$

Генератор типа Г5-72 вырабатывал прямоугольные электрические сигналы длительностью 1–5 мкс и частотой следования 2 кГц, которые в свою очередь формировали радиоимпульсы из высокочастотного ($f = 31.33$ МГц) синусоидаль-

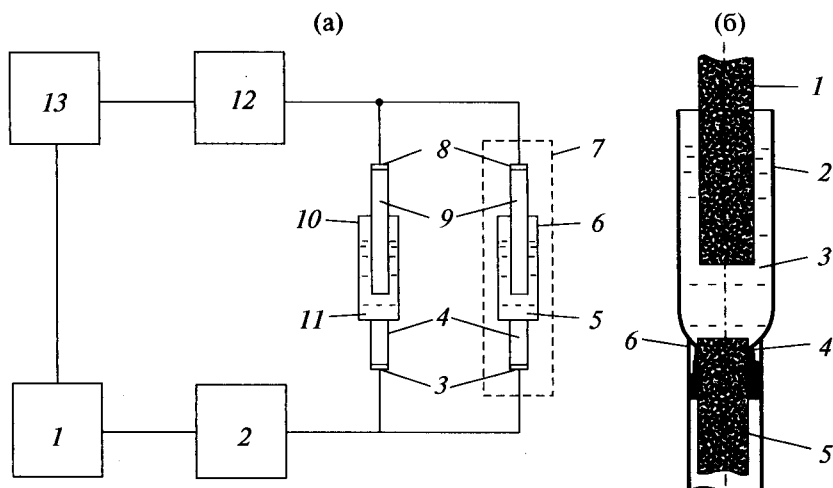


Рис. 1. Экспериментальная установка для измерения скорости звука в металлических расплавах. (а) — принципиальная схема опытной установки: 1 — генератор импульсных сигналов; 2 — генератор синусоидальных сигналов; 3, 8 — пьезоэлементы; 4, 9 — звукопроводы; 5 — исследуемый жидкий металл; 6 — контейнер для металлического расплава; 7 — нагревательная печь; 10 — контейнер для эталонной жидкости; 11 — эталонная жидкость; 12 — селективный усилитель; 13 — осциллограф. (б) — измерительная ячейка: 1 — верхний звукопровод; 2 — контейнер для жидкого металла; 3 — металлический расплав; 4, 6 — термопары; 5 — нижний звукопровод.

ного напряжения от генератора типа Г4-151 со встроенным синхронизирующим частотомером. Эти импульсы, амплитуда которых могла плавно регулироваться от 0 до 1.2 В, подавались на нижние излучающие пьезоэлементы измерительной и эталонной ячеек одной и той же конструкции, соединенных параллельно друг с другом. Причем рабочая ячейка заполнялась исследуемым металлическим расплавом, а эталонная — дистиллированной водой.

Зондирующие сигналы в виде акустических импульсов проходили через элементы измерительной и эталонной ячеек и поступали на их верхние приемные пьезоэлементы, где снова преобразовывались в электрические импульсы. Так как времена задержки акустических сигналов в обеих ячейках подбирались примерно одинаковыми, то электрические импульсы на их выходе, передаваемые по соединительной цепи, интерферировали между собой. Результаты этой интерференции усиливались в селективном приемнике и наблюдались на экране осциллографа типа С1-70.

Верхний звукопровод измерительной ячейки мог перемещаться вдоль ее вертикальной оси. Его перемещение измерялось часовым микрометром типа ИЧ-25 с ценой деления 0.01 мм. При этом на осциллографе фиксировалась последовательность экстремумов интерференционных сигналов, расстояния между которыми равнялись длине звуковой волны.

Длина этой волны может быть рассчитана по формуле

$$\lambda = \Delta h/n, \tag{2}$$

где n — число минимумов акустического колебания, появившихся на экране осциллографа при перемещении верхнего звукопровода измерительной ячейки на Δh , а скорость звука в исследуемой жидкости с учетом соотношений (1) и (2)

$$a = (\Delta h/n)f. \tag{3}$$

Несущая частота f акустических колебаний, равная 31.33 МГц, измерялась электронным частотомером с абсолютной погрешностью ± 50 Гц, что составляет в относительных единицах около $\pm 2 \times 10^{-4}\%$. Поэтому для повышения точности проводимых экспериментов необходимо увеличивать число фиксируемых минимумов звуковой волны, т.е. увеличивать акустическую базу этих измерений.

В качестве материала основных элементов измерительной и эталонной ячеек, в том числе и их нижних и верхних звукопроводов, применялся плавный кварц. Для излучающих и приемных пьезопреобразователей использовался цирконат-титанат свинца в виде круглых пластинок диаметром 5–10 мм и толщиной 0.3–0.7 мм. Эта керамика обладает наилучшими электромеханическими свойствами среди других подобного рода материалов. Она отличается более широкими резонансными полосами и меньшим напряжением возбуждения по сравнению с кварцевыми пьезоэлементами. Так, при амплитуде входных электрических импульсов более 0.5 В в ней возбуждаются достаточно мощные акустические колебания.

Известно [5], что для уменьшения погрешностей акустических измерений, вызываемых дифракционными явлениями, необходимо соблюдать условие $D/\lambda \geq 30$, при котором D — диаметр

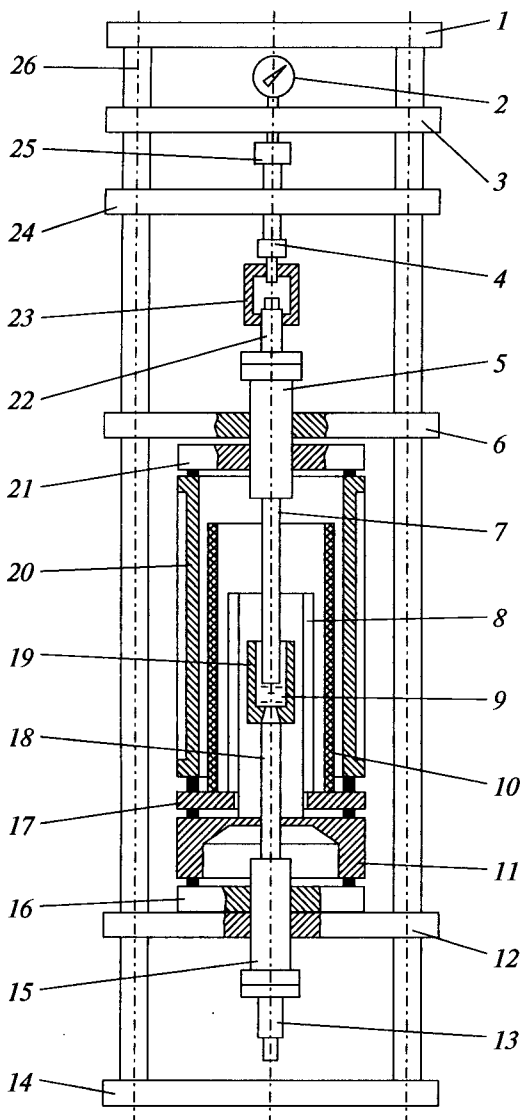


Рис. 2. Конструкция опытной установки для измерения скорости звука в жидких металлах: 1, 3, 6, 12, 24 – установочные платформы; 2 – индикаторный микрометр; 4 – опорное гнездо; 5, 15 – конусные держатели; 7, 18 – верхний и нижний звукопроводы соответственно; 8 – нагревательная печь; 9 – металлический расплав; 10 – радиационный экран; 11, 17 – токовводы печи; 13 – нижний волновод; 14 – массивное основание; 16, 21 – нижний и верхний фланцы соответственно; 19 – рабочая ампула; 20 – корпус печи; 22 – волновод; 23 – соединительная муфта; 25 – микрометрический винт; 26 – стойки.

звуковых излучателей и приемников. Исходя из технологических соображений, диаметр звукопроводов выбирался равным 14 мм, что в полной мере удовлетворяло вышеуказанному условию. Этот диаметр определял диаметр измерительной и эталонной ячеек (20–25 мм) и внутренний диаметр трубчатой нагревательной печи (≥ 30 мм). При длине печи около 200 мм для нагрева метал-

лического расплава до температуры 1500 К требовалась электрическая мощность ~ 2 кВт.

Для обеспечения надежного акустического контакта между кварцевыми звукопроводами и жидким металлом на их торцы наносился тонкий промежуточный слой борного ангидрида [6]. Поскольку он размягчался при температуре около 750 К, основные измерения начинались именно с этой температуры. При этом эксперименты проводились как при нагреве, так и при охлаждении металлического расплава с изотермическими выдержками в течение не менее 20 мин при каждой рабочей температуре.

Температура жидкого металла в измерительной ячейке контролировалась двумя хромель-алюмелевыми термопарами градуировки К [6], поверенными по месту их установки (см. рис. 16) по реперным точкам МТШ-90 – температурам затвердевания галлия, олова, алюминия и серебра. При этом их погрешность составляла ± 0.2 К при температуре до 1000 К и ± 0.3 К при более высоких температурах.

Измерительная ячейка размещалась внутри рабочей камеры экспериментальной установки (см. рис. 2). Эта камера располагалась между нижней и верхней платформами и состояла из водоохлаждаемого корпуса со съемными нижним и верхним фланцами. Во фланцах были устроены проходы для звукопроводов, а также трубчатой электрической печи сопротивления с двумя коаксиальными радиационными экранами, пространство между которыми было заполнено теплоизолирующей набивкой, и водоохлаждаемых токовводов. Отдельные элементы камеры соединялись между собой на герметичных прокладках из вакуумной резины, которые одновременно позволяли осуществлять юстировку излучающего и приемного звукопроводов измерительной ячейки по вертикали относительно друг друга. Сама юстировка производилась тремя винтами, с помощью которых верхний фланец прикреплялся к верхней платформе.

Оба звукопровода зажимались в двухстенных холодильниках-держателях специальными конусными зажимами и резиновыми уплотнителями. В эти держатели ввинчивались нижний и верхний волноводы. При этом верхний волновод оканчивался цилиндрической муфтой с прорезями для вывода высокочастотного кабеля, к которой на шарикоподшипниковой опоре присоединялось гнездо для штыря микрометрического винта. Перемещение верхнего звукопровода, задаваемое этим винтом, регистрировалось затем индикаторным микрометром.

Через нижний фланец рабочей камеры выводились термоэлектродные провода измерительных термопар, а также линия вакуумной и газовой систем экспериментального стенда. Высокотемпературная нагревательная печь представляла

Таблица 1. Химический состав исследованных металлов

| Металл | Содержание химических элементов, мас. % | | | | | | | | | | | |
|--------|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Fe | Ni | Cu | Zn | As | Ag | Cd | Sb | Hg | Tl | Pb | Bi |
| Свинец | 1×10^{-5} | 1×10^{-5} | 1×10^{-5} | 2×10^{-5} | — | 1×10^{-5} | 1×10^{-5} | 3×10^{-5} | 5×10^{-5} | 1×10^{-5} | 99.9996 | 5×10^{-5} |
| Висмут | 1×10^{-3} | — | 1×10^{-4} | 5×10^{-4} | 7×10^{-5} | 2×10^{-5} | 5×10^{-5} | 2×10^{-5} | — | — | 1×10^{-2} | 99.98 |

собой две последовательно соединенные коаксиальные графитовые трубы, электрический ток по которым протекал в противоположных направлениях, что исключало возможность появления переменного магнитного поля и связанной с ним погрешности при исследовании акустических свойств проводящих металлических расплавов.

Перед началом основных измерений образец исследуемого металла или сплава в виде кусочков различных размеров загружался в измерительную ячейку. После этого опытная установка откачивалась при вакууме 1×10^{-2} мм рт.ст. в течение часа и затем заполнялась гелием высокой чистоты. Такая процедура промывки внутреннего пространства установки повторялась несколько раз. Окончательно давление инертного газа в ней устанавливалось на уровне ~ 0.1 МПа.

В экспериментах применялись высокочистые металлы: свинец марки С00 по ГОСТ 22861-93 и висмут марки Ви00 по ГОСТ 10928-90, химический состав которых по данным завода-изготовителя представлен в табл. 1. Свинец-висмутовый сплав эвтектического состава приготавливался весовым способом путем сплавления в вакууме чистых свинца и висмута. Проведенный в специализированной химико-аналитической лаборатории химический анализ нескольких проб этой эвтектики показал, что содержание в ней свинца составляло в среднем 44.6 мас. % и висмута — 55.4 мас. %. Погрешность такого анализа оценивалась равной ± 0.2 мас. %.

Дополнительно после основных измерений определялось содержание металлических примесей в исследованных металлах. Анализы выполнялись масс-спектрометрическим методом в специализированной масс-спектрометрической и газ-хроматографической лаборатории. Они показали, что чистота Pb, Bi и эвтектического сплава системы Pb-Bi в процессе проведения исследований практически не изменялась.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Было проведено экспериментальное исследование скорости звука в жидких свинце, висмуте и свинец-висмутовой эвтектике в широком температурном интервале. Результаты этих экспериментов даны на рис. 3 и в табл. 2, где температура

указана по МТШ-90. Доверительная погрешность полученных опытных данных, объединяющая систематическую и случайную составляющие, рассчитывалась по методике [7] и составляла 0.2% при температурах до 1000 К и 0.3% при более высоких температурах.

Для расплавленных висмута и эвтектического сплава Pb-Bi было выполнено три и две серии измерений соответственно. Результаты каждой серии обрабатывались отдельно друг от друга методом наименьших квадратов (МНК) в интерпретации [8]. В качестве аппроксимирующего уравнения выбирался полином по целым степеням абсолютной температуры вида

$$a = b_0 + b_1T + b_2T^2 + \dots, \tag{4}$$

где a — скорость звука в исследованных металлических расплавах в м/с; T — температура, К.

Регрессионно-статистический анализ результатов этой обработки с использованием критерия Фишера [9] показал, что во всех случаях оптимальным является квадратичное аппроксимирующее уравнение (4). На основе указанного анализа можно было сделать вывод о том, что между опытными данными отдельных серий о скорости звука в жидких висмуте и свинец-висмутовой эв-

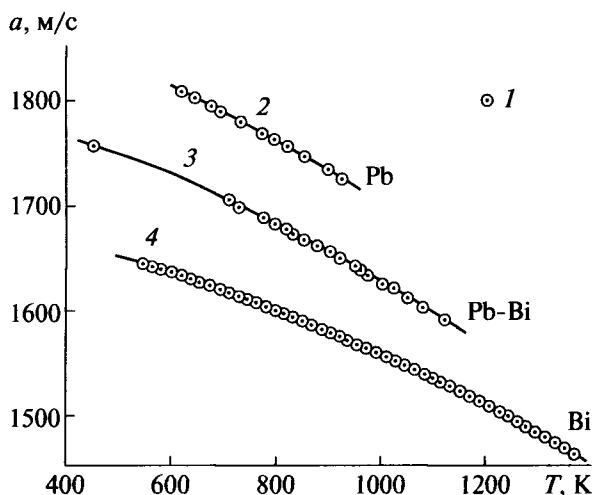


Рис. 3. Температурная зависимость скорости звука в расплавленных свинце, висмуте и свинец-висмутовой эвтектике: 1 — экспериментальные точки; 2—4 — аппроксимирующее уравнение (4).

Таблица 2. Опытные данные о скорости звука в жидких исследованных металлах

| T, К | a, м/с | T, К | a, м/с | T, К | a, м/с |
|-----------------------------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| Свинец | | | | | |
| 614.0 | 1810.2 | 727.9 | 1781.9 | 848.9 | 1747.3 |
| 640.0 | 1802.8 | 767.9 | 1770.1 | 891.9 | 1733.8 |
| 670.0 | 1794.3 | 789.4 | 1764.1 | 919.0 | 1727.3 |
| 687.9 | 1790.0 | 815.4 | 1757.0 | — | — |
| Висмут | | | | | |
| 1-я серия | | 2-я серия | | 1219.9 | 1505.0 |
| 1375.7 | 1464.3 | 759.9 | 1610.7 | 1226.6 | 1502.5 |
| 1350.7 | 1469.5 | 769.9 | 1610.1 | 1234.9 | 1499.1 |
| 1325.8 | 1476.1 | 789.9 | 1605.8 | 1239.8 | 1497.3 |
| 1300.8 | 1481.2 | 799.9 | 1605.3 | 1249.8 | 1496.1 |
| 1274.8 | 1489.4 | 809.9 | 1601.4 | 1259.8 | 1493.0 |
| 1250.8 | 1495.9 | 819.9 | 1598.2 | 1269.8 | 1489.7 |
| 1225.9 | 1507.2 | 829.9 | 1596.2 | 1284.9 | 1485.7 |
| 1200.9 | 1508.0 | 834.9 | 1549.5 | 1299.8 | 1482.3 |
| 1176.0 | 1516.9 | 840.9 | 1594.1 | 1319.8 | 1476.5 |
| 1151.1 | 1520.7 | 844.9 | 1593.0 | 1339.8 | 1470.9 |
| 1126.2 | 1526.4 | 854.9 | 1590.1 | 1359.7 | 1465.9 |
| 1101.3 | 1532.7 | 859.9 | 1589.4 | 1379.7 | 1461.1 |
| 1076.3 | 1539.6 | 874.9 | 1585.4 | 3-я серия | |
| 1051.4 | 1542.2 | 879.9 | 1586.3 | 1193.9 | 1512.0 |
| 1026.4 | 1551.6 | 884.9 | 1584.6 | 1184.5 | 1513.8 |
| 1001.3 | 1559.3 | 889.9 | 1581.8 | 1175.0 | 1515.1 |
| 976.2 | 1561.7 | 894.9 | 1582.1 | 1165.0 | 1517.4 |
| 951.1 | 1567.0 | 899.9 | 1581.0 | 1150.1 | 1520.2 |
| 926.0 | 1575.4 | 904.9 | 1580.0 | 1130.2 | 1524.8 |
| 900.9 | 1584.2 | 909.9 | 1579.2 | 1100.3 | 1532.6 |
| 875.9 | 1583.8 | 920.0 | 1575.8 | 1035.4 | 1549.6 |
| 850.9 | 1593.6 | 930.0 | 1574.8 | 1020.4 | 1552.8 |
| 825.9 | 1596.0 | 940.0 | 1571.6 | 970.2 | 1564.4 |
| 780.4 | 1610.7 | 960.1 | 1567.2 | 869.9 | 1588.6 |
| 741.4 | 1615.8 | 985.2 | 1561.5 | 849.9 | 1591.6 |
| 720.9 | 1617.6 | 1000.3 | 1558.9 | 779.9 | 1609.9 |
| 700.9 | 1621.6 | 1047.9 | 1547.0 | 749.9 | 1613.0 |
| 676.0 | 1628.3 | 1064.9 | 1543.5 | 729.9 | 1615.9 |
| 651.0 | 1630.7 | 1080.3 | 1537.3 | 719.9 | 1618.2 |
| 625.0 | 1634.9 | 1120.2 | 1529.1 | 709.9 | 1619.5 |
| 611.8 | 1639.2 | 1140.1 | 1526.1 | 699.9 | 1622.5 |
| 601.0 | 1641.9 | 1160.0 | 1519.5 | 689.9 | 1624.9 |
| 591.0 | 1642.5 | 1170.0 | 1520.1 | 680.0 | 1626.0 |
| 581.0 | 1641.9 | 1180.0 | 1517.1 | 670.0 | 1628.9 |
| 571.0 | 1642.5 | 1190.0 | 1514.6 | 660.0 | 1629.1 |
| 561.0 | 1644.0 | 1199.0 | 1510.0 | 650.0 | 1631.5 |
| 551.1 | 1644.2 | 1204.9 | 1509.6 | 640.0 | 1632.3 |
| 547.0 | 1644.3 | 1209.9 | 1506.8 | 630.0 | 1634.5 |
| 545.5 | 1645.1 | 1214.9 | 1505.8 | 620.0 | 1638.1 |
| Свинец-висмутовая эвтектика | | | | | |
| 1-я серия | | 898.4 | 1654.7 | 1125.2 | 1595.1 |
| 702.9 | 1706.8 | 922.0 | 1650.4 | 2-я серия | |
| 743.9 | 1696.4 | 945.6 | 1640.6 | 1052.4 | 1612.4 |
| 772.9 | 1690.5 | 976.2 | 1635.2 | 963.7 | 1639.5 |
| 797.9 | 1682.9 | 1001.3 | 1625.4 | 811.9 | 1672.1 |
| 825.9 | 1675.3 | 1024.4 | 1625.4 | 721.4 | 1697.0 |
| 848.4 | 1668.8 | 1050.9 | 1612.4 | 451.5 | 1757.8 |
| 873.9 | 1659.1 | 1074.3 | 1601.6 | — | — |

Таблица 3. Коэффициенты аппроксимирующего уравнения (4) и их средняя квадратическая погрешность

| b_0 | Δb_0 | $-b_1$ | Δb_1 | $-b_2 \times 10^3$ | $\Delta b_2 \times 10^3$ |
|-----------------------------|--------------|---------|--------------|-----------------------|--------------------------|
| м/с | | м/(с К) | | м/(с К ²) | |
| Свинец | | | | | |
| 1921.79 | 0.92 | 0.12464 | 0.00242 | 0.09531 | 0.00157 |
| Висмут | | | | | |
| 1717.48 | 0.50 | 0.08583 | 0.00107 | 0.07298 | 0.00055 |
| Свинец-висмутовая эвтектика | | | | | |
| 1837.07 | 2.62 | 0.14135 | 0.00732 | 0.06841 | 0.00376 |

тектике систематическое расхождение отсутствовало. Поэтому результаты различных серий экспериментов для висмута и свинец-висмутовой эвтектики принимались равноценными и им приписывалась одна и та же доверительная погрешность.

Затем весь массив опытных данных о скорости звука для каждого из исследованных металлических расплавов обрабатывался весовым МНК аппроксимирующим уравнением (4). Оптимальная степень этого уравнения определялась также с применением критерия Фишера. Коэффициенты аппроксимирующего уравнения и их средняя квадратическая погрешность, соответствующая 95%-ной доверительной вероятности, представлена в табл. 3.

На рис. 4 показаны отклонения экспериментальных данных о скорости звука в исследованных жидких металлах от рассчитанных по аппроксимирующему уравнению (4). Средняя квадратическая величина этих отклонений составляет

0.05, 0.1 и 0.15% для Pb, Bi и эвтектики системы Pb–Bi соответственно.

Отклонения результатов проведенных измерений скорости звука в расплавленных свинце, висмуте и свинец-висмутовой эвтектике от рекомендуемых справочных данных [10, 11] приведено на рис. 5. Как видно из рис. 5, расхождение между этими данными лежит в пределах $\pm 1\%$, что несколько превышает доверительную погрешность экспериментов настоящей работы.

Значения скорости звука в жидких Pb, Bi и сплаве системы Pb–Bi эвтектического состава в диапазоне от температуры плавления до 1300 К с шагом 50 К, рассчитанные по аппроксимирующему уравнению (4), представлены в табл. 4. В ней температура плавления (кристаллизации) свинца 600.61 К принята по МТШ-90, в которой она является реперной точкой, висмута 544.56 К – по данным Г.А. Хачкурузова (ГИПХ, г. Ленинград, 1988 г.) и свинец-висмутовой эвтектики 398.1 К – по [1].

На рис. 6 показано отклонение опытных данных настоящей работы о скорости звука в расплавленной свинец-висмутовой эвтектике от рассчитанных по интерполяционной формуле Кудрявцева [12], которая для двойного металлического сплава записывается в виде

$$a_{Pb-Bi}^2 = c_{Pb} a_{Pb}^2 + c_{Bi} a_{Bi}^2, \tag{5}$$

где a_{Pb} , a_{Bi} , a_{Pb-Bi} – скорость звука в жидких свинце, висмуте и свинец-висмутовой эвтектике соответственно; c_{Pb} , c_{Bi} – массовая доля свинца и висмута в эвтектическом сплаве системы Pb–Bi соответственно, причем $c_{Pb} + c_{Bi} = 1$. Скорость звука в расплавленных чистых Pb и Bi принималась по опытным данным настоящей работы. Из рис. 6 видно, что это отклонение имеет положительный

Таблица 4. Скорость звука в расплавленных исследованных металлах

| T, К | a, м/с | | | T, К | a, м/с | | |
|--------|--------|--------|--------|------|--------|--------|--------|
| | Pb | Bi | Pb–Bi* | | Pb | Bi | Pb–Bi* |
| 398.1 | – | – | 1770.4 | 800 | 1761.1 | 1602.1 | 1680.6 |
| 400 | – | – | 1770.0 | 850 | 1747.0 | 1591.8 | 1667.9 |
| 450 | – | – | 1760.0 | 900 | 1732.4 | 1581.1 | 1654.8 |
| 500 | – | – | 1749.7 | 950 | 1717.4 | 1570.1 | 1641.4 |
| 544.56 | – | 1649.1 | – | 1000 | 1701.8 | 1558.7 | 1627.7 |
| 550 | – | 1648.2 | 1739.0 | 1050 | – | 1546.9 | 1613.6 |
| 600 | – | 1639.7 | 1728.0 | 1100 | – | 1534.8 | 1599.2 |
| 600.61 | 1812.5 | – | – | 1150 | – | 1522.3 | 1584.4 |
| 650 | 1800.5 | 1630.9 | 1716.7 | 1200 | – | 1509.4 | 1569.3 |
| 700 | 1787.8 | 1621.6 | 1705.0 | 1250 | – | 1496.2 | – |
| 750 | 1774.7 | 1612.1 | 1693.0 | 1300 | – | 1482.6 | – |

* Свинец-висмутовый сплав эвтектического состава.

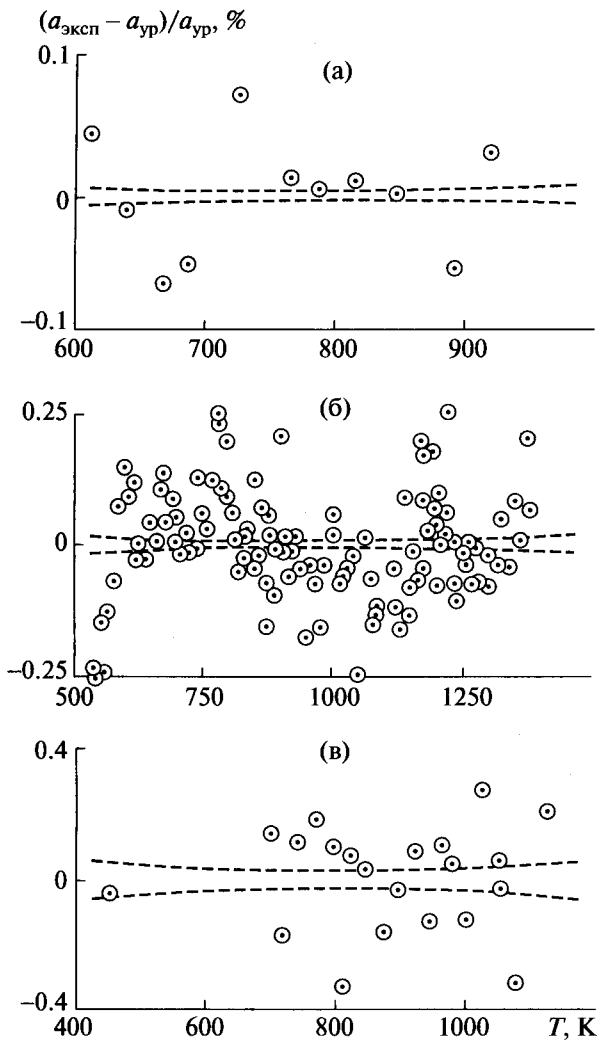


Рис. 4. Отклонение опытных данных настоящей работы о скорости звука в расплавленных металлах от рассчитанных по аппроксимирующему уравнению (4): (а) – свинец; (б) – висмут; (в) – свинец-висмут-овая эвтектика. Всюду штриховыми линиями указаны границы коридора средней квадратической погрешности расчетных данных о плотности исследованных металлов с 95%-ной доверительной вероятностью.

знак, а по величине превышает аналогичное отклонение для плотности расплавленной свинец-висмут-овой эвтектики [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены высокоточные и надежные измерения скорости звука в жидких свинце, висмуте и свинец-висмут-овой эвтектике в интервале от температуры плавления до 1380 К. По результатам выполненных экспериментов были получены аппроксимирующие уравнения, а также рассчитаны таблицы скорости звука в этих металлах и сплаве в широком температурном диапазоне и оценена их доверительная погрешность.

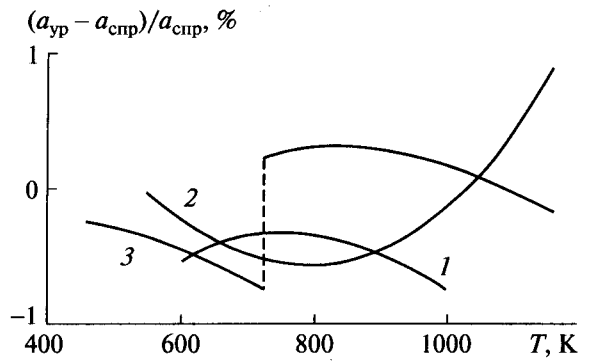


Рис. 5. Отклонение результатов настоящей работы о скорости звука в металлических расплавах от рекомендуемых справочных данных: 1 – свинец [9]; 2 – висмут [9]; 3 – свинец-висмут-овая эвтектика [10].

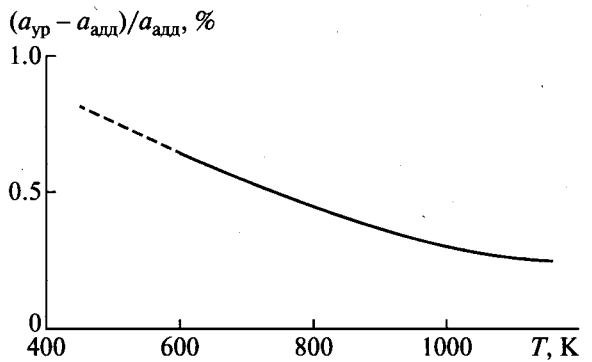


Рис. 6. Отклонение экспериментальных данных настоящей работы о скорости звука в жидкой эвтектике системы Pb–Bi от рассчитанных по формуле Кудрявцева (5).

Эти данные в определенной степени уточняют имеющиеся в литературе рекомендации и могут рассматриваться в качестве стандартных справочных данных для различных областей современной науки и новой техники.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 09-08-00040а и 07-08-00589а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Binary Alloy Phase Diagrams / Ed. Massalski T.B. V. 1. Metals Park, OH, USA: American Society for Metals, 1987. 1100 p.
2. Preston-Thomas H. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) // Metrologia. 1990. V. 27. № 1. P. 3.
3. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / Под. ред. Кириллова П.Л. М.: ИздАТ, 2007. 280 с.
4. Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-Hydrau-

- lics and Technologies. Karlsruhe, Germany: Forschungszentrum Karlsruhe, 2007. 691 p.
5. Глазов В.М., Ким С.Г., Мамбетерзина Г.К. Аппаратура и методика для высокочастотных акустических исследований расслаивания жидкометаллических и полупроводниковых систем // Заводская лаборатория. 1991. Т. 57. № 8. С. 45.
 6. Ким Сен Гук. Молекулярная акустика жидких полуметаллов и полупроводников. Дисс. ... доктора химических наук. М.: ИОНХ РАН, 1991. 210 с.
 7. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. М.: Изд-во стандартов, 1976. 10 с.
 8. Попов В.Н., Мозговой А.Г. Инструмент аппроксимации разнородных данных. М.: Интерконтакт Наука, 2006. 48 с.
 9. Худсон Д. Статистика для физиков. 2-е изд. дополн. Пер. с англ. М.: Мир, 1970. 296 с.
 10. Пашаев Б.П., Палчаев Д.К., Пащук Е.Г., Ревелис В.Г. Плотность, скорость ультразвука, электро- и теплопроводность легкоплавких многовалентных металлов в жидком состоянии // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. 1982. № 3. С. 1.
 11. Стремоусов В.И., Соломин Б.А. Скорость звука в тройной жидкометаллической системе Bi-Pb-Sn // ЖФХ. 1975. Т. 49. № 8. С. 1972.
 12. Кудрявцев Б.Б. О расчете скоростей звука в бинарных смесях. В сб.: Применение ультразвуки к исследованию вещества. Вып. 11 / Труды VII конференции по применению ультразвуки к исследованию вещества. М.: МОПИ, 1971. С. 63.
 13. Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Мозговой А.Г. и др. Плотность жидкометаллического теплоносителя на основе свинец-висмутовой эвтектики при высоких температурах // ТВТ. 2006. Т. 44. № 2. С. 307.