

# Криогенная техника: теплопроводность конструкционных алюминиевых сплавов

Рассматриваются метод и измерительная установка, предназначенные для определения теплопроводности существующих конструкционных материалов, используемых в сверхпроводящих магнитах и других объектах криогенной техники. Приводятся результаты исследований температурной зависимости теплопроводности современных конструкционных алюминиевых сплавов ENAW6061 и ENAW6063 в диапазоне от 13 до 82 К. УДК статьи 536.2.08

# В

## А.Ф. Бродников<sup>1</sup>

Новосибирский филиал ФГАОУ ДПО «Академия стандартизации, метрологии и сертификации (учебная)»,  
доцент, канд. техн. наук,  
maibox@asmsnsk.ru

## В.И. Кондратьев<sup>2</sup>

ФГБУН «Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук»,  
V.I.Kondratyev@inp.nsk.su

настоящее время алюминиевые сплавы широко применяются в объектах криогенной техники, при всех своих достоинствах и недостатках они остаются очень востребованными конструкционными металлами для использования при криогенных температурах. Нас в данном случае интересует теплопроводность представленных на отечественных и зарубежных рынках алюминиевых сплавов, справочные данные которых помогают скорректировать конструкцию изделия с целью увеличения теплопроводности и повышения эффективности охлаждения.

В соответствующей литературе приведены справочные данные о различных свойствах алюминиевых сплавов, однако о теплопроводности интересующих нас сплавов ENAW6061 и ENAW6063 представлены данные либо полувекковой давности [1], либо теоретические, полученные методом прогнозирования, основанные на проявлениях физических способностей металлов, например их удельном электрическом сопротивлении, или температурной проводимости [2], что небезосновательно оставляет место для некоторых вопросов.

Предприятия, в том числе и зарубежные, которые поставляют на рынок различные материалы, сегодня не имеют возможности осуществлять выходной контроль по колоссальному числу присущих изделиям свойств, вдобавок еще и в диапазоне криогенных температур. Кроме того российские федеральные законы «О техническом регулировании» и «О стандартизации» в свое время отменили обязательность соблюдения государственных (национальных) стандартов, придав

им статус «добровольного применения» [3].

Из сертификатов качества на приобретенные нами алюминиевые сплавы ENAW6061-T6 и ENAW6063-T6 явствует, что они имеют почти одинаковый химический состав. Это затрудняет поиск различий двух сплавов с точки зрения свойств материалов, их полезности и возможного применения.

Соответствие химического состава (%) металла, указанного в сертификате качества, осуществляется при помощи рентгеноспектрального микроанализа исследуемых образцов на базе сканирующего электронного микроскопа «Hitachi S-3400N Type II» и кремний-литиевого энергодисперсионного детектора. Спектральное разрешение менее 133 эВ на линии Mn Ka и менее 65 эВ на линии C Ka. Анализируемый материал включает в себя элементы от углерода до урана.

Образцы, представленные для проведения измерений рентгеноспектрального микроанализа и теплопроводности, выполнены в виде плоскопараллельного цилиндра диаметром 30 мм и высотой 10 мм. По полученным данным определяются отклонения от номинальных требований химического состава (%) в партии металла. Протокол измерения сплава ENAW6063-T6 представлен на рис. 1.

Теоретическую основу большинства наиболее точных современных методов измерений теплопроводности составляют закономерности стационарных одномерных плоских или цилиндрических температурных полей в образцах в виде пластины или цилиндра [4, 5]. Для решения поставленной задачи разработана криогенная уста-

<sup>1</sup> доцент, г. Новосибирск, Россия

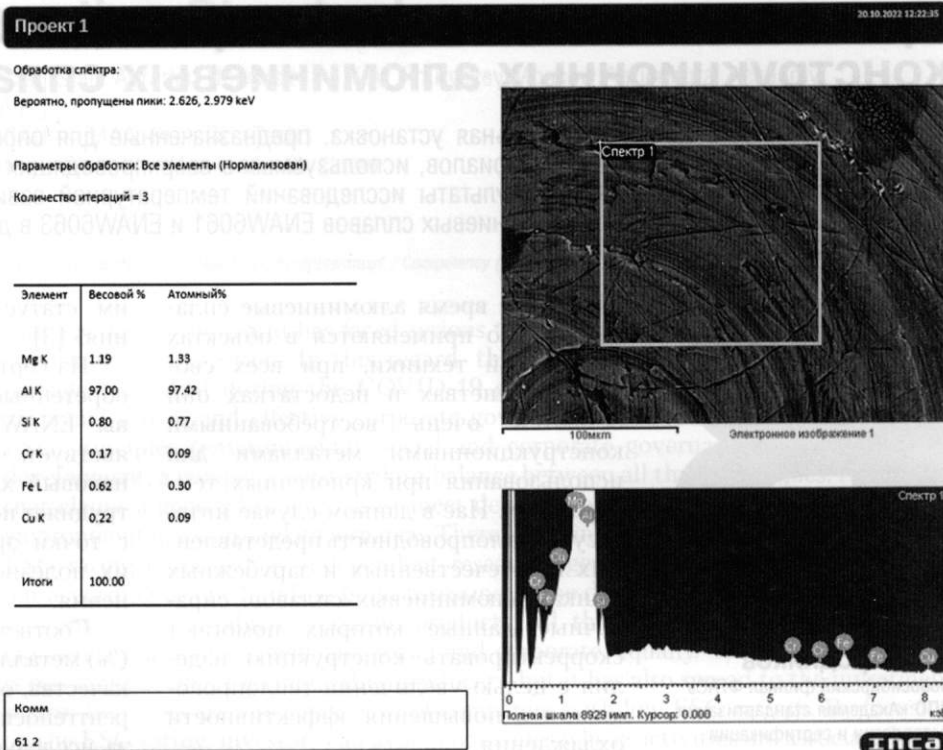
<sup>2</sup> научный сотрудник, г. Новосибирск, Россия

Для цитирования: Бродников А.Ф., Кондратьев В.И. Криогенная техника: теплопроводность конструкционных алюминиевых сплавов // Компетентность / Competency (Russia). — 2023. — № 2. DOI: 10.24412/1993-8780-2023-2-27-31

## ключевые слова

конструкционные сплавы, теплопроводность, измерение, метод пластины (цилиндра), погрешность, криостат

**Рис. 1.** Протокол рентгеноспектрального микроанализа [Protocol of X-ray spectral microanalysis]



новка, основанная на методе измерений теплопроводности, использующем стационарное одномерное температурное поле в пластине [4]. Расчет теплопроводности  $\lambda$  в этом случае проводится по формуле

$$\lambda = Q_0 h / (T_H - T_X) S_0, \quad (1)$$

где  $Q_0$  — тепловой поток в образце;

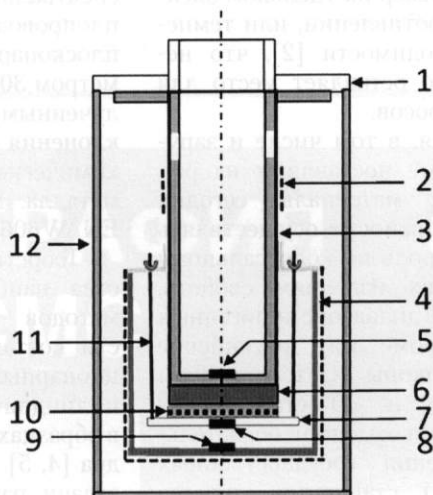
$h, S_0$  — толщина и площадь поперечного сечения образца;

$T_H$  и  $T_X$  — температура его нагретой и охлажденной поверхностей.

Схема стационарного метода пластины и оценка значения погрешности  $\delta_\lambda$  в полной мере соответствует уровню точности большинства средств измерений теплопроводности [5]. Ее значение зависит, в основном, от наличия методических погрешностей измерений величин, входящих в (1). Главными источниками методических погрешностей являются несоблюдения условий адиабатичности и стационарности, а также измерения температуры поверхностей образца [6].

Установка для реализации рассмотренного метода создана на базе криостата КГ-15/150-1 с жидким гелием, в который погружают ее тепловой блок (рис. 2) [7]. Блок содержит основной нагреватель, окруженный адиабатическим экраном, который обеспечивает исключение тепловых потерь нагревателя, и теплосток с нагревателем, задающим необходимую температуру

**Рис. 2.** Тепловой измерительный блок установки [Thermal measuring unit of the installation]



образца. Прижимное кольцо и тяги обеспечивают плотный контакт основного нагревателя с образцом и теплоотводом. Все устройство помещается в вакуумную камеру.

Для калибровки измерительной установки были взяты два образца — из нержавеющей стали диаметром 30 мм и высотой 10 мм и кварцевого стекла марки КВ [8] диаметром 30 мм и высотой 8 мм, которые были использованы в качестве однозначных мер теплопроводности. Данные, полученные при проведении измерений и их сравнении со стандартными значениями теплопроводности кварцевого стекла КВ, приведены в табл. 1.

Из таблицы следует, что в диапазоне от гелиевых до азотных температур отклонение полученных на установке результатов от стандартных данных не превышает 5 %. Оценка погрешности соответствует требованиям ГОСТ 8.511–84, предъявляемым к средствам измерений теплопроводности в указанном диапазоне температур.

При выполнении измерений на образце из нержавеющей стали марки 12X18H10T в области азотных и гелиевых температур возникли трудности с заданием температурных режимов между нагревателем и теплоотводом, поэтому полученные данные отличаются от стандартных на 20 %. Они приведены в табл. 2.

Теплопроводность исследуемых образцов алюминиевых сплавов ENAW6061 и ENAW6063 была проверена на нескольких образцах диаметром 30 мм и высотой 10 и 15 мм. Верхняя и нижняя грани исследуемых образцов смазываются криогенной вакуумной смазкой «APIEZON», для улучшения контакта образца с нагревателем и теплоотводом используется индий, прижимным кольцом обеспечивается плотный контакт. Устанавливается адиабатический экран с нагревателем, вакуумная камера плотно, при помощи индиевой прокладки, соединяется с фланцем измерительного блока, в котором создается вакуум 2,4 Е-2 Торр. Сам измерительный блок размещается во внутренней полости

криостата КГ-15/150-1. Измерительные провода подключаются к многоканальному мультиметру на базе АЦП AD7794 и источникам линейного питания АКПП, весь процесс измерения регистрируется с помощью ПК. Разность температуры между нагревателем и теплоотводом поддерживается в районе 3...5 К, между адиабатическим экраном и нагревателем — в районе 0,01...0,03 К. Длительность измерения после стабилизации температуры заданного режима составила не менее 1,5 часа.

Средние данные теплопроводности конструкционных сплавов алюминия, установленные при проведении измерений, приведены в табл. 3.

В заключение можно сказать, что полученные значения теплопроводности сплавов отличаются от справочных данных [1, 2], что объясняется изменением технологий и усовершенствованием промышленного оборудования. Зафиксированные нами действительные значения теплопроводности, не-

Таблица 1  
**Теплопроводность кварцевого стекла КВ**  
**[Thermal conductivity of quartz glass KV]**

| Результат измерения [Measurement result] |                      | Стандартные значения [Standard values] |                      | Отклонение, $\delta_\lambda$ [Deviation, $\delta_\lambda$ ] |
|--|----------------------|--|----------------------|---|
| $T_0$ , К                                | $\lambda$ , Вт/(м·К) | $T$ , К                                | $\lambda$ , Вт/(м·К) | %   |
| 6,58                                     | 0,102                | 6,51                                   | 0,107                | 4,6   |
| 9,90                                     | 0,105                | 9,82                                   | 0,109                | 3,7   |
| 76,98                                    | 0,513                | 73,12                                  | 0,538                | 4,6   |

Таблица 2  
**Теплопроводность нержавеющей стали марки 12X18H10T**  
**[Thermal conductivity of stainless steel grade 12X18H10T]**

| Образец [Sample] | $\lambda_{He}$ , Вт/(м·К) | $\lambda_N$ , Вт/(м·К) | Отклонение, $\delta_\lambda$ [Deviation, $\delta_\lambda$ , %] |
|------------------|---------------------------|------------------------|--|
| 12X18H10T        | 1,79                      | 6,11                   | $\pm 20$   |

Таблица 3  
**Теплопроводность конструкционных сплавов алюминия при температуре 13 и 82 К**  
**[Thermal conductivity of structural aluminum alloys at temperatures of 13 and 82 K]**

| Образец [Sample] | $\lambda_{13K}$ , Вт/(м·К) | $\lambda_{82K}$ , Вт/(м·К) | Отклонение, $\delta_\lambda$ [Deviation, $\delta_\lambda$ , %] |
|------------------|----------------------------|----------------------------|--|
| ENAW6061         | 3,7                        | 12                         | 20   |
| ENAW6063         | 3,3                        | 10                         | 20   |

Статья поступила  
в редакцию 15.12.2022

смотря на отклонения в 20 %, в свою очередь помогают более точно рассчитать время охлаждения конструкции изделия для увеличения теплопроводности и повышения эффективности охлаждения. После проведения целого ряда косвенных замеров выявлено, что

наша измерительная установка может работать с наименьшими отклонениями только на небольших мощностях температурных режимов, для более мощных температурных режимов необходимо конструкционно переделать измерительную ячейку. ■

## Список литературы

1. Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. — М.: Машиностроение, 1975.
2. Woodcraft A. L. Predicting the thermal conductivity of aluminium alloys in the cryogenic to room temperature range // Cryogenics. — 2005. — Т. 45. — № 6; [http://reference.lowtemp.org/woodcraft\\_alalloy.pdf](http://reference.lowtemp.org/woodcraft_alalloy.pdf).
3. Рыбак Н.И., Черепанов В.Я., Шейнин Э.М., Ямшанов В.А. Правовой статус национальных стандартов единства измерений // Стандарты и качество. — 2015. — № 12.
4. Свириденко В.И., Медведев В.И., Рыбкин Н.П., Горбунова В.Г. Теплопроводность кварцевого стекла КВ при температуре 2–300 К // Измерительная техника. — 1987. — № 5.
5. Черепанов В.Я. Измерения параметров теплообмена // Мир измерений. — 2005. — № 9.
6. Лозинская О.М., Рыбак Н.И., Черепанов В.Я., Шейнин Э.М., Ямшанов В.А. Государственный первичный эталон единицы поверхностной плотности теплового потока // Измерительная техника. — 2009. — № 10.
7. Бродников А.Ф., Черепанов В.Я. Криогенная установка для измерений теплопроводности конструкционных материалов // Приборы. — 2015. — № 6.
8. ГОСТ 15130–86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия.

## СОБЫТИЕ

### Метрологическое обеспечение измерительных систем

**11–12 апреля 2023 г. в ФБУ «Пензенский ЦСМ» (г. Пенза) состоится XII научно-практическая конференция «Метрологическое обеспечение измерительных систем»**

Пензенский ЦСМ является организатором научно-практических конференций «Метрологическое обеспечение измерительных систем» начиная с 2004 года. В последнее время значительно возросла потребность в повышении квалификации специалистов различных отраслей промышленности в области метрологического обеспечения измерительных систем. В частности, эту тенденцию подтвердил и прошедший в октябре прошлого года обучающий семинар «Испытания, поверка и калибровка измерительных систем», проведенный Пензенским ЦСМ совместно с Нижегородским филиалом Академии стандартизации, метрологии и сертификации.

В рамках конференции запланированы выступления по опыту применения и метрологического обслуживания измерительных систем (ИС), в том числе информационных, функционирующих в составе систем учета электрической и тепловой энергии, нефти и нефтепродуктов, газа, а также экспозиция материалов по новым разработкам ИС.

Среди рассматриваемых вопросов:

- ▶ Правовая и нормативно-техническая база метрологического обеспечения ИС.
- ▶ Новые разработки ИС и их компонентов.
- ▶ Проблемы метрологического обеспечения при эксплуатации измерительных систем.

Приглашаются ведущие специалисты метрологических институтов, ФБУ ЦСМ, организации разработчиков и проектировщиков ИС, а также специалисты различных отраслей промышленности, эксплуатирующих измерительные системы.

Материалы конференции будут изданы в виде сборника докладов в электронной форме.

Заявки на участие принимаются до 24 марта 2023 г.:  
e-mail: [info@penzacsm.ru](mailto:info@penzacsm.ru), факс: 8(841) 249 85 00.



# Cryogenic Technology: Thermal Conductivity of Structural Aluminum Alloys

**A.F. Brodnikov**<sup>1</sup>, Novosibirsk Branch of FSAEI FVT Academy for Standardization, Metrology and Certification (Training), Assoc. Prof. PhD (Tech.), maibox@asmnsk.ru  
**V.I. Kondrat'ev**<sup>2</sup>, FSBIS G.I. Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, V.I.Kondratyev@inp.nsk.su

<sup>1</sup> Associate Professor, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Researcher, Novosibirsk, Russia

**Citation:** Brodnikov A.F., Kondrat'ev V.I. Cryogenic Technology: Thermal Conductivity of Structural Aluminum Alloys, *Kompetentnost' / Competency (Russia)*, 2023, no. 2, pp. 27–31. DOI: 10.24412/1993-8780-2023-2-27-31

## key words

structural alloys, thermal conductivity, measurements, plate (cylinder) method, error, cryostat

A method and a measuring device designed to determine the thermal conductivity of existing structural materials used in superconducting magnets and other cryogenic equipment objects are considered. The results of studies of the temperature dependence of the thermal conductivity of modern structural aluminum alloys ENAW6061 and ENAW6063 in the range from 13 to 82 K.

Obtained values of the thermal conductivity of the alloys differ from the reference data. This is due to changes in technology and the improvement of industrial equipment. The actual values of thermal conductivity obtained by us, despite deviations of 20 %, in turn help to more accurately calculate the cooling time of the product structure in order to increase thermal conductivity and increase cooling efficiency.

We carried out a number of indirect measurements and found that our measuring unit can work with the smallest deviations only at small capacities of temperature regimes. For more powerful temperature conditions, it is necessary to constructively alter the measuring cell.

## References

1. Novitskiy L.A., Kozhevnikov I.G. Teplofizicheskie svoystva materialov pri nizkikh temperaturakh [Thermophysical properties of materials at low temperatures], Moscow, *Engineering*, 1975, 216 P.
2. Woodcraft A. L. Predicting the thermal conductivity of aluminium alloys in the cryogenic to room temperature range, *Cryogenics*, 2005, vol. 45, no. 6, pp. 421–431; [http://reference.lowtemp.org/woodcraft\\_alalloy.pdf](http://reference.lowtemp.org/woodcraft_alalloy.pdf).
3. Rybak N.I., Cherepanov V.Ya., Sheynin E.M., Yamshanov V.A. Pravovoy status natsional'nykh standartov edinstva izmereniy [The legal status of national standards of unity of measurements], *Standards and quality*, 2015, no. 12, pp. 44–47.
4. Sviridenko V.I., Medvedev V.I., Rybkin N.P., Gorbunova V.G. Teploprovodnost' kvartsevogo stekla KV pri temperature 2–300 K [Thermal conductivity of quartz glass KV at a temperature of 2–300 K], *Measuring equipment*, 1987, no. 5.
5. Cherepanov V.Ya. Izmereniya parametrov teploobmena [Measurements of heat transfer parameters], *The world of dimensions*, 2005, no. 9, pp. 4–15.
6. Lozinskaya O.M., Rybak N.I., Cherepanov V.Ya., Sheynin E.M., Yamshanov V.A. Gosudarstvennyy pervichnyy etalon edinstva poverkhnostey plotnosti teplovogo potoka [State primary standard of the unit of surface heat flux density], *Measuring equipment*, 2009, no. 10, pp. 52–55.
7. Brodnikov A.F., Cherepanov V.Ya. Kriogennaya ustanovka dlya izmereniy teploprovodnosti konstruktsionnykh materialov [Cryogenic installation for measuring thermal conductivity of structural materials], *Instruments*, 2015, no. 6, pp. 24–27.
8. GOST 15130–86 Quartz optical glass. General technical conditions.