

УДК 537.311.4

## КОНТАКТНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРАФИТА

© 2022 г. М. Г. Зеодинов, А. В. Костановский\*, М. Е. Костановская, А. А. Пронкин

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия**\*E-mail: Kostanovskiy@gmail.com*

Поступила в редакцию 27.12.2020 г.

После доработки 16.06.2022 г.

Принята к публикации 10.07.2022 г.

В работе сравниваются два существующих подхода к изучению контактного электрического сопротивления: в зарубежных исследованиях результаты измерения представляют как сопротивление одного контактного соединения, в отечественных — как контактное удельное электрическое сопротивление. В качестве исследуемого материала выбран графит. Впервые представлены результаты экспериментального исследования контактного электрического сопротивления графита марки МПГ-7 в области температур 350–750 К.

DOI: 10.31857/S0040364422040081

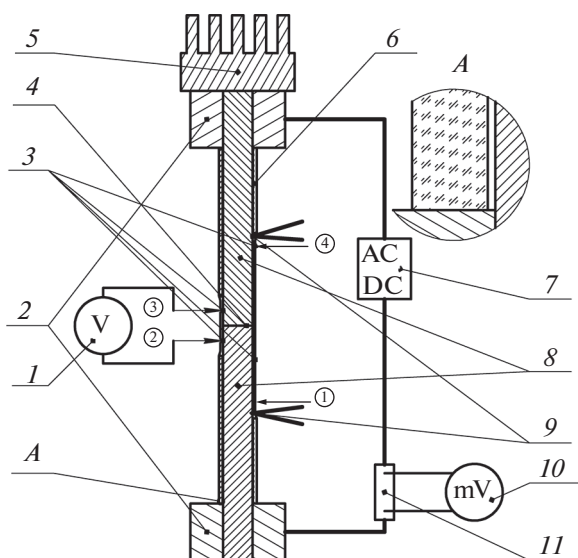
### ВВЕДЕНИЕ

Контактное электрическое сопротивление (КС) представляет собой сопротивление, которое возникает в месте соединения двух образцов одного или разных материалов. КС исследуется с середины 20-го века. Повышенный интерес к КС вызван, в частности, совершенствованием процесса сварки [1]. В настоящее время электрическое и тепловое КС чаще изучаются в приложении к задачам микроэлектроники, где используются многослойные тонкие пленки и покрытия. Электрическое КС неоднозначно трактуется в отечественной и зарубежной научной литературе. В работе [2] КС определяется как увеличение удельного электрического сопротивления (УЭС) по сравнению с сопротивлением монолитного материала (контактные поверхности отсутствуют). Соответственно, КС имеет размерность Ом м. В зарубежных работах [1] КС трактуется как сопротивление одной контактной поверхности, выраженное в Ом. Принципиальное отличие перечисленных подходов заключается в трактовке площади контактной поверхности: в [2] подразумевается, что вся площадь контактирующих элементов соответствует площади экспериментального образца; в [1] предполагается, что контактная поверхность является только частью от общей площади и зависит от многих внешних параметров и даже может меняться во времени. Одним из внешних параметров, который может влиять на КС, является внешнее усилие. В [2] для определения внешнего усилия используется давление, при этом предполагается, что контактная поверхность равна площади контактирующих экспериментальных образцов. В [1] внешнее усилие выражается в приложенном весе. Данные принципиальные противоречия затруд-

няют сравнение эмпирических результатов. Цель настоящей работы состоит в сравнении указанных подходов определения КС, которое проведено для случая неподвижных контактирующих элементов на одном материале — отечественной марке графита МПГ-7 в диапазоне температур 350–750 К.

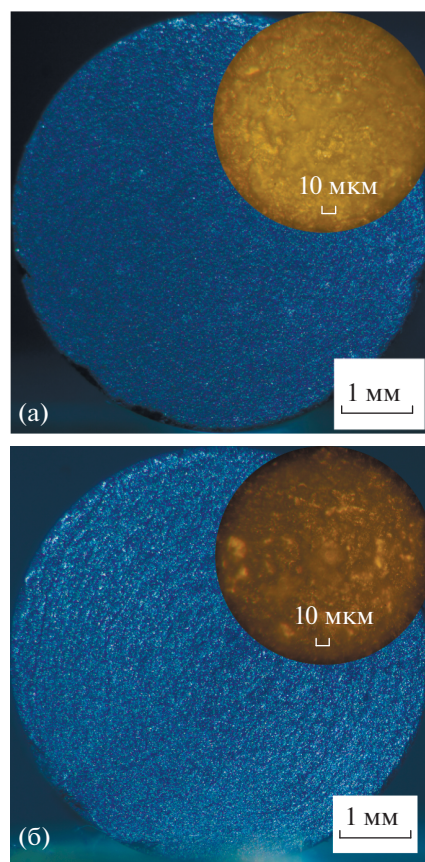
### ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследования проведены на сплошном цилиндре радиусом  $r = 3.905$  мм и длиной 124.0 мм, изготовленном из графита марки МПГ-7. Принципиальная схема экспериментального участка приведена на рис. 1. Образец устанавливался вертикально и затем нагревался пропусканием переменного электрического тока. Сила тока  $I$ , проходящего по образцу, измерялась с помощью 100 А шунта и вольтметра марки GDM-8246. Падение напряжения  $U$  определялось с использованием точечных поверхностных контактных зондов. Данный метод измерения  $U$  применялся ранее, например, при определении теплопроводности графита [3]. Четыре контактных зонда устанавливались попарно на различных расстояниях  $l_{\text{проб}}$  от контактной поверхности, что позволяло одновременно измерять падение напряжения на участках разной длины. Падение напряжения измерялось вольтметрами GDM-8135. Контроль за выполнением изотермического распределения вдоль оси цилиндра осуществлялся с помощью двух хромель-копелевых термопар с диаметром королька 0.5 мм, которые устанавливались на расстоянии 40 мм друг от друга в специально просверленные отверстия, которые заполнялись графитом после установки термопар. Значения числа



**Рис. 1.** Принципиальная схема экспериментального участка: 1 – вольтметр для измерения падения напряжения между зондами, 2 – токоподводы, 3 – поверхностные зонды 1–4, 4 – контактная поверхность, 5 – грузик, 6 – кварцевая трубка, 7 – источники питания постоянного и переменного тока, 8 – два элемента экспериментального образца, 9 – термопары, 10 – вольтметр, 11 – эталонное сопротивление.

Био оценены по формуле  $Bi = \alpha_{эфф} d / \lambda_{МПГ} < 0.1$  –  $Bi \approx 0.0015$  при  $T = 400$  К,  $0.004$  при  $700$  К,  $\alpha_{эфф}$  – эффективный (конвекция и излучение) коэффициент теплоотдачи,  $\lambda_{МПГ}$  – теплопроводность графита, что соответствует “внешней задаче” [4] и означает правомерность приближения равномерного распределения температуры по радиусу цилиндра. Следовательно, глубина размещения королька термопары в материале образца может быть выбрана произвольно. Зонды располагались между термопарами. Таким образом, отверстия, просверленные под термопары, не оказывали влияния на точность определения падения напряжения, которое измерялось поверхностными зондами. Это позволяет провести оценку влияния контактных явлений в сравнении с монолитным участком образца и в дальнейшем рассчитать термический эффект, вызванный контактным электрическим сопротивлением. Эксперименты проводились в стационарном тепловом режиме, время выдержки составляло не менее 10 мин. Центральная часть элементов образца при наличии контактной поверхности помещалась в кварцевый тонкостенный полый цилиндр для обеспечения соосности. Специальные эксперименты показали, что данный цилиндр не оказывает влияния на результаты определения



**Рис. 2.** Фотографии образца до (а) и после (б) эксперимента ( $T = 750$  К, вес – 0.5 кг): большие окружности – изображения всей поверхности контакта (оптический микроскоп, отраженный свет), малые окружности – изображения части поверхности, сделанные на атомно-силовом микроскопе Bruker MultiMode 8 с разрешением 0.1 мкм на точку.

КС. Исследования реализованы на воздухе, температура которого измерялась в процессе эксперимента.

Состояние поверхности оказывает влияние на КС [1]. Поверхности образцов, которые образовывали контактную плоскость, предварительно полировались и обезжиривались ацетоном. На рис. 2 приведены фотографии всей поверхности, сделанные на оптическом микроскопе в отраженном свете, и отдельные участки поверхности, исследованные на атомно-силовом микроскопе. По оценке средние значения высоты неровностей не превышают 10 мкм, что согласуется с размером зерна графита марки МПГ-7 – порядка 30 мкм.

#### УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МОНООБРАЗЦОВ

Первая серия экспериментов проводилась на монолитных образцах, которые вырезаны параллельно и перпендикулярно направлению прессо-

вания исходной заготовки графита. Задача данной серии состояла в проверке воспроизводимости удельного электрического сопротивления (УЭС). Результаты для УЭС рассчитывались по формуле по измеренным величинам

$$\rho = U\pi r^2 / (I l_{\text{проб}}). \quad (1)$$

Значения УЭС, полученные на образцах, вырезанных параллельно направлению приложения давления при прессовании  $\rho^{\perp}$ , имели большой разброс. Величины УЭС, измеренные в направлении, перпендикулярном направлению прессования (в Ом м):

$$\rho^{\perp} = -4.837 \times 10^{-14} T^3 + 1.0053 \times 10^{-10} T^2 - 7.106 \times 10^{-8} T + 2.6318 \times 10^{-5},$$

характеризовались хорошей воспроизводимостью, поэтому в дальнейших экспериментах использовались такие образцы.

### УДЕЛЬНОЕ КОНТАКТНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

В основе определения контактного УЭС для одной контактной поверхности, образованной при соединении  $n + 1$  образцов одного материала, лежит формула

$$\rho_{\text{кc } 1}^{n=1}(T) = (U_{\text{проб}} \pi r^2 / (I l_{\text{проб}}) - \rho^{\perp}(T)) / n, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{кc } 1}^{n=1}$  – КС одной контактной поверхности и  $n = 1$ ;  $U_{\text{проб}}$  – падение напряжения между зондами, измеренное на длине с  $n$ -числом контактных поверхностей. В данной формуле длина  $l_{\text{проб}}$  равна длине участков монолитного материала, длина контактной поверхности предполагается бесконечно малой величиной. Дополнительно считается, что все контактные поверхности изготовлены по одинаковой технологии и КС контактирующих элементов равны между собой.

На рис. 3 представлены результаты определения КС  $\rho_{\text{кc } 1}^{n=1}(T)$  при наличии одной контактирующей поверхности в зависимости от температуры при давлении  $P = 32$  и  $100$  кПа. Видно, что первый режим нагрева отличается более высокими значениями КС, последующие режимы охлаждения и нагрева имеют более низкие величины  $\rho_{\text{кc } 1}^{n=1}(T)$  и хорошо согласуются между собой. Данные закономерности УЭС имели место и для монолитного образца, поэтому дальнейший анализ проводился для режимов нагрева и охлаждения, исключая первичный режим нагрева. Температурная зависимость  $\rho_{\text{кc } 1}^{n=1} = f(T)$  является убывающей функцией (рис. 3). Полученные результаты  $\rho_{\text{кc } 1}^{n=1} = f(T)$  качественно соответствуют данным, измеренным на графите марки ГМЗ [2] и на зарубежных гра-

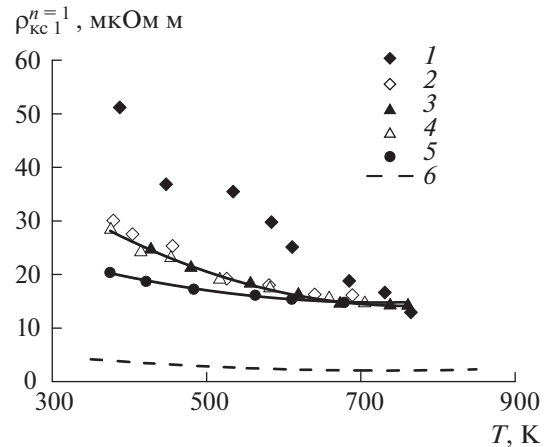
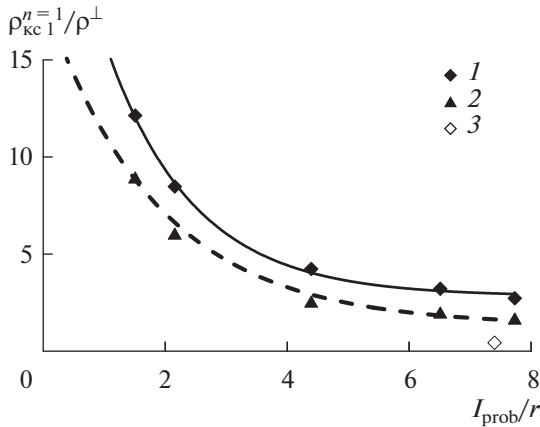


Рис. 3. Зависимости удельного контактного сопротивления от температуры для одной контактирующей поверхности графита марки МПГ-7 при  $P = 32$  кПа: 1 – первый нагрев, 2 – первое охлаждение, 3 – второй нагрев, 4 – второе охлаждение, 5 – третий нагрев при  $P = 100$  кПа, 6 – графит марки ГМЗ,  $P = 32$  кПа [2].

фитах [1]. Увеличение давления на контактирующую поверхность приводит к уменьшению  $\rho_{\text{кc } 1}^{n=1}$ , что совпадает с результатами работы [2].

**Количественный анализ.** Величина КС, измеренная при  $P = 32$  кПа и  $T = 400$  К на образце графита марки МПГ-7,  $\rho_{\text{кc } 1}^{n=1} 100 / \rho^{\perp} \approx 220\%$ , превышает соответствующее значение КС графита марки ГМЗ более чем в пять раз  $\rho_{\text{кc } 1}^{n=1} 100 / \rho \approx 43\%$  ( $l_{\text{проб}} \approx \text{idem}$ ) [2]. Столь сильное отличие, по-видимому, не может быть связано только со свойствами графита, так как используются относительные величины  $\rho_{\text{кc } 1}^{n=1} / \rho$ . Влияние экспериментальных условий показывает перерасчет по формуле (2) величины КС на одну контактную поверхность (кc1) при увеличении  $n$ :  $\rho_{\text{кc } 1}^{n=1} 100 / \rho \approx 43\%$ ,  $\rho_{\text{кc } 1}^{n=7} / \rho \approx 27\%$  и  $\rho_{\text{кc } 1}^{n=15} / \rho \approx 17\%$  [2]. Видно, что увеличение  $n$  не приводит к равенству  $\rho_{\text{кc } 1}^{n=1} = \rho_{\text{кc } 1}^{n=7} = \rho_{\text{кc } 1}^{n=15}$ . В работе [2]  $n$  увеличивалось при одновременном уменьшении длины между контактными поверхностями. Следовательно, необходимо разделить влияние различных экспериментальных параметров. На рис. 4 приведены результаты измерения относительного удельного контактного сопротивления графита марки МПГ-7  $\rho_{\text{кc } 1}^{n=1} / \rho^{\perp}$  в зависимости от расстояния между зондами при  $T = 400$  и  $700$  К. В настоящих экспериментах контактная поверхность располагалась равноудаленно от зондов, поэтому величину  $l_{\text{проб}} / 2$  можно в первом приближении рассматривать как расстояние между контактными поверхностями в [2]. КС зависит от  $l_{\text{проб}}$  (рис. 4), поэтому действительное значение КС в плоскости контакта следует определять экстраполяцией при  $l_{\text{проб}} / 2 \rightarrow 0$



**Рис. 4.** Зависимости относительного удельного электрического контактного сопротивления  $\rho_{кc1}^{n=1}/\rho^\perp$  графита марки МПГ-7 от относительного расстояния между зондами  $l_{проб}/r$  при различных температурах: 1 – 400 К, аппроксимация экспоненциальной функцией, данная работа; 2 – 700 К, экспоненциальной функцией; 3 – 400 К,  $P = 32$  кПа, работа [2].

(используются все значения  $l_{проб}$ ), как это делается в методе экстраполяции [5].

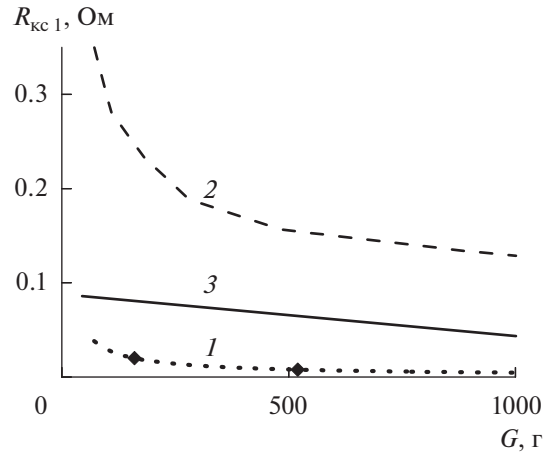
Обработка экспериментальных точек, приведенных на рис. 4, экспоненциальной функцией показала, что удельное КС при  $T = 400$  К равно  $\rho_{кc1}^{n=1}/\rho^\perp \approx 15$  и 11 при 700 К ( $P = 32$  кПа). Следовательно, двухзондовая система измерения КС при использовании протяженного расстояния между зондами ( $l_{проб}/r \approx 7.4$  [2]) может приводить к занижению  $\rho_{кc1}^{n=1}$ , что позволяет частично объяснить превышение авторских значений КС над величинами, полученными в [2]. Кроме того, более низкие значения  $\rho_{кc1}^{n=1}$  работы [2] могут быть обусловлены влиянием полостей, просверленных для измерения температуры на длине, где измерялось КС.

#### КОНТАКТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Перейдем к форме рассмотрения КС, принятой в иностранной литературе [1, 5, 6]. Для одной контактной поверхности КС (в Ом) определяется следующим образом:

$$R_{кc1}^{n=1}(T) = (U_{проб}/I - \rho^\perp(T)l_{проб}/(\pi r^2))/n. \quad (3)$$

Аналогично предположениям, которые вводились ранее для формулы (2), в (3) заложена гипотеза, что длина контактной поверхности много меньше длины  $l_{проб}$  и величины КС каждой контактной поверхности равны между собой. Дополнительно предполагается, что реальная площадь контакта может быть много меньше поверхности, по которой соприкасаются элементы экспериментального образца, поэтому переход к удельным величинам не считается корректным. На



**Рис. 5.** Зависимости контактного сопротивления одной контактной поверхности от приложенного веса: 1 – МПГ-7 при  $l_{проб} = 5.89$  мм,  $T = 400$  К; 2 – стержни из электрографита, 3 – угольная щетка/угольное кольцо [1].

рис. 5 приведены результаты определения КС графита МПГ-7, которые измерены при  $T = 400$  К на минимальном расстоянии  $l_{проб} = 5.89$  мм между зондами в зависимости от усилия ( $G = 0.160$  и  $0.520$  кг), приложенного к торцу образца. Внешнее усилие выражается в приложенном весе, так как использование давления оказывается некорректным, когда площадь контакта неизвестна. Видно, что  $R_{кc1}^{n=1}$  так же убывает с ростом приложенной внешней нагрузки, выраженной в весе  $G$ , как и в случае зависимости  $\rho_{кc1}$  от давления  $P$ . На рис. 5 впервые приведено сравнение данных для графитовых материалов отечественного и иностранного производства [1]. При изменении внешней нагрузки от  $G = 0.01$  до  $0.5$  кг значения КС графита марки МПГ-7  $R_{кc1} \approx 0.01$  Ом как минимум на порядок ниже соответствующих величин для графитовых материалов импортного производства  $R_{кc1} \geq 0.15$  Ом [1].

Теория, построенная в рамках описания КС, выраженного сопротивлением в омах, позволяет увидеть, что  $R_{кc1}$  подчиняется обратной степенной зависимости  $R_{кc1} \sim G^{-1/\kappa}$  от приложенного веса. Настоящие эксперименты показали, что для графита марки МПГ-7 имеет место следующая зависимость:  $R_{кc1} \sim G^{-1/1.3}$ .

Относительные суммарные расширенные неопределенности величин  $\rho_{кc1}^{n=1}$  и  $R_{кc1}^{n=1}$  оцениваются в 7.5 и 5.8% при  $T = 700$  К, возрастают при понижении температуры и превышают неопределенность значений УЭС, которые были определены на других материалах [7, 8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые приведены экспериментальные результаты для электрического КС графита марки МПГ-7 в диапазоне изменения температуры 350–750 К. Показано, что в изученном диапазоне температурная зависимость удельного контактного электрического сопротивления является убывающей функцией. Экспериментально выявлена зависимость удельного КС от расстояния между зондами при использовании двухзондовой системы измерения падения напряжения. Это означает, что при двухзондовом методе измерения КС необходимо располагать зонды строго на одинаковом расстоянии от поверхности контакта. Значения КС следует, по-видимому, определять экстраполяцией к точке контакта величин удельного КС, измеренных на разных расстояниях. Сочетание двухзондовой схемы измерения, обработки первичных экспериментальных данных по формуле (2) с последующей аппроксимацией зависимости  $\rho_{\text{КС}1}^{n=1}/\rho^{\perp} = f(I_{\text{проб}}/r)$  экспоненциальной функцией и экстраполяцией полученной зависимости на значение абсциссы, которое соответствует контактной поверхности, позволяет определить  $\rho_{\text{КС}1}^{n=1}(x=0)$ . Другой важный вывод, который следует из рис. 4, заключается в необходимости учитывать протяженность влияния контактной поверхности на длине примерно  $<5r$ . Размещение контактных поверхностей на расстоянии  $<5r$  может приводить к искажению экспериментальных результатов  $\rho_{\text{КС}1}$ .

Полученные в работе данные о КС графита марки МПГ-7 имеют прикладное значение, так как показывают, что величина удельного КС может на порядок превышать УЭС монолитного образца, поэтому место контакта является областью дополнительных электрических потерь.

Приведено сравнение двух подходов, которое показало, что для определения КС используются идентичные исходные предположения и полученные зависимости  $\rho_{\text{КС}1}^{n=1}$  и  $R_{\text{КС}1}^{n=1}$  от температуры и внешней нагрузки являются качественно одинаковыми. С одной стороны, использование удельных

значений  $\rho_{\text{КС}1}^{n=1}$  позволило проанализировать влияние расстояния между зондами на величину КС при использовании двухзондовой схемы измерения падения напряжения и методом экстраполяции определить значения  $\rho_{\text{КС}1}^{n=1}$  в плоскости контакта. С другой стороны, подход, основанный на сопротивлении  $R_{\text{КС}1}$ , дает возможность сравнить результаты измерения КС с зарубежными данными и открывает пути использования теоретических моделей [1]. Следовательно, каждый подход имеет свои положительные стороны, поэтому сочетание отечественного и иностранного методов может раскрыть более широкий спектр возможностей изучения электрического КС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785 от 23 сентября 2020 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 464 с.
2. Лутков А.И. Тепловые и электрические свойства углеродных материалов. М.: Металлургия, 1990. 176 с.
3. Raser N.S., McClelland J.D. Thermal Properties of Graphite, Molybdenum and Tantalum to their Destruction Temperatures // J. Phys. Chem. Solids. 1960. V. 15. P. 17.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. 485 с.
5. Berger H.H. Contact Resistance and Contact Resistivity // J. Solid-State Sci. Technol. 1972. V. 119. № 4. P. 507.
6. Lijadi M., Pardo F., Bardou N., Pelouard J.-L. Floating Contact Transmission Line Modelling: An Improved Method of Ohmic Contact Resistance Measurement // Solid-State Electronics. 2005. V. 49. № 10. P. 1655.
7. Костановский А.В., Костановская М.Е., Зеодинов М.Г., Пронкин А.А. Влияние температуры на электрическое сопротивление пиролитического графита // ТВТ. 2020. Т. 58. № 4. С. 732.
8. Костановский А.В., Костановская М.Е., Зеодинов М.Г., Пронкин А.А. Удельное электрическое сопротивление силицированного карбида кремния // ТВТ. 2018. Т. 56. № 5. С. 841.