

**Структура, составы и создание теплопроводных композиционных материалов  
на основе полиуретана и модифицированных частиц карбида кремния**

**Structure, composition, and preparation of thermal conductive composite materials  
based on polyurethane and modified silicon carbide particles**

*Т.А. ШАЛЫГИНА<sup>1</sup>, М.С. РУДЕНКО<sup>1</sup>, И.Д. СИМОНОВ-ЕМЕЛЬЯНОВ<sup>2</sup>*

*T.A. SHALYGINA<sup>1</sup>, M.S. RUDENKO<sup>1</sup>, I.D. SIMONOV-EMELYANOV<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> СибГУ науки и технологии им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М. В. Ломоносова), Москва, Россия

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup> MIREA – Russian Technological University, Institute of fine chemical technologies, Moscow, Russia

В настоящей работе впервые приведены данные по зависимости теплопроводности ДНПКМ от обобщенных параметров и типа структуры, согласно классификации (РС, ННС, СНС-1, СНС-2 и ВНС), на примере системы полиуретан + модифицированные частицы карбида кремния.

Получены новые модифицированные плазмохимическим методом частицы карбида кремния с уникальным строением и высокой удельной поверхностью, а также определены основные их характеристики, необходимые для расчета составов, обобщенных параметров и определения типа дисперсной структуры ДНПКМ.

Установлены основные закономерности, описывающие связь коэффициента теплопроводности ( $\lambda_{\text{ПКМ}}$ ) с обобщенным параметром  $\Theta$ , типом структуры ДНПКМ и морфологией поверхности частиц SiC. Впервые показан вклад удельной поверхности дисперсных частиц SiC ( $S_{\text{ВЕТ}}$  – от 3 до 45 м<sup>2</sup>/г) в теплопроводность дисперсных систем.

*Ключевые слова:* композиционные полимерные материалы, структура, теплопроводность, удельная поверхность, граница раздела фаз, модель, обобщенные параметры структуры

This paper presents the first data on the dependence of thermal conductivity of DFPCM on generalized parameters and type of structure, according to the classification (dilute – low filled – medium filled – high filled systems), using the system of polyurethane + modified silicon carbide particles as an example.

New plasma-modified silicon carbide particles with a unique structure and high specific surface area have been obtained, and their main characteristics necessary for calculating the compositions, generalized parameters, and determining the type of disperse structure of DFPCM have been determined.

The main regularities are established that describe the relationship between the thermal conductivity coefficient ( $\lambda_{\text{PCM}}$ ) and the generalized parameter  $\Theta$ , the type of structure of the DFPCM, and the surface morphology of SiC particles. For the first time, the contribution of the specific surface area of dispersed SiC particles ( $S_{\text{ВЕТ}}$  – from 3 to 45 м<sup>2</sup>/g) to the thermal conductivity of disperse systems is shown.

*Keywords:* composite polymer materials, structure, thermal conductivity, specific surface area, phase boundary, model, generalized structure parameters

DOI: 10.35164/0554-2901-2022-9-10-10-13

Дисперсно-наполненные полимерные композиционные материалы (ДНПКМ) широко используются при создании новых материалов с комплексом ценных эксплуатационных свойств. Многоуровневое построение структуры ДНПКМ определяет их технологические и эксплуатационные свойства. Организация структуры происходит в технологических процессах получения полимерного материала и переработки его в изделие заданной формы, конфигурации и типоразмера [1].

Проявления функциональных свойств ДНПКМ обусловлены комплексом технологических и эксплуатационных свойств исходных компонентов, типом и параметрами гетерогенной гетерофазной структуры, а также формированием границы раздела фаз [2]. В настоящее время для описания структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (ДНПКМ) разработана обобщенная модель дисперсной структуры, которая объединяет в единое целое построение гетерогенности в пространстве (модель Шкловского – Де Жена) и представление свободного пространства, занимаемое в монолитном материале полимерной матрицей, в виде трех функциональных элементов структуры –  $\Theta$ ,  $B$  и  $M$  (модель Симонова-Емельянова).

Такой подход позволил провести классификацию ДНПКМ по структурному принципу: разбавленные (РС), низко-наполненные (ННС), средне-наполненные (СНС-1 и СНС-2) и высоконаполненные (ВНС) – и связать тип дисперсной структуры, ее обобщенные и приведенные параметры с комплексом физико-механических, электрофизических и других характеристик [3–5].

Для ДНПКМ вопросы связи теплофизических характеристик с составом, типом и параметрами структуры ДНПКМ, построением квазинепрерывных теплопроводящих путей из частиц наполнителя с различной морфологией поверхности в объеме полимерной матрицы практически не рассматривались.

В настоящей статье впервые приводятся данные о теплопроводности гетерогенных гетерофазных систем с разными типами дисперсной структуры на основе полиуретановой матрицы (ПУ) и дисперсных частиц карбида кремния (SiC) с достаточно высокой теплопроводностью, декорированной поверхностью и развитой границей раздела фаз.

Теплопроводность полиуретановой матрицы и ДНПКМ с разными типами и параметрами структур определяли на дифференциальном сканирующем калориметре с температурной модуляцией

теплового потока (ТМДСК) DSC25 производства TA Instruments (США), согласно ГОСТ Р 57830-2017.

ДНПКМ получали путем смешения исходных компонентов полиуретана (А + Б) и модифицированных частиц SiC, механического диспергирования, вакуумирования, а процесс полимеризации осуществляли по выбранной температурной программе (4 часа при 80°C). Методом контактного формования с использованием технологической оснастки получали образцы с толщиной 0,7 мм.

Для создания ДНПКМ с разными типами структур использовали полиуретан заливочного типа на основе ε-поликапролактона (компонент А) и ароматического диизоцианата (компонент Б) марки MP5510, производства компании Diaplex (компании Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Япония).

В качестве теплопроводящего наполнителя был выбран карбид кремния, модифицированный плазмохимическим методом. Для получения дисперсных систем с различными типами структур были использованы микрочастицы SiC (фракция F800), характеризующиеся размером частиц от 6 до 10 мкм, согласно ГОСТ 26327-84 (СТ СЭВ 4169-83), ПКФ «Цвет» (Россия). Специально для изменения морфологии, удельной поверхности, химического состава и структуры поверхности частиц SiC был использован плазмохимический способ модификации дисперсного наполнителя с использованием плазматрона комплекса плазменного напыления марки F4 (Швейцария) [6].

При плазмохимической модификации частиц SiC в качестве плазмообразующего и дополнительного газа использовали аргон (Ar) и водород (H) соответственно. Основными процессами, протекающими при плазмохимической модификации частиц карбида кремния, являются сублимация атомов кремния с поверхности частиц SiC, которая протекает при заданных условиях обработки, а также конденсация, нуклеация и коалесценция.

Протекание данных процессов внутри реактора при направленном изменении условий модификации приводит к образованию на поверхности частиц SiC кремниевых наноструктур в виде наночастиц или нановолокон. В результате получен новый вид дисперсного карбида кремния с высококоразвитой поверхностью и новым химическим составом.

На рис. 1 представлены микрофотографии сканирующей электронной микроскопии исходных частиц SiC и модифицированных при различном соотношении Ar/H. Как видно из рис. 1, на поверхности модифицированных частиц SiC сформированы наноструктуры в виде наночастиц и нановолокон (рис. 1, б-в). Диаметр наночастиц составляет от 30 до 60 нм, нановолокна характеризуются диаметром около ~50 нм и длиной около ~300–400 нм. В среднем отношение длины к диаметру нановолокон составляет  $l/d = 6-8$ .

Впервые получены частицы SiC с разным составом и декорированной поверхностью кремниевыми наноструктурами ( $SiC_{Ar}$ ,  $SiC_{H1}$  и  $SiC_{H2}$ ), которые не только увеличивают площадь поверхности, а также могут оказывать армирующий эффект при создании дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (ДНПКМ).

Для построения всех возможных типов дисперсных структур в ДНПКМ на различных полимерных матрицах необходимо экспериментально определить плотность упаковки ( $k_{уп}$ ) и максимальное содержание дисперсного наполнителя – параметр  $\varphi_m$ .

Упаковку (параметр  $\varphi_m$ ) исходных частиц SiC и модифицированных плазмохимической обработкой определяли по значению маслосъемности [7].

В таблице 1 приведены характеристики исходных частиц SiC и после их модификации плазмохимической обработкой. В результате плазмохимической модификации получены новые уникальные частицы карбида кремния с высококоразвитой поверхностью с удель-

ной поверхностью ( $S_{ВЕТ}$ ) и объемом пор ( $V_{пор}$ ) в ~15 и ~7,5 раз выше исходных частиц соответственно. Одновременно модификация поверхности частиц приводит к увеличению их эквивалентного диаметра с 8 до 28 мкм.

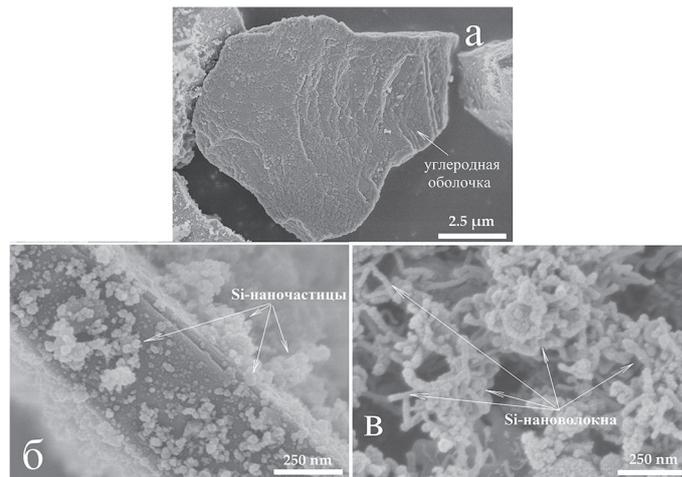


Рис. 1. Микрофотографии частиц SiC, модифицированных при различном соотношении плазмообразующего и дополнительного газов: Ar (а), Ar + H1 (б) и Ar + H2 (в).

Установлено [7], что с увеличением размера частиц значение маслосъемности должно снижаться и параметр  $\varphi_m$  возрастать. Однако уникальность новых модифицированных частиц карбида кремния заключается в высококоразвитой поверхности, что приводит к повышению маслосъемности и снижению плотности упаковки при увеличении эквивалентного диаметра частиц.

За счет плазмохимической модификации, приводящей к декорированию поверхности частиц SiC углеродной оболочкой и кремниевыми наноструктурами (наночастицами или нановолокнами), возрастает удельная поверхность  $S_{ВЕТ}$  в 15 раз (с 3 до 45 м<sup>2</sup>/г), что приводит к увеличению поверхности наполнителя в ДНПКМ в ~8 раз. Можно предположить, что в результате увеличения поверхности модифицированных частиц SiC увеличится площадь передачи тепла через межфазные границы и возрастет эффективность теплопроводности ДНПКМ.

Представленные характеристики дисперсных наполнителей позволяют провести классификацию и проектировать составы ДНПКМ с заданным типом дисперсной структуры и свойствами [4, 5].

Предложенная нами обобщенная модель дисперсной структуры ДНПКМ одновременно учитывает параметры гетерогенной дисперсной фазы (наполнителя), поверхность наполнителя ( $S_H$ ) непосредственно в композите, а также распределение свободного пространства, занимаемое полимерной матрицей – обобщенные параметры –  $\Theta$ ,  $B$  и  $M$ .

Тип дисперсной структуры, ее обобщенные и приведенные параметры определяют комплекс теплофизических характеристик ДНПКМ, а классификация позволяет на количественном уровне (по обобщенному параметру  $\Theta$ ) проектировать для конкретного наполнителя и полимерной матрицы тип структуры.

Содержание дисперсной фазы ( $\varphi_n$ ) при известной максимальной упаковке ( $\varphi_m$ ) для каждого типа дисперсной структуры (РС, ННС, СНС-1, СНС-2 и ВНС) можно рассчитать как:

$$\varphi_n = (1 - \Theta) \varphi_m, \text{ об. д.} \quad (1)$$

где  $\Theta$ , об. д. – доля полимерной матрицы для формирования прослоек между частицами в ДНПКМ.

На рис. 2 приведены зависимости содержания ( $\varphi_n$ ) SiC с разной морфологией поверхности и параметром  $\varphi_m$  от обобщенного

Таблица 1. Характеристики дисперсных наполнителей на основе SiC.

| Частицы            | Характеристики модифицированных частиц SiC |                              |                               |                                |                     |    |    |                         |                                      |
|--------------------|--|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|----|----|-------------------------|--------------------------------------|
|                    | $d_{ср}$ , мкм                             | $\rho_H$ , г/см <sup>3</sup> | $S_{ВЕТ}$ , м <sup>2</sup> /г | $V_{пор}$ , см <sup>3</sup> /г | Состав частиц, ат.% |    |    | Маслосъемность, г/100 г | Упаковка частиц $\varphi_m$ , об. д. |
|                    |  |                              |                               |                                | Si                  | C  | O  |                         |                                      |
| SiC <sub>исх</sub> | 8,03                                       | 1,26                         | 3                             | 0,04                           | 44                  | 53 | 3  | 150                     | 0,39                                 |
| SiC <sub>Ar</sub>  | 10,64                                      | 0,68                         | 15                            | 0,07                           | 37                  | 54 | 9  | 250                     | 0,28                                 |
| SiC <sub>H1</sub>  | 17,49                                      | 0,59                         | 38,8                          | 0,14                           | 38                  | 48 | 14 | 330                     | 0,23                                 |
| iC <sub>H2</sub>   | 28,58                                      | 0,48                         | 45                            | 0,16                           | 36                  | 44 | 20 | 370                     | 0,21                                 |

параметра  $\Theta$  для разных типов дисперсной структуры ДНПКМ. С увеличением удельной поверхности частиц SiC параметр  $\varphi_m$  наполнителя уменьшается, что оказывает существенное влияние на формирование структуры ДНПКМ, изменение ее типа, параметров и содержание дисперсной фазы.

Таким образом, не только размер частиц влияет на их упаковку, а также оказывает влияние строение и структура поверхности наполнителя.

По приведенным зависимостям (рис. 2) можно определить составы практически всех возможных ДНПКМ с частицами исходного и модифицированного карбида кремния в разных полимерных матрицах, включая полиуретановую матрицу (ПУ).

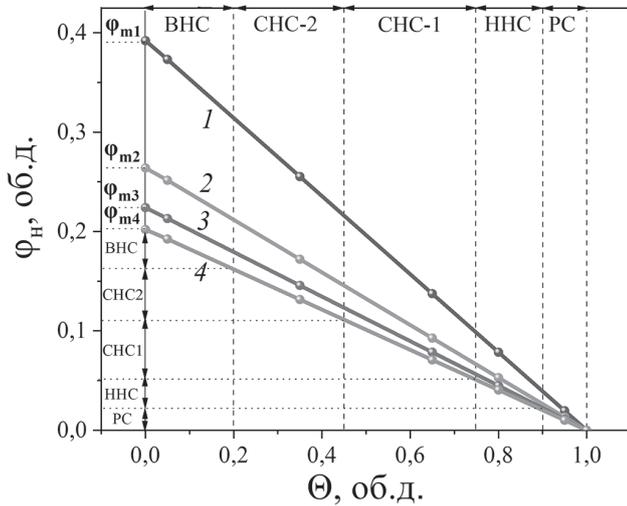


Рис. 2. Зависимость содержания наполнителя  $\varphi_n$  в ДНПКМ с разными типами структур от обобщенного параметра  $\Theta$  для частиц: 1 – SiC<sub>исх</sub> с  $\varphi_m = 0,39$  об. д., 2 – SiC<sub>Ar</sub> с  $\varphi_m = 0,28$  об. д., 3 – SiC<sub>H1</sub> с  $\varphi_m = 0,23$  об. д. и 4 – SiC<sub>H2</sub> с  $\varphi_m = 0,21$  об. д.

В таблице 2 приведены расчетные данные по обобщенным параметрам, типам структуры и составам ДНПКМ на основе полиуретана и модифицированных частиц SiC с разными значениями параметра  $\varphi_m$ , об. д.

Теплопроводность ( $\lambda_{пкм}$ ) ДНПКМ для системы ПУ + SiC рассчитывали по модифицированной формуле Оделевского (2), предполагающей, что частицы дисперсной фазы равномерно распределены по всему объёму и касаются друг друга при критической концентрации  $\varphi_{кр} \approx \varphi_m$  и модели Кондорского – Оделевского (3), учитывающей наличие агломератов и неравномерность распределения частиц наполнителя:

$$\lambda_{км} = \lambda_1 \left[ 1 + \frac{\varphi / \varphi_{max}}{(1 - \varphi / \varphi_{max}) / 3 + \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)} \right] \quad (2)$$

$$\lambda_{км} = A + \sqrt{A^2 + \lambda_1 \lambda_2 / 2} \quad (3)$$

где  $\lambda_{пкм}$ ,  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – теплопроводность ДНПКМ, полимерной матрицы и дисперсной фазы (твёрдой);  $A = [(2 - 3\varphi)\lambda_1 + (3\varphi - 1)\lambda_2] / 4$ .

Индексы 1 и 2 относятся соответственно к матрице и дисперсной фазе ДНПКМ.

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента теплопроводности ДНПКМ от содержания теплопроводного карбида кремния с разным размером частиц и параметром  $\varphi_m$ , рассчитанного по уравнениям 2 и 3, при  $\lambda_1 = 0,24$  Вт/(м·К) и  $\lambda_2 = 270$  Вт/(м·К).

Теоретические данные по  $\lambda_{пкм}$  для ДНПКМ с исходными и модифицированными частицами карбида кремния, рассчитанные по уравнениям 2 и 3, практически совпадают.

Таблица 2. Тип структуры и содержание наполнителя ( $\varphi_n$ , об. д.) в ДНПКМ на основе ПУ и частиц SiC с разными значениями параметра  $\varphi_m$ .

| Тип структуры ДНПКМ | Обобщенный параметр $\Theta$ , об. д. | Содержание SiC ( $\varphi_n$ , об. д.) с разным значением параметра $\varphi_m$ , об. д. |   |   |  |
|---------------------|---------------------------------------|--|---|---|--|
|                     |                                       | SiC <sub>H2</sub><br>$\varphi_m = 0,21$  | SiC <sub>H1</sub><br>$\varphi_m = 0,23$ | SiC <sub>Ar</sub><br>$\varphi_m = 0,28$ | SiC <sub>исх</sub><br>$\varphi_m = 0,39$ |
| PC                  | 0,99–0,90                             | 0,002–0,021  | 0,002–0,023                             | 0,003–0,028                             | 0,004–0,039                              |
| HHC                 | 0,90–0,75                             | 0,021–0,052  | 0,023–0,058                             | 0,028–0,07                              | 0,039–0,097                              |
| CHC-1               | 0,75–0,45                             | 0,052–0,12   | 0,058–0,13                              | 0,07–0,15                               | 0,097–0,21                               |
| CHC-2               | 0,45–0,20                             | 0,12–0,17  | 0,13–0,19                               | 0,15–0,22                               | 0,21–0,31                                |
| BHC                 | 0,20–0,00                             | 0,17–0,21  | 0,19–0,23                               | 0,22–0,28                               | 0,31–0,39                                |

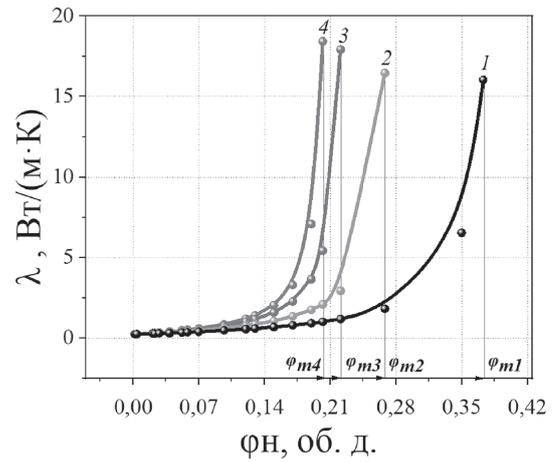


Рис. 3. Зависимость расчетного значения  $\lambda_{пкм}$  для ДНПКМ от содержания исходного (1) и модифицированного (2–4) карбида кремния с разным параметром  $\varphi_m$ :  $\varphi_{m1} > \varphi_{m2} > \varphi_{m3} > \varphi_{m4}$ : 2 – SiC<sub>Ar</sub>; 3 – SiC<sub>H1</sub> и 4 – SiC<sub>H2</sub>.

Строение и развитость поверхности частиц SiC существенно влияют на теплопроводность. Так впервые показано (рис. 3), что при увеличении поверхности наполнителя, при незначительном возрастании эквивалентного диаметра частиц (с 8 до 28 мкм), происходит снижение параметра  $\varphi_m$  (с 0,39 до 0,21 об. д.), рост площади передачи тепловых потоков и повышение теплопроводности ДНПКМ до ~10 раз.

Однако приведенные зависимости  $\lambda_{пкм} = f(\varphi_n)$  не позволяют оценить влияние обобщенных параметров и типа дисперсной структуры на теплопроводность ДНПКМ на основе ПУ + SiC.

Впервые были проведены исследования теплофизических свойств ДНПКМ с различными типами структур (PC, HHC, CHC-1, CHC-2 и BHC) и построены зависимости коэффициента теплопроводности ( $\lambda_{пкм}$ ) при комнатной температуре от обобщенного параметра  $\Theta$  с учетом морфологии поверхности частиц SiC (рис. 4).

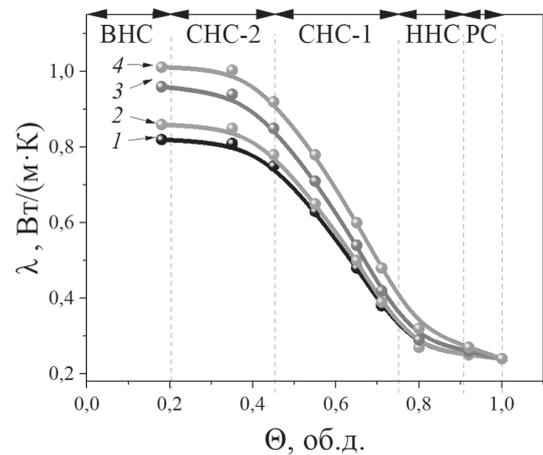


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ) от обобщенного параметра  $\Theta$  для ДНПКМ на основе ПУ и частиц SiC: 1 – ПУ + SiC<sub>исх</sub>, 2 – ПУ + SiC<sub>Ar</sub>, 3 – ПУ + SiC<sub>H1</sub>, 4 – ПУ + SiC<sub>H2</sub>.

В области разбавленных (PC, до  $\Theta \geq 0,90$  об. д.) и низко-наполненных систем (HHC, до  $\Theta \geq 0,75$  об. д.) наблюдается незначительное увеличение  $\lambda_{пкм}$  (не более 7–12%).

При введении в ПУ модифицированных частиц SiC<sub>H2</sub> значение  $\lambda_{пкм}$  ДНПКМ увеличивается по сравнению с исходными частицами с 0,27 до 0,31 Вт/(м·К), что составляет не более 12%.

В области средне-наполненных систем (СНС-1, с  $0,75 \geq \theta \geq 0,45$  об.д.) наблюдается переход к трехмерной объемной решетке, и при формировании в объеме квазинепрерывной теплопроводящей структуры из частиц SiC происходит резкий рост теплопроводности – в  $\sim 2,5\text{--}3$  раза, причем значение  $\lambda_{\text{ПКМ}}$  возрастает для системы ПУ + SiC<sub>H2</sub> до 0,92 Вт/(м·К) по сравнению с исходными частицами SiC<sub>исх</sub> (0,72 Вт/(м·К) – 20–25%.

Для СНС-2 (с  $0,45 \geq \theta \geq 0,20$  об.д.) достигается построение непрерывных теплопроводящих путей за счет совершенствования трехмерной тетраэдрической решетки, наблюдается возрастание  $\lambda_{\text{ПКМ}}$  до  $\sim 1,01$  Вт/(м·К).

В области высоконаполненных систем (ВНС, с  $0,20 \geq \theta \geq 0,0$  об.д.) для ДНПКМ на основе ПУ + SiC<sub>H2</sub> достигается максимальное значение  $\lambda_{\text{ПКМ}}$  – 1,03 Вт/(м·К), а для ДНПКМ на основе ПУ + SiC<sub>исх</sub> – 0,82 Вт/(м·К).

Впервые получены данные о теплопроводности ДНПКМ с разными типами дисперсной структуры, которые описаны в терминах обобщенных параметров и учитывают размер, форму, упаковку, состояние и строение поверхности частиц дисперсного наполнителя, на примере теплопроводного карбида кремния.

На рис. 5 приведены расчетная и экспериментальная зависимости  $\lambda_{\text{ПКМ}}$  для системы ПУ + SiC<sub>H2</sub> от содержания наполнителя, на которых указан тип дисперсной структуры ДНПКМ.

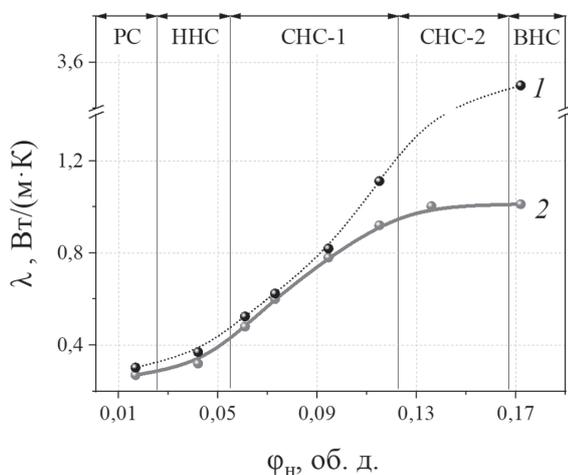


Рис. 5. Зависимость расчетного (1) и экспериментального (2) значения  $\lambda_{\text{ПКМ}}$  для ДНПКМ от содержания модифицированных теплопроводных частиц SiC<sub>H2</sub>

Как видно, в области РС, ННС и СНС-1 наблюдается хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных по  $\lambda_{\text{ПКМ}}$ . Однако, в области средне-наполненных систем СНС-2 с  $0,45 \geq \theta \geq 0,20$  об. д. ДНПКМ характеризуются формированием в объеме структуры из дисперсных частиц квазинепрерывных и теплопроводящих путей, что приводит к росту  $\lambda_{\text{ПКМ}}$  и расхождению расчетных и экспериментальных данных. Замедление роста  $\lambda_{\text{ПКМ}}$  в области ВНС может быть связано с возрастанием пористости в таких дисперсных системах.

Представляло интерес оценить влияние удельной поверхности дисперсных частиц исходного и модифицированного карбида кремния на теплопроводность ДНПКМ со структурой СНС-1 при  $\theta \approx 0,45$  об. д. (рис. 6)

Увеличение удельной поверхности дисперсного наполнителя оказывает влияние на протяженность границы раздела фаз, и ее вклад в теплофизические свойства интеллектуальных ДНПКМ возрастает. Так, с увеличением  $S_{\text{ВЕТ}}$  с 3 до 45 м<sup>2</sup>/г наблюдается увеличение  $\lambda_{\text{ПКМ}}$  на  $\sim 50\%$ .

В настоящей работе представлены данные по комплексу технологических характеристик новых дисперсных наполнителей, рассчитаны обобщенные параметры, определены типы структур (РС, ННС, СНС-1, СНС-2 и ВНС), согласно классификации, и составы ДНПКМ на основе полиуретана и модифицированных частиц SiC.

Впервые приведены зависимости коэффициента теплопроводности систем на основе ПУ + SiC от обобщенных параметров для разных типов дисперсных структур. Показано, что резкий рост ( $\sim$  в 2–3 раза) теплопроводности наблюдается для ДНПКМ в области СНС-1 с  $0,75 \geq \theta \geq 0,45$  об.д.

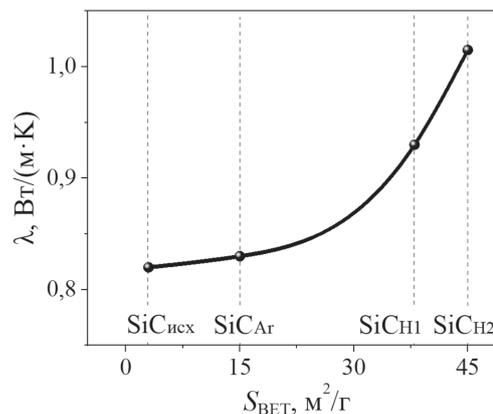


Рис. 6. Зависимость  $\lambda_{\text{ПКМ}}$  системы ПУ + SiC от удельной поверхности исходных SiC<sub>исх</sub> и модифицированных частиц карбида кремния – SiCAg, SiCH1 и SiCH2.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений  $\lambda_{\text{ПКМ}}$  показало, что более эффективное увеличение теплопроводности ДНПКМ наблюдается при введении в полиуретан модифицированных частиц SiC<sub>H2</sub>, декорированных углеродной оболочкой и кремниевыми нановолокнами по плазмохимической технологии.

Установлено, что увеличение удельной поверхности модифицированных частиц SiC с 3 до 45 м<sup>2</sup>/г приводит к повышению теплопроводности на  $\sim 50\%$  в результате увеличения площади теплопередачи на межфазных границах полимер-наполнитель.

Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

## Литература

- Харламова К.И., Селезнева Л.Д., Симонов-Емельянов И.Д. Оптимизация размеров частиц и параметров структуры для получения дисперсно-наполненных полимерных композитов с максимальной прочностью // Пластические массы. – 2020 – №9–10. – С. 13–18.
- Shalygina, T.A. Influence of the Filler Particles' Surface Morphology on the Polyurethane Matrix's Structure Formation in the Composite / T.A. Shalygina, M.S. Rudenko, I.V. Nemtsev, V.A. Parfenov, S.Y. Voronina, I.D. Simonov-Emelyanov and P.E. Borisova // Polymers. – 2021. – Vol. 13. – P. 3864.
- Симонов-Емельянов И.Д. Параметры решетки и структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов с регулируемым комплексом свойств // Конструкции из композиционных материалов. – 2019. – №3. – С. 37.
- Симонов-Емельянов И.Д. / Классификация дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов по типу решетки и структурному принципу // Клеи. Герметики. Технологии. 2020, №1, С. 8–13
- Симонов-Емельянов И.Д. / Расчет составов дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов с различными типами решеток и параметрами структур // Пластические массы 2020, №1–2, С. 4–7.
- Шалыгина Т.А., Руденко М.С., Немцев И.В., Парфенов В.А., Воронина С.Ю. Плазмохимический способ модификации карбида кремния для получения частиц с управляемой морфологией поверхности // Письма в Журнал технической физики. – 2022. – Т. 48. – № 4. – С. 15–19.
- Симонов-Емельянов И.Д., Харламова К.И., Дергунова Е.Р. / Маслоемкость дисперсных порошков и определение максимального содержания наполнителей в полимерных композиционных материалах // Клеи. Герметики. Технологии. 2022 №3 С.18–24.