

УДК 531.754.1:531.754.4

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЖУЩЕЙСЯ И ИСТИННОЙ ПЛОТНОСТЕЙ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИОННЫХ ГРАФИТОВ

© М. С. Ряшенцев, С. А. Колесников<sup>1</sup>*Статья поступила 25 февраля 2015 г.*

Предложены комплекс измерительного оборудования и методика для оперативного исследования кажущейся и истинной плотностей конструкционных графитов и углерод-углеродных композиционных материалов. Проведено сравнение результатов с данными, определенными стандартными методами. Значения кажущейся плотности, полученные на устройстве GeoPyc 1360, выше «стандартных», что связано с использованием псевдожидкой среды, а значения истинной плотности, определяемые на газовом пикнометре AccuPyc 1340, имеют ниже, что можно объяснить наличием закрытых пор при неразрушающем анализе образцов. С увеличением степени дробления образцов расхождение уменьшается.

**Ключевые слова:** конструкционные графиты; углерод-углеродные композиционные материалы; истинная плотность; кажущаяся плотность; пористость; псевдожидкая среда.

Конструкционные графиты (КГ) и углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) применяются в таких стратегически важных отраслях промышленности, как атомная энергетика, ракетно- и авиационное строительство, космонавтика [1–3]. Срок службы изделий из КГ и УУКМ, которые могут испытывать воздействие высоких температур, окисляющих сред и других негативных факторов, зависит в первую очередь от эрозионной стойкости материалов [2, 4, 5]. Как известно, она прямо пропорциональна истинной плотности и обратно пропорциональна пористости [2, 6, 7]. Поэтому знание истинной плотности и пористости КГ и УУКМ необходимо, в частности, для выходного контроля изделий.

Цель работы — сравнительная оценка методик и приборов для определения кажущейся и истинной плотностей образцов КГ и УУКМ.

Кажущуюся плотности ( $d_k$ ) измеряли на устройстве GeoPyc 1360 фирмы Micrometritics (США) и по стандартной методике МИ 00200851-162–2009,

<sup>1</sup> НИИ конструкционных материалов на основе графита (НИИГрафит), Москва, Россия,  
e-mail: mikhail-gyashencev@yandex.ru

истинную плотность ( $d_n$ ) — на газовом пикнометре AccuPyc 1340 фирмы Micrometritics (США) и по стандартной методике МИ 00200851-329–2010.

На AccuPyc 1340 исследовали как недробленные, так и раздробленные (размер частиц 0,5 и 0,1 мм) металлической ступкой образцы. В качестве среды в пикнометре использовали гелий 99,9999 %-й чистоты.

Сравнительный анализ проводили по шести образцам (УУКМ марок КМ-ВМ-4Д и НШ-2; КГ марок УПВ-1 и МПГ-7). Образцы имели неправильную форму и форму цилиндра (диаметр 15 и высота 20 мм).

Результаты представлены в таблице. Видно, что между сравниваемыми методиками присутствуют систематические отличия: значения  $d_k$ , полученные на устройстве GeoPyc 1360, оказались выше, чем значения, найденные по МИ 00200851-162–2009, а  $d_n$ , определенные на AccuPyc, — ниже установленных по МИ 00200851-329–2010. Для  $d_k$  это объясняется тем, что используемая на GeoPyc 1360 псевдожидкая среда DryFlo — не идеально смачивающая жидкость и между ее гранулами всегда остаются пустоты, что приводит к завышению показателей. В случае  $d_n$  при не-

Результаты измерения кажущейся ( $d_k$ ) и истинной ( $d_n$ ) плотностей, г/см<sup>3</sup>

$d_k$		$d_n$			
GeoPyc 1360	МИ 00200851-162–2009	AccuPyc 1340	AccuPyc 1340 (размер частиц 0,5 мм)	AccuPyc 1340 (размер частиц 0,1 мм)	МИ 00200851-329–2010 (размер частиц 0,1 мм)
1,9064 ± 0,0153	1,8966 ± 0,0288	2,0273 ± 0,0196	2,0604 ± 0,0161	2,0859 ± 0,0179	2,0933 ± 0,0065
1,9784 ± 0,0144	1,9567 ± 0,0292	2,0489 ± 0,0011	2,0544 ± 0,0393	2,0788 ± 0,0133	2,1067 ± 0,0261
1,7986 ± 0,0133	1,8033 ± 0,0281	2,0148 ± 0,0284	2,0334 ± 0,0154	2,0618 ± 0,0191	2,1033 ± 0,0065
2,1339 ± 0,0481	2,0733 ± 0,1831	2,1814 ± 0,0040	2,1910 ± 0,0006	2,2007 ± 0,0027	2,2133 ± 0,0173
2,0851 ± 0,0502	1,9933 ± 0,0295	2,1016 ± 0,0090	2,1490 ± 0,0072	2,1587 ± 0,0035	2,1667 ± 0,0327
1,7166 ± 0,0011	1,6300 ± 0,0011	2,1697 ± 0,0119	2,1798 ± 0,0090	2,1913 ± 0,0044	2,2033 ± 0,0173

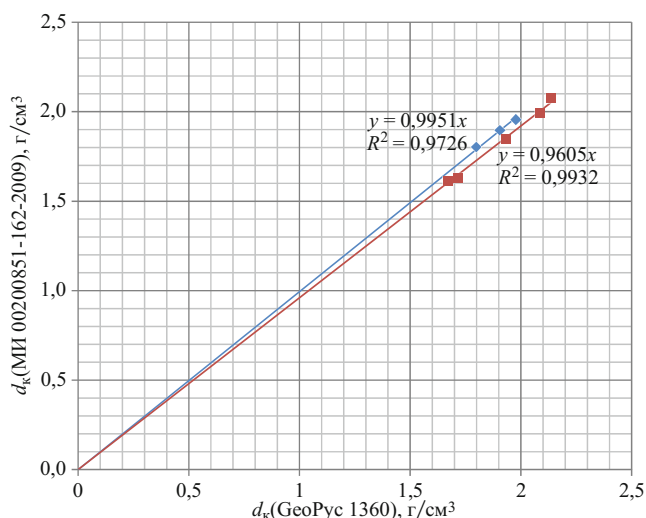


Рис. 1. Взаимозависимость  $d_k$  по GeoPyc 1360 и по МИ 00200851-162-2009 (● — образцы цилиндрической формы; ■ — образцы неправильной формы)

разрушающих методах определения в объеме образца присутствуют как открытые, так и закрытые поры, недоступные для проникновения газовой среды, что ведет к занижению результатов. Напротив, при дроблении большинство закрытых пор вскрываются, что сглаживает искажения.

На рис. 1 и 2 представлены взаимозависимости  $d_k$  и  $d_n$ . Отличия в значениях  $d_k$  при измерении образцов неправильной формы существенно больше, чем в случае образцов правильной (цилиндрической) формы (3,95 против 0,49 %) (см. рис. 1). Возможно, это связано с тем, что при исследовании «неправильных» образцов плотность засыпки псевдожидкой среды в GeoPyc 1360 ниже, чем при измерении «правильных» образцов. Для  $d_n$  величина отличия снижается с увеличением степени дробления: 2,7 — для недробленных образцов, 1,7 — с размером частиц 0,5 мм, 0,85 — с размером частиц 0,1 мм (см. рис. 2). Это можно объяснить тем, что с увеличением степени дробления растет доля вскрытия закрытых пор, ранее недоступных при неразрушающих методах анализа.

Таким образом, предложенный комплекс измерительного оборудования и разработанные методики дают возможность оперативного исследования кажущейся и истинной плотностей КГ и УУКМ. Установлена функциональная зависимость ( $R^2 \approx 1$ ) между результатами поверочных испытаний, что подтверждает достоверность предлагаемого подхода.

Для повышения точности определения кажущейся плотности на GeoPyc 1360 следует использовать образцы правильной формы (вследствие неплотной насыпки псевдожидкой среды при испытании «неправильных» образцов). Однако погрешность устройства остается в пределах допустимых значений как для «правильных», так и «неправильных» образцов.

Значения истинной плотности, получаемые на AccuPyc 1340, оказываются несколько заниженными

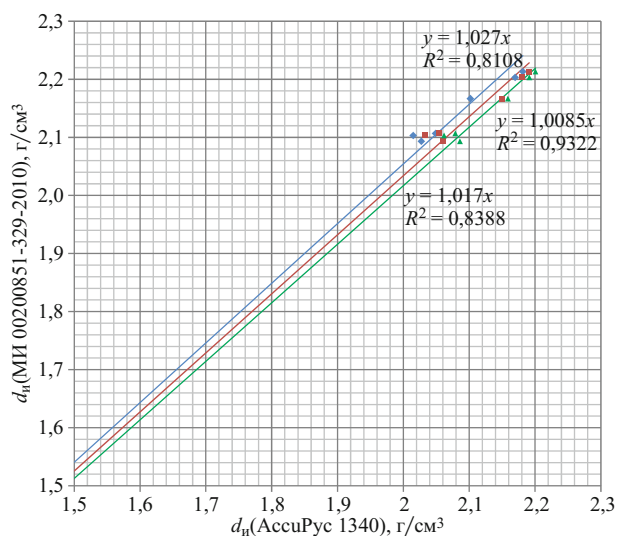


Рис. 2. Взаимозависимость  $d_n$  по AccuPyc 1340 и по МИ 00200851-329-2010 (● — недробленные образцы; ■ — размер частиц 0,5 мм; ▲ — размер частиц 0,1 мм)

из-за наличия закрытых пор. Величина отличия между результатами, полученными по методике МИ 00200851-329-2010 и на устройстве AccuPyc 1340, обратно пропорциональна степени дробления образцов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Буланов И. М., Воробей В. В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: Учебник для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. — 516 с.
2. Калинин Б. А. Физическое материаловедение: Учебник для вузов в 6 томах. Т. 6. Ч. 1. Конструкционные материалы ядерной техники. — М.: МИФИ, 2008. — 672 с.
3. Бушуев Ю. Г., Персин И. М., Соколов А. В. Углерод-углеродные композиционные материалы. — М.: Металлургия, 1994. — 128 с.
4. Аржаников Н. С., Седакова Г. С. Аэродинамика больших скоростей. — М.: Высшая школа, 1965. — 562 с.
5. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. — М.: Машиностроение, 1980. — 533 с.
6. Фялков А. С. Углеродные материалы. — М.: Энергия, 1979. — 320 с.

## REFERENCES

1. Bulanov I. M., Vorobei V. V. Tekhnologiya raketnykh i aërokosmicheskikh konstruksii iz kompozitsionnykh materialov: Uchebnik dlya vuzov [Technology of rocketry and aerospace composite constructions: textbook for high school]. — Moscow: Izd. MG TU im. N. È. Bauman, 1998 — 516 p. [in Russian].
2. Kalin B. A. Fizicheskoe materialovedenie: Uchebnik dlya vuzov [Physical materials science]. Vol. 6. Part 1. Konstruksionnye materialy yadernoi tekhniki [Materials of construction of nuclear technology]. — Moscow: Izd. MIFI, 2008. — 672 p. [in Russian].
3. Bushuev Yu. G., Persin I. M., Sokolov A. V. Uglërod-uglërodnye kompozitsionnye materialy [Carbon-carbon composites]. — Moscow: Metallurgiya, 1994. — 128 p. [in Russian].
4. Arzhanikov N. S., Sedakova G. S. Aërodinamika bol'shikh skorostei [Aerodynamics of large velocities]. — Moscow: Vysshaya Shkola, 1965. — 562 p. [in Russian].
5. Alemasov V. E., Dregalin A. F., Tishin A. P. Teoriya raketnykh dvigatelei. Uchebnik dlya studentov mashinostroitel'nykh spetsial'nostei vuzov [Theory of rocket engines]. — Moscow: Mashinostroenie, 1980. — 533 p. [in Russian].
6. Fialkov A. S. Uglegrafitovye materialy [Carbon-graphite materials]. — Moscow: Ènergiya, 1979 — 320 p. [in Russian].