

УДК 620.174.22

## ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ УГЛЕРОДНЫХ И УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ДО 3000 °С

© Г. Е. Мостовой, А. П. Карпов<sup>1</sup>

*Статья поступила 6 июня 2016 г.*

Описаны особенности уникальной испытательной машины, разработанной в научно-исследовательском институте конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит», для исследования механических свойств углеродных и углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) при растяжении, сжатии и изгибе в интервале температур от 20 до 3000 °С. Отмечены достоинства конструкций печей для испытательной машины и dilatометров для измерений продольного перемещения образцов при определении упругих деформационных характеристик исследуемых материалов, а также конструкций реверсов для испытаний образцов на сжатие и изгиб. Показана необходимость использования образцов при сжатии нестандартной формы в виде катушки и образцов на растяжение с удлиненными головками для углерод-углеродных композиционных материалов. Указанные особенности позволили определить не только прочностные, но и упругие деформационные характеристики углеродных и углерод-углеродных композиционных материалов в диапазоне 20 – 3000 °С.

**Ключевые слова:** углерод-углеродный композиционный материал (УУКМ); dilatометрические стержни; реверс; жаропрочность.

Серьезной проблемой высокотемпературных испытаний жаропрочных материалов, в том числе углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ), является нагрев до высоких температур (до 3000 °С) за относительно короткое время и измерение переме-

щений (деформаций) образцов под воздействием приложенных нагрузок.

Быстрый нагрев образца из УУКМ можно осуществить путем пропускания через него электрического тока, возможны также индукционный и электронно-лучевой нагревы [1, 2]. Но эти методы позволяют равномерно прогреть фасонный образец по всему объему (в процессе выдержки при заданной температуре) только в случае применения специальной формы за-

<sup>1</sup> Госкорпорация «Росатом», АО «Наука и инновации», Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит», Москва, Россия; e-mail: andrew.karpov@gmail.com

хватов из материалов, резко отличающихся тепло- и электропроводностью от материала образца. Подобный подход к испытанию углерод-углеродных материалов невозможен, так как захваты должны быть изготовлены из такого же материала, что и образец. Кроме того, поддерживать заданную температуру по всему объему образца в процессе его деформирования указанными методами затруднительно из-за изменения структуры материала вследствие деформационного упрочнения. Последнее сопровождается пластическими деформациями углеродной матрицы и наполнителя УУКМ, а также возникновением и развитием в них микро- и макротрещин как внутри, так и на границах раздела. Эти дефекты могут приводить к возникновению локальных областей перегрева и, соответственно, к искажению результатов испытания.

Авторы работы [3] осуществляли быстрый нагрев непосредственно рабочей части образца, используя компактный пластинчатый графитовый нагреватель и водоохлаждаемые металлические захваты, охлаждая при этом и захватные части образца. Для предупреждения разрушения вне рабочей части применяли фасонный образец, имеющий большее сечение в нерабочей зоне. Но как показала практика испытаний, применение подобных образцов не гарантирует разрушение только в рабочей части. При наличии не фиксируемых визуально концентраторов напряжений в объеме образца в виде микро- и макродефектов типа пор или трещин как в самих компонентах УУКМ, так и на границе раздела, а также обрывов углеродных жгутов разрушение может произойти и вне рабочей части.

Серьезной проблемой является также измерение продольного перемещения (деформации) образцов из углеродных материалов при высоких температурах датчиками с удлинителями и ножами, непосредственно контактирующими с телом образца [4, 5]. Но указанные датчики могут надежно работать только до 1200 – 1600 °С.

Разработанные и применяемые в настоящее время бесконтактные лазерные и оптические датчики позволяют фиксировать продольное перемещение образца при температурах выше 1600 °С [6 – 8]. Но в случае с УУКМ необходимо решать проблему сцепления контрастных (керамических) меток с углеродной матрицей (коксом) и углеродным наполнителем (углеродными тканью, жгутами или стержнями), поскольку величина адгезии меток к этим компонентам может сильно отличаться. При деформировании этот факт, а также различие в деформационных свойствах кокса и наполнителя могут приводить к отслаиванию меток при температурных испытаниях.

Пробные исследования лазерного датчика P-50 фирмы «Fiedler Optoelektronik GmbH», проведенные при испытании углерод-углеродных образцов на швейцарской машине Walter+b LFMZ-50 в НИИГрафит, показали, что наряду с настройкой режима само-

го излучателя необходимо также подбирать материал керамических меток таким образом, чтобы их контрастность по отношению к образцу сохранялась при нагреве до 2000 °С, поскольку при температурах выше 1400 °С углеродный образец начинает светиться ярче, чем метки.

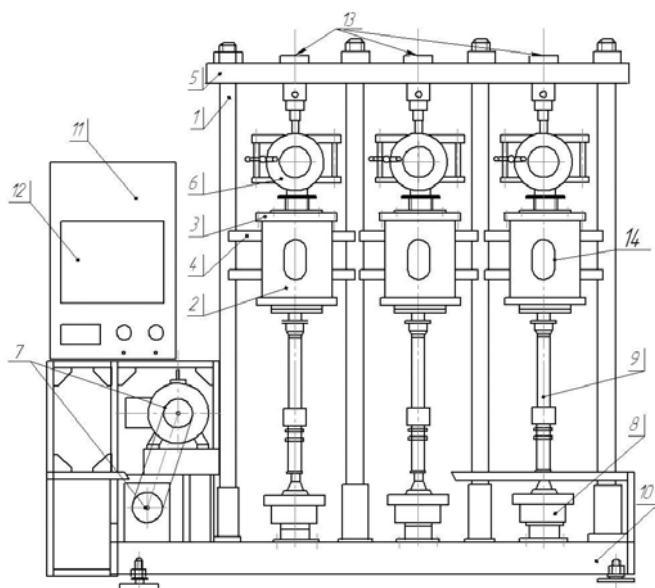
Многолетняя эксплуатация высокотемпературного оборудования в НИИГрафит показала надежность использования dilatометрического способа измерения продольных перемещений образца. Для этого вначале применяли высокотемпературные испытательные машины, разработанные на основе машин Dst-5000. Эти машины позволяли проводить как кратковременные испытания, так и испытания на ползучесть углеродных материалов (графитов, пирографитов и стеклоуглеродов) при растяжении и сжатии до 3000 °С [9].

Для нагрева использовали трубчатый графитовый нагреватель диаметром 38, длиной 260 и толщиной 4 мм. Зона его нагрева превышала в 2,5 раза длину образца, при этом нижний конец нагревателя вместе с токоподводом не закреплялся, что позволяло ему свободно перемещаться в процессе термического расширения.

Перемещение образца в процессе нагрева и нагружения фиксировалось с помощью dilatометрической системы, состоящей из измерительной головки и составных экстензометрических стержней, изготавливаемых из мелкозернистого графита. Стержни проходили через высокотемпературную зону (1000 – 3000 °С) и непосредственно контактировали с образцом — упирались в его торцевые поверхности. Продолжением графитовых стержней служили кварцевые трубчатые стержни, которые проходили через низкотемпературную зону (20 – 1000 °С) и передавали перемещение образца измерительной головке. Измерительная головка устанавливалась вне горячей зоны, в отдельной камере, жестко расположенной на водоохлаждаемом корпусе печи. Результаты высокотемпературных исследований графитов опубликованы в работах [10 – 12], в которых показано, что с увеличением температуры испытания вплоть до 2500 °С прочность этих материалов повышается. Это объясняется теплофизическими особенностями углеродных материалов: при атмосферном давлении они не плавятся и при температурах выше 2200 °С начинают интенсивно сублимировать. При 1500 °С под воздействием приложенной внешней нагрузки углеродные материалы проявляют пластичность, которая приводит к их деформационному упрочнению, максимальному в интервале 2200 – 2500 °С.

Недостатки указанных машин — длительный выход на заданную температуру выше 2000 °С (до 30 – 40 мин) и невозможность испытания образцов на изгиб.

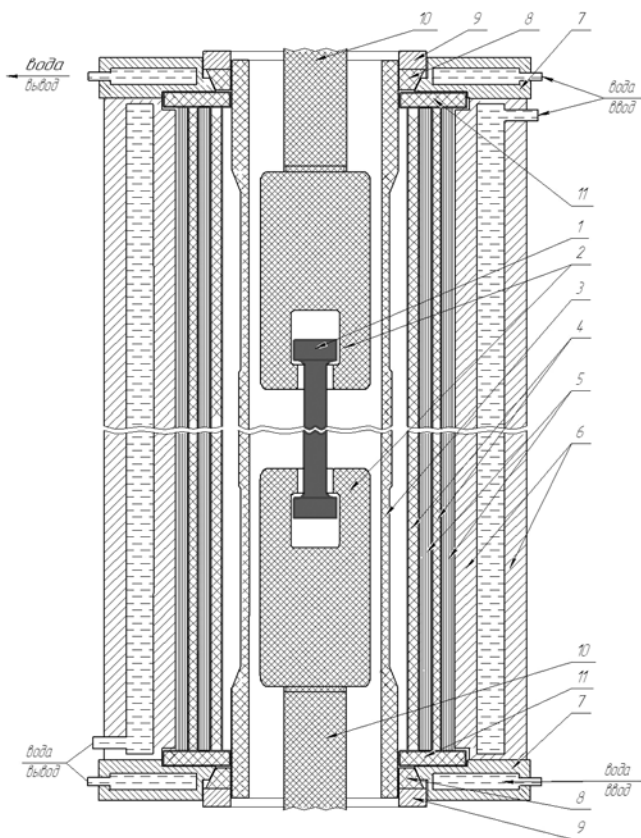
В начале семидесятых годов в институте была разработана и запущена в эксплуатацию универсаль-



**Рис. 1.** Схема универсальной испытательной машины ИМГр-3000-1000: 1 — колонна; 2 — высокотемпературная печь; 3 — водоохлаждаемая токоподводящая крышка; 4 — текстолитовая направляющая; 5 — верхняя неподвижная траверса; 6 — камера измерителя деформации; 7 — привод; 8 — червячный редуктор; 9 — нижняя водоохлаждаемая тяга; 10 — нижняя траверса; 11 — пульт управления; 12 — двухкоординатный самописец; 13 — силоизмерители (динамометры); 14 — иллюминаторы

ная испытательная машина ИМГр-3000-1000, позволяющая проводить кратковременные механические испытания графитовых и углеродных материалов при температурах до 3000 °С не только на растяжение и сжатие, но и на изгиб — за счет увеличения диаметра нагревателя до 60 мм. Причем стало возможным испытывать на изгиб образцы длиной до 55, шириной до 12 и толщиной 2 – 10 мм. Как показала практика испытаний графитовых образцов, максимальная разрывная нагрузка машины не должна была превышать 2000 кгс. Такое ограничение по разрывной нагрузке обусловлено прочностью графитовых материалов, применяемых на момент создания машин для изготовления графитовой оснастки.

Испытательная машина (рис. 1) состояла из трех секций с общей неподвижной станиной (траверсой) 10 и общим электроприводом 7 для увеличения производительности испытаний при температурах выше 2200 °С, при которых длительность охлаждения печи составляла 30 – 90 мин. Поэтому образец испытывали сначала на одной секции, затем привод переключался на вторую секцию, куда устанавливали образец и нагревали его до заданной температуры с последующими выдержкой и испытанием. После испытания на второй секции привод переключался уже на третью секцию и повторялась процедура установки, нагрева и испытания следующего образца. При снижении температуры в печи первой секции до 50 – 70 °С испытания проводились на ней.



**Рис. 2.** Схема печи для испытаний: 1 — испытываемый образец; 2 — захваты из графита или УУКМ; 3 — графитовый нагреватель; 4 — графитовые теплозащитные экраны; 5 — теплозащитные экраны из графитированной ткани; 6 — водоохлаждаемый корпус печи; 7 — медные водоохлаждаемые токоподводящие крышки; 8 — графитовые конусные прижимные кольца-фиксаторы; 9 — медные прижимные гайки; 10 — тяги из графита или из УУКМ; 11 — кольцевые теплозащитные графитовые пластины

Наличие трех секций машины позволяет проводить на ней последовательно высокотемпературные испытания образцов на растяжение, сжатие и изгиб при температурах выше 2200 °С. Испытывая по 5 – 7 образцов каждого типа, можно получить надежную зависимость механических свойств углеродных материалов от температуры испытания.

Как показала практика высокотемпературных испытаний в печи (рис. 2) испытательной машины, оба конца графитового трубчатого нагревателя можно жестко защемлять в медных токоподводах, которые одновременно служат крышками печи 7.

Контакт нагревателя с токоподводами осуществляется с помощью графитовых прижимных колец-фиксаторов. Вставки к нагревателю прижимаются с помощью медных прижимных гаек 9. Для создания равномерной зоны прогрева нагреватель изготовлен фасонным: средняя его часть длиной 70 мм более толстая (4 мм), чем приторцевая (3 мм). Конструкция печи позволяет нагревать образцы до температуры 3000 °С за 3 мин за счет изменения не только крепления нагревателя в токоподводах, но и системы экрани-

рования стального корпуса печи и медных токоподводов-крышек.

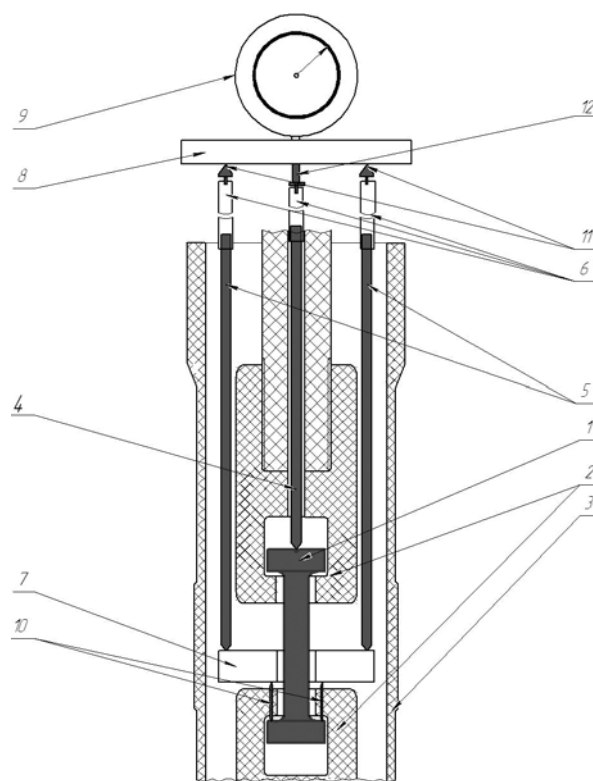
Вместо теплоизоляционной сажевой засыпки в таких печах используется система коаксиально расположенных графитовых цилиндрических экранов 4, пространство между которыми заполнено графитированной тканью 5. Теплоизоляция медных крышек осуществляется с помощью кольцевых теплозащитных графитовых пластин 11, также чередующихся со слоями графитированной ткани. Изменение системы крепления нагревателя и системы теплоизоляции позволило изготовить компактную печь мощностью 80 кВт с водоохлаждаемым корпусом 6 из нержавеющей стали высотой 350 и диаметром 300 мм.

Чтобы поменять захваты и установить образец, печи на машине ИМГр-3000-1000 перемещаются вниз с помощью направляющих 4 вдоль колонн 1 (см. рис. 1).

При разработке конструкции печи с рабочей зоной нагрева, превышающей в 2 – 3 раза длину образца для растяжения, исходили из того, что образец и графитовые захваты должны иметь одинаковую температуру. Если бы захваты находились при более низкой температуре, чем образец, то обладали бы меньшей прочностью, а следовательно, могли разрушиться, несмотря на значительно большее сечение [13]. Поскольку графитовые тяги только частично заходят в рабочую зону, отмечены случаи их разрушения в зоне пониженной температуры, где работает их основная часть. Как показали исследования, причиной разрушения являлось наличие внутренних дефектов (пор, внутренних трещин), а также дефектов, появившихся в результате отклонения от технологического процесса при производстве графита (коковых включений). Другой причиной может служить интенсивный теплообмен от захватов к тягам, способствующий увеличению концентрации внутренних напряжений в тягах.

Для измерения продольной деформации при растяжении, сжатии и прогиба образцов использовали дилатометрическую систему. Она состоит (рис. 3) из трех составных экстензометрических стержней: одного центрального (4), который своим графитовым заостренным концом опирается на торец верхней головки образца 1, и двух крайних стержней (5), опирающихся заостренными концами в графитовое коромысло 7. Последнее устанавливается на два игольчатых стержня 10 из мелкозернистого графита, которые, проходя через отверстия в нижнем захвате, упираются в опорную торцевую поверхность нижней головки образца. Верхние концы кварцевых трубчатых стержней со стальными наконечниками выведены в водоохлаждаемую камеру, в которой поддерживается комнатная температура. В камере на специальной платформе 8 установлена измерительная головка 9, представляющая собой индикатор часового типа.

Для температурного диапазона до 2000 °С, когда упругие и пластические деформации графитовых об-



**Рис. 3.** Схема дилатометрической системы измерения деформации: 1 — испытуемый образец; 2 — графитовые (либо УУКМ) захваты; 3 — графитовый нагреватель; 4 — центральный графитовый стержень; 5 — боковые графитовые стержни; 6 — кварцевые стержни; 7 — графитовое коромысло; 8 — платформа; 9 — измерительная головка; 10 — игольчатые стержни; 11 — стальные наконечники; 12 — подвижный шток индикатора часового типа

разцов относительно невелики, используют индикаторы типа МИГ-1, МИГ-2 с максимальными диапазонами измерения до 1 и 2 мм соответственно. При температурах выше 2000 °С для измерения больших деформаций применяется индикатор типа МИГ-10.

Платформа опирается на два стальных наконечника 11 крайних кварцевых стержней, при этом средний стержень с седловидным наконечником упирается в подвижный шток индикатора 12. В результате крайние стержни перемещаются вместе с нижней головкой образца, фиксируя ее перемещение относительно верхней его головки. К индикатору прикреплена консольная балочка с наклеенными на ней тензодатчиками, которая свободным концом касается верхнего конца штока. Когда этот шток нажимает на балочку, она изгибается, вызывая изменение электрического потенциала на тензодатчиках.

Это изменение в виде электрического сигнала подается на двухкоординатный самописец 12 (см. рис. 1). Для регистрации усилия, прикладываемого к образцу, на верхней неподвижной траверсе машины установлены три динамометра 13 (см. рис. 1), рассчитанные на максимальную нагрузку 2000 кгс. На рабочую часть динамометров наклеены тензодатчики, собранные по мостовой схеме. Электрический сигнал



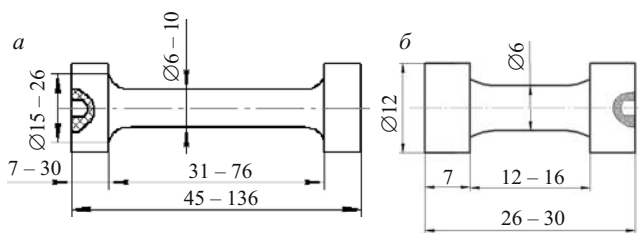


Рис. 4. Образцы для механических испытаний графитовых материалов на растяжение (а) и сжатие (б)

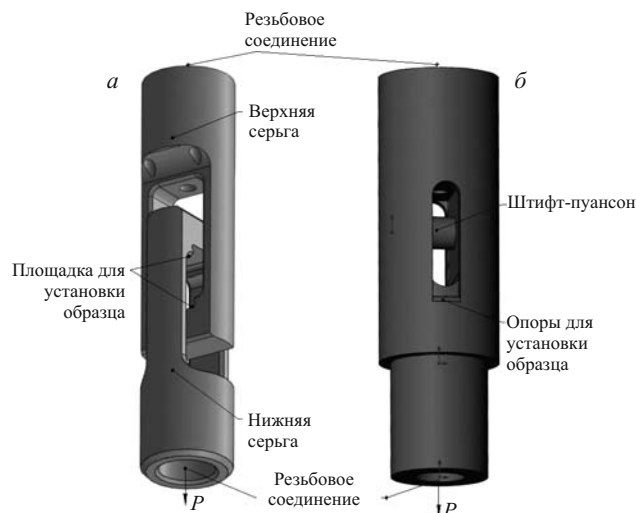


Рис. 5. Реверсы для высокотемпературных испытаний на сжатие (а) и изгиб (б)

от динамометра также подается на двухкоординатный самописец, в результате чего записывается диаграмма деформирования.

Температура образца измеряется с помощью оптического двухцветного пирометра «Диэлтест-ТЦ5П» (пирометра спектрального отношения) через кварцевое стекло иллюминатора 14 (см. рис. 1) с инструментальной погрешностью, не превышающей 0,3 %. Для пирометра данного типа потемнение стекла в результате осаждения на него паров углерода или задымления в случае выделения из образца газообразных продуктов термохимических реакций и окисления легирующих добавок не сказывается на точности измерения температуры в определяемом диапазоне (800 – 3000 °С) [14].

Для испытаний на растяжение графитовых конструкционных материалов в диапазоне 20 – 3200 °С используют круглые образцы — простые и удобные (рис. 4, а). Центрирование образца и захватов осуществляется за счет карданного переходника, соединяющего камеру для измерителя деформации с динамометром. Дилатометрический графитовый стержень фиксируется в центре головки образца за счет центрирующего глухого отверстия глубиной ~1 мм.

Для испытаний образцов на сжатие на машине ИМГр-3000-1000 разработан реверс, изготавливаемый

из одной заготовки высокопрочного мелкозернистого графита (рис. 5, а). Особенность конструкции реверса заключается в том, что две серьги, входя друг в друга, образуют единое целое, не имея никаких болтовых креплений для соединения.

Для испытаний на сжатие наиболее простой формой графитового образца является прямоугольный цилиндр, высота которого в два раза больше диаметра. Как показала практика высокотемпературных испытаний, такие образцы чаще разрушались по торцам, образуя конусообразную поверхность. Данный вид разрушения приводил к занижению прочности, модуля упругости, завышению деформации и искажению диаграмм деформирования из-за смятия и локального продавливания графитовых опор под образцами при температурах выше 2000 °С. Для исключения указанных недостатков стали применять образцы более сложной формы — образцы-катушки (рис. 4, б). Указанные на рис. 4, б размеры образца на сжатие обусловлены особенностями конструкции реверса. Для центрирования центрального дилатометрического стержня на образце-катушке также сделано небольшое углубление, как и в образце для растяжения. Все графитовые образцы данной формы в диапазоне температур 20 – 2000 °С разрушались в выделенной рабочей части в результате сдвига под углом 45°. При температурах испытания 2200 – 2400 °С разрушение происходило также в результате поперечного сдвига, но при этом оно сопровождалось пластическими деформациями, которые приводили к появлению бочкообразного выпучивания. При температурах  $\geq 2500$  °С образцы невозможно было разрушить из-за их смятия.

Для испытаний на трех- и четырехточечный изгиб применяется графитовый реверс другой конструкции (рис. 5, б). Образец укладывался в продольные пазы верхнего и нижнего (активного) захвата. В пазах верхнего захвата две нижние поперечные стенки являются опорами с радиусом закругления 2 мм. Нажимное усилие создается пуансоном в виде штифта диаметром 10 мм, закрепляемым в нижнем захвате. Ширина паза составляет 12 мм.

С появлением в семидесятых годах углерод-углеродных материалов, разработанных в НИИГрафит, вся графитовая оснастка для испытаний на растяжение и изгиб (тяги и захваты) на машине ИМГр-3000-1000 была заменена на оснастку, изготовленную из многомерных УУКМ. Замена обусловлена частым разрушением графитовой оснастки в результате динамических нагрузок, возникающих при разрушении образцов из высокопрочных композиционных материалов.

Для высокотемпературных испытаний многомерных УУКМ на растяжение использовали круглые образцы с удлиненной головкой длиной 30 мм для исключения выскальзывания жгутов (стержней) из углеродной матрицы (рис. 6, а). Для УУКМ на тканой основе стали применять плоские образцы — двусторонние лопатки с заплечиками (рис. 6, б).

Для высокотемпературных испытаний объемно-армированных материалов на сжатие применяли реверс из мелкозернистого прочного графита ввиду сложности его изготовления из УУКМ.

Длительные испытания показали надежность работы тяг и захватов из объемно-армированных материалов. Не зафиксировано ни одного случая разрушения указанной оснастки при испытании образцов в диапазоне 20 – 3000 °С.

Благодаря разработанным в институте НИИГрафит высокотемпературному испытательному оборудованию и методикам испытаний стало возможным исследование изменения не только прочности конструкционных углеродных материалов и УУКМ, но и их деформационных характеристик, изучение влияния состава, технологии получения и особенностей структуры материалов на работоспособность изделий из них при температурах до 3000 °С.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 770000880033 СССР, кл. G 01 N3/18. Образец для испытания на прочность при нагреве прямым пропусканием тока / Н. Н. Малушкин, А. М. Росс, Н. С. Зубков — № 4735106; заявл. 07.09.89; опубл. 15.08.91. Бюл. № 30(71).
2. А. с. 1391549/29-33 СССР, М. кл. F 27b 17/2. Устройство для нагревания образца материала / А. А. Каплан — № 352106; заявл. 04.01.70; опубл. 21.09.72. Бюл. № 28.
3. Белов Н. В., Вагин В. П., Дворецкий А. Э. и др. Установка для механических испытаний композиционных материалов при высоких температурах: Новые технологии / Материалы X Всероссийской конференции. Миасс. 15 – 17 октября 2013. Т. 2. — М.: РАН, 2013. С. 199.
4. Машины для испытания на растяжение, сжатие и изгиб ИПЭ — разрывные машины. [http://www.skbim.ru/product/razrivnaya\\_machina.html](http://www.skbim.ru/product/razrivnaya_machina.html) (Дата обращения 04.05.2015).
5. Пат. 2110766 РФ, МПК G01B7/16. Устройство для измерения деформаций при повышенных температурах / Ильин Ю. С.; Заявитель и патентообладатель Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского. — № 96115089/28; заявл. 23.07.96; опубл. 10.05.98. Бюл. № 13.
6. Афанасьев В. А., Барсуков В. С., Гофин М. Я. и др. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов. — М.: МАИ, 1964. — 412 с.
7. Sander C., Lamon J., Pailier R. The tensile properties of carbon matrices at temperatures up to 2200°C / Carbon. 2005. Vol. 43. N 10. P. 2054 – 2065.
8. Kobayachi K., Yamaguchi I. High Accuracy and Wide Temperature Measurement by Non-Contact Speckle Extensometer / Strain. 2011. Vol. 47. N 1. P. 98 – 103.
9. Дергунов Н. Н., Барабанов В. Н. Техника эксперимента при исследовании углеграфитовых материалов при 20 – 3200 °С / Заводская лаборатория. 1964. Т. 30. № 8. С. 997 – 1005.
10. Dergunov N. N., Krotov A. I., Barabanov V. N., Anufriev U. P. Tensile and creep behavior of polycrystalline graphites / Carbon. 1972. Vol. 10. P. 19 – 27.
11. Дергунов Н. Н., Паперник Л. Х., Работнов Ю. Н. Анализ поведения графита на основе нелинейной наследственной теории / Прикл. мех. теор. физ. 1971. № 2. С. 76 – 82.
12. Карпов А. П., Мостовой Г. Е. Высокотемпературные механические свойства углеродных и композиционных углерод-углеродных материалов / Перспективные материалы. 2015. № 3. С. 13 – 21.
13. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: Справочник / Под ред. В. П. Соседова. — М.: Metallurgiya, 1975. — 336 с.
14. Семейство Термоконт-ТЦ5П. <http://www.pyrometer.ru> (Дата обращения 04.05.2015).

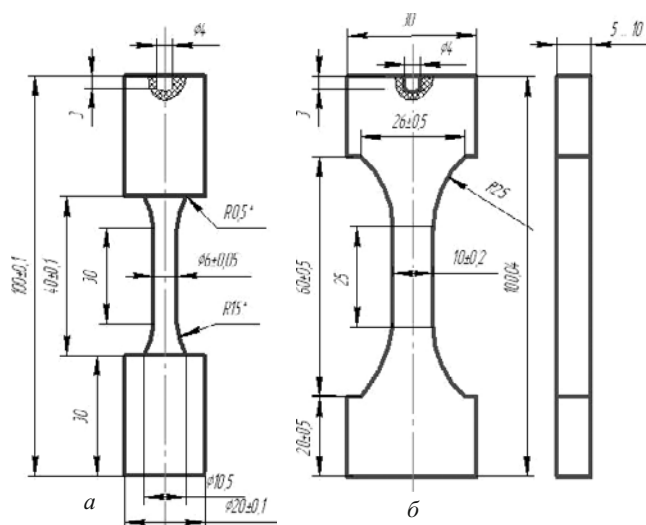


Рис. 6. Образцы для высокотемпературных испытаний УУКМ на растяжение: а — цилиндрический образец для испытаний объемно-армированных УУКМ; б — плоский образец для испытаний двумерно-армированных слоистых материалов

## REFERENCES

1. USSR Inventor's Certificate No. 770000880033. A sample for strength tests at heating direct current transmission / N. N. Malushkin, A. M. Ross, N. S. Zubkov; appl. 07.09.89; publ. 15.08.91. Byull. Otkryt. Izobret. 1991. N 30(71) [in Russian].
2. USSR Inventor's Certificate No. 1391549/29-33. The device for heating the sample material / A. A. Kaplan; appl. 04.01.70; publ. 21.09.72. Byull. Otkryt. Izobret. 1972. N 28 [in Russian].
3. Belov N. V., Vagin V. P., Dvoretiskii A. É., et al. Installation for mechanical testing of composite materials at high temperatures: New technologies / Materials of the 10<sup>th</sup> All-Russian Conference. Miass. October 15 – 17, 2013. Vol. 2. — Moscow: Izd. RAN, 2013. P. 199 [in Russian].
4. Testing machine tensile, compression and bend IRE-bursting machine. [http://www.skbim.ru/product/razrivnaya\\_machina.html](http://www.skbim.ru/product/razrivnaya_machina.html) (accessed 04.05.2015).
5. RF Pat. No. 2110766, MPK G01B7/16. A device for measuring deformations at elevated temperatures / Il'in Yu. S.; appl. 23.07.96; publ. 10.05.98. Byull. Otkryt. Izobret. 1998. N 13.
6. Afanas'ev V. A., Barsukov V. S., Gofin M. Ya., et al. Experimental testing of spacecraft. — Moscow: Izd. MAI, 1964. — 412 p. [in Russian].
7. Sander C., Lamon J., Pailier R. The tensile properties of carbon matrices at temperatures up to 2200°C / Carbon. 2005. Vol. 43. N 10. P. 2054 – 2065.
8. Kobayachi K., Yamaguchi I. High Accuracy and Wide Temperature Measurement by Non-Contact Speckle Extensometer / Strain. 2011. Vol. 47. N 1. P. 98 – 103.
9. Dergunov N. N., Barabanov V. N. Experimental techniques in the study of carbon-graphite materials at 20 – 3200°C / Zavod. Lab. 1964. Vol. 30. N 8. P. 997 – 1005 [in Russian].
10. Dergunov N. N., Krotov A. I., Barabanov V. N., Anufriev U. P. Tensile and creep behavior of polycrystalline graphites / Carbon. 1972. Vol. 10. P. 19 – 27.
11. Dergunov N. N., Papernik L. Kh., Rabotnov Yu. N. Analysis of the behavior of graphite on the basis of the nonlinear hereditary theory / Prikl. Mekh. Teor. Fiz. 1971. N 2. P. 76 – 82 [in Russian].
12. Karpov A. P., Mostovoi G. E. High temperature mechanical properties of carbon and composite carbon-carbon materials / Perspekt. Mater. 2015. N 3. P. 13 – 21 [in Russian].
13. Sosodov V. P. (ed.). Properties of structural materials based on carbon: reference book. — Moscow: Metallurgiya, 1975. — 336 p. [in Russian].
14. The family of termokont-TTs5P. <http://www.pyrometer.ru> (accessed 04.05.2015) [in Russian].