

Тепловое деформирование углерод-углеродных композиционных материалов с различными схемами армирования при термоциклировании

Л. И. Грачева

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Рассмотрены результаты экспериментального исследования теплового деформирования карбонизированных углепластиков, используемых в качестве тепловой защиты летательных аппаратов многоразового действия. Показано, что при термоциклировании слоистых, хаотически и пространственно армированных углерод-углеродных композиционных материалов до определенного цикла нагрева (четыре-пять) значения теплового расширения увеличиваются независимо от газовой среды испытания. При росте числа термоциклов начинается постепенное уменьшение тепловой деформации материалов, связанное со структурными изменениями в матрице, волокне и на границах раздела сред композита.

Ключевые слова: композиционный материал, углеродное волокно, карбонизированная матрица, температура, циклический нагрев, тепловые деформации.

Введение. Благодаря высокой удельной прочности и экономичности композиционные материалы, армированные углеродными волокнами, широко применяются в качестве конструктивных в авиастроении. Детали фюзеляжа и основных крыльев, хвостовое оперение, обшивки элементов конструкций, лопасти несущего винта, рули направления в отечественных транспортных самолетах предыдущего поколения составляли 53% общей массы конструктивных материалов [1], в американских истребителях типа ADCA (Advanced Design Composite Aircraft) – до 69% [2].

Композиты на основе углеродных волокон эффективно применяются также в космической технике. Предполагается, что количество углеродных волокон, используемых в этой области в США, составляет не менее 10% объема их производства [3]. Замена металлических (алюминиевых) деталей и узлов аэрокосмических аппаратов углепластиковыми позволяет снизить массу конструкций на 15...25% [4], что, в свою очередь, например, в самолетах приводит к так называемому каскадному эффекту. При практически одинаковой стоимости их изготовления расходы в процессе эксплуатации падают – уменьшение массы самолетов приводит к снижению массы двигателя, топлива при сохранении тех же летных характеристик [5].

В 2005 г. начались испытания натуральных элементов конструкций американского самолета “Боинг-787”, которые выполнены из углепластика. Испытания на прочность (растяжение, сжатие, изгиб) натуральных углепластиковых панелей фюзеляжа осуществляли в аэродинамических трубах ЦАГИ (г. Жуковский, Россия). Предполагается, что замена металла композитом позволит уменьшить вес и первоначальную стоимость этого авиагиганта на 20%.

Карбонизированные углепластики, или так называемые углерод-углеродные материалы благодаря малой плотности ($\gamma \approx 1,3 \text{ г/см}^3$), возможности сохранения механических свойств до температур порядка 3000°С, высокой

температуре сублимации (3600°С) являются уникальным конструкционным и теплозащитным материалом, работающим при температурах до 3000°С и выше.

Исследование линейного термического расширения углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) представляет большой научный и практический интерес, обусловленный прежде всего необходимостью оценки конструкционных возможностей материалов, эксплуатируемых в жестких температурных условиях. Необходимость учета возможных значений тепловых деформаций композиционных материалов (КМ) и сочетания их с величинами линейного теплового расширения металлов существенно возрастает при многократных температурных воздействиях.

Характер теплового деформирования углеродных композиций связан с такими особенностями их структуры, как отсутствие трехмерной упорядоченности в карбонизированной матрице, наличие внутренних напряжений, возникающих в материале главным образом при изготовлении [6, 7], система перекрестных связей, образующаяся при спекании, многофазность и условия взаимодействия входящих в нее компонентов [8].

Углеродные волокна, полученные графитизированием полиакрилонитрильных (ПАН) волокон, представляют собой самоармированную систему, состоящую из “хребтовых” (длинных) кристаллов и поперечников той же природы [9]. Химическое родство компонентов углеродного волокна обеспечивает такое качество адгезионного взаимодействия, что оно может рассматриваться как идеальное для достижения комплекса физико-механических свойств.

Способ укладки армирующего наполнителя является одним из эффективных методов управления свойствами композита. Стремление снизить анизотропию теплофизических свойств приводит в случае объемно-армированных УУКМ к увеличению количества направлений армирования: 4D, 5D, 7D

В работе [10] предпринята попытка теоретической оценки коэффициентов термического расширения α (КТР) пространственно-армированного композита структуры nD , где n – количество направлений армирования. Расчет КТР выполнен по схеме однонаправленных структурных элементов, пространственно-армированных в представительном объеме. Коэффициент термического расширения трехмерно-армированного (3D) УУКМ с кубической симметрией и анизотропией упругих свойств определяется как

$$\alpha = \frac{\alpha_{\perp} + \alpha_{\parallel} n^0}{n^0 + 1},$$

где n^0 – комбинированный параметр, характеризующий анизотропию упругих свойств структурного элемента,

$$n^0 = \frac{1 - \nu_{23}^0 + 2\nu_{12}^0}{2(1 + \nu_{21}^0)} \frac{E_1^0}{E_2^0},$$

индексы 1, 2, 3 обозначают грани единичного куба; ν – коэффициент поперечной деформации; E – модуль упругости.

Предложенная модель, по мнению авторов [10], не учитывает точности перехода к приведенной сплошной среде, что вызывает существенные погрешности и большие расхождения с экспериментом. Кроме того, не представляется возможным оценить теоретически степень реализации упругих свойств углеродного волокна в композите вследствие нарушения адгезионной связи на границе раздела волокно–связующее. Увеличение размеров углепластиков при нагреве может быть обусловлено релаксацией напряжений, аккумулированных в армирующем пакете в процессе изготовления [6]. При давлении прессования, например, в 25 кг/см^2 максимальная деформация с учетом сопротивления матрицы, по данным авторов [11], составляет приблизительно 10%. Не поддается расчету также повышение жесткости углеродного волокна вследствие его науглероживания при повторных нагревах.

Данные о соответствии экспериментально полученных свойств разработанных УУКМ при нагреве до 1000°C и выше с их теоретической оценкой в литературных источниках практически отсутствуют. Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном исследовании характеристик термического расширения (усадки) УУКМ в зависимости от способа укладки углеродных волокон в композите: хаотически армированных; слоистых с тканым наполнителем и пространственно-армированных при термоциклировании в интервале температур $20\dots 1000^\circ\text{C}$.

Методы экспериментального исследования. Разработанные в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины установки позволяют исследовать температурные деформации неметаллических композиционных деструктурирующих и углеродных материалов в интервале температур $20\dots 2200^\circ\text{C}$. С их помощью можно исследовать влияние на процесс деформирования скорости нагрева, химического состава и давления газовой среды, а также других факторов, моделирующих реальные условия работы конструкционных элементов.

Определение величин теплового деформирования УУКМ с различной структурой при термоциклировании проводили на dilatометрической установке ДТМ, которая позволяет исследовать деформативные свойства образцов из теплозащитных материалов в условиях равномерного и одностороннего нагрева при различных давлениях газовой среды и скорости нагрева в интервале $1\dots 700$ град/мин. В качестве рабочей среды использовали аргон или воздух [12]. Установка ДТМ состоит из высокотемпературной печи, системы нагрева образца, регулирования и измерения его температуры, бесконтактной системы измерения тепловых деформаций образца, системы создания и измерения давления газа внутри печи или ее продувки инертным газом, а также системы охлаждения деталей печи [13].

Базой измерения деформаций является расстояние l_0 между двумя реперами специальной формы [14] (рис. 1). Деформация образца при нагреве измеряется автоматически специально разработанной двухканальной оптической следящей системой ОСС-50-1300 [13, 15], реализующей метод непрерывного фотослежения за реперами, внедренными в образец. С выходов обоих измерительных каналов постоянные напряжения, соответствующие смещениям меток, подаются на интегратор, где алгебраически складываются.

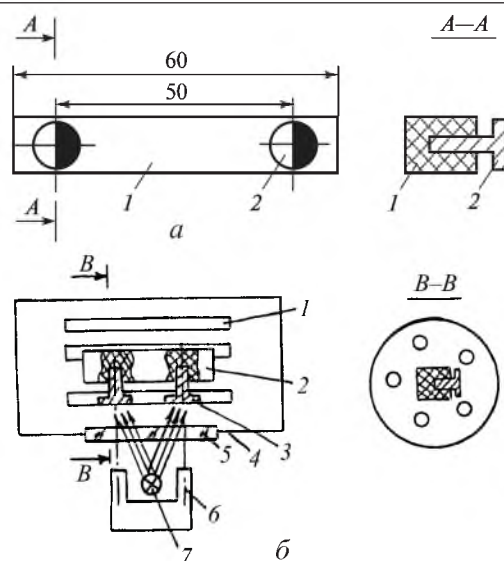


Рис. 1. Образец для исследования теплового деформирования композиционных материалов (1 – образец, 2 – реперы) – а и схема его размещения в испытательной камере установки ДТМ (1 – нагреватели, 2 – образец, 3 – реперы, 4 – камера, 5 – иллюминатор, 6 – оптико-электронная система ОСС-50-1300, 7 – осветитель) – б.

Вторичные регистрирующие устройства (электронный потенциометр, компьютер) записывают непрерывную кривую изменения величины температурного расширения (усадки) образца в координатах Δl (перемещение) – T (температура).

Равномерность распределения температуры по длине образцов размерами $10 \times 10 \times 60$ мм обеспечивалась условиями в нагревательной камере dilatометрической установки. Предварительное термометрирование образцов тканого углеродного материала показало, что температурной неравномерностью, составляющей $3...7^\circ\text{C}$ при температурах меньше 200°C по сечению образцов и $1...3^\circ\text{C}$ при температурах до 400°C , можно пренебречь.

После нагрева до 400°C и выше происходит выравнивание температур по всему сечению образцов. При повторных нагревах неравномерность температур по сечению образцов практически отсутствует, что объясняется, очевидно, ростом теплопроводности карбонизированных углепластиков, связанным с более глубоким коксованием связующего в материале при неоднократном нагреве до температуры 1000°C .

Дилатометрирование проводили со скоростью нагрева 100 град/мин в нейтральной и окислительной газовых средах в диапазоне температур $20...1000^\circ\text{C}$.

Результаты исследований и их обсуждение. В хаотически армированном углерод-углеродном композите короткие высокомодульные углеродные волокна ($0,5-1,0$ см) расположены беспорядочно, что предопределяет квазиизотропию свойств материала.

Результаты исследования термического деформирования хаотически армированного (изотропного) углеродного материала при повторных тепловых нагрузках в нейтральной и окислительной среде приведены на рис. 2.

Видно, что с увеличением количества циклов нагрев–охлаждение характер кривых не изменяется, происходит только параллельное смещение кривых деформаций в область меньших значений. Усадка материала в начале нагрева на воздухе при 2- и 3-м циклах нагрева не превышает 0,1%; температура начала усадки материала увеличивается к 3-му циклу нагрева на 100°С по сравнению с таковой при 1-м цикле нагрева [16].

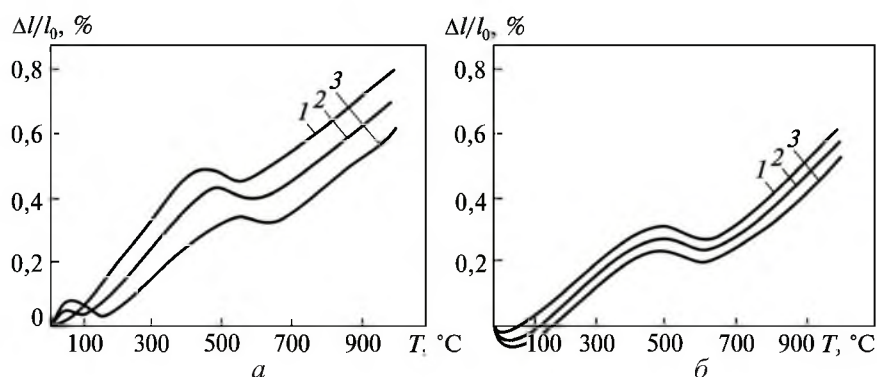


Рис. 2. Зависимость относительного теплового деформирования хаотически армированного углеродного материала от температуры в нейтральной (а) и окислительной (б) среде при увеличении количества циклов нагрева. (Здесь на рис. 3–6, 9, 10 цифры на кривых соответствуют номеру цикла нагрева.)

Уменьшение значения теплового расширения карбонизированного углепластика при термоциклировании обусловлено изменением структуры материала при нагреве. Трехмерная структура исходного полимера-матрицы должна, по-видимому, способствовать образованию такой же структуры углеродного остатка [17]. Термоокислительные процессы на поверхности и внутри образца приводят к перестройке структуры пиролитического углерода, тем самым способствуя более плотной упаковке слоев в пакет, что вызывает смещение кривых теплового деформирования материала в зону усадок.

Сравнение результатов многократного дилатометрирования исследуемого материала в нейтральной и окислительной среде показало, что в первом случае термоциклирование существенно влияет на величину деформаций. Так, если в нейтральной среде значение деформаций от 1-го к 3-му циклу нагрева при температуре 1000°С уменьшилось на 0,25%, то в окислительной среде – всего на 0,08%, т.е. почти в три раза. И так во всем исследованном температурном диапазоне.

При термоциклировании хаотически армированных карбонизированных углепластиков наиболее опасным с точки зрения величины тепловых деформаций является первый нагрев, при дальнейших нагревах абсолютные значения расширения и усадок постепенно уменьшаются, сокращается также суммарная амплитуда изменения линейных размеров образцов.

На рис. 3,а представлено типичное разрушение слабоконической модели теплозащитного покрытия из хаотически армированного УУКМ после первого высокотемпературного нагружения в газовом потоке газодинамического стенда [18]. Трещина в оболочке – результат действия растягивающих тангенциальных напряжений, в свою очередь, являющихся следст-

вием усадочных деформаций в материале. Распределение температуры вблизи наружного слоя теплозащитного покрытия из УУКМ и на стыке слоев с теплоизоляцией показано на рис. 3,б.

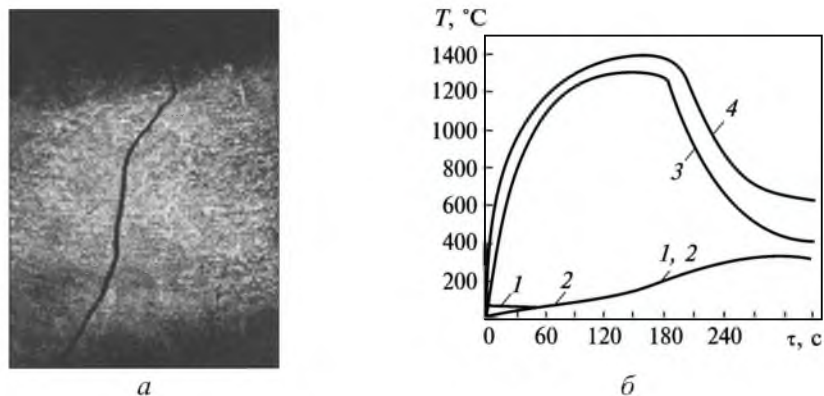


Рис. 3. Типичное разрушение наружного слоя покрытия – а и распределение температуры по толщине наружного слоя (1, 2 – на стыке слоев, 3, 4 – вблизи наружного слоя) – б.

В качестве *слоистых* углеродных материалов исследовали композиты на основе графитизированных фенолформальдегидных смол с наполнителем из углеродной ткани сатинового плетения с соотношением нитей 2:1 (основа и уток). Исследования проводили по направлению основы и утка в плоскости тканого наполнителя.

Результаты исследования теплового деформирования слоистого углеродного композита в зависимости от температуры при увеличении количества циклов нагрева и охлаждения в нейтральной газовой среде показаны на рис. 4. Как видно, при увеличении количества циклов нагрева образцов в аргоне независимо от направления вырезки происходит параллельное смещение точек кривых в область меньших значений. Так, для образцов, вырезанных в направлении основы, при втором тепловом нагреве кривая деформаций колеблется около нейтральной оси, причем расширение составляет 0,1%, усадка не превышает 0,06% деформаций при первом нагреве. Деформации при следующем цикле нагрева характеризуются отрицательными значениями вплоть до температуры 900°C, колебания суммарных значений (амплитуды) не превышают 0,15%.

Данные дилатометрирования, полученные при многократном тепловом нагреве слоистого углеродного материала в направлении утка, также свидетельствуют об уменьшении расширения образцов по мере увеличения количества циклов нагрев–охлаждение.

Всплеск деформаций на кривых расширения при температурах 550...650°C при первом и третьем тепловых нагревах составляет 0,4%, различие между наибольшими значениями деформаций при $T = 1000^\circ\text{C}$ – более 0,6%.

Термоциклирование слоистого углеродного материала при снижении величин тепловых деформаций во всем исследованном температурном диапазоне сокращает амплитуду его наибольших и наименьших значений, стабилизируя деформативные свойства УУКМ. Это также относится к результатам исследования теплового деформирования материала при цикли-

ческом нагреве на воздухе (рис. 5). Влияние окислительной газовой среды приводит к большему, чем в аргоне, смещению кривых в область отрицательных величин деформаций для образцов, вырезанных в направлении основы, а также к увеличению значений температурного интервала усадки в начале нагрева для образцов, вырезанных параллельно утку.

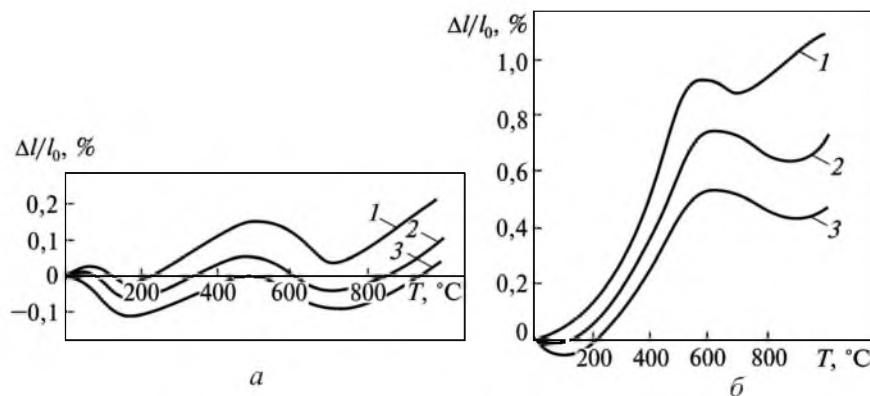


Рис. 4. Зависимость относительного теплового деформирования слоистого углеродного материала от температуры при увеличении количества циклов нагрева в нейтральной газовой среде: *a* – в направлении основы ткани; *б* – в направлении утка.

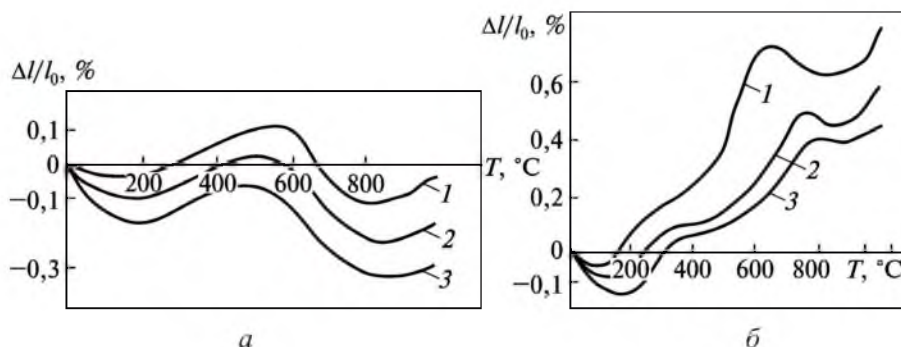


Рис. 5. Зависимость относительного теплового деформирования слоистого углеродного материала от температуры при увеличении количества циклов нагрева в окислительной газовой среде: *a* – в направлении основы ткани; *б* – в направлении утка.

Для сравнения выполнено dilatометрирование в окислительной газовой среде слоистого углеродного материала (с целью сокращения записи обозначим его УУКМ(с)) с коэффициентом анизотропии наполнителя 1:1. Кокс-связующее в композите насыщался пироуглеродом из парогазовой среды при температуре 1200°C.

При термоциклировании УУКМ(с) обнаружено, что кривые температурного деформирования (ТД) имеют характерную особенность: величины относительного теплового расширения устойчиво увеличиваются до 4-5-го циклов нагрев–охлаждение, а затем также устойчиво начинают уменьшаться (рис. 6). Из рис. 7, *a* видно, что значения $\Delta l/l_0$ при 10- и 11-м циклах нагрева практически совпадают, например при температуре 700°C – с данными 4-го цикла, при температуре 200°C – 2-го цикла. Полиэкстремальный

характер кривых теплового деформирования УУКМ(с) при повышении количества циклов нагрева свидетельствует о сложных процессах, происходящих в композите. Согласно данным [19], уменьшение жесткости композита в результате растрескивания матрицы и, как следствие, ухудшение ее связи с волокнами при термической усталости приводит к увеличению коэффициентов теплового расширения (1–5-й циклы).

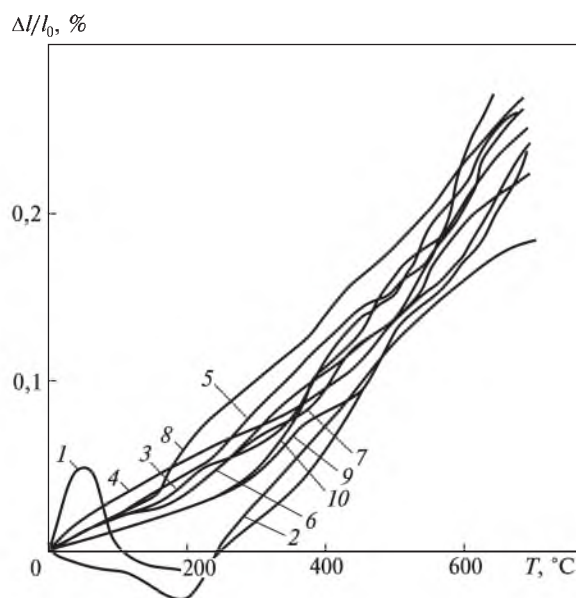


Рис. 6. Зависимость относительного теплового деформирования слоистого насыщенного пироуглеродом углеродного материала от температуры при увеличении количества циклов нагрева в окислительной газовой среде.

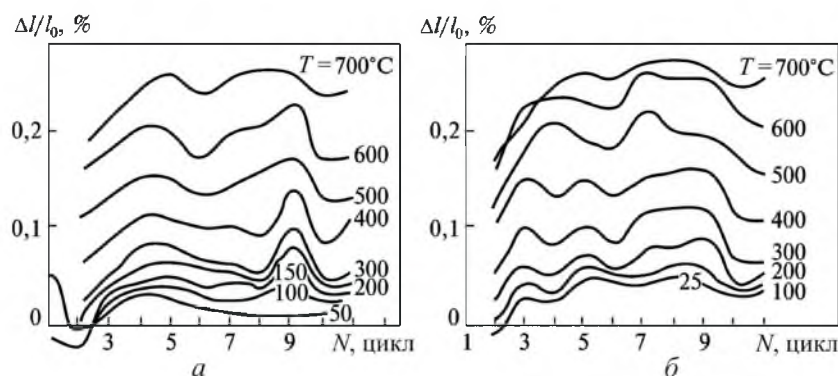


Рис. 7. Изменение относительного теплового деформирования УУКМ(с) в зависимости от количества циклов нагрева (а) и охлаждения (б) при различных температурах.

Очевидно, что резкое уменьшение величин теплового деформирования после 6-7-го термоцикла можно связать с отрицательным коэффициентом теплового расширения углеродных волокон, освобожденных от связи с матрицей, и его влиянием на тепловое расширение материала в целом [20]. Если первый максимум на кривых теплового деформирования обусловлен

температурным расширением композита в целом, то второй максимум, скорее всего, остаточными технологическими напряжениями, возникающими вследствие различия между коэффициентами теплового расширения углеродных волокон и полимерных связующих, причем в матрице эти напряжения оказываются растягивающими [21]. Циклическое воздействие высоких температур способствует в этом случае реализации свойств матрицы, что приводит к кратковременному тепловому расширению.

Дальнейшее уменьшение значений теплового расширения карбонизированных углепластиков при повторных температурных воздействиях обусловлено изменением структуры материала при нагреве.

Упорядочение такой структуры при повторных нагревах должно вызывать усадку за счет уменьшения объема пор и развития тонкопористой структуры, причем убыль массы при этих превращениях, как показал гравиметрический анализ, особенно в нейтральной среде, незначительна [22].

Кривые теплового деформирования (рис. 7,б) получены во второй половине термоцикла – при охлаждении композита. Наибольший интерес представляют величины относительного теплового деформирования при температуре 25°C, т.е. остаточные деформации образца после каждого нагрева. Изменение не только величины, но и знака остаточной деформации материала, работающего в пакете теплозащитной конструкции, вызывает необходимость их учета при проектировании покрытия.

Таким образом, увеличение количества циклов нагрев–охлаждение с постоянной скоростью нагрева приводит к уменьшению значений термических деформаций УУКМ с тканым слоистым наполнителем независимо от природы газовой среды испытаний, при этом величина относительных максимальных деформаций в нейтральной среде не превышает 0,3%, в окислительной – 0,1% величины деформаций в предыдущем испытании.

Значения остаточных деформаций слоистых углеродных материалов, уплотненных пироуглеродом, при термоциклировании в исследованном температурном диапазоне колеблются от –0,1 до +0,5%. Исследования работоспособности рабочих панелей тепловой защиты из УУКМ(с) в условиях многократного воздействия высокотемпературного эрозионно-коррозионного газового потока на газодинамическом стенде [23] показали*, что разрушения поверхности чаще всего начинаются на стыках плиток тепловой защиты. Рис. 8 иллюстрирует состояние плоского покрытия из УУКМ(с) до и после 5 циклов нагрева в высокотемпературном газовом потоке. Видно, что между рабочими плитками произошло раскрытие стыковочных швов (выгорание и унос замазки, увеличение зазоров вследствие усадки), но вспучивание, коробление и растрескивание отсутствуют, поскольку при выборе ширины стыковочных зазоров учитывалось температурное расширение материала, полученное на образцах (рис. 5–7).

Пространственные связи в *объемно-армированных* композиционных материалах образуются системой трех углеродных нитей в прямоугольной системе координат, волокна при этом взаимно ортогональны в направлении осей армирования XYZ. Результаты дилатометрирования трехмерного компо-

* Испытания на газодинамическом стенде проведены Л. Ф. Ставцевой и Г. И. Мельниченко.

зиционного углеродного материала на основе графитизированной фенолформальдегидной матрицы резольного типа, уплотненной пироуглеродом из парогазовой среды, представлены на рис. 9 и 10. Температурные деформации пространственно-армированных композитов получены в направлениях, параллельных осям армирования Z (рис. 9) и X (рис. 10); исследования выполнены в нейтральной газовой среде (аргон).

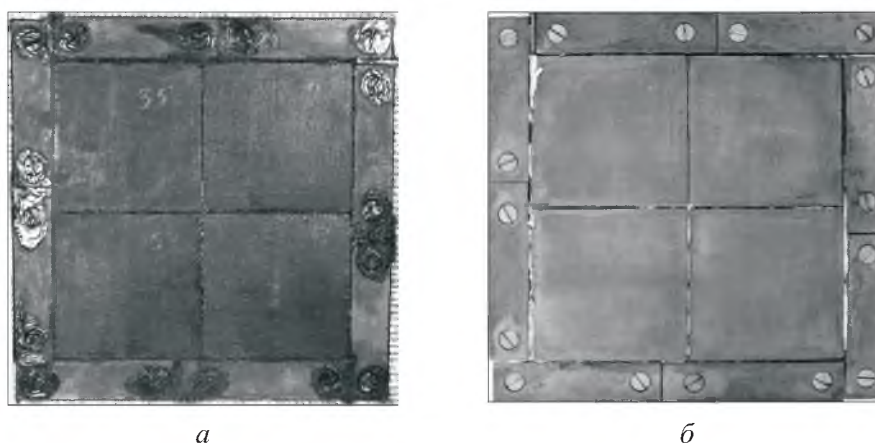


Рис. 8. Внешний вид плоской модели (рабочие пластины) теплозащитного покрытия из УУКМ(с) до испытания (а) и после 5 циклов нагрева (б) в высокотемпературном газовом потоке.

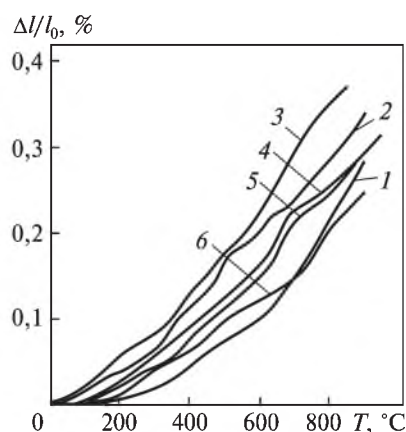


Рис. 9. Зависимость относительного теплового деформирования пространственно-армированного углеродного материала от температуры при термоциклировании вдоль оси армирования Z .

Как видно, повышение количества циклов нагрева до определенного числа (вдоль оси армирования Z оно составляет три, рис. 9) приводит вначале к увеличению относительных значений теплового расширения, а затем к их уменьшению. Указанная закономерность имеет место также при термоциклировании вдоль оси армирования X (рис. 10). Необходимо заметить, что при первом нагреве образца (рис. 10) на кривой температурного деформирования наблюдается минимум значений при температурах 300...320°C, что связано с усадочными явлениями в материале вплоть до температуры ~ 500°C.

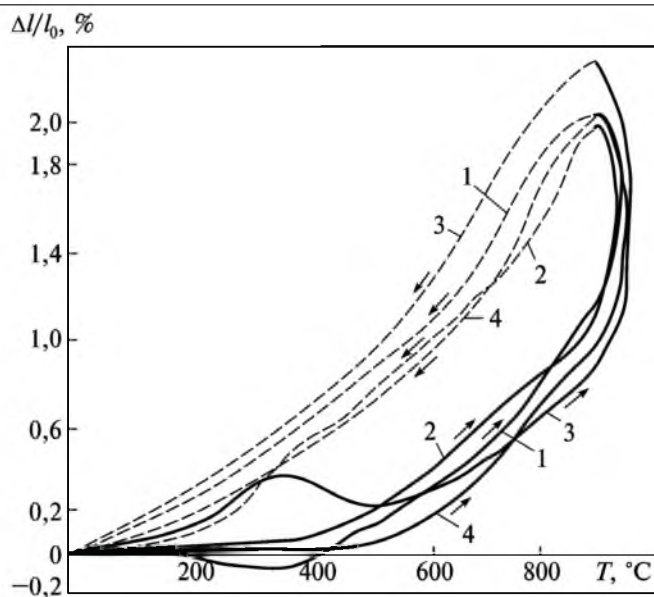


Рис. 10. Зависимость относительного теплового деформирования пространственно-армированного углеродного материала при термоциклировании вдоль оси армирования X . (Штриховые линии – усадка материала при охлаждении.)

Экстремумы на кривых теплового деформирования, наблюдаемые при первом нагреве и связанные с усадочными явлениями в материале, при повторных нагревах отсутствуют. Постоянное уменьшение дилатометрических величин после четырех-пятикратного нагрева при дальнейшем увеличении циклов нагрева замедляется, и к 10-11-му циклу величины тепловых деформаций сопоставимы с данными, полученными при первом нагреве.

Анализ результатов исследований. Результаты экспериментального исследования углерод-углеродных композиционных материалов с различной структурой армирования показали, что геометрия волокна в материале оказывает существенное влияние на величину и знак термической деформации.

В соответствии с полученными графиками температурного расширения исследуемых материалов определены амплитуды (диапазоны) изменения величин теплового деформирования. В табл. 1–3 представлены наибольшие и наименьшие значения тепловых деформаций и их сумма (амплитуда) в температурном интервале 20...1000°C в зависимости от количества циклов нагрев–охлаждение.

В табл. 3 приведены максимальные величины тепловых деформаций УУКМ(с) и пространственно-армированного УУКМ в направлениях Z и X при термоциклировании в нейтральной газовой среде.

Как видно из данных табл. 1–3, амплитуды тепловых деформаций УУКМ(с) вдоль направлений основы ткани наполнителя и утка отличаются после первого нагрева более чем в пять раз, после второго – в четыре, после третьего – в три. Для хаотически армированного УУКМ определяющим является влияние углеродной матрицы: величины амплитуд его ТД на 30% меньше данных УУКМ(с) вдоль направления утка после первого нагрева и практически совпадают после третьего.

Т а б л и ц а 1

Экстремальные значения относительных тепловых деформаций и их сумма (а) для хаотически армированного УУКМ при термоциклировании в нейтральной (над чертой) и окислительной (под чертой) газовой среде

| № термоцикла | $T_{D_{max}}$ | $T_{D_{min}}$ | T_{D_a} |
|--------------|---------------|---------------|-----------|
| 1 | 0,80 | 0,02 | 0,78 |
| | 0,6 | 0 | 0,6 |
| 2 | 0,70 | 0,03 | 0,67 |
| | 0,57 | -0,01 | 0,58 |
| 3 | 0,60 | 0,03 | 0,57 |
| | 0,52 | -0,05 | 0,57 |
| 4 | 0,54 | 0 | 0,54 |
| | 0,48 | 0 | 0,48 |
| 5 | 0,51 | 0 | 0,54 |
| | 0,40 | 0 | 0,40 |

Т а б л и ц а 2

Экстремальные значения относительных тепловых деформаций и их сумма (а) для слоистого УУКМ в направлении основы тканого наполнителя при термоциклировании в нейтральной (над чертой) и окислительной (под чертой) газовой среде

| № термоцикла | $T_{D_{max}}$ | | $T_{D_{min}}$ | | T_{D_a} |
|--------------|---------------|-------|---------------|-------|-----------|
| | Основа | Уток | Основа | Уток | |
| 1 | 0,23 | 1,10 | -0,02 | 0 | 0,25 |
| | 0,10 | 0,80 | -0,12 | 0,05 | 0,22 |
| 2 | 0,10 | -0,78 | -0,06 | -0,02 | 0,16 |
| | 0,02 | -0,60 | -0,24 | -0,10 | 0,26 |
| 3 | 0,60 | 0,53 | 0,03 | -0,02 | 0,57 |
| | -0,10 | 0,47 | -0,36 | -0,10 | 0,26 |

Углеродное наполнение УУКМ(с) (с коэффициентом анизотропии ткани 1:1) нейтрализует влияние матрицы, и диапазон изменения его ТД в двух взаимно ортогональных направлениях в плоскости армирования одинаков и не превышает 0,1%.

Изменение экстремальных величин ТД пространственно-армированных УУКМ, исследованных вдоль направлений Z и X , при термоциклировании в нейтральной среде происходило в диапазоне 0,2...0,4%, т.е. величины амплитуд ТД в двух взаимно ортогональных плоскостях отличались не более чем на 0,2%.

Рассмотрение динамики изменения амплитудных значений УУКМ(с) и пространственно-армированных УУКМ в нейтральной газовой среде показало, что наибольшие амплитуды тепловых деформаций УУКМ(с) при термоциклировании получены после 7-го цикла нагрева (0,295), при дальнейшем увеличении количества циклов нагрева происходит постепенное уменьшение амплитудных значений ТД, при этом величины амплитуд после 10-го и

3-го циклов нагрева сравниваются (0,24%). Для пространственно-армированных УУКМ также наблюдается снижение амплитудных значений ТД при росте количества циклов нагрева.

Т а б л и ц а 3

Максимальные значения тепловых деформаций УУКМ(с) и пространственно-армированных УУКМ в направлениях Z (над чертой) и X (под чертой) при термоциклировании в нейтральной газовой среде

| № термоцикла | УУКМ(с) | УУКМ |
|--------------|---------|-----------------------|
| 1 | 0,20 | <u>0,360</u> 0,215 |
| 2 | 0,17 | <u>0,390</u> 0,200 |
| 3 | 0,24 | <u>0,410</u> 0,230 |
| 4 | 0,25 | <u>0,360</u> 0,205 |
| 5 | 0,22 | <u>0,340</u> – |
| 6 | 0,27 | <u>0,300</u> – |
| 7 | 0,29 | – |
| 8 | 0,27 | – |
| 9 | 0,25 | – |
| 10 | 0,24 | – |

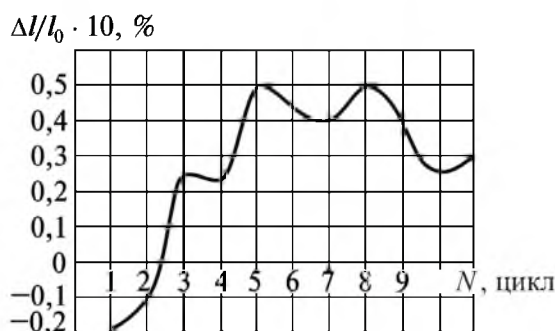


Рис. 11. Изменение величины остаточной тепловой деформации УУКМ(с) при охлаждении в зависимости от числа термоциклов в нейтральной газовой среде.

При исследовании температурного деформирования УУКМ при термоциклировании необходимо учитывать величины расширения-усадки, возникающие в композите в обратном полуцикле – при охлаждении. На рис. 11 показана зависимость величины остаточной тепловой деформации УУКМ(с) при термоциклировании после охлаждения до комнатных температур. Как видно, остаточные деформации изменяют не только величину, но и знак, при

этом наблюдается общая тенденция роста значений ТД от 1-го до 5-го термоцикла, а затем незначительное их уменьшение: в нашем случае с 0,05 после 5-го термоцикла до 0,03% после 11-го.

Закключение. Наименьшей амплитудой ТД обладают пространственно-армированные и слоистые УУКМ в направлении основы тканого наполнителя.

Для слоистых УУКМ амплитудные значения ТД в направлении основы в три–пять раз меньше аналогичных данных, полученных вдоль направления утка углеродной ткани; для УУКМ(с) с распределением волокон в тканом наполнителе 1:1 амплитуды изменения ТД в направлениях 0 и 90° одинаковы и не превышают 0,1%.

Величины и характер ТД хаотически армированного УУКМ определяются деформированием углеродной матрицы при нагреве. Разница, составляющая 30% между данными, полученными для слоистого УУКМ вдоль направления утка и квазиизотропного УУКМ при первом нагреве, практически исчезает после 3-го термоцикла.

Изменение амплитуды экстремальных значений ТД пространственно-армированных УУКМ в двух взаимно ортогональных направлениях Z и X происходит в интервале 0,2...0,45% при первых трех термоциклах, увеличение количества нагревов сокращает разницу между амплитудами ТД до 1%.

Влияние окислительной газовой среды на характер и величину температурного деформирования УУКМ проявляется в более значительном, чем в аргоне, смещении кривых в область меньших значений, а также повышении температуры начала усадки для образцов из хаотически армированных УУКМ и параллельных направлению утка УУКМ(с). При термоциклировании УУКМ обнаружена общая для всех исследованных типов армирования закономерность температурного деформирования: независимо от природы газовой среды величины относительного теплового расширения устойчиво возрастают до 4-5-го циклов нагрев–охлаждение, а затем также устойчиво начинают уменьшаться.

Экстремумы на кривых ТД, наблюдаемые при первых нагревах и связанные с усадочными явлениями в материале, при увеличении термоциклов исчезают. Постоянное уменьшение данных дилатометрирования после 4-5-го циклов нагрева при последующем увеличении количества циклов нагрева замедляется, и к 10-11-му циклу максимальные величины ТД сопоставимы с данными, полученными при первом нагреве.

Особый интерес представляет характер изменения ТД УУКМ во второй половине термоцикла при охлаждении до комнатных температур – остаточных деформаций. В исследованном температурном диапазоне величины остаточных деформаций, например, слоистых УУКМ при термоциклировании колеблются от $-0,1$ до $+0,5\%$. Изменение не только величины, но и знака остаточной деформации материала, работающего в пакете теплозащитного покрытия, предназначенного для многоразового летательного аппарата, требует самого пристального внимания и учета их при технологической обработке конструкций.

Резюме

Розглянуто результати експериментального дослідження теплового деформування карбонізованих вуглепластиків, що використовуються як тепловий захист літальних апаратів багаторазової дії. Показано, що при термоциклуванні шаруватих, хаотично та просторово армованих вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів до визначеного циклу нагріву (чотири-пять) значення теплового розширення незалежно від газового середовища випробування зростають. При збільшенні числа термоциклів починають поступово зменшуватися значення теплової деформації матеріалів, що пов'язано зі структурними змінами в матриці, волокні та на межі розподілу середовищ композита.

1. *Вольмир А. С.* Современные концепции применения композиционных материалов в летательных аппаратах и двигателях // Механика композитных материалов. – 1985. – № 6. – С. 1049 – 1056.
2. *Hadcock R. N.* A.I.A.A. – 1979. – No. 0719.
3. *Keieser R.* National Information Service (USA). – Pb. 283416, 1978.
4. *Адамс Д.* Использование углепластиков в авиакосмической промышленности США // Углеродные волокна и углекомпози́ты. – М.: Мир, 1988. – С. 236 – 237.
5. *Протасов В. Д., Страхов В. Л., Кульков А. А.* Проблемы внедрения композитных материалов в конструкции авиационно-космической техники // Механика композитных материалов. – 1990. – № 6. – С. 1057 – 1063.
6. *Грачева Л. И.* Влияние технологических напряжений на прочность углеродных материалов при высоких температурах: Тр. III Междунар. конф. “Материалы и покрытия в экстремальных условиях” (13–17 сент. 2004 г.). – Кацивели (АР Крым). – С. 344 – 345.
7. *Gracheva L. I.* Thermal stresses in composite materials at the manufacturing stage // Proc. of Int. Cong. on Thermal Stresses' 05 (May 26 – June 3, 2005). – Vienna, 2005. – P. 763 – 767.
8. *Филалков А. С.* Формирование структуры и свойства углеграфитовых материалов. – М.: Металлургия, 1965. – 288 с.
9. *Безрук Л. И., Хорева Г. Б.* Углеродные волокна как пример самоармированного композита // Механика композитных материалов. – 1982. – № 3. – С. 387 – 389.
10. *Тарнопольский Ю. М., Поляков В. А., Жигун И. Г.* Термическое деформирование пространственно армированных композитов // Там же. – 1990. – № 2. – С. 212 – 218.
11. *Буланов В. Н., Васильев А. В., Францевич И. Н., Шевченко В. Я.* Фрагментирование поверхности теплозащитных материалов в процессе абляции: Тр. I Всесоюз. конф. по дисперсно-упрочненным и волокнистым материалам. – Киев, 1968. – С. 287 – 290.

12. ДСТУ 2308-93. Метод визначення температурного коефіцієнта лінійного розширення композиційних матеріалів у трьох взаємоортогональних напрямках / В. О. Борисенко, Л. І. Грачова, В. В. Рубан. – Київ: Держстандарт України, 1993.
13. *Borysenko V. A., Gracheva L. I., and Pankratova N. D.* Methods for investigation of composite materials thermal deformation by optical dilatometers // Proc. of 10th Int. Conf. on Experimental Mechanics (18–22 July, 1994). – Rotterdam, 1994. – 2. – P. 837 – 841.
14. А. с. 1328667 СССР, МКИ G01 B11/16. Образец для измерения температурных деформаций / Л. И. Грачева, Б. В. Марасин. – Оpubл. 30.06.92, Бюл. № 24.
15. А. с. 998858 СССР, МКИ G01 B11/16. Фотоследящая система для измерений деформаций объекта / Б. В. Марасин, А. Г. Малый, Н. А. Фот и др. – Оpubл. 23.02.83, Бюл. № 7.
16. *Грачева Л. И.* О влиянии режимов нагрева и природы газовой среды на тепловое деформирование углеродных материалов // Пробл. прочности. – 1981. – № 8. – С. 68 – 72.
17. *Адамс Д.* Испытание углепластиков и оптимизация их свойств // Углеродные волокна и углекомпозиаты. – М.: Мир, 1988. – С. 203 – 214.
18. *Третьяченко Г. Н., Грачева Л. И., Ставцева Л. Ф.* Исследование свойств изотропного углеродного материала при повышенных температурах // Косм. исследование в Украине. – 1982. – Вып. 16. – С. 58 – 63.
19. *Бергман Х.* Разработка крупногабаритных космических конструкций // Углеродные волокна и углекомпозиаты. – М.: Мир, 1988. – С. 188 – 202.
20. *Геллер А. Б., Славинский С. Т., Перепелкин К. Б.* Связь анизотропии армирующих высококомодульных волокон с механическими и теплофизическими свойствами композитных волокнистых материалов // Механика композитных материалов. – 1983. – № 1. – С. 160 – 161.
21. *Окада Дж.* Термическое расширение углеграфитовых материалов с каменноугольным песком в качестве связующего // Графит как высокотемпературный материал. – М.: Мир, 1964. – С. 65 – 71.
22. *Самсонов Б. А., Бутюгин В. К., Сигарев А. М.* Изучение особенностей изменения плотности продуктов карбонизации некоторых полимеров // Конструкционные материалы на основе графита. – М.: Металлургия, 1972. – С. 106 – 111.
23. А. с. 977971 СССР, МКИ G01M7/00. Стенд для исследования вибропрочности материалов и элементов конструкций в высокотемпературном газовом потоке / Г. Н. Третьяченко, Г. И. Мельниченко, Л. Ф. Ставцева. – Оpubл. 30. 11. 82, Бюл. № 44.

Поступила 01. 09. 2005