

УДК 539.431+620.178.32

Ю. А. Похил¹, Р. В. Гаврилов¹, Л. Ф. Яковенко¹,
Е. Н. Алексенко¹, В. А. Лотоцкая¹, С. Ван²,
Ш. Хе², Г. В. Тарасов³, Б. М. Рассемакин⁴

¹Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з криогенної техніки ФТІНТ НАН України, Харків

²Харбінський політехнічний інститут, КНР

³ДКБ «Південне», Дніпропетровськ

⁴Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

Механические характеристики основных элементов конструкций солнечных батарей

Надійшла до редакції 02.09.05

Наведено результати досліджень впливу температури в інтервалі 373—77 К на статичні та динамічні механічні властивості конструкційних матеріалів, що входять до складу сонячних батарей космічних апаратів. Експериментальні дані будуть використані у теоретичних розрахунках довговічності сонячних батарей в умовах дії численних періодичних термічних навантажень під час орбітального польоту.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость выполнения сложных задач, стоящих перед современной космической техникой, требует разработки и применения в космических аппаратах (КА) новых конструкционных и функциональных материалов, способных эффективно работать в условиях длительного воздействия факторов космического пространства (ФКП). Очевидно, что надежность и долговечность конструкций КА в решающей степени определяются работоспособностью выбранных конструкционных материалов в специфических условиях космического полета.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния температуры в интервале 373—77 К (эксплуатационные температуры КА на околоземных и геостационарных орбитах) на статические и динамические механические свойства ряда материалов, применяемых при изготовлении панелей солнечных батарей (СБ). Полученные результаты используются

в качестве исходных данных в последующих расчетных оценках циклической долговечности батарей при длительном воздействии орбитальных теплосмен, необходимых для оптимизации конструкции батарей с точки зрения их устойчивости к термоградиентным циклическим нагрузкам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованы следующие материалы.

- Эпоксиглепластик — материал обшивки сотопанельного каркаса СБ (лист толщиной 0.14 мм). Наполнителем для эпоксиглепластика служил ЭЛУР-П-0.08 ТУ6-06; И81-85. В качестве основы использована эпоксидная смола ЭДТ-69Н ТИ59-1035-92.
- Клей соединительный КЛ-П-7 (шайбы толщиной 1 мм).
- Кремний монокристаллический марки КДБ 10/0.1 — материал фотоэлектрических преоб-

разователей СБ (пластины толщиной 0,45 мм, нормаль к плоскости пластины совпадает с кристаллографическим направлением типа $\langle 100 \rangle$).

- Стекло защитное кварцевое К-208, используемое для фотоэлектрических преобразователей солнечной батареи КА (пластины толщиной 0,17 мм).

Исследования комплекса механических свойств проводили с использованием лабораторно-испытательной базы СКТБ ФТИНТ НАНУ, обладающей парком оригинального криогенно-вакуумного имитационного исследовательского оборудования и набором соответствующих методик исследования материалов в условиях наземной имитации одно- и многофакторного воздействия космической среды [1, 3].

Испытания на статическую прочность стандартных образцов с усилием более 100Н проводили на испытательной машине FPZ-100/1, снабженной низкотемпературной приставкой [1]. Погрешность измерения нагрузки не превышала 1 % от измеряемой величины.

Испытания на усталость в широком диапазоне циклических долговечностей при переменном осевом нагружении в том случае, когда требовалось приложение к образцам усилия более 100 Н, проводили на усталостной машине с гидравлическим приводом, позволяющей создавать переменное усилие до 20 кН с частотой 10...50 Гц [1]. Погрешность измерения нагрузки в указанном интервале значений составляла 1 % от измеряемой величины. Схема систем нагружения и термостатирования образцов в усталостной машине приведена на рис. 1.

Малогабаритные образцы, требующие приложения нагрузок в интервале от 0,2 до 100 Н, испытывали с помощью дополнительного универсального испытательного стенда как на усталость при переменном осевом растяжении или при переменном изгибе с частотой 10 Гц, так и при статическом нагружении для этих же видов деформирования с погрешностью измеряемой нагрузки 1 %. На рис. 2 приведены схемы компоновки испытательного стенда для разных видов нагружения в заданном температурном интервале.

Механические характеристики: модуль Юнга E ; предел прочности σ_B и циклическую долговечность (кривые усталости) материалов исследу-

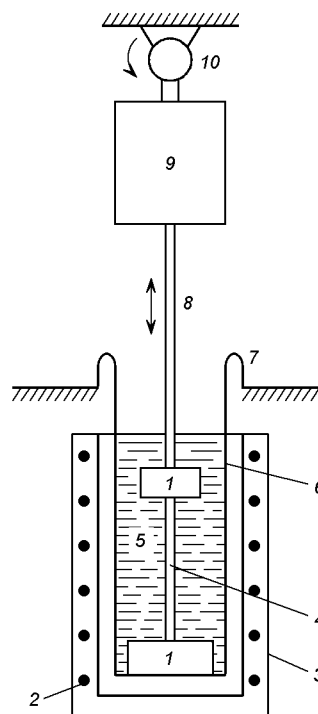


Рис. 1. Схема нагружения штатной усталостной машины с гидравлическим приводом: 1 — захваты, 2 — нагревательная спираль, 3 — термостат, 4 — образец, 5 — жидкий азот, 6 — опорная труба, 7 — динамометр, 8 — активная тяга, 9 — гидроцилиндр, 10 — вращающийся эксцентрик, управляющий золотником гидроцилиндра

довались в интервале температур 373—77 К при различных видах нагружения. В условиях статической деформации растяжением испытаны углепластик и клей, а изгибом — кремний и стекло. Испытания на усталость углепластика и клея проводили при переменном растяжении с коэффициентом асимметрии цикла $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0,1$ и частотой 10 Гц. Выбор значения R определялся тем, что образцы испытываемых материалов не обладали необходимой жесткостью на сжатие для испытаний их при симметричном цикле ($R = -1$). Испытания на усталость кремния и стекла проводили соответственно при симметричном чистом и симметричном консольном изгибе с частотой 10 Гц. В качестве базы циклических испытаний принимали $5 \cdot 10^5$ циклов.

Образцы углепластика вырезали из листа в двух разных направлениях: с осью, параллель-

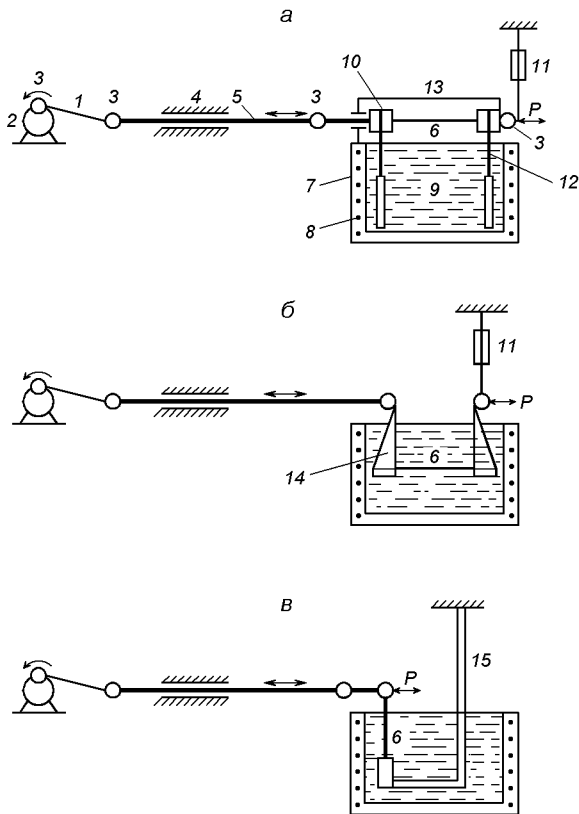


Рис. 2. Схемы применения испытательного стенда для разных видов нагружения: *a* — на растяжение (1 — шатун, 2 — эксцентрик, 3 — шарниры, 4 — направляющая втулка, 5 — шток, 6 — образец, 7 — термостат, 8 — нагревательная спираль, 9 — жидкий азот, 10 — захваты, 11 — динамометр, 12 — хладопровод, 13 — крышка); *б* — на чистый изгиб (14 — захват); *в* — на консольный изгиб (15 — захват)

ной углеродным волокнам (продольные образцы), и с осью, перпендикулярной к углеродным волокнам (поперечные образцы). Образцы углепластика продольной ориентации испытывали на усталость на штатной усталостной машине. Размеры и форма продольных образцов приведены на рис. 3, *a*. Образцы углепластика поперечной ориентации и клея, в связи с их низкой прочностью, испытывали на усталость на универсальном испытательном стенде по схеме, показанной на рис. 2, *a*. Размеры и форма этих образцов приведены на рис. 3, *б*.

Испытание образцов углепластика и клея на статическое растяжение проводили на испытательной машине FPZ-100/1 при скорости пере-

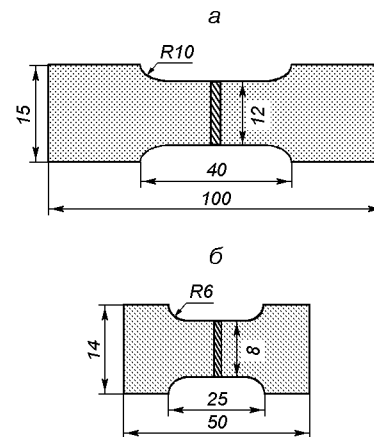


Рис. 3. Образцы углепластика и клея: *a* — для статических и циклических испытаний, *б* — для циклических испытаний низкопрочных образцов

движения подвижного захвата 1 и 20 мм/мин соответственно. Размеры и форма этих образцов приведены на рис. 3, *a*.

Предел прочности при растяжении $\sigma_{вр}$ определяли как отношение максимальной нагрузки P_{max} , предшествующей разрушению образца, к начальной площади его поперечного сечения:

$$\sigma_{вр} = P_{max} / (bh). \quad (1)$$

Для определения модуля упругости E при растяжении образец равномерно нагружали в пределах начального линейного участка диаграммы растяжения. При этом фиксировалось приращение нагрузки ΔF и соответствующее удлинение расчетной длины образца Δl :

$$E = \frac{\Delta P}{bh} \frac{l_0}{\Delta l}, \quad (2)$$

где l_0 — начальная расчетная длина образца.

Ввиду малой жесткости образцов углепластика и клея, применение датчиков деформации, устанавливаемых на рабочей части образца, исключалось. Поэтому применяли бесконтактный оптический метод измерения удлинения образца путем нанесения реперных меток на его рабочей части. Измерение проводили при остановке перемещения подвижного захвата с помощью длиннофокусного микроскопа с точностью 0.01 мм. При 77 К измерение удлинения осуществляли тем же способом через смотровую поло-

су в специальном стеклянном криостате. Погрешность измерения модуля упругости E не более $\pm 2\%$. Кроме этого, оценку значения модуля упругости проводили, принимая за величину удлинения рабочей части образца перемещение захватов испытательной машины. При этом ошибка могла быть больше, чем в первом случае, вследствие неучтенной деформации в захватах. Реально заметного различия между значениями модуля упругости, определенного двумя способами, не наблюдалось.

Относительное удлинение образца при разрыве δ вычислялось как

$$\delta = (\Delta l / l_0) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где Δl — изменение расчетной длины образца в момент разрыва.

Величину Δl определяли из диаграммы «нагрузка—удлинение», которую получали путем перестройки диаграммы «нагрузка—время» с учетом скорости перемещения подвижного захвата машины.

Температуры испытания на усталость углепластика в продольном направлении были 77, 293 и 373 К, а клея и углепластика в поперечном направлении — 150, 293 и 373 К. Охлаждение образцов до 77 К осуществлялось путем погружения их в жидкий азот, налитый в специальный криостат, надвигаемый на испытательный узел (рис. 1). При испытаниях на переменное растяжение на стенде такой способ охлаждения образцов был затруднителен вследствие расположения силового штока и образца в одной горизонтальной плоскости (рис. 2, а). Поэтому охлаждение образцов в этом случае осуществляли путем отвода тепла через гибкие медные жгуты 12, закрепляемые с одной стороны на захватах образца, а с другой стороны — помещенные в термостат 7 с жидким азотом. Температура образца при таком способе охлаждения могла достигать 150 К. Охлаждение образцов до 150 К при статических испытаниях на машине FPZ-100/1 осуществлялось путем контролируемого обдува образца и его захватов холодными парами азота. Нагревались образцы с помощью печи в криостате. Температуру в каждом отдельном случае контролировали с помощью медь-константановой термопары, закрепляемой на образце. Точность поддержания температуры ± 2 К.

Образцы хрупких материалов, таких как кремний и стекло, представляли собой прямоугольные пластинки размером 75×15 и 50×15 мм соответственно. Образцы кремния вырезали таким образом, чтобы ось растяжения была направлена вдоль кристаллографического направления $\langle 100 \rangle$ (тип 1) или $\langle 110 \rangle$ (тип 2). Испытание образцов кремния и стекла на статический и динамический изгиб проводили на стенде при 77, 293 и 373 К. Способы охлаждения и нагрева образцов те же, что и для образцов углепластика продольной ориентации (рис. 2, б, в). Переход от схемы нагружения чистым изгибом для кремния к консольному изгибу для стекла вызван уменьшенной длиной пластинок стекла по сравнению с пластинками кремния.

Предел прочности при изгибе $\sigma_{виз}$ определяли как отношение максимального изгибающего момента M_{max} , предшествующего разрушению образца, к начальному моменту сопротивления сечения образца W :

$$\sigma_{виз} = M_{max} / W, \quad (4)$$

где $M_{max} = FL$ (рис. 2, б, в), $W = bh^2/6$.

Каждая точка на температурных зависимостях полученных механических характеристик соответствует среднему значению по данным испытания 3—5 образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Углепластик. Результаты испытания углепластика на статическое растяжение в продольном и поперечном направлениях при исследованных температурах приведены на рис. 4. Предел прочности и модуль упругости углепластика, испытанного в продольном и поперечном направлении, при охлаждении от 373 до 77 К увеличивается почти в два раза. При этом для продольных образцов значения предела прочности более чем в 10 раз, а модуля упругости — более чем в 20 раз превышают аналогичные характеристики для поперечных образцов.

Зависимость удлинения продольных образцов от величины приложенной нагрузки при всех температурах испытания фактически линейная. Значение относительного удлинения в момент разрушения не превышает 2 %, при этом непосредственно

редственно упругая деформация, оцененная по определенным значениям модуля упругости, на начальном участке кривой деформирования составляет 1 %. Разрушение продольных образцов при растяжении для всех условий испытаний происходит путем первоначального разрыва углеродных волокон наполнителя в местах пересечения их с одной из нитей утка, а затем и разрывом связующего.

Для поперечных образцов вид диаграммы растяжения зависит от температуры испытания. Так, если при 77 и 150 К диаграмма растяжения, как и для продольных образцов, фактически линейная, а относительное удлинение в момент разрушения составило 2 %, то при 293 К наблюдается переход от линейного квазиупругого участка к участку высокоэластичной деформации. В момент разрыва образца среднее обратимое относительное удлинение достигает 12 %. При 373 К этот эффект более выражен, и среднее обратимое относительное удлинение достигает 25 %. Разрушение поперечных образцов при растяжении для всех условий испытаний происходит по связующему между углеродными волокнами, расположенными в этом случае перпендикулярно к оси растяжения образца.

Таким образом, характеристики прочности и упругости, а также вид диаграмм растяжения углепластика зависят от ориентации волокон

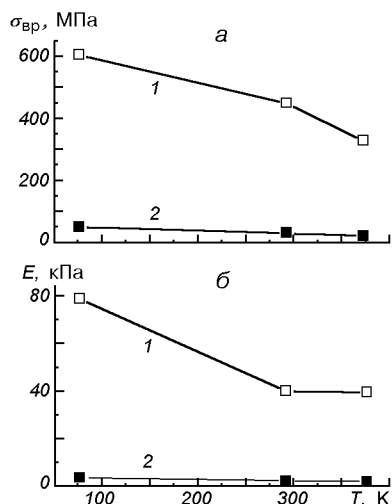


Рис. 4. Температурные зависимости предела прочности $\sigma_{вр}$ и модуля упругости E образцов углепластика при статическом нагружении, деформированных в продольном (1) и поперечном (2) направлениях

наполнителя относительно направления растягивающего усилия, и для продольных образцов определяются в основном свойствами углеродных волокон, а для поперечных образцов — свойствами связующего.

Результаты испытаний углепластика на усталость при переменном растяжении, представленные в виде зависимости циклической долговечности N от максимального напряжения цикла $\sigma_{р\ max}$ для каждой температуры испытания, приведены на рис. 5, а, б для продольной и поперечной ориентации соответственно. На рис. 5 приведены также полосы рассеяния значений предела прочности $\sigma_{вр}$ для этих температур и его средние значения. Как видно, для продольных образцов достижение числа циклов $5 \cdot 10^5$, соответствующего выбранной базе испытаний, происходит при значениях $\sigma_{р\ max}$, составляющем примерно 80 % от среднего значения предела

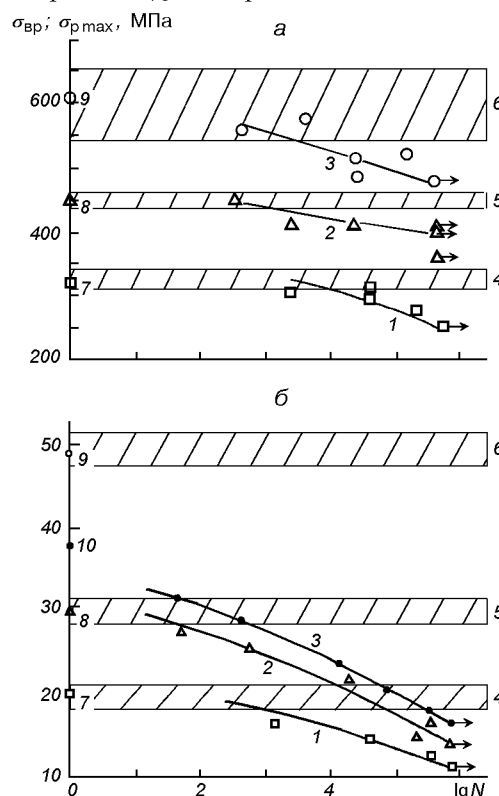


Рис. 5. Кривые усталости углепластика, деформированного при температурах 373 К (1), 293 К (2) и 77 К (3) в продольном (а) и поперечном (б) направлениях при переменном растяжении (4, 5, 6 и 7, 8, 9 — полосы рассеяния и средние значения $\sigma_{вр}$ при 373, 293 и 77 К соответственно; 10 — средние значения $\sigma_{вр}$ при 150 К)

прочности $\sigma_{вр}$, а для поперечных образцов — при значениях $\sigma_{р\ max}$ составляющем около 50 % от среднего значения предела прочности.

Клей соединительный. Результаты испытания клея на статическое растяжение при исследованных температурах приведены на рис. 6. Для клея наблюдается сильная температурная зависимость предела прочности и модуля упругости. В интервале от 373 до 150 К предел прочности увеличивается приблизительно в 50 раз, а модуль упругости приблизительно в 77 раз. Разрыв образцов клея всегда происходит перпендикулярно к оси образца.

Диаграмма растяжения при 150 К представляет собой квазилинейную зависимость (рис. 7, кривая 3). Доля упругой составляющей в обратимом относительном удлинении, рассчитанная по значению модуля упругости на начальном участке диаграммы растяжения, в момент разрыва при 150 К составляет 10 % на фоне общего значения удлинения 13 %.

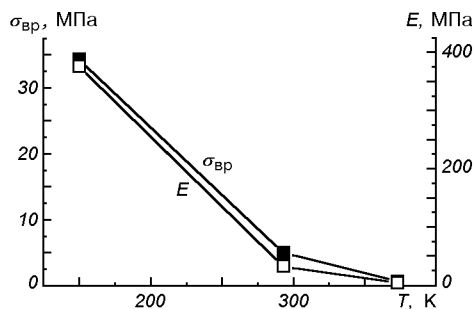


Рис. 6. Температурные зависимости предела прочности $\sigma_{вр}$ и модуля упругости E клея при статическом нагружении

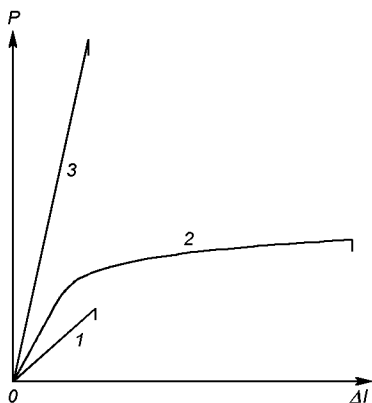


Рис. 7. Характерные диаграммы растяжения клея при 373 К (1), 293 К (2) и 150 К (3)

При 293 К диаграмма растяжения представляет собой типичную зависимость «нагрузка—удлинение» для полимеров в высокоэластическом состоянии (рис. 7, кривая 2). Общее относительное удлинение в момент разрыва составляет 240 %, тогда как рассчитанная упругая составляющая — примерно 15 %. После разрыва размеры образца восстанавливаются. Однако при 373 К диаграмма растяжения становится похожей на низкотемпературную (рис. 7, кривая 1). При этом обратимое относительное удлинение в момент разрыва составляет 27 %, а рассчитанная упругая составляющая — 14 %.

Результаты испытания клея на усталость при переменном растяжении представлены на рис. 8, где дополнительно приведены полосы рассеяния значений предела прочности для исследованных температур и его средние значения. Ограничен-

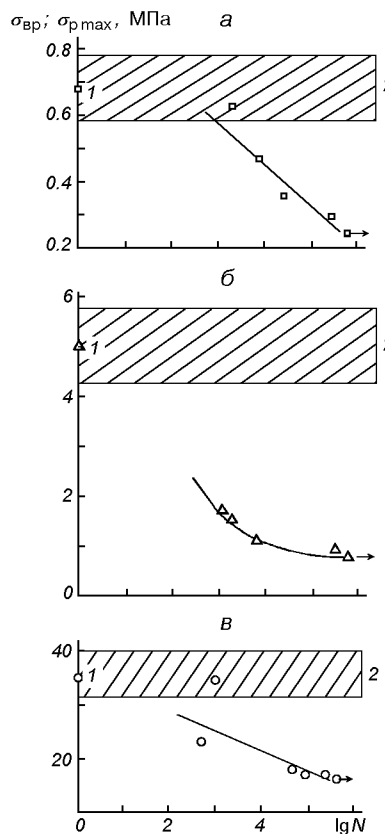


Рис. 8. Кривые усталости клея при переменном растяжении при 373 К (а), 293 К (б), 150 К (в) (1 — среднее значение предела прочности, 2 — полоса рассеяния значений предела прочности клея при тех же температурах.

ный предел выносливости (амплитудное значение напряжения в цикле $\sigma_{p \max}$, соответствующее выбранной базе испытаний $5 \cdot 10^5$ циклов) монотонно увеличивается с уменьшением температуры испытания и составляет 55 % по отношению к соответствующему среднему значению предела прочности σ_b (при $T = 150$ К), 18 % (при $T = 293$ К) и 40 % (при $T = 373$ К). Близость приведенных отношений $\sigma_{p \max}/\sigma_b$ при 150 и 373 К качественно коррелирует с аналогичным видом кривых растяжения при тех же температурах.

Кремний монокристаллический. На рис. 9 приведены результаты испытания на статический изгиб при заданных температурах образцов кремния двух ориентаций относительно оси деформации. Видно, что для образцов кремния типа 1 ($\langle 100 \rangle$) заметного влияния температуры на предел прочности не наблюдается. Для образцов кремния типа 2 ($\langle 110 \rangle$) можно говорить о слабом упрочнении материала при понижении температуры в интервале 373—77 К. При температурах 293 и 77 К уровень значений предела прочности образцов типа 1 соответственно в 1.4 и 1.2 раза выше, чем у образцов типа 2.

Разрушение образцов обоих типов происходит в исследованном интервале температур одинаково хрупко, плоскость излома расположена перпендикулярно к оси образца.

Испытания на усталость из-за недостаточного количества образцов, необходимых для получения достоверных результатов, проводили при 293 и 77 К на образцах типа 1, а при 373 К — на образцах типа 2. Результаты испытаний кремния на усталость при симметричном изгибе в виде зависимости циклической долговечности N от амплитуды напряжения цикла $\sigma_{a \text{ изг}}$ для каждой температуры испытания приведены на рис. 10, где дополнительно приведены полосы

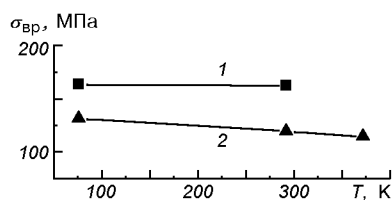


Рис. 9. Температурные зависимости предела прочности кремния монокристаллического с ориентацией оси деформации вдоль кристаллографических направлений $\langle 100 \rangle$ (тип 1) и $\langle 110 \rangle$ (тип 2)

рассеяния значений предела прочности на изгиб для исследованных температур и его средние значения.

Из представленных результатов следует, что достижение числа циклов $5 \cdot 10^5$, соответствующего выбранной базе испытаний, при выбранных температурах испытания и для разных типов образцов происходит при значениях $\sigma_{a \text{ изг}}$,

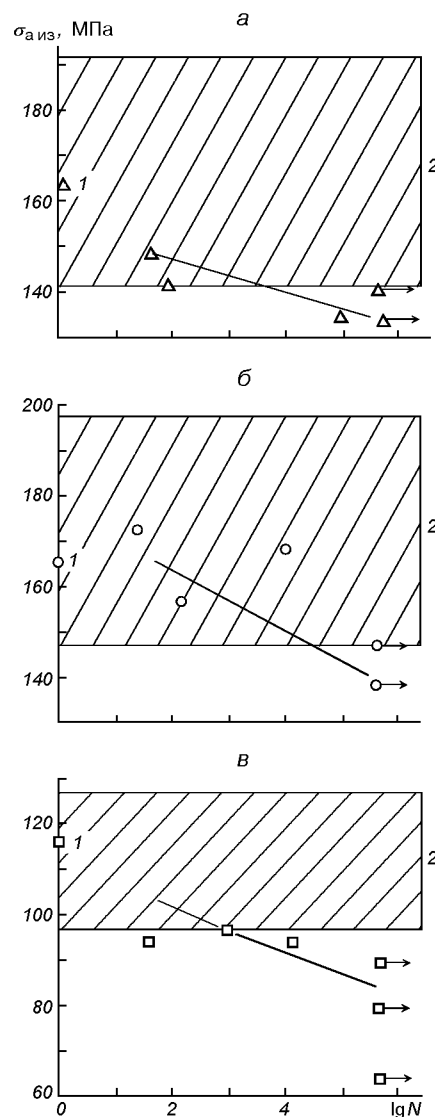


Рис. 10. Кривые усталости кремния монокристаллического при симметричном изгибе при температурах: *а* — 293 К (тип 1), *б* — 77 К (тип 1), *в* — 373 К (тип 2); 1 — среднее значение предела прочности, 2 — полоса рассеяния значений предела прочности кремния при тех же температурах и ориентациях

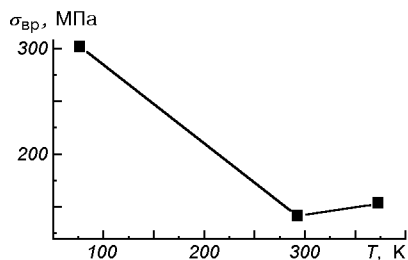


Рис. 11. Температурная зависимость предела прочности стекла защитного при статическом нагружении

составляющих не менее 77 % от среднего значения предела прочности.

Стекло защитное. Результаты испытания образцов стекла на статический изгиб при 373, 293 и 77 К приведены на рис. 11. Значения предела прочности при 373 и 293 К отличаются незначительно, однако при охлаждении до 77 К предел прочности стекла увеличивается почти в два раза. Разрушение образцов стекла происходит хрупко при всех температурах испытания, при этом наблюдается довольно большое рассеяние значений предела прочности, что характерно и для кремния.

На рис. 12 представлены результаты испытания стекла при симметричном циклическом изгибе в виде зависимости циклической долговечности N от амплитуды напряжений цикла $\sigma_{a \text{ из}}$ для каждой температуры испытания. Из приведенных результатов следует, что влияние температуры на сопротивление стекла усталости коррелирует с температурной зависимостью предела прочности. Так, в области температур 373—293 К сопротивление стекла усталости изменяется незначительно, причем при 373 К отмечено некоторое смещение кривой усталости в область больших значений амплитуд напряжений в сравнении с температурой 293 К. Однако охлаждение стекла до 77 К приводит уже к существенному повышению сопротивления усталости.

Достижение числа циклов $5 \cdot 10^5$ при исследованных температурах наблюдается для стекла, в отличие от кремния, при более низких значениях отношения соответствующих амплитуд напряжений к среднему пределу прочности (от 55 % при 150 К до 72 % при 373 К).

Таким образом, статические, упругие и динамические характеристики всех исследованных материалов увеличиваются с понижением тем-

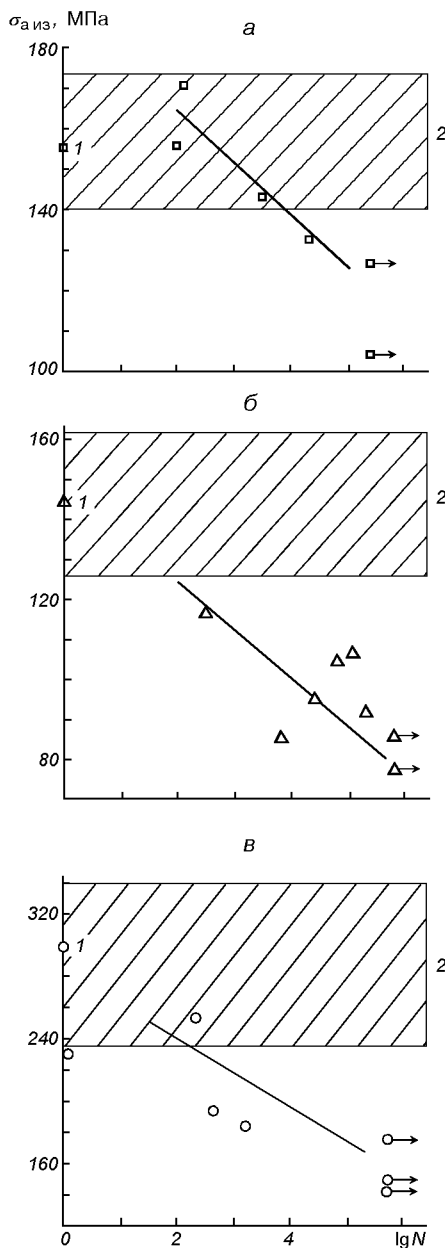


Рис. 12. Кривые усталости стекла защитного при симметричном изгибе при температурах: а — 373, б — 293, в — 77 К (1 — среднее значение предела прочности, 2 — полоса рассеяния значений предела прочности стекла при тех же температурах)

пературы. При этом влияние температуры на сопротивление усталости материалов хорошо коррелирует с ее влиянием на предел прочности при аналогичных условиях нагружения.

ВЫВОДЫ

1. Обнаружено, что предел прочности σ_B и модуль упругости E углепластика, испытанного в продольном и поперечном направлении, при охлаждении от 373 до 77 К увеличиваются почти в два раза, зависят от взаимной ориентации волокон наполнителя и растягивающих напряжений и для продольных образцов определяются в основном свойствами углеродных волокон, а для поперечных образцов — связующего. При этом для продольных образцов значения прочности и жесткости более чем в 10—20 раз превышают аналогичные характеристики поперечных образцов.

2. Установлено, что соединительный клей в условиях одноосного растяжения упруго деформируется как при температуре 150 К, так и 373 К, а при 293 К находится в высокоэластичном состоянии. Значения σ_B и E для клея при растяжении увеличиваются в 50 и 77 раз с понижением температуры от 373 до 150 К соответственно.

3. Монокристаллический кремний обнаруживает заметную ориентационную зависимость σ_B при изгибе. В зависимости от ориентации образца относительно оси нагружения наблюдается изменение уровня значений предела прочности и отсутствие или наличие влияния температуры на значения σ_B . Разрушение образцов кремния обоих типов при изгибе происходит хрупко в исследованном интервале температур.

4. Для защитного стекла установлено, что значения σ_B при изгибе при температуре 373 и 293 К отличаются незначительно, однако при понижении температуры до 77 К предел прочности стекла увеличивается почти в два раза.

Разрушение стекла в интервале температур 373—77 К происходит хрупко.

5. Полученные экспериментально механические характеристики материалов — элементов СБ были использованы для анализа напряженно-деформированного состояния панелей СБ КА при термоградиентном нагружении, вызванном орбитальным движением КА [2], и являются исходными данными для расчетных оценок циклической долговечности СБ при воздействии многократных орбитальных теплосмен.

1. Абушенков И. Д., Чернецкий В. К., Ильичев В. И. Установка для испытания материалов на усталость при криогенных температурах // Завод. Лаб.—1986.— № 12.—С. 59—63.
2. Ван С., Похил Ю. А., Коваль К. В., Хе Ш., Гаврилов Р. В. Расчет напряженного деформированного состояния панели солнечной батареи космического аппарата при термическом напряжении // Космічна наука і технологія.—2005.—11, № 5/6.—С. 103—110.
3. Воликова Л. М., Чернецкий В. К. Низкотемпературная приставка к разрывной машине 123Y10 // Прикладное криогенное и вакуумное материаловедение / Под ред Ф. Ф. Лаврентьева. — Киев: Наук. думка, 1991.— С. 137—143.

MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MAJOR COMPONENTS OF SOLAR ARRAYS

Yu. O. Pokhyl, R. V. Gavrylov, L. F. Yakovenko,
E. N. Aleksenko, V. A. Lototskaya, S. Van,
Sh. He, G. V. Tarasov, B. M. Rassamakin

We give some results of investigation of temperature influence, within 373 K to 77 K interval, on static and dynamic mechanical properties of structure materials to be employed with solar arrays of space vehicles. The experimental data thus obtained can be used in further theoretical calculations for lifetime of solar arrays under conditions of influence by multiple periodical thermal loads, in the course of orbital flight.