

УДК 539.0

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ СФЕРОПЛАСТА В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Е. В. Карпов

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mail: evkarpov@mail.ru

Приводятся результаты экспериментального исследования деформирования и разрушения сферопласта при малоцикловом одноосном нагружении (сжатие и разгрузка) при температуре $T = 25, 100$ °С. Изучены различные механизмы накопления повреждений при различных температурах и степенях поврежденности материала. Проведено сравнение результатов экспериментов с известными зависимостями, учитывающими накопление повреждений для металлов. Установлено, что основные положения этих теорий применимы к описанию малоциклового разрушения сферопласта — хрупкого материала, имеющего сложную структуру.

Ключевые слова: сферопласт, композит, циклическое нагружение, малоцикловая усталость, накопление повреждений.

Введение. В настоящее время существует большое количество работ, посвященных исследованию малоцикловой усталости металлов и сплавов. Известны уравнение малоцикловой долговечности Коффина [1]

$$\varepsilon_p N^{1/2} = c \quad (1)$$

(ε_p — прирост пластической деформации за один цикл; N — количество циклов до разрушения; c — константа материала) и более общие зависимости, предложенные в работах [2, 3]:

$$\varepsilon_p N^k = c \quad (2)$$

(k — константа, которая для различных материалов принимает значения от 0,2 до 1,0 [4]). Из (1), (2) следует, что при циклическом упругопластическом деформировании долговечность металлов и сплавов зависит только от накопленной пластической деформации и не зависит от вида напряженного состояния. Известны аналогичные закономерности для ползучести металлических конструкционных материалов. Так, согласно энергетическому варианту теории ползучести [5, 6] каждый материал характеризуется постоянным значением критической рассеянной энергии, при достижении которого в процессе ползучести происходит разрушение независимо от вида напряженного состояния и величины напряжения. Эта гипотеза подтверждается результатами экспериментов с образцами из стали 45 и различных титановых и алюминиевых сплавов. Рассеянная энергия принимается в качестве меры поврежденности материала.

Работа выполнена в рамках Интеграционного проекта ОЭМПУ РАН № 4.12.2 и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 05-01-00728).

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований деформирования и разрушения сферопласта ЭДС-7А в условиях малоциклового нагружения при температуре $T = 25, 100$ °С. Сферопласт — материал, механические свойства которого существенно отличаются от механических свойств металлов. Сферопласт, имеющий сложную структуру, состоит из компонентов, по-разному реагирующих на изменение температуры и приложенную нагрузку, и содержит большое количество микроконцентраторов. Однако проведенные исследования показывают, что при всех различиях механических свойств сферопластов и металлов для малоциклового усталости сферопласта наблюдаются закономерности, близкие к закономерностям, определенным для металлов.

1. Материал и условия экспериментов. Сферопласт ЭДС-7А представляет собой композитный пористо-армированный материал, состоящий из эпоксидно-диановой смолы со стеклянными микросферами в качестве наполнителя. Диаметр микросфер может достигать $120 \cdot 10^{-6}$ м, но диаметр большинства из них составляет от $20 \cdot 10^{-6}$ до $70 \cdot 10^{-6}$ м, толщина стенок приблизительно равна 10^{-6} м и не зависит от размеров сфер. Объемная доля сфер в материале составляет около 60 %. При $T = 25$ °С модуль Юнга равен 2060 МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность равна 700 кг/м^3 . На рис. 1 представлена фотография микроструктуры материала, полученная на сканирующем электронном микроскопе LEO-420.

В ходе испытаний проводилось циклическое одноосное нагружение цилиндрических образцов при $T = 25, 100$ °С. Выбор значения $T = 100$ °С обусловлен тем, что нагревание до этой температуры не приводит к возникновению необратимых изменений материала, но при ее достижении меняется характер разрушения сферопласта и наблюдается резкое уменьшение его деформационной прочности на сжатие (при более низких температурах нагревание приводит к увеличению деформационной прочности). Эксперименты проводились на машине для испытания материалов “Zwick/Roell Z100 TC-FR100TL.A4K”. Пульсирующее нагружение (многократное чередование сжатия и разгрузки) осуществлялось перемещением подвижной траверсы с постоянной скоростью, обеспечивающей скорость деформирования $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Деформация замерялась датчиком перемещения траверсы (жесткость данного материала позволяет замерять деформацию таким методом с достаточно высокой точностью), приложенная сила — встроенным датчиком силы. При разгрузке образца запись измерений в базу данных не производилась вследствие ограниченных возможностей конфигурации оборудования.

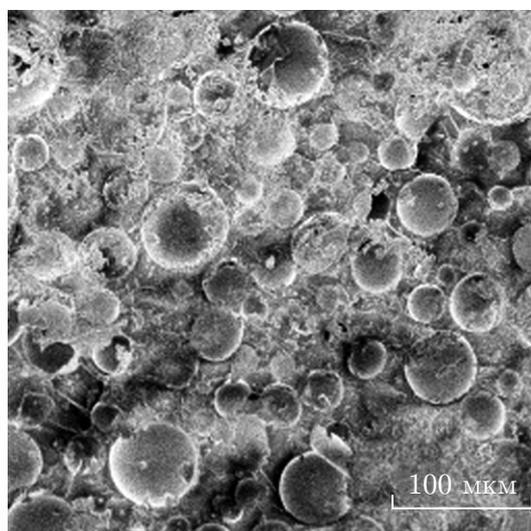


Рис. 1. Микроструктура сферопласта

Необходимо отметить, что при одноосном сжатии $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграмма сфероласта аналогична $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграмме упругопластического материала. Однако деформирование на линейном участке $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграммы лишь условно можно считать упругим, поскольку при каждом нагружении происходит приращение остаточной деформации, что при определенном количестве циклов (порядка 10^3) может привести к разрушению материала. Искривление диаграммы при увеличении нагрузки вызвано не пластичностью, а накоплением большого числа локальных хрупких разрушений структуры (трещин в матрице вблизи микросфер, играющих роль концентраторов напряжений, и разрушений самих микросфер).

В случае металлов о малоцикловой усталости говорят при упругопластическом циклическом деформировании. В случае сфероласта при любой нагрузке, сравнимой с пределом прочности, происходит необратимое деформирование материала, даже если не превзойден предел текучести (вычисляемый обычным способом по $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграмме). Поэтому далее вместо пластической деформации рассматривается необратимая деформация сжатия ε_n , накопленная при циклическом деформировании.

2. Циклическое нагружение при температуре $T = 25^\circ\text{C}$. При $T = 25^\circ\text{C}$ проводилось нестационарное пульсирующее нагружение образцов, при котором циклы нагружения были объединены в группы с постоянным значением максимального напряжения σ_{\max} . Далее такая группа циклов называется шагом нестационарного циклического нагружения. Переход от одного шага нагружения к следующему осуществлялся увеличением значения σ_{\max} на 2 МПа. Нагружение проводилось в двух режимах. В первом режиме, при котором количество циклов в одном шаге равно 20, число циклов до разрушения составляло $N = 282$. Во втором режиме, при 50 циклах в одном шаге, $N = 450$. Основное различие этих режимов заключается в том, что для накопления одной и той же величины остаточной деформации во втором режиме требуется большее количество циклов, чем в первом. Экспериментальные $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграммы для первого и второго режимов представлены на рис. 2, 3 соответственно. Вследствие большого количества циклов на рис. 2 приведена только каждая третья кривая, а на рис. 3 — каждая пятая.

Относительная деформация сжатия и необратимая деформация, накопленная за i циклов, равны соответственно

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0}, \quad \varepsilon_n^i = \frac{h_0 - h_i}{h_0}$$

(h_0 — высота образца до начала эксперимента; h — текущая высота образца; h_i — высота образца после завершения i -го цикла). Горизонтальный участок i -й кривой, лежащий на оси абсцисс, соответствует необратимой деформации ε_n^{i-1} .

Пусть ε_{\max}^i — максимальная деформация для i -го цикла. Тогда величину $\Delta\varepsilon_c^i = \varepsilon_{\max}^i - \varepsilon_{\max}^{i-1}$ будем называть добавочной деформацией i -го цикла. В случае нагружения при комнатной температуре $\Delta\varepsilon_c^i = \varepsilon_n^i - \varepsilon_n^{i-1}$. Величину $\Delta\varepsilon_s$, равную сумме всех $\Delta\varepsilon_c^i$ на одном шаге нагружения, будем называть добавочной деформацией шага.

На рис. 2,б видно, что в ходе эксперимента значение $\Delta\varepsilon_s$ сначала уменьшается от шага к шагу до некоторого значения, после чего начинает увеличиваться. На первом шаге наблюдается стабилизация накопления повреждений, проявляющаяся в нелинейном уменьшении значения $\Delta\varepsilon_c^i$ в зависимости от числа циклов нагружения. На всех шагах начиная со второго значения $\Delta\varepsilon_c^i$ почти одинаково для всех циклов одного шага. Очевидно, стабилизация накопления повреждений продолжается и после первого шага, что проявляется в уменьшении величины $\Delta\varepsilon_s$, при этом уменьшение $\Delta\varepsilon_c^i$ настолько незначительно, что обнаружить его в пределах одного шага затруднительно. Существенную нелинейность изменения величины $\Delta\varepsilon_c^i$ на первом шаге можно объяснить постепенным разрушением

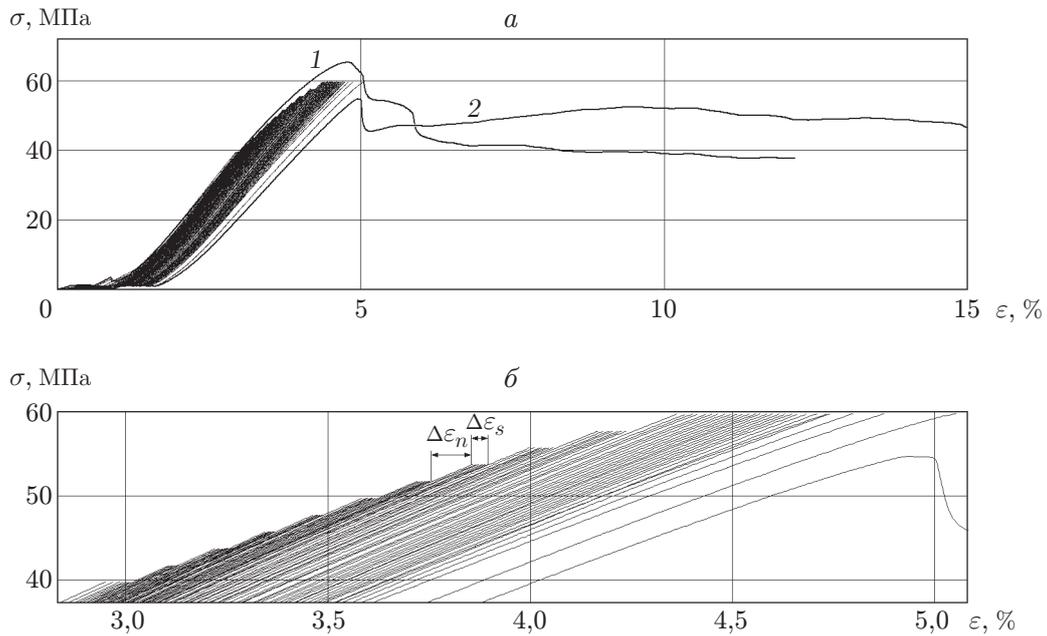


Рис. 2. $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграммы в случае циклического сжатия при $T = 25^\circ\text{C}$ в первом режиме нагружения:

a — $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграммы (1 — кривая однократного нагружения, 2 — кривая на последнем цикле нагружения); *б* — определение величин $\Delta\varepsilon_n$, $\Delta\varepsilon_s$

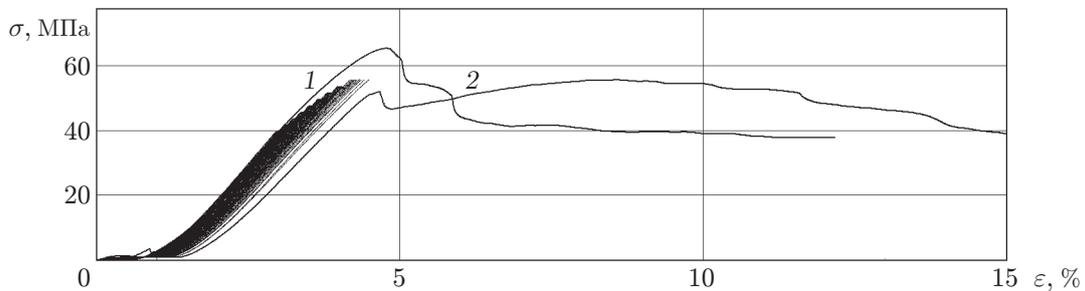


Рис. 3. $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграммы в случае циклического сжатия при $T = 25^\circ\text{C}$ во втором режиме нагружения:

1 — кривая однократного нагружения, 2 — кривая на последнем цикле нагружения

элементов структуры, размеры которых превышают средний характерный размер. После разрушения таких элементов (например, микросфер, диаметр которых значительно больше среднего) материал становится более однородным, в результате чего накопление остаточной деформации стабилизируется. Для второго режима нагружения наблюдаются аналогичные закономерности накопления необратимой деформации. Стабилизация накопления повреждений в обоих режимах нагружения продолжается до тех пор, пока величина накопленной остаточной деформации ε_n не приблизится к значению $\varepsilon_n^* = 0,45\%$, после чего $\Delta\varepsilon_s$ и $\Delta\varepsilon_c^i$ начинают увеличиваться от шага к шагу. В первом режиме нагружения минимальное значение $\Delta\varepsilon_c^i$ составляет около $0,002\%$, а максимальное значение, достигаемое на предпоследнем 10-м шаге, равно $0,005\%$. Последний шаг нагружения отличается от предыдущих шагов тем, что на нем происходит процесс, обратный наблюдаемому ранее процессу стабилизации накопления повреждений: наблюдается нелинейное увеличение значения $\Delta\varepsilon_c^i$ от цикла к циклу, что в конечном счете приводит к разрушению образца

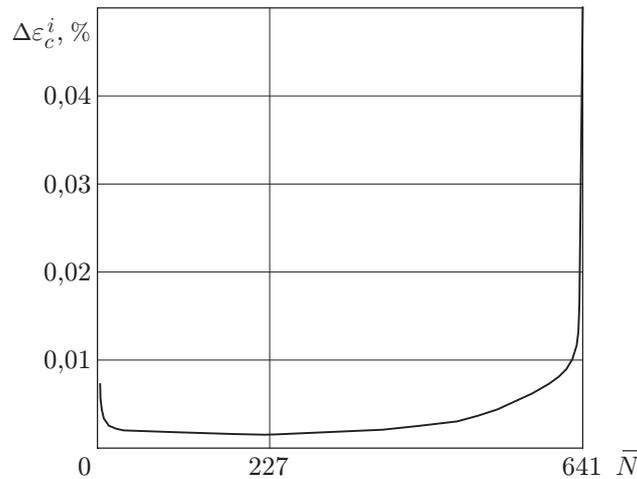


Рис. 4. Зависимость приращения остаточной деформации $\Delta\varepsilon_c^i$ за один цикл от числа циклов \bar{N}

при нагрузке, меньшей значения σ_{\max} на этом шаге. После начала роста значения $\Delta\varepsilon_c^i$ значение σ_{\max} не увеличивалось, поэтому последний шаг нагружения, продолжавшийся до разрушения образца, включает 82 цикла (см. рис. 2).

Сравнение результатов экспериментов для первого и второго режимов нагружения показывает, что изменение значения $\Delta\varepsilon_c^i$ при переходе от одного шага нагружения к другому обусловлено не столько повышением максимального напряжения σ_{\max} , сколько увеличением необратимой деформации ε_n при увеличении σ_{\max} . В обоих режимах при близких деформациях происходят аналогичные процессы, хотя этим деформациям соответствуют разные напряжения.

Поскольку изменения $\Delta\varepsilon_c^i$ от шага к шагу малы по сравнению с величиной остаточной деформации $\Delta\varepsilon_s$, накапливаемой на этих шагах, приращения остаточной деформации $\Delta\varepsilon_n$, обусловленные увеличением максимального напряжения при переходе к следующему шагу, будем интерпретировать как остаточную деформацию $\Delta\varepsilon_s$, накопленную на “добавочных” шагах с постоянным значением $\Delta\varepsilon_c^i$. Это значение положим равным среднему арифметическому соответствующих значений для предыдущего и последующего шагов. Число циклов в каждом таком шаге положим равным целой части $\Delta\varepsilon_n/\Delta\varepsilon_c^i$. Представив процесс нагружения в виде непрерывной последовательности циклов без скачков деформации при переходе с шага на шаг, получим представленную на рис. 4 зависимость $\Delta\varepsilon_c^i$ от количества пройденных циклов. Данная зависимость построена для первого режима нагружения, для второго режима зависимость аналогична. Вместо количества реально осуществленных циклов нагружения N используется величина \bar{N} , полученная добавлением к N суммарного количества циклов в “добавочных” шагах. На рис. 4 значение $\bar{N} = 227$ для первого режима соответствует значению накопленной остаточной деформации $\varepsilon_n^* = 0,45\%$, при котором в обоих режимах уменьшение значения $\Delta\varepsilon_s$ сменяется его увеличением. Если в формуле Коффина константу c определить как необратимую деформацию, полученную до момента начала макроразрушения при однократном нагружении, то зависимость между $\Delta\varepsilon_c^i$ и предельной деформацией до момента начала макроскопического разрушения можно описать формулой следующего вида:

$$\Delta\varepsilon_c^{\min}(\bar{N}_1^{k_1} + \bar{N}_2^{k_2}) = c. \tag{3}$$

Здесь $\Delta\varepsilon_c^{\min}$ — минимальное для данного режима нагружения значение $\Delta\varepsilon_c^i$; \bar{N}_1 — число циклов до момента, с которого начинается рост $\Delta\varepsilon_s$; $\bar{N}_2 = \bar{N} - \bar{N}_1$; k_1, k_2 — константы

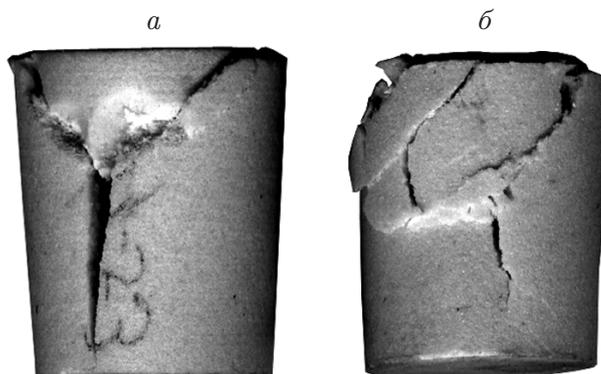


Рис. 5. Разрушение образцов при однократном (а) и малоцикловом (б) нагружениях

материала (для первого режима нагружения $k_1 = 1,05$, $k_2 = 1,15$, для второго режима $k_1 = 1,03$, $k_2 = 1,15$). Полученные в данных экспериментах значения констант k_1 , k_2 являются приближенными. Для более точного их определения, а также для определения константы ε_n^* , необходимой для вычисления \bar{N}_1 и \bar{N}_2 , требуется проведение дополнительных серий экспериментов по стационарному малоцикловому нагружению (с постоянным значением σ_{\max}). Однако возможность определения этих констант свидетельствует о том, что процессы малоциклового усталости в сферопласте подчиняются закономерностям, близким к установленным для металлов и сплавов.

В случае если нагружение происходит при комнатной температуре, модуль Юнга изменяется существенно только за несколько циклов до начала макроскопического разрушения, когда значение $\Delta\varepsilon_c^i$ начинает быстро увеличиваться (см. рис. 4). В ходе эксперимента (за исключением нескольких последних циклов) отклонения значения модуля Юнга от его начального значения не превышают 1,5 %.

Разрушение образца может наступить при нагрузках, существенно меньших предела прочности материала при однократном нагружении, однако после падения напряжения, свидетельствующего об образовании макротрещины, при дальнейшем сжатии образца напряжение возрастает. В результате образец, подвергнутый циклическому нагружению, до момента окончательной потери несущей способности выдерживает значительно большие деформации, чем образец, разрушаемый однократным нагружением (см. рис. 2, а, рис. 3). При этом максимальное напряжение, достигаемое в образце после образования макротрещин, может оказаться больше напряжения, при котором началось макроразрушение (см. рис. 3). Возможно, это обусловлено более равномерным распределением повреждений в материале (рис. 5).

Из рис. 2, 3 следует, что при втором режиме нагружения, когда для достижения того же значения накопленной остаточной деформации, что и в первом режиме, требуется большее число циклов, разрушение происходит не только при меньшей нагрузке, но и при меньшем значении накопленной остаточной деформации. Последнее может быть обусловлено тем, что во втором режиме (см. рис. 3) число циклов до разрушения в 1,5 раза больше, чем в первом (см. рис. 2). Дело в том, что не все повреждения структуры, возникающие при сжатии образцов, могут вызывать остаточную продольную деформацию. Повреждениями, не вызывающими остаточную деформацию, могут являться характерные для пористых сред микротрещины, возникающие в связующем вблизи сферических пустот и направленные вдоль оси нагружения. Не влияя на увеличение остаточных деформаций сжатия, эти повреждения тем не менее накапливаются от цикла к циклу, усиливая поврежденность материала, что при увеличении числа циклов может приводить к уменьшению максимальной деформации, выдерживаемой образцом до разрушения.

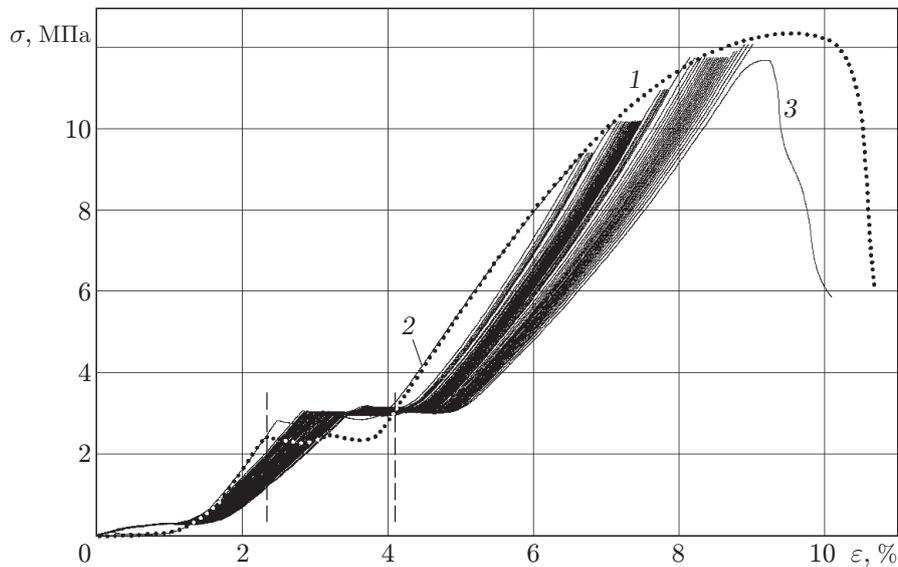


Рис. 6. $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграммы в случае циклического сжатия при $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$:
 1 — кривая однократного нагружения до разрушения; 2 — кривая на первом шаге циклического нагружения; 3 — кривая на последнем шаге циклического нагружения

3. Малоцикловое нагружение при температуре $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 6 приведены экспериментальные $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграммы, полученные в случае малоциклового нагружения при температуре $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$. Всего было проведено 63 цикла.

В начале процесса нагружения образцов из сферопласта при напряжениях, существенно меньших предела прочности, на $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграмме во всем диапазоне температур имеется участок (на рис. 6 выделен штриховыми линиями), разделяющий линейные участки диаграммы. В ходе циклического нагружения на этом участке кривые $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграммы сохраняют свою форму (индивидуальную для каждого образца), а значит, он не является ни площадкой текучести, ни результатом локального разрушения материала при начальном перераспределении напряжений в образце. По-видимому, наличие этого участка на диаграмме обусловлено каким-либо обратимым процессом.

При $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$ накопление повреждений в материале происходит не так, как при комнатной температуре. Остаточные деформации сжатия практически не накапливаются в образце, а увеличение деформации, соответствующей максимальному напряжению σ_{\max} , происходит за счет уменьшения модуля Юнга материала (если вычислять его по линейному участку $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграммы, следующему за участком, выделенным штриховыми линиями на рис. 6, например в интервале от 4 до 9 МПа). В результате в последнем цикле, заканчивающемся разрушением, значение модуля Юнга оказывается на 12 % меньше начального, равного 250 МПа. Такое изменение свойств может объясняться увеличением (при высокой температуре) деформационной прочности связующего, сопровождающимся значительным уменьшением его жесткости, вследствие чего большая часть нагрузки приходится на микросферы. В этом случае разрушение микросфер может происходить без повреждения матрицы, в результате чего модуль Юнга образца будет уменьшаться без накопления при этом остаточных деформаций сжатия. Уменьшение жесткости материала может быть вызвано также накоплением в связующем трещин, направленных вдоль оси приложения нагрузки (см. п. 2).

При $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$ (в отличие от комнатной температуры) накопление повреждений в материале происходит по существенно нелинейному закону. При каждом значении максимального напряжения σ_{\max} значение $\Delta\varepsilon_c^i$ уменьшается от цикла к циклу (сгущение кривых

нагружения на рис. 6), т. е. происходит стабилизация накопления повреждений. После достижения величиной $\Delta\varepsilon_c^i$ некоторого предельного значения монотонное уменьшение значений модуля Юнга прекращается, и наблюдается лишь их колебание в окрестности достигнутого значения. При нагрузках, близких к критической в случае однократного нагружения, значение $\Delta\varepsilon_c^i$ не приближается к нулю, как при меньших нагрузках, а уменьшается до некоторого значения, доступного для измерения, которое в дальнейшем остается постоянным. Исключение составляют несколько последних циклов, в которых $\Delta\varepsilon_c^i$ увеличивается до тех пор, пока не наступит разрушение. В отличие от случая, когда нагружение происходит при комнатной температуре, несущая способность после образования макротрещины не сохраняется.

4. Выводы. Результаты проведенных экспериментов показывают, что закономерности малоциклового усталости сферопласта аналогичны закономерностям, установленным для металлов и сплавов. По крайней мере, при комнатной температуре для сферопласта можно получить уравнение долговечности, аналогичное уравнению Коффина.

Согласно различным теориям накопление повреждений может происходить по линейному [6] или нелинейному [1] закону. В случае сферопласта для одного и того же материала имеют место и линейный, и нелинейный законы накопления повреждений в зависимости от температуры, при которой происходит циклическое нагружение, и степени поврежденности материала.

При повышенной (по сравнению с комнатной) температуре, не вызывающей необратимого изменения материала, изменяется механизм накопления повреждений при малоциклового усталости. Если при комнатной температуре увеличение поврежденности проявляется в увеличении остаточных деформаций сжатия без существенного изменения жесткости материала, то при температуре $T = 100$ °С происходит уменьшение модуля Юнга материала (к моменту разрушения модуль Юнга составляет 88 % начального значения) без прироста остаточных деформаций сжатия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Coffin L. F., Schenectady Jr. Study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal // Trans. ASME. 1954. V. 76, N 6. P. 931–950.
2. Manson S. S. Thermal stress and low-cycle fatigue. N. Y.: McGraw-Hill, 1966.
3. Martin D. E. An energy criterion for low-cycle fatigue // Trans. ASME. Ser. D. 1961. Dec. P. 565–571.
4. Трощенко В. Т. Усталость и неупругость металлов. Киев: Наук. думка, 1971.
5. Соснин О. В. Энергетический вариант теории ползучести / О. В. Соснин, Б. В. Горев, А. Ф. Никитенко. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1986.
6. Никитенко А. Ф. Ползучесть и длительная прочность металлических материалов. Новосибирск: Новосиб. гос. архит.-строит. ун-т, 1997.

*Поступила в редакцию 28/XI 2007 г.,
в окончательном варианте — 20/XII 2007 г.*