

УДК 678.01 : 53

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОЛИМЕРОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

A. M. Лексовский, B. P. Регель

Как уже отмечалось в работах [1, 2], разрушение твердых тел, в частности полимеров, при любом режиме нагружения, в том числе и при циклическом, необходимо рассматривать исходя из общих представлений о природе температурно-временной зависимости прочности твердых тел. Согласно этим представлениям разрушение является кинетическим процессом (термоактивационным), развивающимся в теле под нагрузкой. Для полимеров в основе процесса разрушения лежат активируемые механическим напряжением флуктуационные разрывы химических связей.

Из опытов, в которых нагружение образца производилось в два приема [3, 4], и различными режимами нагружения [1], был сделан вывод, что разрушение в теле накапливается необратимо.

Необратимость процесса разрушения означает, что должен соблюдать-
ся принцип суммирования нарушений (принцип суперпозиции), который может быть выражен формулой [1]:

$$\int_0^{\tau'} \frac{dt}{\tau[\sigma(t)]} = 1. \quad (1)$$

Здесь τ' — время от момента приложения нагрузки до разрыва образца. При циклическом нагружении τ' включает как промежутки времени, когда образец находится под нагрузкой, так и промежутки времени, в которых образец разгружен и отдыхает. Под $\tau[\sigma(t)]$ в формуле (1) подразумевается зависимость долговечности от напряжения и температуры, которую можно представить в виде:

$$\tau[\sigma(t)] = \tau_0 e^{(u_0 - \gamma \sigma(t))/kT}. \quad (2)$$

В формуле (2), согласно работе [1], коэффициенты τ_0 , u_0 и γ могут быть приняты равными соответствующим коэффициентам, найденным из опытов со статическим нагружением [4—7].

В работе Журкова и Томашевского [1] справедливость принципа суперпозиции (1) была проверена при различных типах нагружения, в том числе и при циклическом нагружении, но только при небольшом числе циклов (порядка 10^3). Между тем при обычных усталостных испытаниях число циклов до разрушения составляет 10^7 и более. При этом, как правило, долговечность при циклическом нагружении оказывается меньше, чем при статическом.

По поводу причин расхождения между статической и циклической долговечностью существуют различные мнения.

Некоторые авторы [8] считают этот опытный факт прямым доказательством несоблюдения принципа суммирования нарушений и делают

вывод, что прямой связи между разрушением под действием постоянных и циклических напряжений нет.

По нашему мнению [2], наличие расхождений между величинами циклической $\tau_{цикл}$ и статической $\tau_{стат}$ долговечности не может служить основанием для утверждения о несоблюдении принципа аддитивности повреждений и тем более об отсутствии определенной общности закономерностей разрушения при различных режимах нагружения. Если циклическость приложения нагрузки по каким-то причинам и ускоряет разрушение, то это еще не означает, что вызываемые за каждый цикл нарушения не суммируются. Можно с уверенностью утверждать, что наблюдаемые на опыте расхождения между $\tau_{стат}$ и $\tau_{цикл}$ не связаны с «заличиванием» нарушений, так как в этом случае расхождение имело бы обратный знак по сравнению с наблюдаемым. Многократное деформирование может усложнить явление разрушения за счет дополнительного нагрева испытуемого образца или вследствие изменений структурного коэффициента γ в формуле (2), как это предположено нами в [2]. Эти усложнения могут затруднить применение принципа суперпозиции для практических расчетов циклической долговечности по данным статических испытаний, но они не исключают возможности рассматривать процесс разрушения при любом режиме нагружения как кинетический термоактивационный процесс, природа которого отражается формулой Журкова (2).

В настоящей работе поставлена цель получить дополнительные опытные данные, подтверждающие справедливость принципа суммирования нарушений и высказанных выше представлений о связи циклической и статической долговечности. Для этого проведены опыты по сопоставлению долговечностей четырех полимеров при статическом и циклическом нагружении в условиях, которые обеспечивают возможность проверки принципа суперпозиции.

Методика

Для проведения усталостных испытаний полимерных волокон и пленок на растяжение при разных температурах и частотах был изготовлен специальный стенд. Система нагружения образца кривошипно-шатунным механизмом через специально подобранные пружины в испытательных машинах стенда не отличалась от применявшейся в [2] и обеспечивала поддержание постоянства амплитуды напряжения при циклическом нагружении. Изменение напряжения со временем при циклических испытаниях соответствовало формуле:

$$\sigma(t) = \frac{1}{2} \sigma_0 (1 - \sin \omega t), \quad (3)$$

где σ_0 — амплитуда напряжения, ω — частота.

Испытания производили при комнатной температуре с частотой нагружения 24 цикл/сек. Известно, что при циклическом деформировании массивных образцов они заметно разогреваются [9, 10]. Мы полагали ранее [2], что в тонких образцах вследствие большой поверхности теплообмена с окружающей атмосферой эффект разогрева незначителен, однако специальные опыты, проведенные в настоящей работе, показали, что, даже волокна толщиной 10—20 μ могут разогреваться при циклическом деформировании, и это заметно сказывается на циклической долговечности. Чтобы исключить температурный эффект и иметь возможность сопоставлять долговечности при статическом и циклическом нагружении при одинаковых температурах, необходимо ускорить теплообмен между образцом и окружающей средой при циклических испытаниях. Для этой цели в случае испытаний при комнатной температуре осуществляли обдув образца воздухом той же температуры при помощи вентилятора. Опыты показали, что подобный обдув воздухом приводит к существенному увеличению долговечности при циклическом нагружении. В то же время обдув совершенно не изменяет долговечности при статических испытаниях. Это означает, что обдув не создает дополнительного понижения температуры образца по сравнению с окружающей средой.

Опыты проводили на волокнах кордного капрона с 0,5% стабилизатора, вытянутого в 5,2 раза, волокнах полиакрилонитрила (ПАН), вытянутого в 17,3 раза, волокнах кордной вискозы фирмы Mergul и пленках полиметилметакрилата (ПММА). Размеры образцов, их изготовление и способ крепления в зажимах не отличались от применявшимися ранее.

Непосредственно из опытов определяли время жизни образца τ' с момента нагружения до разрыва. В случае циклических испытаний из τ' необходимо исключить промежутки времени, в которые образец разгружен, т. е. определить расчетное время пребывания образца под нагрузкой $\tau_{цикл}$ — долговечность при циклическом нагружении. Для синусоидального нагружения, соответствующего формуле (3), расчет $\tau_{цикл}$ производился так же, как это делалось в работе [2], на основе принципа суперпозиции (1) по формуле:

$$\tau_{цикл} = \tau' \cdot \frac{I(ix)}{e^x} = N \cdot \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{I(ix)}{e^x}; \quad x = \alpha \sigma_0. \quad (4)$$

где N — число циклов до разрушения, $2\pi/\omega$ — период циклического нагружения, $I(ix)$ — бесселева функция для мнимого аргумента, σ_0 — амплитуда напряжения в формуле (3), $\alpha = \gamma/kT$.

Результаты измерений и обсуждение

На рис. 1 показана зависимость логарифма долговечности от напряжения для волокон ПАН и пленки ПММА. В случае статических испытаний по оси ординат отложено значение долговечности в логарифмическом

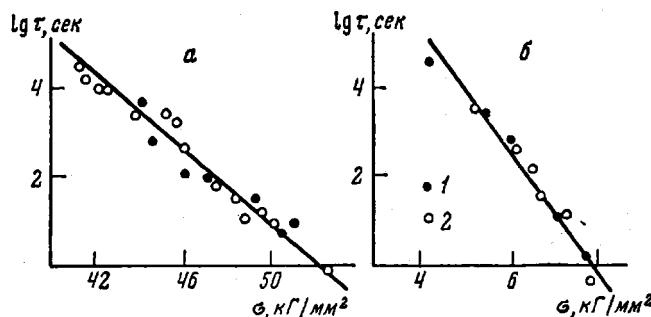


Рис. 1. Зависимость долговечности от напряжения при статическом и циклическом нагружении для: *a* — волокон полиакрилонитрила, *b* — пленки полиметилметакрилата:
1 — статическое нагружение, 2 — циклическое нагружение с частотой 24 цикл/сек

масштабе $lg \tau_{stat}$, а по оси абсцисс — напряжение σ . При циклическом нагружении по оси ординат отложено значение $lg \tau_{цикл}$, а по оси абсцисс — амплитуда напряжения σ_0 . Из приведенных графиков видно, что зависимости $lg \tau = f(\sigma)$ при циклическом и статическом нагружении как для ПАН, так и для ПММА полностью совпадают. Следует подчеркнуть, что полное совпадение τ_{stat} и $\tau_{цикл}$ для ПАН получается без применения метода ускоренного теплоотвода, а для пленок ПММА это совпадение получено только в результате применения метода обдува воздухом. В работе [2], где образцы ПММА не обдувались, и разогрев, возникающий вследствие циклического деформирования, не устраивался, наблюдалось некоторое расхождение между τ_{stat} и $\tau_{цикл}$.

Таким образом, на примере двух полимеров — ПАН и ПММА — удалось показать, что принцип суперпозиции (1) справедлив и, следовательно, в основе разрушения как при статическом, так и при циклическом нагружении, действительно, лежит один и тот же механизм, природа которого отражается уравнением Журкова (2). С другой стороны, уже из приведенного примера видно, что различные материалы ведут себя при циклических испытаниях по-разному. Для волокон ПАН циклическое деформирование, по-видимому, не приводит ни к заметному изменению структурно-чувствительного множителя γ , ни к существенному нагреву образца, поэтому для волокон ПАН принцип суперпозиции (1) справедлив при подстановке в него значения $\tau[\sigma(t)]$ по формуле (2) с коэффициентами t_0 , n_0 , γ , определенными из статических испытаний и без изменения температуры T по сравнению с окружающей.

Для ПММА циклическое деформирование приводит уже к заметному нагреву образца. Поэтому принцип (1) соблюдается для ПММА при условии внесения в (2) поправок на изменение температуры T образца по сравнению с окружающей, или же при условии усиленного теплоотвода при циклическом испытании.

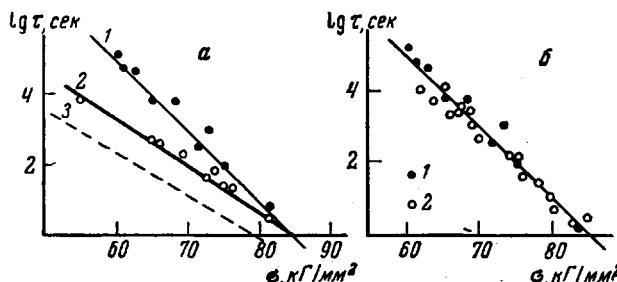


Рис. 2. Зависимость долговечности вискозных волокон от напряжения при статическом и циклическом нагружении:

а: 1 — статическое нагружение, 2 — циклическое нагружение с частотой 24 цикла/сек с обдувом воздухом, 3 — то же, без обдува воздухом; б: 1 — статическое нагружение, 2 — циклическое нагружение (частота 24 цикла/сек) с предварительным статическим подтягиванием и обдувом воздухом

Для других полимеров принцип суперпозиции (1) соблюдается при условии учета изменений как температуры T , так и структурно-чувствительного коэффициента γ . В качестве примера подобного материала можно привести вискозные волокна. На рис. 2 приведены данные измерений долговечности вискозных волокон при комнатной температуре для случая статического и циклического нагружения. На рис. 2, а нанесены данные измерений при статическом нагружении (прямая 1) и при циклическом нагружении с обдувом воздухом (прямая 2); пунктирная прямая (3) соответствует циклическим испытаниям без обдува воздухом. Видно, что обдув сильно сблизил $\tau_{\text{стат}}$ и $\tau_{\text{цикл}}$, однако расхождение между ними все же осталось. Расхождение, как это ясно из [2], может быть объяснено изменениями коэффициента γ при переходе от статического к циклическому режиму нагружения. Чтобы избавиться от этого эффекта, можно воспользоваться приемом, примененным нами в [2], позволяющим производить сопоставление долговечностей при статическом и циклическом нагружении при одинаковых исходных структурах испытуемых образцов. Для этого циклические испытания следует производить после предварительного выдерживания образца под статической нагрузкой в течение времени, составляющего $0,1 \div 0,3 \tau_{\text{стат}}$.

На рис. 2, б приведены результаты опытов по сопоставлению долговечностей вискозных волокон при статическом нагружении и при циклическом нагружении с обдувом воздухом и после предварительного выдерживания образцов под статической нагрузкой. Видно, что в этом случае удалось добиться полного совпадения значений $\tau_{\text{стат}}$ и $\tau_{\text{цикл}}$.

Это еще раз подтверждает справедливость принципа суперпозиции нарушений для полимерных материалов. Тот факт, что этот принцип подтвержден прямыми опытами на трех полимерах позволяет полагать, что он справедлив и во всех других случаях. Полученные данные позволяют предполагать также, что причина расхождения между $\tau_{\text{стат}}$ и $\tau_{\text{цикл}}$ для всех полимеров, как и для исследованных выше, связана прежде всего с явлением нагрева образцов при циклическом деформировании и изменениями коэффициента γ при изменении режима нагружения.

Последний вывод требует еще дополнительного экспериментального подтверждения, особенно для таких полимеров, для которых методами предварительного подтягивания и методами усиленного отвода тепла от

испытуемых образцов не удается добиться полного совпадения $\tau_{\text{стат}}$ и $\tau_{\text{цикл}}$. В качестве примера такого рода полимеров можно привести капрон. На рис. 3 приведены результаты измерений долговечности капроновых волокон при статическом и циклическом нагружении. Из рисунка видно, что применение обдува значительно сблизило значения $\tau_{\text{стат}}$ и $\tau_{\text{цикл}}$, как и в случае ПММА и вискозы. Попытки уменьшить оставшееся расхождение за счет выдерживания капроновых волокон под статической нагрузкой не привели к такому же заметному эффекту, как в случае вискозных волокон. Попытки уменьшить расхождение $\tau_{\text{стат}}$ и $\tau_{\text{цикл}}$ за счет усиления теплоотвода путем проведения испытаний в жидкой среде пока также не увенчались успехом.

На основании результатов, полученных для трех полимеров, можно предположить, что мы не добились в случае капрона полного совпадения $\tau_{\text{стат}}$ и $\tau_{\text{цикл}}$, так как не сумели привести испытуемые образцы к сопоставимым условиям испытания — одинаковым температурам и структурным коэффициентам γ . Не исключено, что это объясняется тем, что в капроне нагрев, вызываемый циклическим деформированием, носит более локальный характер, чем в других полимерах, и разрушение химических связей в месте нагрева успевает проходить в нем до того, как выделенное тепло отведено из данного места за счет теплопроводности. Возможно также, что структурные особенности капрона приводят к таким изменениям γ при изменении режима нагружения, которые не могут быть исключены методом простого подтягивания.

Итак, в опытах для ПАН, ПММА и вискозы достигнутое полное совпадение $\tau_{\text{стат}}$ и $\tau_{\text{цикл}}$. Расхождение долговечностей, обнаруженное для капрона, качественно объяснено теми же причинами, что и для предыдущих трех полимеров. Все это дает возможность считать, что основные выводы данной работы о справедливости принципа суперпозиции нарушений и о том, что причина наблюдаемых расхождений между $\tau_{\text{стат}}$ и $\tau_{\text{цикл}}$ связана в основном с явлением нагрева образцов при циклическом деформировании и изменениями структурного коэффициента γ при изменении режима нагружения, могут быть распространены на все полимеры.

Авторы выражают глубокую благодарность С. Н. Журкову за интерес к работе и участие в обсуждении результатов.

Выводы

- Сравнением долговечностей четырех полимеров (ПАН, ПММА, вискоза и капрон) при статическом и циклическом нагружении доказана справедливость принципа суперпозиции нарушений.
- Полученное совпадение долговечностей для трех полимеров в этих двух режимах нагружения позволяет считать, что разрушение при циклическом нагружении имеет в своей основе термоактивационный разрыв химических связей, как и в случае статического нагружения.
- Причина наблюдаемых расхождений между долговечностями связана в основном с явлением нагрева образцов при циклическом деформировании и изменениями структурного коэффициента γ при изменении режима нагружения.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе

Поступила в редакцию
20 VII 1964

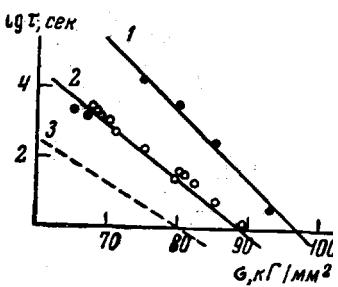


Рис. 3. Зависимость долговечности капроновых волокон от напряжения при циклическом и статическом нагружении:

1 — статическое нагружение, 2 — циклическое нагружение с частотой 24 цикла/сек с обдувом воздухом, 3 — то же, без обдува воздухом

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Н. Журков, Э. Е. Томашевский, Сб. Некоторые проблемы прочности твердого тела. Изд. АН СССР, 1959, стр. 68.
 2. В. Регель, А. М. Лековский, Физика твердого тела, 4, 949, 1962.
 3. Н. Н. Нэвард, Trans. Faraday Soc., 38, 394, 1942.
 4. С. Н. Журков, Б. Н. Нарзуллаев, Ж. техн. физики, 23, 1677, 1953.
 5. С. Н. Журков, С. А. Абасов, Высокомолек. соед., 3, 441, 1961.
 6. С. Н. Журков, С. А. Абасов, Высокомолек. соед., 3, 450, 1961.
 7. С. Н. Журков, С. А. Абасов, Физика твердого тела, 4, 2184, 1962.
 8. И. Е. Куро, В. А. Степанов, Физика металлов и металловедение, 15, 419, 1963.
 9. Б. И. Панишин, Г. М. Бартенев, Г. Н. Финогенов, Пласт. массы, 1960, № 11, 47.
 10. С. Е. Ратнер, А. В. Станскас, Б. И. Шпаковская, Пласт. массы, 1961, № 7, 59.
-

THE LONGEVITY OF POLYMERS ON CYCLIC LOADING

A. M. Leksovskii, V. R. Regel

Summary

The validity of the impairment superposition principle has been shown by a comparison of the longevity of polymers on static and periodic loading on the example of polyacrylonitrile, polymethylmethacrylate and viscose. It has thus been demonstrated that at the basis of degradations on both static and periodic loading lies the thermal activation rupture of chemical bonds, the nature of which is described by the Zhurkov equation.
