

КАНАЕВА Н. С., НИЗИН Д. Р., ПОРВАТОВА А. А.

ЦИКЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ¹

Аннотация. Проведена оценка характера кривой деформирования образцов эпоксидных полимеров при мягком циклическом ассиметричном нагружении до уровня напряжений, составляющих 80% от разрушающей нагрузки. Проанализировано изменение потерь энергии на гистерезис с ростом числа циклов для полимера на основе эпоксидной смолы Этал-247, отверждаемой смолой Этал-1472.

Ключевые слова: полимерные материалы, циклические испытания, гистерезис, петли гистерезиса, потери гистерезиса.

KANAeva N. S., NIZIN D. R., PORVATOVA A. A.

CYCLIC TESTS OF EPOXY POLYMERS

Abstract. The character of the deformation curve of epoxy polymer samples under soft cyclic asymmetric loading to the stress level of 80% of the breaking load is estimated. The change in energy losses due to hysteresis with an increase in the number of cycles is analyzed for the composition of an epoxy polymer based on Etal-247 epoxy resin cured by Etal-1472.

Keywords: polymer materials, cyclic tests, hysteresis, hysteresis loops, hysteresis losses.

В последнее время в качестве конструкционных и защитных материалов все чаще применяются полимеры. Их серьезным преимуществом является то, что за счет изменения состава и совершенствования процесса производства полимерные материалы приобретают новые эксплуатационные качества. Обеспечение надежности и долговечности конструктивных элементов является важнейшим направлением при проектировании и эксплуатации зданий и сооружений. Одним из наиболее значимых критериев обеспечения долговечной работы полимерных материалов является их устойчивость к действию циклических механических нагрузок [1; 2].

Сопrotивление материалов действию циклических нагрузок существенно отличается от сопротивления тех же материалов статическому и ударному воздействию. В работах [3–7] показано, что в условиях действия переменных нагрузок могут протекать процессы как упрочнения, так и разупрочнения, связанные с исходным структурным состоянием материалов, его изменением под действием циклических деформаций, образованием и

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-38-90287 «Количественная оценка влияния природных климатических факторов на динамическую усталость и долговечность полимерных композитов».

перераспределением остаточных микронапряжений, а также возникновением и развитием микроповреждений.

Согласно ГОСТ 57143-2016, сущность метода циклических испытаний полимерного композита состоит в повреждении образца под действием переменных растягивающих напряжений с постоянной частотой, формой цикла и коэффициентом асимметрии до полной потери его прочности или динамической жесткости. Испытания могут проводиться по двум методикам, каждая из которых определяет различные контрольные параметры испытаний. Мягкое нагружение характеризуется постоянной амплитудой напряжений, контрольным параметром испытаний является нагрузка (напряжение). Жесткое нагружение осуществляется при постоянной амплитуде деформаций, контрольным параметром испытания является деформация в направлении нагружения [8].

При циклическом приложении нагрузки диаграмма зависимости деформации от напряжений представляет собой петли гистерезиса. Площадь петли пропорциональна доле энергии упругости, перешедшей в тепло за один цикл нагружения. Гистерезис (от греч. *hysteresis* – отставание, запаздывание) свойствен нелинейным процессам, состояние которых определяется не только внешними условиями в данный момент времени, но и предысторией [9].

В качестве объекта исследования был выбран полимер, получаемый на основе модифицированной эпоксидной смолы Этал-247 (ТУ 2257-247-18826195-07), отверждаемой отвердителем Этал-1472 (ТУ 2257-3570-18826195-03). Данный отвердитель позволяет повысить подвижность и жизнеспособность полимерных смесей на его основе по сравнению с композициями на основе полиэтиленполиамиона; является нетоксичным веществом, не вызывает аллергических реакций, не имеет неприятного запаха.

Для проведения циклических испытаний составов полимерных композитов на растяжение использовалась разрывная машина серии AGS-X с программным обеспечением TRAPEZIUM X. Частота фиксации значений напряжений и деформаций составляла 0,01 сек. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ Р 57143-2016 «Композиты полимерные. Метод испытания на усталость при циклическом растяжении» при температуре 23 ± 2 °C и относительной влажности воздуха $50 \pm 5\%$ на образцах, имеющих форму «восьмерок» (тип 2 согласно ГОСТ 11262-2017). Скорость перемещения зажимов испытательной разрывной машины составляла 2 мм/мин. Испытания проводились при мягком циклическом ассиметричном нагружении до уровня напряжений, составляющих 80% от разрушающей нагрузки.

Анализ полученных результатов показал, что при циклических испытаниях на растяжение, кривая деформирования образцов эпоксидных полимеров имеет чередующиеся

восходящие (нагрузка) и нисходящие (разгрузка) ветви (рис. 1). Восходящие кривые имеют выгнутую форму, а нисходящие – практически прямолинейную, что свидетельствует о разном характере процессов, происходящих в структуре полимеров при нагрузке и разгрузке. При нагружении всегда присутствует пластическая составляющая деформации, возрастающая при увеличении нагрузки. Процесс разгрузки представляет собой упругую релаксацию напряжений.

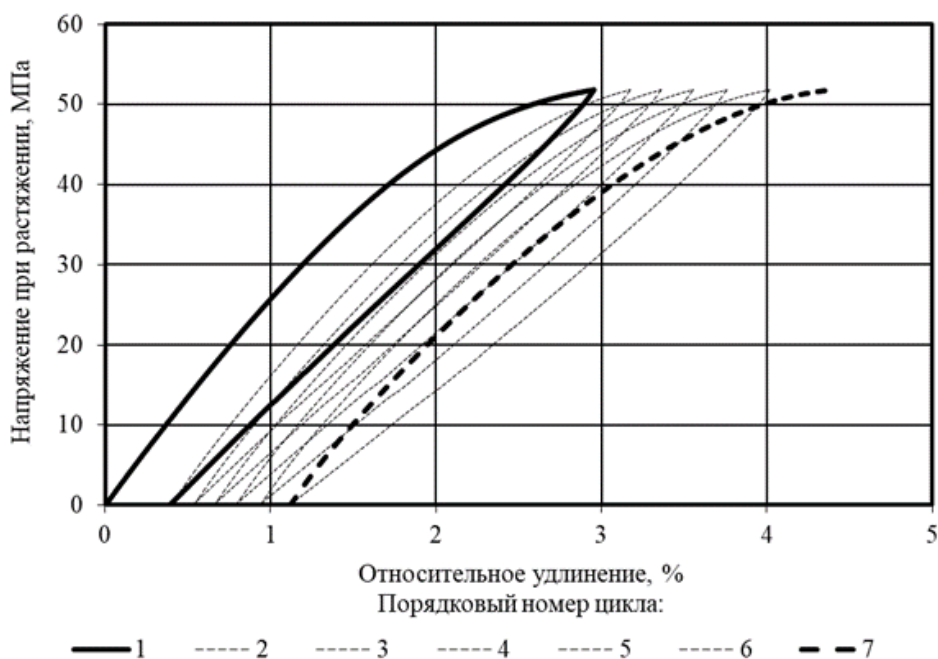


Рис. 1. Кривая деформирования образца эпоксидного полимера (Этал-247/Этал-1472) при циклическом воздействии растягивающих нагрузок (80% от разрушающей нагрузки).

По результатам проведенных исследований установлено, что разрушение образца произошло на седьмом цикле воздействия растягивающей нагрузки, равной 80% от разрушающей. Нагрузка при разрыве образца достигла уровня 99,8% от заданного уровня нагружения. Изменение модуля упругости эпоксидного полимера состава Этал-247/Этал-1472 при растяжении в зависимости от номера циклического нагружения представлено на рисунке 2. Установлено повышение данного показателя для второго цикла нагружения по сравнению с этапом №1 на 2,7% с последующим практически линейным снижением для циклов №№ 3-6. В целом, снижение модуля упругости полимера в процессе циклического нагружения не превышает 1,2% по сравнению с аналогичным показателем, определенным для этапа №1.

На основе анализа экспериментальных данных, а именно петель циклического гистерезиса (циклической диаграммы), вычислены потери на гистерезис для каждого цикла деформирования (см. таблицу 1). Изменение потерь энергии на гистерезис с ростом числа циклов представлено на рисунке 3. При первом цикле растяжения потери на гистерезис

максимальны, из чего можно заключить, что уже при первом нагружении в образцах полимеров происходят существенные необратимые изменения. Далее потери на гистерезис уменьшаются, а затем постепенно нарастают до цикла разрушения. Можно полагать, что на начальном этапе деформирования эпоксидных полимеров происходит массовое разрушение «слабых» структур, после чего нагрузка перераспределяется на элементы, находящиеся в «работоспособном» состоянии. Дальнейшее воздействие циклических растягивающих нагрузок приводит к формированию в структуре полимерного композита микроповреждений, развитию процесса разуплотнения структуры, зарождению очагов локального разрушения, приводящих впоследствии к его разрушению.

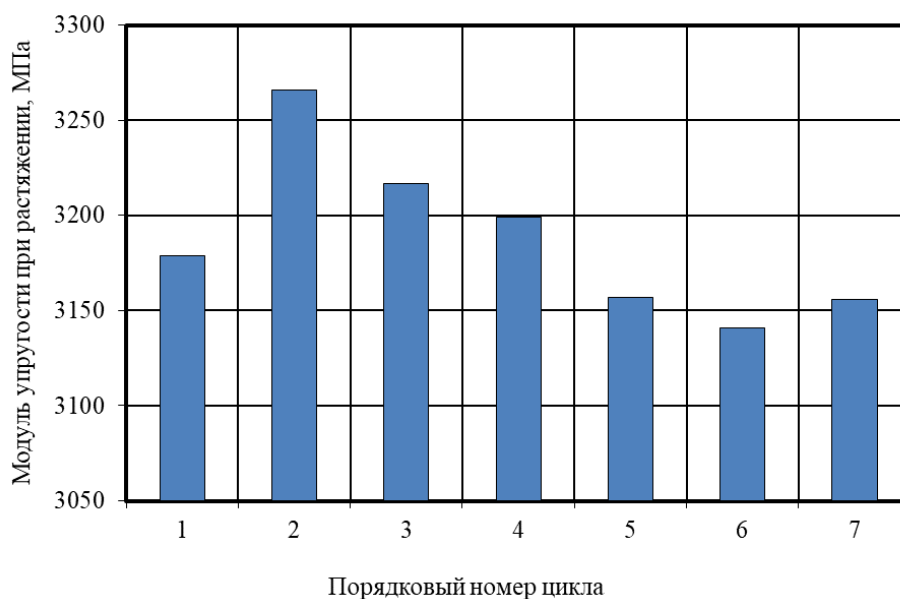


Рис. 2. Изменение модуля упругости при растяжении эпоксидного полимера состава Этал-247/Этал-1472 в зависимости от порядкового номера циклического воздействия (80% от разрушающей нагрузки).

Таблица 1

Изменение энергии при циклическом растяжении с ростом числа циклов

Номер цикла	Относительное удлинение при максимальной нагрузке цикла*, %	Необратимая деформация цикла, %	Энергия нагружения, Дж	Энергия разгрузки, Дж	Гистерезис, Дж
1	2,95	0,40	4,40	3,02	1,38
2	3,17	0,14	3,97	3,09	0,88
3	3,36	0,13	4,02	3,14	0,88
4	3,55	0,13	4,12	3,18	0,95
5	3,76	0,15	4,25	3,21	1,04
6	4,02	0,18	4,47	3,26	1,21
7	4,37	-	4,80	-	-

* 80% от разрушающей нагрузки при растяжении (51,8 МПа).

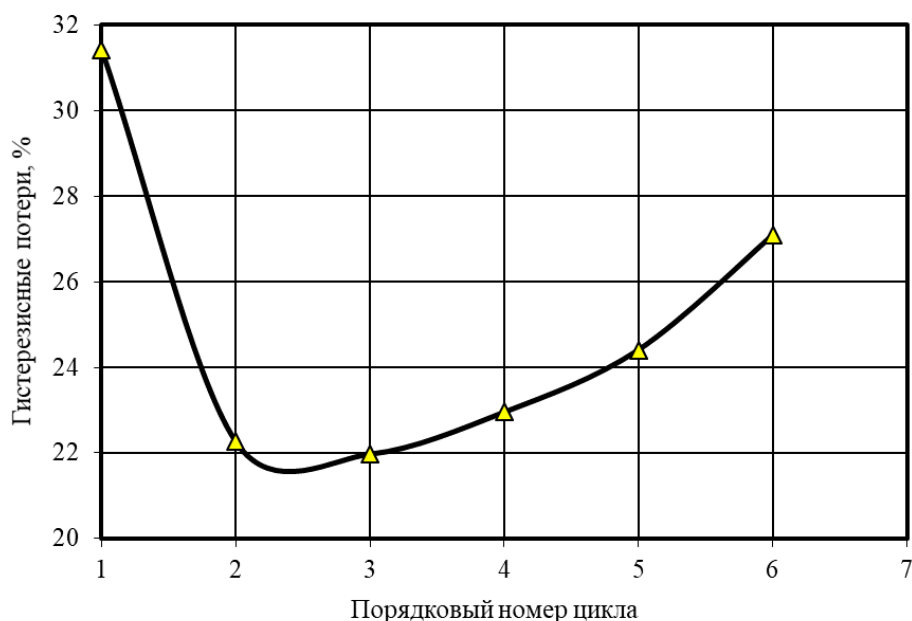


Рис. 3. Изменение величины гистерезисных потерь эпоксидного полимера состава Этал-247/Этал-1472 в зависимости от порядкового номера циклического воздействия (80% от разрушающей нагрузки).

В результате проведенных циклических испытаний эпоксидного полимера установлено, что на этапах нагружения пластическая составляющая деформации возрастает, а процесс разгрузки представляет собой упругую релаксацию напряжений. При анализе петель гистерезиса выявлено, что на начальном этапе деформирования после существенных внутренних повреждений происходит перераспределение нагрузки. Последующее деформирование приводит к формированию в структуре полимерного композита необратимых изменений, которые со временем прогрессивно возрастают и приводят к разрушению материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарев Б. А., Борков П. В., Комаров П. В., Бондарев А. Б. Экспериментальные исследования циклической долговечности полимерных композиционных материалов // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 6. – С. 136-143.
2. Pruitt L. A. Fatigue of Polymers // *Comprehensive Structural Integrity*. – 2003. – Vol. 4. – P. 89-103.
3. Гоц А. Н., Глинкин С. А. Обзор моделей усталостного разрушения при циклическом нагружении // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 9 (часть 3). – С. 478-482.
4. Borkov P. V., Komarov P. V., Bondarev A. B., Bondarev B. A. Accelerated method of predicting cyclic durability of polymer composite materials // *Scientific Herald of the*

Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. – 2014. – №2(22). – С. 27-33.

5. Startsev O. V., Blaznov A. N., Petrov M. G., Atyasova E. V. A study of the durability of polymer composites under static loads // Polymer Science Series D. – 2019. – Vol. 12. – P. 440-448.

6. Jain V. K. Fatigue Effects in the Wear of Polymers: PhD Thesis. – USA: Iowa State University, 1980. – 190 p.

7. Ярцев В. П. Старение и разрушение стабилизированных термопластов в напряженном состоянии // Вестник ТГТУ. – 2005. – Т. 11. – №2. – С. 470–474.

8. ГОСТ Р 57143-2016. Композиты полимерные. Метод испытания на усталость при циклическом растяжении. – М.: Стандартинформ, 2016.

9. Данилин А.Н., Кузнецова Е.Л., Рабинский Л.Н. Модель гистерезиса энергорассеяния при колебаниях механических систем // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2014. – №4. – С. 45-67.