

УДК 691.175+691-416

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-89-98

*С.Н. ОВСЯННИКОВ, В.Н. ОКОЛИЧНЫЙ,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПЛЕНКИ ИЗ ЭТИЛЕН-ТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА*

Аннотация. Проведены силовые испытания образцов пленки из этилен-тетрафторэтилена на разрывной машине INSTRON.

Установлен средний модуль упругости пленки в упругой стадии, который составил 35,8 МПа, при последующем нагружении происходит переход к упругопластичной и пластичной стадиям работы с понижением модуля упругости сначала до 1,78–2,71 МПа и затем до 0,06–0,086 МПа.

Силовые испытания мембраны из пленки из этилен-тетрафторэтилена толщиной 250 мкм на силовой треугольной раме при равномерно распределенной нагрузке 8,577 кПа не привели к разрыву мембраны ни при положительных (+15...+18 °С), ни при отрицательных температурах (–23...–29 °С). Многократное механическое повреждение мембраны под нагрузкой 8,50 кПа при температуре –26 °С не привело к ее разрыву. Прогобы мембраны при положительных температурах достигали 84 мм, при отрицательных температурах – 58,2 мм.

Испытания пленки показали ее сверхвысокие прочностные характеристики и на перспективность широкого использования пленки из этилен-тетрафторэтилена для создания комфортной среды в сооружениях, возводимых в Арктике и на других территориях России.

Ключевые слова: силовые испытания, пленка ЭТФЭ, мембрана, механическое повреждение

Для цитирования: Овсянников С.Н., Околичный В.Н. Результаты механических испытаний пленки из этилен-тетрафторэтилена // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 89–98.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-89-98

*S.N. OVSYANNIKOV, V.N. OKOLICHNYI,**Tomsk State University of Architecture and Building*

MECHANICAL STRENGTH TESTING OF ETHYLENE-TETRAFLUOROETHYLENE FILM

Abstract. Mechanical strength testing of ethylene-tetrafluoroethylene (ETFE) film is performed on the test machine INSTRON. The average elastic modulus of the film is 35.8 MPa. Under subsequent loading, the elastic-to-plastic stage transition occurs with decreasing elastic modulus to 1.78–2.71 MPa and then to 0.06–0.086 MPa.

* Исследование выполнено по заказу ФГУП «ГНПП «КРОНА» по теме «Поиск, исследование и анализ решений несущих, ограждающих конструкций и оснований для создания большепролетных климатических искусственных укрытий для условий районов Крайнего Севера и вечной мерзлоты» и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту FEMN-2020-0003.

Strength testing of the ETFE film 250 μm thick at 8.577 kPa uniformly distributed load does not lead to the film rupture either at positive (15–18 °C) or negative temperatures (–23–29 °C). A multiple damage of the film under an 8.50 kPa load at –26 °C does not lead to its disruption. The film bending at positive and negative temperatures reaches 84 and 58.2 mm, respectively.

Strength testing of the ETFE film demonstrates its ultra-high strength properties, and thus predicts its wide use in the formation of comfortable conditions in buildings created in Arctic and other territories of Russia.

Keywords: mechanical strength testing, polytetrafluorethylene, ethylene-tetrafluoroethylene film, membrane, elastic modulus

For citation: Ovsyannikov S.N., Okolichnyi V.N. Rezul'taty mekhanicheskikh ispytaniy plenki iz etilen-tetrafluoretilena [Mechanical strength testing of ethylene-tetrafluoroethylene film]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 89–98.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-89-98

Активное освоение Арктической зоны России требует создания сверхлегких светопрозрачных конструкций большепролетных сооружений укрытий, обеспечивающих комфортную среду жизнедеятельности в условиях крайне сурового климата. Эти конструкции позволят размещать вахтовые поселки, жилые, производственные и сельскохозяйственных зоны северных гражданских и военных поселений, укрытые от низких температур, ураганных ветров и осадков. Подобные конструкции представляют интерес и для территорий Севера России, Сибири и Дальнего Востока.

В современном строительстве большепролетных сооружений со светопрозрачными покрытиями с успехом применяются пневматические подушки из пленки этилен-тетрафторэтилена (ЭТФЭ) в один или несколько слоев. Применение пленок ЭТФЭ позволяет реализовать практически любые идеи и замыслы архитекторов, что обусловлено не только архитектурной выразительностью таких сооружений, но и возможностью противостоять мощным ветрам, выдерживать низкие температуры и интенсивное воздействие ультрафиолетового излучения (рис. 1).



Рис. 1. Верхняя станция канатной дороги на лыжной горе Гайслахkogль, Австрия

Пленка ЭТФЭ обладает уникальными прочностными и физико-техническими свойствами, имеет малый объемный вес, высокие характеристики светопропускания, устойчива к солнечной радиации, безопасна при пожаре, а срок эксплуатации таких покрытий – до 50 лет. Исследованиям свойств пленки ЭТФЭ и ее применению посвящен целый ряд отечественных и зарубежных работ [1–18]. Практика строительства показала, что пленка ЭТФЭ использовалась в основном для пневматических ограждающих конструкций с умеренными условиями эксплуатации. Для суровых условий арктического побережья, с низкими температурами и значительной ветровой нагрузкой, необходимы дополнительные исследования.

В Томском государственном архитектурно-строительном университете (ТГАСУ) проведены лабораторные силовые испытания образцов пленки ЭТФЭ и ячейки с пленкой ЭТФЭ в климатических камерах. Программа силовых испытаний включала в себя испытания на растяжение образцов пленки ЭТФЭ 250 мкм на разрывной машине INSTRON и испытания ячейки с пленкой в силовой треугольной раме со стороной 1260 мм при равномерном нагружении (имитация снеговых и ветровых нагрузок) при положительных и отрицательных температурах.

Силовые испытания пленки ЭТФЭ на разрыв

Силовые испытания пленки ЭТФЭ на разрыв выполнены на разрывной машине INSTRON для трех образцов пленки шириной 27,3, 27,0, 26,9 мм и длиной 207, 137, 92 мм (рис. 2).



Рис. 2. Силовые испытания пленки ЭТФЭ

Разрывная машина INSTRON создает пошаговое напряжение и на каждом шаге измеряет нагрузку, Н, напряжение, МПа, и относительное удлинение, мм/мм. Результаты эксперимента выдаются в виде таблиц Excel и графиков «напряжение–деформация». Так, например, для первого образца в таб-

личном виде представлены нагрузки от 5,858 Н на 1-м шаге и 164,841 Н на последнем 10068-м шаге нагружения. Удлинения составили на первом шаге 0,130 мм, на последнем шаге 419,364 мм. Здесь же определены напряжения на 1-м шаге 0,856 МПа, на последнем шаге 24,126 МПа. Общее время нагружения образца составляло 1006,176 с. График «напряжение–деформация» для первого образца показан на рис. 3.

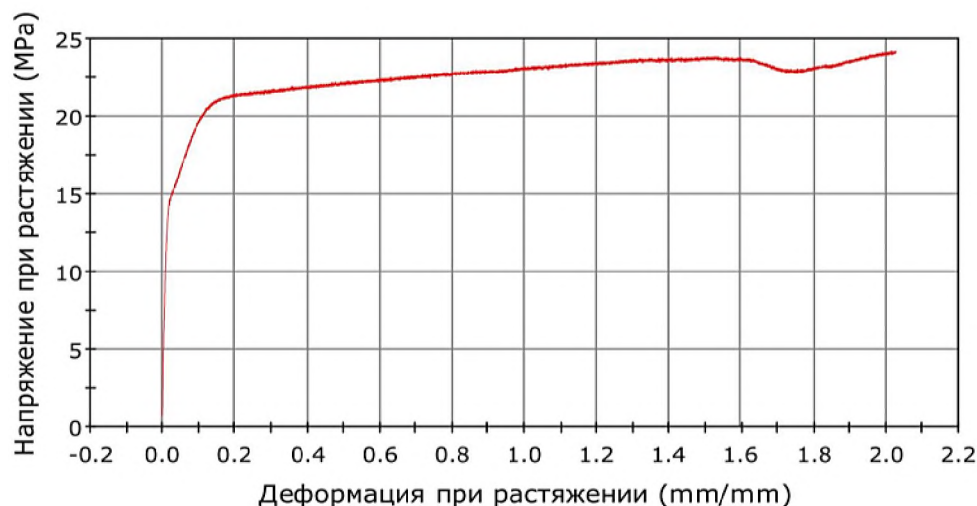


Рис. 3. График «напряжение–деформация» испытания пленки ЭТФЭ

Из рис. 3 видно, что зависимость «напряжение – деформации» имеет 3 характерных участка: начальный – «упругий» с высоким модулем упругости для всех образцов 35,8 МПа, второй – «упругопластичный» с модулем упругости 1,78–2,71 МПа и последний – «пластичный» с модулем упругости 0,06–0,086 МПа. Эта зависимость повторялась для всех исследованных образцов. Ни один из них не удалось разорвать в связи с ограниченностью хода разрывной машины. Начальный модуль упругости был определен по ГОСТ 34370–2017¹ в диапазоне нагрузок, соответствующих относительному удлинению от 0,1 до 0,3 %. Среднее значение начального модуля упругости для образцов пленки ЭТФЭ 250 мкм составило 1090 МПа, что несколько ниже, чем по результатам зарубежных исследователей [17–20].

Испытания на разрывной машине показали, что для проектирования пленочных конструкций следует произвести более обширные исследования пленочных материалов ЭТФЭ с целью определения расчетных модулей упругости в разных режимах нагружения. Особый интерес представляют измерения при отрицательных температурах, близких к расчетным (–55 °С) и абсолютно минимальным температурам (–63 °С) в Арктике.

¹ ГОСТ 34370–2017. Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Москва: Стандартинформ. 2018. 21 с.

Силовые испытания треугольной ячейки с пленкой ЭТФЭ

Силовые испытания мембраны из пленки ЭТФЭ толщиной 250 мкм производились равномерно распределенными нагрузками, моделирующими снеговые и ветровые нагрузки. В соответствии с СП 20.13330.2016² арктические территории России по весу снегового покрова находятся в III и IV снеговых районах, а по давлению ветра – в III–VII ветровых районах со снеговой нагрузкой до 2,0 кПа и нормативным ветровым давлением до 0,85 кПа.

С учетом различных возможных сочетаний нагрузок на мембрану ЭТФЭ наружного слоя оболочки и вероятности образования «снеговых мешков» принято решение выполнить нагружение мембраны толщиной 250 мкм до 8,5 кПа, т. е. с четырёхкратной перегрузкой, при положительных и отрицательных температурах. Для проведения эксперимента были изготовлены силовые рамы треугольной формы с размерами, соответствующими проектным размерам ячеек проектируемого укрытия со стороной 1260 мм. Пленки ЭТФЭ крепились на них с использованием прижимных планок (рис. 4). Всего изготовлено и испытано шесть образцов пленки: три при положительных температурах 15–18 °С и три при отрицательных температурах –23...–29 °С.



Рис. 4. Силовая рама с мембраной из пленки ЭТФЭ

² СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. Москва.: Стандартинформ. 2018. 95 с.

Нагружение производилось плавно в 16 этапов (в среднем 15 мин на 1 этап) путем размещения на мембране мешочков с песком, предварительно навешанных по 1,0 кг. Нагрузка на этапе составляла около 28 кг. В свету силовой рамы площадь нагружаемой пленки составляла 0,528 м². На 16-м этапе мембрана нагружалась равномерной нагрузкой до 452,9 кгс, что соответствовало распределенной нагрузке 857,7 кгс/м², или 8,577 кПа (рис. 5). В процессе испытаний производилось выдерживание мембраны под нагрузкой с целью определения дополнительных прогибов во времени. На каждом этапе осуществлялось определение прогибов по центру мембраны с использованием лазерного дальномера с точностью измерения 1 мм.



Рис. 5. Силовые испытания пленки ЭТФЭ на 16-м этапе загрузки при положительной температуре

После разгрузки мембраны и ее снятия с рамки производилось измерение толщины мембраны после растяжения с применением микрометра МКЦ-25. Было выявлено, что толщина пленки ЭТФЭ до эксперимента составляла 250 мкм, после нагружения – 245 мкм, т. е. толщина пленки по центру исследуемой мембраны уменьшилась на 5 мкм.

По итогам силовых испытаний пленки ЭТФЭ толщиной 250 мкм выявлено, что прогибы пленки при нагрузках до 8,5 кПа не превышали 84 мм при положительных температурах и 58,2 мм при отрицательных температурах, а сама пленка не подавала признаков разрушения (рис. 6). После разгрузки с течением времени пленка практически восстанавливает первоначальную форму.

На последнем образце, нагруженном равномерно распределенной нагрузкой 8,581 кПа, были выполнены порезы мембраны ножом (13 раз) при температуре в камере –26 °С, однако это не привело к разрушению мембраны (рис. 7).



Рис. 6. Силовые испытания пленки ЭТФЭ на 16-м этапе загрузки при отрицательной температуре в климатической камере ТТАСУ

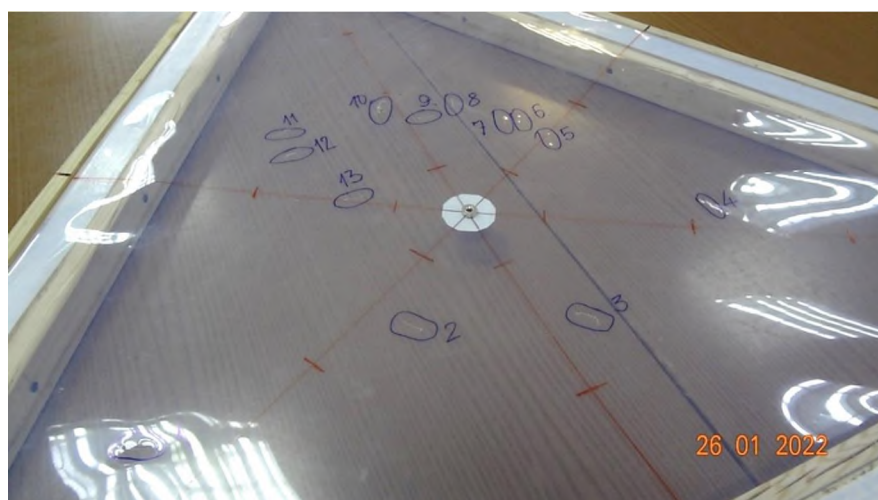


Рис. 7. Мембрана из пленки ЭТФЭ с порезами после снятия нагрузки

Выводы

Силовые испытания пленки ЭТФЭ показали ее сверхвысокие прочностные характеристики при положительных и отрицательных температурах, устойчивость к повреждениям целостности мембраны. Материал очень перспективен для создания сооружений укрытий с комфортной средой обитания для Арктической зоны и других территорий России.

Результаты испытания на разрывной машине показали, что для проектирования пленочных конструкций следует произвести более обширные исследования пленочных материалов ЭТФЭ с целью уточнения расчетных модулей упругости в разных режимах нагружения и при более низких температурах до -70°C .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Новое в технологии соединений фтора* : пер. с японск. / под ред. Н. Исикавы. Москва : Мир, 1984. 592 с.
2. Houtman R., Llorens J.I. Materials used for architectural fabric structures // *Fabric Structures in Architecture*. Woodhead Publishing, Boston, MA, 2015. P.101–120.
3. Robinson-Gayle S., Kolokotroni M., Cripps A., Tanno S. ETFE foil cushions in roofs and atria // *Constr. Build. Mater.* 2001. 15 (7). P. 323–327.
4. Chilton J. Lightweight envelopes: ethylene tetra-fluoro-ethylene foil in architecture // *Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater.* 2013. 166 (6). P. 343–357.
5. Chilton J., Lau B. Lighting and the visual environment in architectural fabric structures // *Fabric Structures in Architecture*. 2015. P. 203–219.
6. Robinson L.A. Structural Opportunities of ETFE (Ethylene Tetra Fluoro Ethylene). Massachusetts Institute of Technology, 2005. P. 66.
7. Hu J., et al. Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior // *Construction and Building Materials*. 2017. 131. P. 411–422.
8. Chen W. Design of Membrane Structure Engineering // China Building Industry Press. 2010.
9. Charbonneau L., Polak M.A., Penlidis A. Mechanical properties of ETFE foils: testing and modelling // *Constr. Build. Mater.* 2014. 60. P. 63–72.
10. Li Y., Wu M. Uniaxial creep property and viscoelastic-plastic modelling of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foil // *Mech. Time-Depend. Mater.* 2015. 19 (1). P. 21–34.
11. Chen W., Tang Y., Ren X., Dong S. Analysis methods of structural design and characteristics of numerical algorithm for ETFE air inflated film structures // *Spat. Struct.* 2010. 16 (4). P. 38–43.
12. Hu J., Chen W., Sun R., Zhao B., Luo R. Mechanical properties of ETFE foils under uniaxial cyclic tensile loading // *J. Build. Mater.* 2015. 18 (1). P. 69–75.
13. Hu J., Chen W., Luo R., Zhao B., Sun R. Uniaxial cyclic tensile mechanical properties of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foils // *Constr. Build. Mater.* 2014. 63 (1). P. 311–319.
14. Schmid G. ETFE cushions and their thermal and climatic behavior // *Tensinet Symposium*. Milan, Italy, 2007. P. 115–125.
15. Hu J., Chen W., Zhao B., Song H. Experimental studies on summer performance and feasibility of a BIPV/T ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) cushion structure system // *Energy Build.* 2014. 69 (1). P. 394–406.
16. Hu J., Chen W., Zhao B., Song H. Experimental studies on system performance of PV-ETFE cushion system in winter // *J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)*. 2014. 48 (10). P. 1816–1821.
17. Zehentmaier S. Fluoropolymers in Film Applications // 27th Annual World Symposium on Performance Films. Duesseldorf. April. 2012.
18. Цеентмайер С. Пленочные фторполимеры / пер. А.П. Сергеевкова // *Полимерные материалы*. 2018. № 8. С. 30–38.

19. Tanigami T., Yamaura K., Matsuzawa S., Ishikawa M., Mizoguchi K., Miyasaka K. Structural studies on ethylene-tetrafluoroethylene copolymer 1. Crystal structure // *Polymer*. 1986. 27 (7). P. 999–1006.
20. Kawabata M. Viscoplastic Properties of ETFE Film and Structural Behavior of Film Cushion // International Association for Shell and Spatial Structures Symposium. Venice, Italy, 2007.

REFERENCES

1. Isikava N., (Ed.) *Novoe v tekhnologii soedinenii flora* [New in fluorine compound technology]. Moscow: Mir, 1984. 592 p. (rus)
2. Houtman R., Llorens J.I. Materials used for architectural fabric structures. In: *Fabric Structures in Architecture*. Woodhead Publishing, Boston, MA, 2015. Pp. 101–120.
3. Robinson-Gayle S., Kolokotroni M., Cripps A., Tanno S. ETFE foil cushions in roofs and atria. *Construction and Building Materials*. 2001. V. 15. No. 7. Pp. 323–327.
4. Chilton J. Lightweight envelopes: ethylene tetra-fluoro-ethylene foil in architecture. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Urban Design and Planning*. 2013. V. 166. No. 6. Pp. 343–357.
5. Chilton J., Lau B. Lighting and the visual environment in architectural fabric structures. In: *Fabric Structures in Architecture*. 2015. Pp. 203–219.
6. Robinson L.A. Structural opportunities of ETFE (ethylene tetra fluoroethylene). Massachusetts Institute of Technology, 2005. P. 66.
7. Hu J., et al. Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior. *Construction and Building Materials*. 2017. V. 131. Pp. 411–422.
8. Chen W. Design of membrane structure engineering. China Building Industry Press, 2010.
9. Charbonneau L., Polak M.A., Penlidis A. Mechanical properties of ETFE foils: Testing and modelling. *Construction and Building Materials*. 2014. 60. P. 63–72.
10. Li Y., Wu M. Uniaxial creep property and viscoelastic-plastic modelling of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foil. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2015. V. 19. No. 1. Pp. 21–34.
11. Chen W., Tang Y., Ren X., Dong S. Analysis methods of structural design and characteristics of numerical algorithm for ETFE air inflated film structures. *Spatial Structure*. 2010. V. 16. No. 4. Pp. 38–43.
12. Hu J., Chen W., Sun R., Zhao B., Luo R. Mechanical properties of ETFE foils under uniaxial cyclic tensile loading. *Building Materials*. 2015. V. 18. No. 1. Pp. 69–75.
13. Hu J., Chen W., Luo R., Zhao B., Sun R. Uniaxial cyclic tensile mechanical properties of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foils. *Construction and Building Materials*. 2014. V. 63. No. 1. Pp. 311–319.
14. Schmid G. ETFE cushions and their thermal and climatic behavior. Tensinet Symposium, Milan, Italy, 2007. Pp. 115–125.
15. Hu J., Chen W., Zhao B., Song H. Experimental studies on summer performance and feasibility of a BIPV/T ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) cushion structure system. *Energy and Buildings*. 2014. V. 69. No. 1. Pp. 394–406.
16. Hu J., Chen W., Zhao B., Song H. Experimental studies on system performance of PV-ETFE cushion system in winter. *The Journal of Zhejiang University*. 2014. V. 48. No. 10. Pp. 1816–1821.
17. Zehentmaier S. Fluoropolymers in Film Applications. In: *Proc. 27th Annual World Symposium on Performance Films*. Duesseldorf. April. 2012.
18. Zehentmaier S. Plenochnye ftoropolimery [Film fluoropolymers]. *Polimernye materialy. Izdeliya, oborudovanie, tekhnologii*. 2018. No. 8. Pp. 30–38. (transl. from Germ.)
19. Tanigami T., Yamaura K., Matsuzawa S., Ishikawa M., Mizoguchi K., Miyasaka K. Structural studies on ethylene-tetrafluoroethylene copolymer: 1: Crystal structure. *Polymer*. 1986. V. 27. No. 7. Pp. 999–1006.
20. Kawabata M. Viscoplastic properties of ETFE film and structural behavior of film cushion. In: International Association for Shell and Spatial Structures Symposium. Venice, Italy, 2007.

Сведения об авторах

Овсянников Сергей Николаевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ovssn@tsuab.ru

Околичный Василий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, okolichnyi@mail.ru

Authors Details

Sergei N. Ovsyannikov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ovssn@tsuab.ru

Vasilii N. Okolichnyi, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, okolichnyi@mail.ru