

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ МИКРОТРЕЩИНЫ В ПОЛИМЕРНОМ СВЯЗУЮЩЕМ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР И ВЫСОКОЙ ВЛАЖНОСТИ

Р.Н. Голых¹, В.Н. Хмелёв¹, Г.В. Пышнограй², М.А. Ленский¹, А.В. Шалунов¹

¹ Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Бийск

² Алтайский государственный университет, г. Барнаул

Аннотация – Эксплуатация механизмов, стационарных конструкций в условиях экстремально низких температур связана с множеством проблем, основными из которых являются следующие: начальные напряжения в материалах из-за тепловых деформаций в результате перепада температур и изменения упругих свойств при низких температурах. Основным фактором, способствующим возникновению начальных напряжений в материалах, особенно в полимерных материалах, заключается в том, что из-за остаточной газации материала при отверждении в пузырьковых включениях накапливается влага. Затем при понижении температуры влага при превращении в лёд расширяется и происходит дальнейшее раскрытие пор и развитие трещин. Реализована численная модель развития микротрещины в полимерном связующем при расширении влаги за счёт фазового перехода из жидкости в лёд.

Ключевые слова: полимер, численная модель, трещина.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация механизмов, стационарных конструкций в условиях экстремально низких температур связана с множеством проблем, основными из которых являются следующие: начальные напряжения в материалах из-за тепловых деформаций в результате перепада температур и изменения упругих свойств при низких температурах. Основным фактором, способствующим возникновению начальных напряжений в материалах, особенно в полимерных материалах, заключается в том, что из-за остаточной газации материала при отверждении в пузырьковых включениях накапливается влага. Затем при понижении температуры влага при превращении в лёд расширяется и происходит дальнейшее раскрытие пор и развитие трещин.

Данный процесс, поскольку представляет собой нерешённую научную и инженерную проблему, широко исследуется на протяжении последних десятилетий.

В работах [1–10] проводились исследования влияния климатических условий (в основном, изучалось длительное климатическое воздействие в течение нескольких месяцев или лет) на свойства ПКМ. Чаще всего в отечественных и зарубежных исследованиях ставятся и решаются конкретные прикладные задачи обоснования возможности использования той или иной марки композита в конструкции на заданный срок эксплуатации [1–7].

В работах NASA [8–10], которые многие годы являлись эталоном обоснования срока службы материалов в различных климатических условиях, проанализированы результаты 10-летних испытаний 7 марок ПКМ авиационного назначения (углепластиков

T300/5209, T300/2544, AS/3501, T300/5208, T300/PIT00 и органопластиков Kevlar-49/F-155, Kevlar-49/F-161), экспонированных 1, 3, 5, 7, 10 лет в 7 местах земного шара: Hampton, Virginia; San Francisco, California; San Diego, California; Honolulu, Hawaii; Frankfurt, Germany; Wellington, New Zealand; Sao Paulo, Brazil).

По результатам этих работ сформировалось общее представление, что старение ПКМ в умеренном климате происходит медленнее, чем в тропическом, из чего следовало, что воздействие холодного климата менее опасно, чем теплового влажного и тропического (во влажном и тропическом климате выявлено падение прочности на 20–30 % после 10 лет экспонирования, в отдельных случаях до 40 %).

Однако в классическом отчёте NASA [10] приведены результаты исследований прочностных показателей 4 марок органопластиков и углепластиков, экспонированных до 10 лет в климате Аляски. Установлено, что прочностные показатели таких материалов в климате Аляски ухудшились в большей степени, чем после воздействия субтропического влажного климата.

При освоении Арктики усилился интерес к исследованиям старения ПКМ в экстремально холодном климате Якутска (в основном, исследования проводились в Северо-Восточном федеральном университете им. М.К. Аммосова и Институте физико-технических проблем Севера СО РАН) [10–18]. Проводились климатические испытания, как известных материалов, так и химически модифицированных материалов (например, материалов на цианэфирной основе, материалов с добавлением карбида кремния).

Показано, что в композитах развиваются внутренние напряжения, вызванные неодинаковым термическим расширением армирующих волокон и полимерных матриц [18]. Эти внутренние напряжения вызывают появление микротрещин, их слияние и формирование макроповреждений в объеме связующего или на границе с волокнами. Стеклопластики, углепластики и другие армированные материалы, экспонируемые в открытых климатических условиях, могут накапливать в порах и капиллярах воду, способную превращаться в твердую фазу при температурах ниже 0 градусов Цельсия и усиливать внутренние напряжения. Под воздействием УФ компоненты солнечной радиации даже в холодном климате поверхность материалов подвергается деструкции и микрорастрескиванию, увеличивая число источников внутренних напряжений.

Проведенный краткий обзор свидетельствует о том, что развитие трещин в полимерном материале при высокой влажности, в основном, исследовалось экспериментально.

Однако численные исследования развития трещин во влажном материале до сегодняшнего дня не проводились.

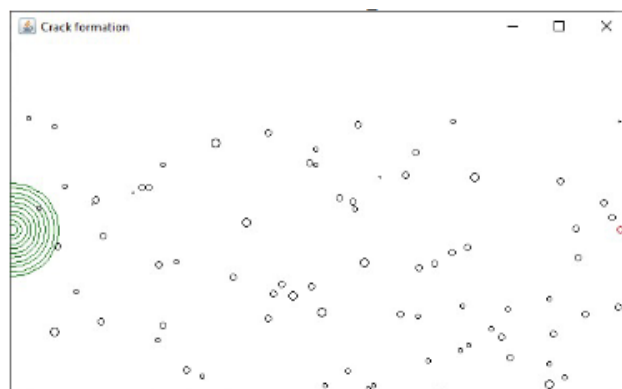
Результаты численных исследований, полученные авторами, представлены в основной части статьи.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

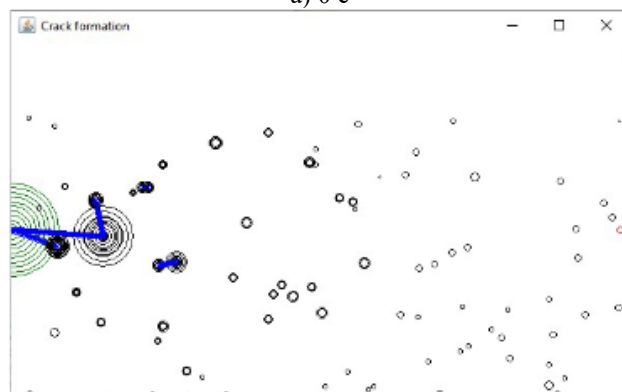
Численное исследование развития трещины в материале основывалось на модели К.Б. Броберга, описывающей развитие трещин [19]. Модель основана на том положении, что развитие трещины происходит при росте её зародышей и объединениях зародышей за счёт коалесценции. При этом линия трещины проходит вдоль линий центров зародышей, коалесцировавших между собой.

Коэффициент интенсивности напряжений вычислялся при заданной деформации в основании трещины на основании конечно-элементного расчёта.

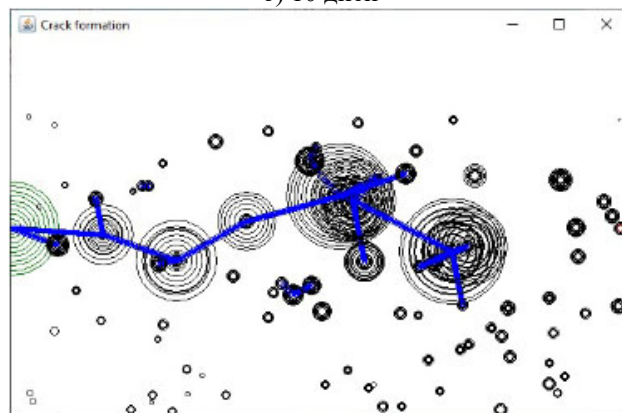
На рисунке 1 представлена визуализация развития трещины в отверждённом эпоксидном связующем при среднем диаметре зародышей (среднем поверхностном) 10 мкм, полном заполнении зародыша трещины вблизи поверхности отверждённого материала влагой. Развитие трещины визуализируется в результате фазового перехода воды в лёд вблизи температуры 0 градусов Цельсия.



а) 0 с



б) 10 дней



в) 90 дней

Рис. 1. Визуализация развития трещины с течением времени в результате фазового перехода воды в лёд

Установлено, что в течение 3-х месяцев трещина развивается до протяжённости, многократно превышающей размер зародыша.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализована численная модель, позволяющая исследовать развитие трещины в материале при расширении влаги.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента РФ № МК-5387.2021.1.1.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Long-term durability of polymeric matrix composites. Ed. by K.V. Pochiraju, G.P. Tandon, G.A. Schoeppner. 2012. Springer.
 2. Ageing of composites. Ed. by R. Martin. 2008. Woodhead Publishing Limited. Cambridge.
 3. Булманис В.Н., Старцев О.В. Прогнозирование изменения прочности полимерных волоконистых компози-тов в результате климатического воздействия // Якутский филиал СО АН СССР; Институт физико-технических проблем Севера. Якутск, 1988.
 4. Vapirov Y.M., Krivonos V.V., Startsev O.V. Interpretation of the anomalous change in the properties of carbon-fiber-reinforced plastic KMu-1u during aging in different climatic regions. // *Mechanics of Composite Materials*. 1994. Vol. 30. URL: <https://doi.org/10.1007/BF00635852>.
 5. Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Диагностика начальной стадии климатического старения ПКМ по изменению коэффициента диффузии влаги // Труды ВИАМ. 2014. No 7.
 6. Startseva L.T., Panin S.V., Startsev O.V., Krotov A.S. Moisture diffusion in glass-fiber-reinforced plastics after their climatic aging // *Doklady Physical Chemistry*. 2014. Vol. 456. URL: <https://doi.org/10.1134/S0012501614050054>.
 7. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов, по данным отечественных и зарубежных источников // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. No 2
 8. Dexter H.B. Long-term environmental effects and flight service evaluation of composite materials. // Report NASA. 1987. No. NASA TM-89067.
 9. Hoffman D.J. Bielawski W.J. Environmental exposure effects on composite materials for commercial aircraft // NASA. CR-187478. 1990.
 10. Baker D.J. Ten-Year Ground Exposure of Composite Materials Used on the Bell Model 206L Helicopter Flight Service Program // NASA Technical Paper 3468, ARL Technical Report 480. Hampton, Virginia. 1994.
 11. Bulmanis V.N., Gunyaev G.M., Krivonos V.V., Mashinskaya G.P., Merculova V.N., Milyutin G.I., Gerasimov A.A. Kuz'min S.A. Atmospheric durability of polymer-fiber composite in cold climate // *Mechanics of Composite materials*. 1991. Vol. 27. URL: <https://doi.org/10.1007/BF00808081>.
 12. Kychkin A.K., Lebedev M.P., Kychkin A.A., Matveeva O.I., Marachovskii P.S. Investigation of the co-efficient of linear temperature expansion of composite rods and heavy concrete // *Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology*. Vol. 1. International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" (ISEES 2019). 2019. URL: <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.87>.
 13. Бабенко Ф.И., Герасимов А.А., Родионов А.К., Сухов А.А., Федоров С.П., Федоров Ю.Ю. Оценка эксплуатационных характеристик полимерных материалов и изделий в условиях холодного климата // *Вестник ЯГУ*. 2006. Т. 3.
 14. Каблов Е.Н., Лебедев М.П., Старцев О.В., Голиков Н.И. Климатические испытания материалов, элементов конструкций, техники и оборудования в условиях экстремально низких температур // Труды VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Т. 1. Якутск, 24–29 июня 2013 г. Якутск, Ахсаан, 2013.
 15. Петрова А.П. Свойства клеев и материалов на их основе в условиях Арктики. Обзор // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2017. No 4.
 16. Startsev V.O., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Influence of moderately warm and extremely cold climate on properties of basalt plastic armature // *Heliyon*. 2018. Vol. 4. Article e01060. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e01060>.
 17. Андреева Н.П., Павлов М.Р. Николаев Е.В., Курносое А.О. Исследование влияния воздействия атмосферных факторов на свойства полимерного конструкционного стеклопластика на цианэфириной основе в естественных условиях холодного, умеренного и тропического климата // Труды ВИАМ. 2019. No 3
 18. Startsev, Oleg & Lebedev, Михаил & Kychkin, A.. (2020). Aging of Polymer Composites in Extremely Cold Climates. *Izvestiya of Altai State University*. 41-51. 10.14258/izvasu(2020)1-06.
 19. Broberg K.B. (1990) Computer demonstration of crack growth. In: Knauss W.G., Rosakis A.J. (eds) *Non-Linear Fracture*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2444-9_18
- Гольх Роман Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.*
- Хмельёв Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.*
- Пышнограй Григорий Владимирович – доктор физико-математических наук, АлтГТУ, тел. (3852)290865, e-mail: pyshnograi@mail.ru.*
- Ленский Максим Александрович – доктор химических наук, директор Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432581, e-mail: lenskiy@bti.secna.ru.*
- Шалунов Андрей Викторович – доктор технических наук, заведующий кафедрой МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.*

NUMERICAL MODEL OF MICROCRACK DEVELOPMENT IN A POLYMER BINDER UNDER LOW TEMPERATURES AND HIGH HUMIDITY

R.N. Golykh¹, V.N. Khmelev¹, G.V. Pyshnogra², M.A. Lenskiy¹, A.V. Shalunov¹

¹ Biysk Technological Institute (branch) of AltSTU, Biysk

² Altai State University, Barnaul

Abstract – The operation of mechanisms, stationary structures in conditions of extremely low temperatures is associated with many problems, the main of which are the following: initial stresses in materials due to thermal deformations as a result of temperature differences and changes in elastic properties at low temperatures. The main factor contributing to the occurrence of initial stresses in materials, especially in polymeric materials, is that due to the residual gassing of the material during curing, moisture accumulates in bubble inclusions. Then, when the temperature drops, the moisture expands when it turns into ice, and further opening of the pores and the development of cracks occur. A numerical model for the development of microcracks in a polymeric binder during expansion of moisture due to a phase transition from liquid to ice is implemented.

Index terms: polymer, numerical model, crack.

REFERENCES

1. Long-term durability of polymeric matrix composites. Ed. by K.V. Pochiraju, G.P. Tandon, G.A. Schoeppner. 2012. Springer.
2. Aging of composites. Ed. by R. Martin. 2008. Woodhead Publishing Limited. Cambridge.
3. Bulmanis V.N., Startsev O.V. Predicting the change in the strength of polymeric fibrous composites as a result of climatic influence // Yakut branch of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; Institute of Physical and Technical Problems of the North. Yakutsk, 1988.
4. Vapirov Y.M., Krivonos V.V., Startsev O.V. Interpretation of the anomalous change in the properties of carbon-fiber-reinforced plastic KМУ-1u during aging in different climatic regions. // Mechanics of Composite Materials. 1994 Vol. 30. URL: <https://doi.org/10.1007/BF00635852>.
5. Panin S.V., Startsev O.V., Krotov A.S. Diagnosis of the initial stage of climatic aging of PCM by changing the moisture diffusion coefficient // Proceedings of VIAM. 2014. No 7.
6. Startseva L.T., Panin S.V., Startsev O.V., Krotov A.S. Moisture diffusion in glass-fiber-reinforced plastics after their climatic aging // Doklady Physical Chemistry. 2014. Vol. 456. URL: <https://doi.org/10.1134/S0012501614050054>.
7. Kablov E.N., Startsev V.O. System analysis of the influence of climate on the mechanical properties of polymer composite materials, according to domestic and foreign sources // Aviation materials and technologies. 2018. No 2
8. Dexter H.B. Long-term environmental effects and flight service evaluation of composite materials. //Report NASA. 1987. no. NASA TM-89067.
9. Hoffman D.J. Bielawski W.J. Environmental exposure effects on composite materials for commercial aircraft // NASA. CR-187478. 1990.
10. Baker D.J. Ten-Year Ground Exposure of Composite Materials Used on the Bell Model 206L Helicopter Flight Service Program // NASA Technical Paper 3468, ARL Technical Report 480. Hampton. Virginia. 1994.
11. Bulmanis V.N., Gunyaev G.M., Krivonos V.V., Mashinskaya G.P., Merculova V.N., Milyutin G.I., Gerasimov A.A. Kuzmin S.A. Atmospheric durability of polymer-fiber composite in cold climate // Mechanics of Composite materials. 1991 Vol. 27. URL: <https://doi.org/10.1007/BF00808081>.
12. Kychkin A.K., Lebedev M.P., Kychkin A.A., Matveeva O.I., Marachovskii P.S. Investigation of the co-efficient of linear temperature expansion of composite rods and heavy concrete // Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology. Vol. 1. International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" (ISEES 2019). 2019. URL: <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.87>.
13. Babenko F.I., Gerasimov A.A., Rodionov A.K., Sukhov A.A., Fedorov S.P., Fedorov Yu.Yu. Evaluation of operational characteristics of polymeric materials and products in a cold climate // Bulletin of YaGU. 2006. Vol. 3.
14. Kablov E.N., Lebedev M.P., Startsev O.V., Golikov N.I. Climatic testing of materials, structural elements, machinery and equipment under extremely low temperatures // Proceedings of the VI Eurasian Symposium on the Strength of Materials and Machines for Cold Climate Regions. T. 1. Yakutsk, June 24–29, 2013 Yakutsk, Akhsaan, 2013.
15. Petrova A.P. Properties of adhesives and materials based on them in the Arctic. Overview // Adhesives. Sealants. Technology. 2017. No 4.
16. Startsev V.O., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Influence of moderately warm and extremely cold climate on properties of basalt plastic armature // Heliyon. 2018 Vol. 4. Article e01060. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e01060>.
17. Andreeva N.P., Pavlov M.R. Nikolaev E.V., Kurnosov A.O. Investigation of the impact of atmospheric factors on the properties of cyanoether-based polymer structural fiberglass in natural conditions of a cold, temperate and tropical climate // Proceedings of VIAM. 2019. No 3
18. Startsev, Oleg & Lebedev, Mikhail & Kychkin, A.. (2020). Aging of Polymer Composites in Extremely Cold Climates. Izvestiya of Altai State University. 41-51. 10.14258/izvasu(2020)1-06.
19. Broberg K.B. (1990) Computer demonstration of crack growth. In: Knauss W.G., Rosakis A.J. (eds) Non-Linear Fracture. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2444-9_18

Golykh Roman Nikolaevich - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of MSIA, Biysk Technological Institute (branch) FSBEI HE AltSTU, tel. (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.

Khmelev Vladimir Nikolaevich - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of MSIA, Biysk Technological Institute (branch) FSBEI HE AltSTU, tel. (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Pyshnogra Grigory Vladimirovich - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Altai State University, tel. (3852)290865, e-mail: pyshnogra@mail.ru.

Lenskiy Maxim Alexandrovich - Doctor of Chemical Sciences, Director of the Biysk Technological Institute (branch) FSBEI HE AltSTU, tel. (3854)432581, e-mail: lenskiy@bti.secna.ru.

Shalunov Andrey Viktorovich - Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of MSIA, Biysk Technological Institute (branch) FSBEI HE AltSTU, tel. (3854)432570, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.