

УДК 620.172.251.226

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АНІЗОТРОПНИХ В'ЯЗКОПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

Мартиненко В.Г.

Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут»,
м. Харків, Україна

Полімерні армовані композиційні матеріали (ПАКМ) використовуються в галузях автомобіле-, авіа- та космічного будівництва, у важкій промисловості та виробництві товарів загального споживання [1, 2].

Під час експлуатації композиційні елементи конструкцій та машин піддаються впливу підвищених температур та високих рівнів навантажень. Оскільки зазвичай вони є тонкостінними елементами, для підтримки їхньої працездатності важливо точно розрахувати їхню поведінку під впливом змінних температур та високих навантажень [3-5].

Таким чином, дослідження механічних властивостей композиційних матеріалів є актуальною на даний момент задачею, оскільки моделювання механічної поведінки та визначення міцності композиційних елементів машин є вкрай важливим при їхньому проектуванні.

Через наявність спрямованих армуючих волокон механічні властивості композиційних матеріалів є анізотропними. Окрім того, властивості полімерної матриці ПАКМ є дуже чутливими до зміни температур [6], особливо при переході через температуру склування – таке значення температури, при перевищенні якого полімер змінює свою мікроструктуру, а форма його молекул стає рухливою під впливом зовнішніх навантажень [7]. Це призводить до прояву разом із явищем пружності (тобто лінійної зміни деформацій тіла під впливом навантажень через зміну відстаней між молекулами) явища в'язкопружності – процесу росту деформацій у часі при постійних напруженнях та релаксації напружень у часі при постійних деформаціях [8]. Лінійна в'язкопружність характеризується інтегральною пропорційністю між деформаціями та напруженнями, а також є зворотнім процесом – при знятті навантажень в'язкопружні деформації з плином часу повертаються до початкового рівня [9].

На даний момент немає єдиної методики моделювання механіки твердих тіл, що деформуються, виконаних з анізотропних в'язкопружних матеріалів. Існують багато підходів, що засновані на аналітичних [10, 11], чисельно-аналітичних [12] або чисельних методах [13]. Зазвичай кількість необхідних параметрів в'язкопружності може бути обмежена не тільки можливістю їхнього експериментального визначення, а й спроможністю розрахункової моделі врахувати ці параметри [14]. Але достатня кількість робіт продемонструвала можливість та необхідність врахування ортотропної в'язкопружності в математичних моделях механічної поведінки твердих тіл, що деформуються, зокрема, полімерних армованих композиційних матеріалів [13, 15-18].

Дослідження анізотропних в'язкопружних властивостей ПАКМ є складною інженерною задачею. Її розв'язання потребує, по-перше, виконання експериментів на розтягування композиційних зразків, вирізаних у різних напрямках, кількість яких залежить від ступеня анізотропії механічних властивостей, по-друге, правильного закріплення зразків у експериментальній машині для уникнення небажаних деформацій в тримачах, по-третє, нагріву зразків однорідним та незмінним у часі температурним полем і, по-четверте, точного заміру деформацій в'язкопружності на протязі достатньо великого проміжку часу.

Композиційний матеріал, що розглядається, є поєднанням епоксидної смоли з довгими скляними спрямованими волокнами [19, 20]. Схема ортогонального плетіння матеріалу

забезпечує високі міцнісні властивості тонких оболонок, виготовлених з цього матеріалу, що піддаються силам розтягування або згину, зберігаючи його легку вагу (приблизно чверть порівняно із аналогічним значенням для сталі). У той же час цей композитний матеріал не настільки міцний, як вуглепластик, через слабші механічні властивості скловолокна, але значно дешевший завдяки низькій ціні їх виробництва у порівнянні з вуглецевими волокнами.

Геометрія зразків була розроблена відповідно до стандарту ASTM D638 [21]. На рисунку 1 зображено фотографію зразків товщиною 2 мм.

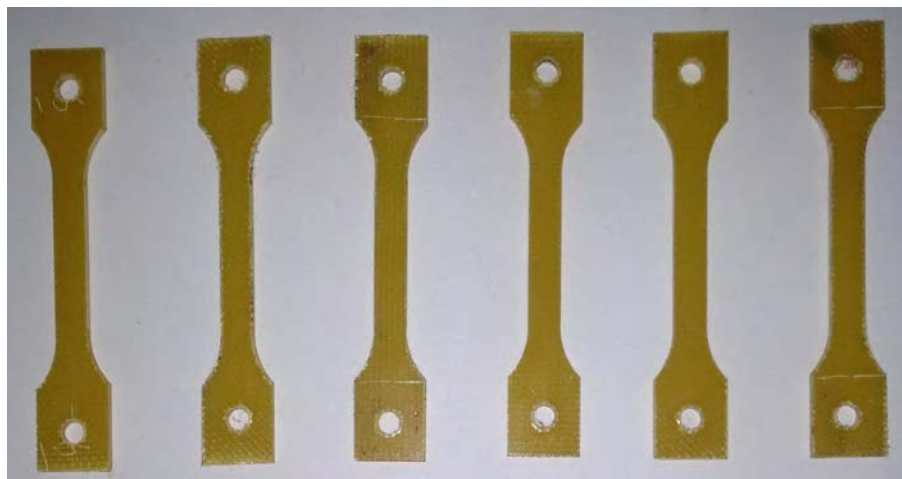


Рис. 1 – Зразки, вирізані з композиційного матеріалу під різними кутами до напрямку армування

У зразках містяться отвори діаметром 4 мм на кінцях, щоб забезпечити їх збірку в експериментальній машині. Після монтажу кінці зразків були затягнуті тримачами, щоб уникнути концентрації напружень навколо отворів і забезпечити повну фіксацію кінців зразка. Зразки вирізані з однієї композиційної пластини товщиною 2 мм під кутами 0° , 45° та 90° до першого напрямку армування. Зразки навантажуються у напрямку їх довшої сторони. Залежно від напрямку вирізання це призведе до одного з трьох станів навантаження армуючої сітки композиційних зразків.

Такі схеми навантаження дозволили отримувати плоскі механічні властивості композиційного матеріалу. Визначення механічних властивостей у третьому напрямку (перпендикулярно до площини пластини) вимагає випробувань на розтягування або стискання в цих напрямках, які важко реалізувати. Проте при моделюванні механічної поведінки тонких композиційних пластин та оболонок, що піддаються силам розтягування та згинання, існує потреба лише у плоских властивостях.

Під час проведення експериментів зразок фіксувався в тримачах, тоді як нагрівальний елемент розташовувався навколо нього. Відносне переміщення захватів вимірювалося двома індикаторами, а постійність температури контролювалася датчиком. Нагрівальний елемент забезпечує плавне підвищення температури до 100°C , підтримуючи її в межах не більше $\pm 2^\circ\text{C}$, як це вимагається у стандарті.

Для перевірки правильності закріплення зразків вони були навантажені до розриву, як це показано на рис. 2, *а* та 2, *б* для зразків, вирізаних під кутами 0° та 45° до першого напрямку армування відповідно. Як видно з рисунків, розрив відбувається в місці робочої частини зразків, що свідчить про ефективність розроблених захватів.

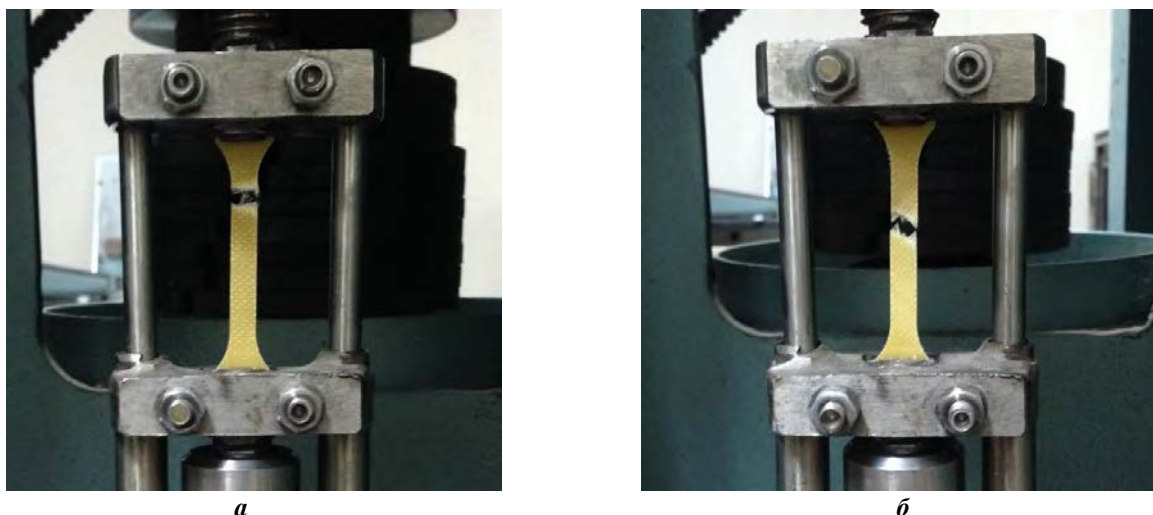


Рис. 2 – Розрив зразків, вирізаних під різними кутами до першого напрямку армування: *a* – під кутом 0° до першого напрямку армування; *b* – під кутом 45° до першого напрямку армування

В процесі дослідження миттєвих пружнопластичних властивостей композиційного матеріалу були побудовані його діаграми розтягування для різних напрямків навантаження при кімнатній та підвищених температурах. Це дозволило визначити миттєві технічні пружні постійні досліджуваного композиту, а також його границі текучості та тимчасового опору розриву. Характер отриманих діаграм свідчить про належність композиційного матеріалу, що розглядався, до класу пластичних матеріалів із виразною площадкою текучості.

Дослідження в'язкопружних властивостей зразків з ПАКМ проводилося при температурах вище за температуру склування та нижче за температуру зміни фазового стану полімеру – від 70°C до 130°C . В результаті цього час до встановлення постійних за часом деформацій варіювався від доби до півгодини в залежності від температури, що прикладалась до зразку.

Після заміру змінних за часом деформацій зразків були побудовані точкові графіки повзучості для різних напрямків вирізання та температур. Їхня обробка дозволила отримати точкові залежності від часу технічних параметрів в'язкопружності, таких як змінні за часом модулі Юнга, зсуву та коефіцієнти Пуассона, а апроксимація цих параметрів експоненціальними рядами Проні за допомогою методу найменших квадратів – їх аналітичні залежності від часу при збереженні мінімальної кількості членів рядів Проні.

Аналіз точкових залежностей технічних параметрів в'язкопружності від температури дозволив встановити термореологічну простоту композиційного матеріалу, що розглядався [22]. В результаті апроксимації цих залежностей із застосуванням різних зсувних функцій була визначена найбільш оптимальна з них – зсувна функція Вільямса-Ландела-Феррі [23] – та знайдені її параметри.

Все це дозволило отримати аналітичні залежності в'язкопружних технічних постійних композиційного матеріалу від часу та температури.

Характеристики анізотропії полімерного армованого композиційного матеріалу, що були визначені за допомогою проведеного експериментального дослідження, якісно співпадають із результатами, отриманими авторами за допомогою структурного методу дослідження, заснованого на моделюванні механіки представницького об'єму композиту [24, 25], що підтверджує коректність проведеної серії експериментів.

Таким чином, виконаний експеримент на високотемпературну анізотропну в'язкопружність полімерного армованого композиційного матеріалу дозволив встановити усі параметри, що необхідні для моделювання цього явища при розрахунках механіки твердого тіла, що деформується.

Список літератури:

1. *Справочник по композиционным материалам* / ред. Дж. Любин. – М.: Машиностроение, 1988. – Т. 1. – 448 с.
2. *Карпинос Д. М. Композиционные материалы. Справочник* / Д. М. Карпинос. – Киев: Наукова думка, 1985. – 588 с.
3. *Кравчук А. С. Механика полимерных и композиционных материалов* / А. С. Кравчук, В. П. Майборода, Ю. С. Уржумцев. – М.: Наука, 1985. – 304 с.
4. *Капитонов А. М. Физико-механические свойства композиционных материалов. Упругие свойства* / А. М. Капитонов, В. Е. Редькин. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 532 с.
5. *Побердья Б. Е. Механика композиционных материалов* / Б. Е. Побердья. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 336 с.
6. *Уорд М. Механические свойства твёрдых полимеров* / И. Уорд. – М.: Химия, 1975. – 357 с.
7. *Шен М. Вязкоупругая релаксация в полимерах* / М. Шен. – М.: Мир, 1974. – 270 с.
8. *Кристенсен Р. М. Введение в теорию вязкоупругости* / Р. М. Кристенсен. – М.: Мир, 1974. – 338 с.
9. *Адамов А. А. Методы прикладной вязкоупругости* / А. А. Адамов, В. П. Матвеевко, Н. А. Труфанов и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 411 с.
10. *Львов Г. І. Аналітичне дослідження контактної поведінки ділянки трубопроводу з в'язкопружною ремонтною накладкою* / Г. І. Львов, В. Г. Мартиненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Динаміка та міцність машин». – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 57. – С. 49-56.
11. *Львов Г. І. Аналіз напружено-деформованого стану трубопроводу з в'язкопружним ремонтним бандажем на різних робочих режимах* / Г. І. Львов, В. Г. Мартиненко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: «Машинобудування». – Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – № 73. – С. 22-28.
12. *Львов Г. І. Чисельно-аналітичне дослідження ортотропної в'язкопружності склопластику на прикладі ремонтної накладки магістрального трубопровода* / Г. І. Львов, В. Г. Мартиненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Динаміка та міцність машин». – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 58. – С. 68-77.
13. *Martynenko V. G. An Original Technique for Modeling of Anisotropic Viscoelasticity of Orthotropic Materials in Finite Element Codes Applied to the Mechanics of Plates and Shells* / V. G. Martynenko // *Mechanics and Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 21, № 2. – P. 389-413.
14. *Fabrizio M. Mathematical Problems in Linear Viscoelasticity* / M. Fabrizio, A. Morro // *Society for Industrial Mathematics*, 1992. – 203 p.
15. *Nedjar B. An anisotropic viscoelastic fibre-matrix model at finite strains: Continuum formulation and computational aspects* / B. Nedjar // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2007. – Vol. 196. – P. 1745-1756.
16. *Hwu C. Analysis of defects in viscoelastic solids by a transformed boundary element method* / C. Hwu, Y. C. Chen // *Procedia Engineering*. – 2011. – Vol. 10. – P. 3038-3043.
17. *Bai T. Time-domain finite-difference modeling for attenuative anisotropic media* / T. Bai, I. Tsvankin // *Geophysics*. – 2016. – Vol. 81. – P. 163-176.
18. *Liefeith D. An anisotropic material model for finite rubber viscoelasticity* / D. Liefeith, S. Kolling // *LS-DYNA Adwenderforum*. – Frankenthal, 2007. – P. 25-54.
19. *Sathishkumar T. Glass fiber-reinforced polymer composites - a review* / T. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, J. Naveen // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2014. – Vol. 33. – P. 1258-1275.
20. *Stickel J. M. Glass Fiber-Reinforced Composites: From Formulation to Application* / J. M. Stickel, M. Nagarajan // *International Journal of Applied Glass Science*. – 2012. – Vol. 3. – P. 122-136.
21. *ASTM D618-13. Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing* / American Society for Testing and Materials, 2013. – 08.01.
22. *Shinozuka M. Thermorheologically simple viscoelastic materials* / M. Shinozuka // *AIAA Journal*. – 1965. – Vol. 3. – P. 375-377.
23. *Williams M. L. The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids* / M. L. Williams, R. F. Landel, J. D. Ferry // *Journal of the American Chemical Society*. – 1955. – Vol. 77. – P. 3701-3706.
24. *Мартиненко В. Г. Чисельна методика визначення анізотропних в'язкопружних властивостей ортогонально армованого композиційного матеріалу* / В. Г. Мартиненко, Г. І. Львов // Вісник НТУ «ХПІ»: серія «Динаміка та міцність машин». – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 46. – С. 44-51.
25. *Martynenko V. G. Numerical prediction of temperature dependent anisotropic viscoelastic properties of fiber reinforced composite* / V. G. Martynenko, G. I. Lvov // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2017. – Vol. 36, № 24. – P. 1790-1801.