

УДК 539.37

Є.Л. ДАНИЛЬЧУК

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка Національної академії наук України
вул. Тимірязєвська, 2, Київ, 01014, Україна

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМУВАННЯ
ТА НЕСІВНОЇ ЗДАТНОСТІ ТКАНИХ МАТЕРІАЛІВ
ПРИ ОДНО- ТА ДВОВІСНОМУ НАВАНТАЖЕННЯХ**

Наукове повідомлення молодого вченого на засіданні Президії НАН України

11 липня 2012 року

Наведено результати досліджень волокнистих полімерних матеріалів і плетених тканин на їх основі. Проведено комплексні експериментальні випробування матеріалів цього класу, а також розроблено моделі прогнозування їх механічної поведінки при одно- та двовісному навантаженнях. Окреслено можливі сфери застосування цих моделей, зокрема під час проектування та розрахунків елементів деталей і конструкцій на основі текстильних структур.

Ключові слова: полімерні нитки, плетені тканини, деформування, несівна здатність, двовісний розтяг, чисельне моделювання.

В останні десятиліття спостерігається бурхлива активізація досліджень, спрямованих на зменшення матеріаломісткості конструкцій при одночасному поліпшенні їхніх функціональних характеристик, підвищенні міцності та надійності. Задоволення таких вимог досягається в основному завдяки використанню нових матеріалів з вищими фізико-механічними, технологічними та експлуатаційними параметрами. Тому волокнисті полімерні структури й каркаси, виготовлені за технологіями текстильної промисловості, все ширше застосовують у різних галузях народного господарства. Зроблені з них елементи деталей машин і механізмів знижують матеріало- й енергомісткість конструкцій, поліпшують їхні функціональні параметри, підвищують надійність і довговічність та сприяють здешевленню виробів.

До причин, що обмежують застосування в інженерній практиці волокнистих і тканих матеріалів, можна віднести недостатню інформацію про їхні механічні властивості за різних видів силового навантаження, складні нелінійні рівняння стану та труднощі математичного моделювання процесів деформування й оцінювання несівної здатності конструкцій.

Проблема побудови моделей деформування волокнистих полімерних матеріалів знайшла відображення в численних роботах. Розвиток досліджень властивостей тканих матеріалів пов'язаний з іменами F.T. Peirce, B. Olofsson, G.A.V. Leaf. Вагомий внесок у розроблення теорії двовісного розтягу тканих матеріалів зробили японські вчені S. Kawabata, M. Niwa та H. Kawai [1]. Однак зазначені моделі ґрунтувалися переважно на розрахунково-емпіричних методах з використанням недосконалих графічних методів визначення параметрів рівнянь.

Можна відзначити також і складніші сучасні кінцево-елементні моделі (J.W.S. Hearle [2], P. Boisse [3], M.J. King [4] та ін.), які використовують уточнене зображення геометрії структури і розподіл зусиль у точках контакту. Проте такі підходи дуже складні, потребують проведення низки базових випробувань для конкретизації рівнянь стану, і в їх визначальні співвідношення входить значна кількість параметрів.

Незважаючи на те, що проблемі побудови різноманітних моделей і відповідних рівнянь стану стосовно волокнистих полімерних матеріалів присвячено чимало робіт, деякі її принципові аспекти залишаються досі мало або зовсім не вивченими. Недостатнім також є рівень експериментального дослідження матеріалів цього класу.

Тому вивчення закономірностей деформування і несівної здатності плетених тканин та їхніх складових елементів — волокон і ниток, а також розроблення моделей прогнозування механічної поведінки таких матеріалів є досить актуальними.

За об'єкти дослідження однонапрямлених волокнистих матеріалів було обрано нитки загального й технічного призначень із найуживаніших полімерних матеріалів — поліпропілену та поліаміду.

Розрахунок процесів деформування двовимірних тканих структур проводили на основі експериментальних даних для тканин полотняного та саржевого переплетення.

Такий вибір об'єктів для дослідження пояснюється насамперед перспективністю їх застосування для виробництва товарів різноманітного технічного і транспортного призначення, починаючи від монтажних стропів, поширених нині банерних тканин, широко використовуваних у транспортній логістиці гнучких контейнерів Big Bag і закінчуючи геотекстилем.

Однак найперспективнішим є використання тканин як армувальних елементів композиційних матеріалів. Унікальне поєднання легкості, гнучкості та високої питомої міцності, характерне для текстиль-

них армувальних структур, зумовлює їх значне поширення і перспективність використання в автомобільній, аерокосмічній, індустріальній та інших галузях промисловості.

Використання тканих просторових структур замість нетканої однонапрявленої арматури дає змогу автоматизувати процеси кроєння та викладання і тим самим знизити трудомісткість виготовлення композиту. За допомогою тканин армувальні елементи краще й легше укладаються на криволінійних поверхнях і забезпечується висока взаємодія волокон між собою по всьому об'єму структури.

Для вирішення зазначених завдань на сучасному та модернізованому обладнанні Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України провадяться комплексні випробування волокнистих матеріалів і тканих виробів на їх основі. Зокрема, отримано нові дані про механічні характеристики, діаграми деформування та криві повзучості волокнистих матеріалів, визначено області нелінійності в'язкопружних властивостей, доведено виконання умови подібності ізохронних діаграм і на цій основі визначено криві миттєвого деформування [5–7]. Для широкого діапазону напружень побудовано діаграми тривалої міцності цих матеріалів.

Для прогнозування тривалого деформування волокнистих полімерних структур запропоновано варіант нелінійної теорії в'язкопружності з урахуванням скінченних деформацій. При конкретизації параметрів інтегро-диференціальних рівнянь цієї моделі запропоновано апроксимацію функції піддатливості за допомогою суми експонент із введенням у неї параметрів, що залежать від величини відносного зусилля [8]. Розроблена модель дає змогу досить ефективно описувати повзучість елементів конструкцій при деформаціях до 60%.

Дослідження процесів деформування двовимірних тканих структур характеризується значно більшою складністю порівняно з однонапрямленими волокнистими матері-

алами, оскільки крім особливостей деформування ниток, що утворюють тканину, потрібно враховувати й геометрію переплетень і сили, що виникають у точках контакту.

Двовимірний тканий матеріал утворюється переплетенням у певній послідовності ниток основи й утоку. При цьому основою називають напрямок по довжині тканини, а утоком — по ширині. Форма взаємного перекриття поздовжніх і поперечних ниток визначає тип тканної структури.

Методика експериментального дослідження тканих матеріалів зумовлена передусім особливостями їхньої геометричної будови. На відміну від волокон і ниток властивості тканин досліджують під час не лише одновісного, а й двовісного розтягу, а також під час зсуву.

При цьому на отримання якісних результатів випробувань значною мірою впливає оптимальне передавання зусиль від захватів випробувальної установки до зразків. Враховуючи це, під час статичних короткочасних випробувань тканих стрічок використовували спеціально розроблений роликовий захват, особливістю якого є фіксування стрічки за допомогою самозатягувальних клинів.

У процесі розрахунків за основну структуру тканого матеріалу прийнято полотняну тканину. Взагалі полотно є найпростішою плетеною структурою, в якій нитки основи й утоку перекриваються в регулярній послідовності (рис. 1).

Для прогнозування процесів деформування таких тканин використано теорію двовісного розтягу тканих матеріалів, у якій нитки вважають ідеально гнучкими та стискуваними елементами.

Насправді вплетена в тканину нитка має криволінійну форму. Однак для розрахунків використовують спрощену модель, у якій нитки основи й утоку вважають прямими лініями з перегином у точці контакту. При цьому довжина нитки в елементі спрощеної структури зберігається такою самою, як і в реальній тканині.

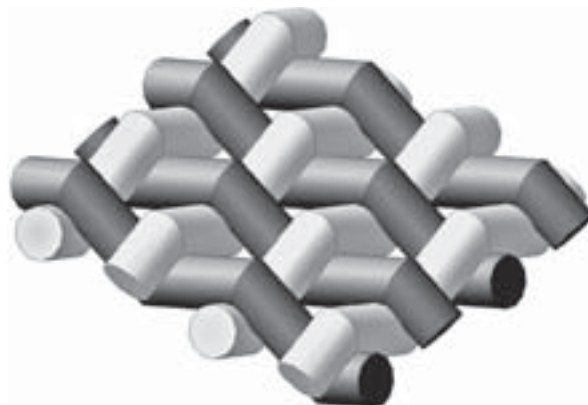


Рис. 1. Схематичне зображення полотняної тканини



Рис. 2. Схематичне зображення саржі 2/2

Складність цієї моделі полягає в постійній зміні геометричної структури тканого матеріалу в процесі навантаження. Унаслідок цього під час розрахунків необхідно постійно визначати поточні структурні параметри в процесі деформування тканини.

Тому для розв'язання відповідних систем рівнянь було розроблено чисельну процедуру і складено програми для розрахунків деформування полотняних матеріалів, що дають можливість обчислити реакцію тканин за різних фіксованих співвідношень деформацій в ортогональних напрямках [9].

Плетені тканини на зразок саржі є більш складними тканими матеріалами, в яких спостерігається несиметрична зміна напрямку ниток основи й утоку в зоні згину (рис. 2). Через цю асиметрію структури

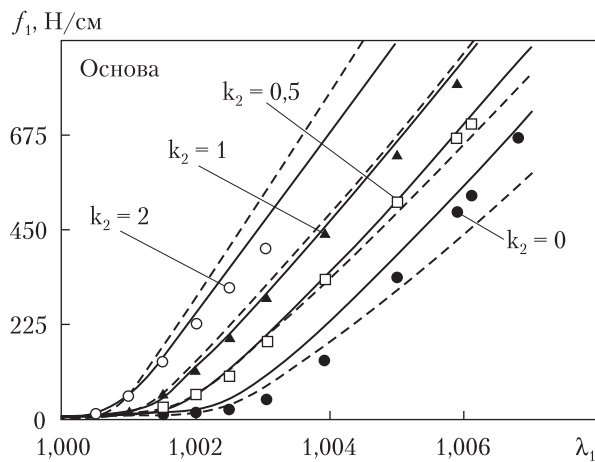


Рис. 3. Розрахунок деформування саржі 2/2 з вуглеволокна в напрямку основи. Точками позначено експериментальні дані іноземних авторів, суцільними лініями — результати чисельного розрахунку за допомогою теорії двовісного розтягу саржевих тканин, штриховими — результати чисельного розрахунку інженерної моделі

деформаційна поведінка саржевих тканин є значно складнішою, ніж полотняних матеріалів. Для прогнозування процесів деформування таких тканин використано теорію двовісного розтягу щодо саржевої структури [10].

Розроблено також варіант інженерної моделі деформування тканин саржевого переплетення, у якому в разі деформування враховано зсув поперечних ниток, зміщення осі нитки та її видовження [11].

Алгоритми розрахунку за цими моделями полягають у розв'язуванні систем рівнянь залежності величин переміщення точок контакту ниток у процесі деформування тканини та зсуву осі нитки відносно нейтральної лінії структури, а також ураховують зусилля, що виникають у точках зчеплення, та відповідні рівняння рівноваги між ними.

Розроблено чисельні процедури, що дають змогу розраховувати реакцію саржевих тканин у різних випадках двовісного деформування.

Як приклад на рис. 3 продемонстровано результати застосування обох структурних

моделей саржевих тканин за різних коефіцієнтів співвідношення деформацій k_2 .

Слід зазначити, що запропонована структурна модель і відповідні чисельні алгоритми для тканин на зразок саржі 2/2 можуть бути використані для прогнозування механічної поведінки тканих матеріалів із довільною формою переплетення за різних випадків двовісного деформування. Для цього потрібно лише внести певні зміни у структурні параметри залежно від обраної геометрії переплетення.

Використання описаних моделей дає можливість оптимізувати розрахунки елементів деталей та конструкцій ще на стадії проектування з метою досягнення потрібних механічних властивостей.

Результати проведених досліджень і створені моделі нині використовують фахівці декількох українських науково-виробничих підприємств у процесі проектування та виготовлення текстильних виробів технічного і рятувального призначень.

Однак слід зазначити, що наведені моделі деформування охоплюють лише певну область механічної поведінки матеріалів цього класу. Актуальними залишаються питання зсувового деформування та вивчення поведінки тканин під час згинів і дії статичного тривалого навантаження. Необхідне також удосконалення експериментальної бази й розширення кола досліджуваних матеріалів.

Незважаючи на широке різноманіття впроваджень тканих матеріалів, найперспективнішим є їх використання як армувальних елементів композитів. Тому важливим є також вивчення поведінки тканих армувальних структур композиційних матеріалів. Усе це відкриває нові перспективи для розвитку подальших досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kawabata S., Niwa M., Kawai H. The finite-deformation theory of plain-weave fabrics, part I: The biaxial-deformation theory // J. Textile Inst. — 1973. — V. 64, N 1. — P. 21–46.

2. *Hearle J.W.S., Potluri P., Thammandra V.S.* Modelling fabric mechanics // *J. Textile Inst.* — 2001. — V. 92, N 3. — P. 53–69.
3. *Boisse P., Zouari B., Gasser A.* A mesoscopic approach for the simulation of woven fibre composite forming // *Compos. Sci. Technol.* — 2005. — V. 65, N 3–4. — P. 429–436.
4. *King M.J., Jearanaisilawong P., Socrate S.* A continuum constitutive model for the mechanical behavior of woven fabrics // *Int. J. Solids Struct.* — 2005. — V. 42, N 13. — P. 3867–3896.
5. *Kucher N.K., Zemtsov M.P., Danil'chuk E.L.* Short-term creep and strength of fibrous polypropylene structures // *Strength Mater.* — 2007. — V. 39, N 6. — P. 620–629.
6. *Кучер Н.К., Скрипченко В.И., Данильчук Е.Л.* Закономерности деформирования полиамидных технических нитей на основе нейлона 6.6 // *Вестник НТУУ «КПИ».* Машиностроение. — 2008. — Т. 54. — С. 190–198.
7. *Кучер М.К., Земцов М.П., Данильчук Є.Л.* Дослідження процесів статичного короткочасного деформування мультифіламентних полімерних матеріалів // *Вісник НТУУ «КПИ».* Машинобудування. — 2010. — Т. 58. — С. 247–253.
8. *Kucher N.K., Danil'chuk E.L.* Nonlinear viscoelastic deformation of polypropylene threads under finite strains // *Strength Mater.* — 2009. — V. 41, N 2. — P. 223–233.
9. *Кучер М.К., Данильчук Є.Л.* Чисельні алгоритми розрахунків задач про двовісний розтяг тканин полотняного типу // *Надійність і довговічність машин і споруд.* — 2010. — Вип. 33. — С. 174–182.
10. *Kucher N.K., Danil'chuk E.L.* Deformation analysis of 2/2 twill weave fabrics // *Strength Mater.* — 2012. — V. 44, N 1. — P. 72–80.
11. *Данильчук Є.Л.* Структурна модель двовісного деформування саржевих тканин // *Вісник НТУУ «КПИ».* Машинобудування. — 2011. — Т. 63. — С. 10–15.

Е.Л. Данильчук

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко
Национальной академии наук Украины
ул. Тимирязевская, 2, Киев, 01014, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОДНО-
И ДВУХОСНОМ НАГРУЖЕНИИ

В сообщении приведены результаты исследований волокнистых полимерных материалов и плетеных тканей на их основе. Проведены комплексные экспериментальные испытания материалов данного класса, а также разработаны модели прогнозирования их механического поведения при одно- и двухосной нагрузке. Рассмотрены возможные сферы применения данных моделей, в частности при проектировании и расчетах элементов деталей и конструкций на основе текстильных структур.

Ключевые слова: полимерные нити, плетеные ткани, деформирование, несущая способность, двухосное растяжение, численное моделирование.

E.L. Danil'chuk

Pisarenko Institute for Problems of Strength
of the National Academy of Sciences of Ukraine
2 Timiryazevs'ka Str., Kyiv, 01014, Ukraine

STUDY OF DEFORMATION
AND LOAD-CARRYING CAPACITY
OF WOVEN MATERIALS UNDER UNIAXIAL
AND BIAxIAL LOADING

The report presents the results of investigations of polymeric fibrous materials and woven fabrics based on them. Comprehensive experimental tests have been conducted on the materials belonging to this class, and the models to predict their mechanical behavior under uniaxial and biaxial loading have been developed. Possible fields of application of these models, in particular in the design and calculation of the elements of details and constructions on the basis of textile structures, are considered.

Keywords: polymer threads, woven fabrics, deformation, load-carrying capacity, biaxial tension, numerical modeling.



Євген ДАНИЛЬЧУК

*Кандидат технічних наук,
науковий співробітник Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка
НАН України.*

У 2006 р. закінчив із відзнакою механіко-машинобудівний інститут Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» і вступив до аспірантури Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. 2011 року захистив кандидатську дисертацію на тему «Деформування та міцність мультифіламентних полімерних систем в умовах статичного короткочасного та тривалого навантажень» (науковий керівник — доктор технічних наук М.К. Кучер).

Є співавтором 20 наукових праць та 1 патенту України.

Лауреат Премії Верховної Ради України найталановитішим молодим ученим у галузі фундаментальних і прикладних досліджень та науково-технічних розробок за 2011 р. (разом з кандидатом технічних наук М.М. Заразовським).

Коло наукових інтересів — експериментальне та теоретичне дослідження механічних властивостей мультифіламентних полімерних систем, тканин, композиційних матеріалів та елементів конструкцій за різних видів простого і складного навантаження.
