

УДК 539.431+620.178.32

Ю. О. Похил, Л. Ф. Яковенко, Є. М. Алексенко, В. О. Лотоцька,
П. М. Желтов, М. А. Малий, А. Ф. Санін, А. М. Алієв ^{††}

СТАТИЧНА І ВТОМНА МІЦНІСТЬ ВУГЛЕЦЕВИХ ПЛАСТИКІВ З РІЗНИМИ МАТРИЧНИМИ КОМПОНЕНТАМИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 293 ТА 77 К

Приведены результаты исследований влияния матричного компонента и температуры деформирования (293, 77 К) на статические и динамические прочностные характеристики некоторых углепластиков, перспективных для использования в криогенно-вакуумной технике. Выявлены скачкообразные срывы напряжения на деформационных кривых углепластика с бакелитовой матрицей, связанные с разрушением композита по механизму межфазного расслоения и отделения матрицы от волокон.

Ключевые слова: многослойные углепластики, напряжение разрушения, усталостная прочность, матричный компонент, одноосное растяжение, характер разрушения.

Вступ

Сучасні композиційні матеріали з неметалевою матрицею, зокрема вуглецеві пластики, мають значні потенційні можливості використання в багатопрофільних конструкціях та приладах криогенно-вакуумної і аерокосмічної техніки завдяки високим питомим механічним характеристикам, таким як міцність і жорсткість, а також прийнятному рівню теплофізичних властивостей.

Комплекс фізико-механічних властивостей неметалевих композиційних матеріалів надзвичайно чутливий до складу і технології виготовлення. Ця обставина надає можливість шляхом варіювання цих параметрів створювати матеріали з заздалегідь заданими характеристиками.

Оптимізація композиційних матеріалів за складом, технологією виготовлення і комплексом фізико-механічних властивостей неможлива без наявності систематичних даних про взаємозв'язок наведених вище факторів. Ця проблема становить надзвичайно складну багатопараметричну задачу, але в ній можуть бути сформульовані часткові задачі, вирішення яких наближає до побудови причинно-наслідкового ланцюжка "хімічний склад–технологія виготовлення–структура–взаємодія з оточуючим середовищем–функціональні властивості–експлуатаційне використання".

В [1] розглядалася одна з таких задач, а саме, досліджувався вплив орієнтації осі навантаження відносно напрямку укладення вуглецевих волокон на статичні і втомні характеристики одношарових односпрямованих вуглецевих пластиків в інтервалі температур 373–77 К. Вибір такого модельного

© Похил Юрій Онисимович, завідувач відділу Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, кандидат фіз.-мат. наук, Яковенко Леонід Федорович, Алексенко Євген Миколайович, Лотоцька Вікторія Олександрівна — співробітники того ж інституту, Желтов Павло Миколайович, перший заступник директора ВАТ Український науково-дослідний інститут технології машинобудування, Малий Микола Андрійович, Алієв Андрій Мамедович — співробітники тієї ж установи, Санін Анатолій Федорович, професор кафедри технології виробництва Дніпропетровського національного університету ім. О. Гончара, доктор техн. наук.

матеріалу дозволив встановити відносний внесок армуючого і матричного компонентів у жорсткість та статичну і втомну міцність вуглецевого композита.

Ця робота спрямована на експериментальне дослідження залежності статичних і втомних властивостей багатошарових вуглецевих перехресноармованих композиційних матеріалів від хімічного складу та агрегатного стану матричного компонента при температурах деформування 293 і 77 К. Важливість визначення низькотемпературних механічних властивостей вуглецевих композитів обумовлена необхідністю з'ясування можливості їхнього використання в криогенних оболонкових конструкціях (наприклад, баках для зберігання криогенних рідин).

Матеріали та методи дослідження

Об'єктами дослідження обрані багатошарові (7 шарів) ортогонально-армовані вуглепластики з різними типами матричного компонента. Як армуючий компонент було використано вуглецеву тканину УРАЛ Т-22 марки А (ГОСТ 28005-88). Композиції формували на базі трьох матричних компонентів:

- бакелітового лаку ЛБС-1;
- порошкоподібного компоненту (смола СФ-010 з додаванням уротропіну);
- суміші лаку бакелітового ЛБС-1 з порошкоподібним компонентом.

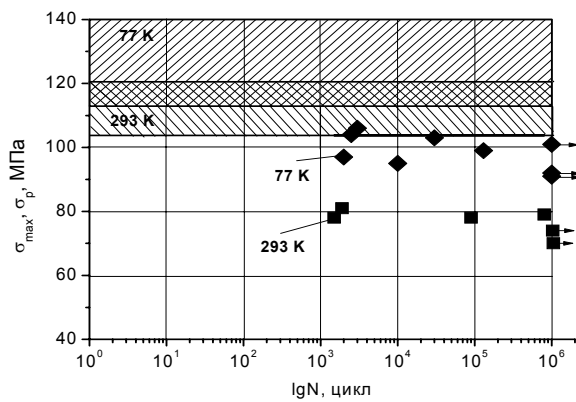
Формування заготовок всіх типів вуглепластиків розміром 350×350 мм з пакетів, що склалися з 7 шарів перехресно укладених під кутом 90° армуючих і стількох же матричних компонентів, здійснювали методом трьохстадійного гарячого пресування зі ступеневим зростанням тиску (в межах 20–30 кг/см²) і температури витримки (80–160 °С). В результаті були отримані пластини завтовшки 2,5 мм, з яких виготовлялися стандартні дволопаточні зразки для механічних випробувань.

Дослідження статичної міцності зразків виконували одноосьовим розтягом зі швидкістю $8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ на розривній машині FPZ-100/1, що оснащена низькотемпературною приставкою конструкції Фізико-технічного інституту низьких температур НАН України [2]. В разі проведення випробувань у рідкому азоті зразки попередньо витримувалися 30 хв в криоагенті.

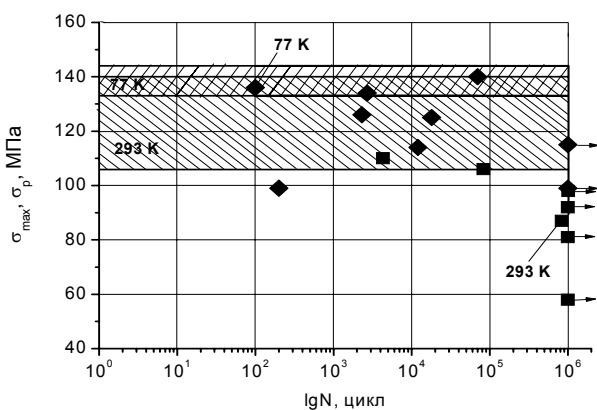
Втомні випробування при температурах 293 и 77 К в широкому діапазоні циклічних довготривалостей при змінному одноосьовому розтязі проводили на низькотемпературній втомній машині [3]. Параметри навантаження: коефіцієнт асиметрії циклу $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0,1$, частота змінного навантаження $f = 10 \text{ Гц}$ і базове число циклів $N = 1 \cdot 10^6$.

Результати та їх обговорення

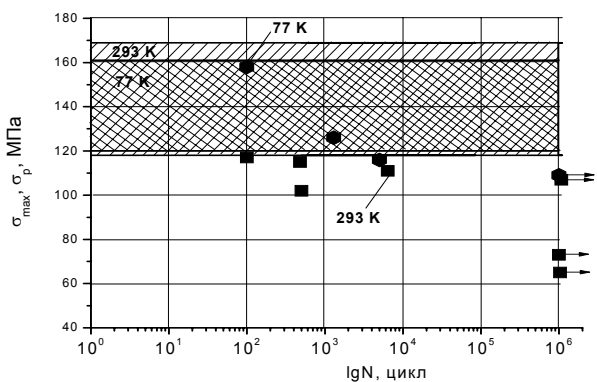
На рис. 1 проілюстровано вплив матричного компонента і температури деформування на статичні та втомні характеристики досліджених вуглепластиків. Вздовж осі абсцис нанесені значення напруги руйнування σ_p у вигляді заштрихованих у межах розкиду смуг, а також значення втомної міцності в координатах “амплітуда напруги в циклі σ_{\max} — число циклів навантаження N ” при температурах 293 і 77 К.



а



б



в

Рис. 1. Результати випробувань при статичному та циклічному одноосьовому розтязі багатошарових ортогонально армованих вуглепластиків при температурах 293 і 77 К: а — бакелітова матриця; б — комбінована матриця; в — порошкоподібна матриця

Для всіх вуглепластиків, незалежно від виду матричного компонента спостерігаються такі особливості:

i) перехід від малоциклової втоми до багатоциклової відбувається у досить вузькому інтервалі напруг, втомні криві скоріше лягають майже на горизонтальну лінію, аніж криві для більшості металевих конструкційних матеріалів;

ii) напруга руйнування при втомних випробуваннях, в тому числі і межа витривалості на базовому числі циклів, наближаються до смуги розкиду статичної міцності і складає 70–80% від її середнього значення; при напругах ледь нижчих нижнього краю смуги розкиду статичної міцності зразки не руйнувалися при $N \geq 10^6$ циклів, тоді як для більшості металів межа витривалості на базі 10^6 циклів зразків становить 30–55% від середнього рівня статичної міцності [4];

iii) зниження температури випробувань від 293 К до 77 К викликає зміцнюючий ефект як для статичних, так і для втомних міцнісних характеристик, але величина ефекту залежить від типу матричного компонента; ефект найвищий при застосуванні бакелітового лаку і найменший — для порошкоподібної матриці;

iv) абсолютне значення міцнісних характеристик при статичному і втомному навантаженні також залежить від типу матричного компонента, досягаючи найбільших значень для порошкоподібної матриці і найменших для бакелітової.

На перші дві з означених особливостей співвідношення статичних і втомних міцнісних характеристик вуглепластиків звертається увага в роботі [5].

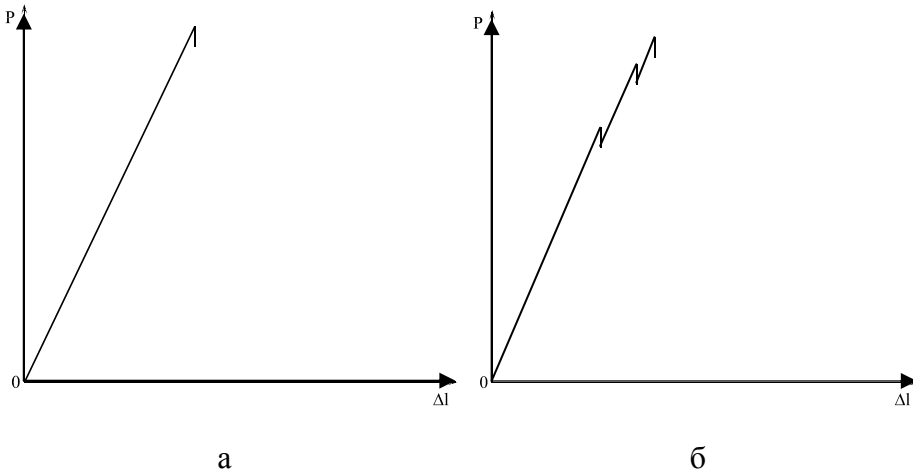


Рис. 2. Характерні діаграми розтягу зразків багатошарових вуглепластиків з порошкоподібною (а) і бакелітовою (б) матрицями при температурі 293 К

Експериментальні результати показали, що тип матричного компонента визначає загальний вигляд деформаційних кривих і характер руйнування вуглецевих композитів. На рис. 2 наведено характерні діаграми розтягу зразків при температурі 293 К для порошкоподібної і бакелітової матриць. В обох випадках деформаційні криві лінійні аж до розриву зразків, однак, якщо для зразків з порошкоподібною матрицею деформаційна крива є гладкою, то для бакелітової матриці на кривих спостерігається декілька стрибкоподібних зривів деформуєчої напруги.

З відмінностями в деформаційних кривих композитів з різними матричними компонентами корелюють і фрактографічні особливості поверхонь руйнування зразків (рис. 3). Так, якщо у випадку порошкоподібної матриці (гладка деформаційна

крива) поверхня руйнування відповідає нормальному відриву шляхом крихкого руйнування, то в зразках з бакелітовою матрицею спостерігаються ознаки комбінованого крихкого руйнування з витяганням армуючих волокон та розшаруванням вздовж площини зразка. Аналогічні деталі мають і поверхні зламів зразків, що пройшли втомні випробування. Такий же характер мають деформаційні криві і поверхні руйнування зразків вуглепластиків, що були випробувані при температурі 77 К. Це дозволяє стверджувати, що механізми зароджування і поширення руйнування вуглепластиків при статичному розтязі і циклічному втомному розтягуючому навантаженні мають спільну природу.

Дійсно, коли композит піддають розтягуючому навантаженню або змінюють його температуру, на мікрорівні виникають складно напружений або складно деформований стани через різницю модулів пружності, коефіцієнтів Пуассона та коефіцієнтів теплового лінійного розширення армуючого і матричного компонентів. Релаксація цих станів супроводжується виникненням розшарувань або розтріскувань на межах поділу волокно-матриця (з урахуванням низької міцності в поперечному напрямку), і це є основною причиною зародження руйнування перехресно армованих вуглепластиків.

Крім того, ортогональноармовані вуглепластики, виготовлені гарячим пресуванням, містять так звані температурні тріщини, походження яких пов'язують із залишковими термонапругами, що виникають під час охолодження пресформ внаслідок анізотропії пружних і теплофізичних характеристик композита [5]. Такі тріщини також є місцями зародження руйнування композита.



а



б

Рис. 3. Характерний вид зламів зразків багатопшарових вуглепластиків з порошкоподібною (а) і бакелітовою (б) матрицями при температурі 293 К

Вирігідно, поверхня розподілу між фазами композита відіграє вирішальну роль в процесі зародження руйнування, а також в передачі і перерозподілі зусиль між сусідніми ділянками матеріалу. Тип зв'язків і міцність міжфазних меж обумовлюють також характер руйнування композита. У випадку міцного адгезійного міжфазного зв'язку спостерігається руйнування нормальним відривом (рис. 3, а). а при слабкому зв'язку руйнування виникає за типом "щітки" з відокремленням матриці від волокон (рис. 3, б). Таким чином, міжфазна зсувна міцність у виріша-

льній мірі визначає макроскопічну статичну і втомну міцність композита, що підтверджується співвідношенням, що спостерігається, міцнісних характеристик композитів із різними матричними компонентами і різним характером їхнього руйнування при механічних випробуваннях.

Слід також відзначити, що наявність декількох зривів навантаження вздовж діаграми розтягу означає, що при руйнуванні першого шару (перший зрив) композит не втрачає здатності сприймати і нести навантаження, відбувається перерозподіл напружень між шарами і матеріал вчиняє опір подальшому деформуванню. Тобто, в нашому випадку не працює так званий критерій “руйнування першого шару” [6].

Висновки

Отримано характеристики міцності при статичному і циклічному розтязі трьох багатшарових промислових вуглепластиків з різними матричними компонентами при температурах 293 і 77 К. Незважаючи на великий розкид значень, відзначається наближення величин втомної і статичної міцності при розтязі.

вуглепластики, що досліджені, не втрачають статичних і втомних міцнісних характеристик в середовищі рідкого азоту. Для всіх типів композитів спостерігається тенденція зростання втомної міцності при зниженні температури деформування.

Найбільші значення міцнісних характеристик мають вуглепластики з порошкподібним матричним компонентом, найнижчі — з бакелітовою матрицею.

Вигляд деформаційних кривих вуглепластиків з різними матричними компонентами при розтязі (гладкий або стрибкоподібний) і корелюючий з ним характер відповідних поверхонь зламу (нормальний крихкий відрив або розшарування з відокремленням матриці від волокон) визначаються імовірніше зсувною міцністю міжфазного прошарку композита.

Отримані результати необхідні для вибору розрахункової моделі прогнозування граничних силових навантажень шаруватих вуглецевих композитів за нормальної та криогенної температур у випадках статичного та циклічного навантажень. Ці дані мають також довідковий характер.

Наведено результати досліджень впливу матричного компонента і температури деформування (293, 77 К) на статичні і динамічні міцнісні характеристики деяких вуглецевих пластиків, перспективних для використання в криогенно-вакуумній техніці. Виявлено стрибкоподібні зриви напруги на деформаційних кривих вуглепластика з бакелітовою матрицею, які пов'язуються з руйнуванням композита за механізмом міжфазного розшарування та відокремлення матриці від волокон.

Ключові слова: багатшарові вуглепластики, напруга руйнування, втомна міцність, матричний компонент, одноосьовий розтяг, характер руйнування.

The results of investigations of matrix component type and deformation temperatures (293, 77 K) influence on static and dynamic strength properties of the some carbon-plastics, which are perspective for usage in cryogenic -vacuum technics, are brought. The jump-like failures of stress on deformation curves of carbon- plastic with bakelite matrix are revealed. Jumps are connected with composite fracture by the mechanism of interphase stratification and matrix —fibers separation.

Keywords: multilayered carbon- plastics, rupture stress, fatigue strength, matrix component, uniaxial tension, fracture character.

1. *Похил Ю. А.* Механические характеристики основных элементов солнечных батарей / Ю. А. Похил, Р. В. Гаврилов, Л. Ф. Яковенко и др. // *Космічна наука і технологія.* – 2006. – Т. 12, № 4. – С. 24–32.
2. *Воликова Л. М.* Низкотемпературная приставка к разрывной машине 123IV10 / Л. М. Воликова, В. К. Чернецкий // *Прикладное криогенное и вакуумное материаловедение.* – К.: Наук. думка, 1991. – С. 137–143.
3. *Абушенков И. Д.* Установка для испытания материалов на усталость при криогенных температурах / И. Д. Абушенков, В. К. Чернецкий, В. Я. Ильичев // *Зав. лаб.* – 1986. – № 18. – С. 59–63.
4. *Форрест П.* Усталость металлов. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
5. *Оуэн М. Дж.* Усталость углепластиков // *Композиционные материалы.* / Под ред. Браутмана Л., Крока Р. Т. 5. Разрушение и усталость. – М.: Мир, 1978. – С. 363–393.
6. *Композиционные материалы: Справочник* / Под общ. ред. Васильева В. В., Гарнопольского Ю. М. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.