

УДК 678.5.05:004.925.8

О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький, В. М. Куриленко
*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
 імені Ігоря Сікорського»*

МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

У даній роботі коротко проаналізовані основні використовувані матеріали, їх властивості, що обумовлені відповідними фізичними ефектами, а також особливості пристроїв та базових технологій, що застосовуються для одержання функціональних полімерних композиційних матеріалів конструктивного призначення, які експлуатуються в умовах складного напружено-деформованого стану та дії термосилових факторів. Отримані результати та висновки обумовлюють напрямки подальшого наукового та практичного дослідження.

Ключові слова: матеріал, полімер, композит, технологія, інтелект, пристрій, датчик, функціональність.

Рис. 1. Літ. 13.

А. Е. Колосов, В. И. Сивецкий, А. Л. Сокольский, И. И. Ивицкий, В. Н. Куриленко
**МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
 ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В данной работе кратко проанализированы основные используемые материалы, их свойства, которые обусловлены соответствующими физическими эффектами, а также особенности устройств и базовых технологий, применяемых для получения функциональных полимерных композиционных материалов конструктивного назначения, которые эксплуатируются в условиях сложного напряженно-деформированного состояния и действия термосиловых факторов. Полученные результаты и выводы обуславливают направления дальнейшего научного и практического исследования.

Ключевые слова: материал, полимер, композит, технология, интеллект, устройство, датчик, функциональность.

A.E. Kolosov, V. I. Siveckiy, O. L. Sokol'skiy, I. I. Ivi'ckiy, V. M. Kurylenko
**MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR OBTAINING FUNCTIONAL POLYMERIC
 COMPOSITE MATERIALS**

In this paper briefly analyzed the main used materials, their properties, which are due to the corresponding physical effects, as well as the features of devices and basic technologies used to produce functional composite polymeric materials of constructive use, which are operated under conditions of a complex stress-strain state and the action of thermal factors. The obtained results and conclusions determine the direction of further scientific and practical research.

Key words: material, polymer, composite, technology, intelligence, device, sensor, functionality.

Постановка проблеми. У всьому світі протягом останніх десятиріч спостерігається високий попит на інтелектуальні матеріали (ІМ), перш за все, на інноваційні полімерні матеріали (ПМ) і полімерні композиційні матеріали (ПКМ), зокрема, на інтелектуальні ПКМ (ІПКМ) та вироби з них [1, 2]. Це обумовлено тим, що у багатьох галузях промисловості інтенсивно поширюється використання полімерних матеріалів і конструкційних виробів з них, особливо тих, що можуть реагувати на зміну умов експлуатації або попереджати про виникнення аварійних ситуацій, тобто т. зв. інтелектуальних полімерних виробів (ІПВ) [3-5].

Волокнисті ПКМ (ВПКМ), ІПКМ та ІПВ виготовляються на базі різних типів датчиків та наномодифікаторів, сплавів з магнітними властивостями, волоконно-оптичних і п'єзоелектронних датчиків тощо, які дозволяють контролювати дію зовнішніх факторів, зокрема, тиску, температури, деформацій тощо. На даний час розроблена велика кількість технічних рішень, в основі яких покладений принцип дії ефекту пам'яті форми термоматеріалів, наприклад, терморезисторні муфти, що осідають тощо.

Аналіз існуючих даних [1, 2] свідчить про те, що незважаючи, наприклад, на різноманіття існуючих компонентів з пам'яттю форми, сучасних волоконнооптичних та п'єзоелектронних датчиків та технологій, зокрема, з'єднання різнорідних циліндричних конструктивних елементів, у цей час відсутні універсальні технології та устаткування приготування ІПКМ та їх переробки у відповідальні деталі. Тому розроблення ефективних технічних засобів створення ІПКМ та прогнозування (моделювання [6, 7]) їх н.д.с. є надзвичайно актуальним для вітчизняної науки і промисловості, що може поставити ці розробки в один ряд із зарубіжними аналогами.

Адже зараз висуваються підвищені вимоги до одержання вищезазначених ІПКМ при одночасному збільшенні продуктивності, зниженні енергоємності та досягненні ресурсозбереження процесів їх приготування, а також до оптимізації конструктивно-технологічних параметрів реалізуючого технологічного обладнання. Тому створення нових

термо- або реактопластичних ПКМ з певним, заздалегідь заданим комплексом властивостей, включаючи ефект пам'яті, та можливість реагування на зміну силових навантажень й дії інших факторів залишається актуальною задачею.

Мета статті: провести короткий аналіз основних використовуваних матеріалів, їх властивостей, що обумовлені відповідними фізичними ефектами, пристроїв та базових технологій, що застосовуються для одержання функціональних полімерних композиційних матеріалів конструктивного призначення, які експлуатуються в умовах складного н.д.с. та дії термосилових факторів.

Вклад основного матеріалу. Згідно з концепцією розробників, основними типами ІМ є: ІМ, що самодіагностуються (*пасивні ІМ*), та ІМ, що адаптуються (*активні ІМ*). Подальше вдосконалення ІМ передбачає, насамперед, оптимізацію їх складу та властивостей шляхом своєрідного «навчання» (тобто шляхом створення т.зв. інтелектуальних конструкцій – ІК) на базі диверсифікованого використання принципів, використовуваних в робототехніці, молекулярній електроніці, а також в нано- і біотехнології [1, 2].

Інтелектуалізація ПМ (ПКМ, ВПКМ), на які «перенесений» інтелект їх розробників, спрямована насамперед на забезпечення стабільності в часі їх експлуатаційних властивостей. Це досягається за рахунок модифікації ПМ компонентами, що переводять такі матеріали в матеріали, що самодіагностуються та адаптуються до зовнішніх впливів: інтелектуальні ПМ, ІПКМ, ІВПКМ.

Як «модифікуючі» компоненти, що вводяться до ІПКМ, широко використовуються [1, 2]: конформні датчики, тобто датчики, що вводяться всередину матеріалу, мікро- і наносенсори, матеріали та процеси мікро- і нано сенсорики; виконавчі механізми (актюатори, матеріали і процеси мікромеханіки), системи аналізу, зв'язку і управління (оптоволоконна техніка, мікро-, наноелектроніка, мікро-, нанооптоелектроніка, мікро- і нанопроцесорна техніка).

Різноманіття типів полімерів, використовуваних у виробництві традиційних ПМ, зв'язуючих (матриць) ПКМ, наповнювачів [8], що складаються з речовин різної природи (мінеральної, вуглецевої, органічної), дисперсних – у вигляді волокон, і текстильних (нитки, джгути, стрічки, тканини) форм, а також нетканих (повсть, мати, папір) форм з них дозволяє моделювати широкий спектр матеріалів з необхідним комплексом експлуатаційних властивостей (конструкційних, діелектричних, токопровідних, триботехнічних, вибродемпфуючих, вібропоглинаючих, теплозахисних, хімічно та радіаційно стійких, тепло-, термо-, вогнестійких та інших).

Серед перерахованих вище типів ПМ і ПКМ функціонального (або спеціального) призначення, серед яких в першу чергу виділяють інтелектуальні, радіоекрануючі та радіопоглинаючі матеріали, насамперед полімерні матеріали, призначені для захисту від високошвидкісного інденторного впливу (броньові матеріали, вироби і конструкції), теплозахисні матеріали, а також полімерні стільникові матеріали, дозволяють істотно розширити використання ПМ і ПКМ у виробках сучасної техніки, що відповідають специфічним умовам їх експлуатації в умовах складного напружено-деформованого стану (н.д.с.) і градієнтних температурних впливів.

Відносно новий клас ПМ, а саме інтелектуальні матеріали (ІМ, або *Smart Materials*) були створені для того, щоб не тільки активно протидіяти вищевказаним зовнішнім факторам, але й в оптимальній адаптуватися до них шляхом «оцінювання» за системою показників, що характеризують як зовнішній вплив, так і власний стан цих матеріалів.

В оптимальній інтелектуальні ПКМ, перш за все, ПКМ з безперервними волокнистими наповнювачами (ВПКМ), виявляють здатність «аналізувати» і «управляти» комплексом своїх експлуатаційних характеристик за алгоритмом, заздалегідь визначеним розробником. Це передбачає розроблення технологій одержання функціональних конструкційних полімерних композиційних матеріалів, що обумовлює їх відповідні властивості.

Особливості одержання функціональних конструкційних полімерних композиційних матеріалів та їх властивості. За «задумом» конструкторів і технологів, ІМ повинні активно реагувати на зміну зовнішніх умов, тобто впливів, прикладених до них. Особливо важливе значення інтелектуалізація набуває саме для конструкційних ПКМ, призначених для роботи в екстремальних умовах впливу високих механічних, в т.ч. знакозмінних, навантажень і перепаду температур. До них, перш за все, відносяться вироби і конструкції автомобіле- і суднобудування, військово-промислового комплексу, а також для авіакосмічної техніки тощо. Одним з найбільш перспективних напрямків наукових досліджень у сфері ІМ стосовно останньої є створення автономних інтелектуальних конструкційних матеріалів та систем на основі біопідходу до інженерного проектування й біометричних процесів [9].

Іншими пріоритетними напрямками досліджень в цій галузі є: широкий спектр композитів (на основі полімерів, кераміки, адгезивів) з новими властивостями; наноструктури на основі графену; самовідновлювані матеріали і покриття; регуляторні структури і системи, що самоорганізуються; сенсорні й активні елементи з поліпшеними експлуатаційними характеристиками та ін.

Що стосується технологій одержання ПКМ, то слід зазначити наступне. В цей час найбільш освоєні в промисловому виробництві технології одержання функціональних композиційних матеріалів на основі інтерметалідів (титану, нікелю, ніобію, алюмінію, хрому та ін.), які використовуються для одержання деталей, що працюють в умовах різко змінних зовнішніх факторів – температур і навантажень. Стосовно до полімерів, найбільш високі конструкційні властивості у ПКМ, що мають в якості наповнювачів саме безперервні волокна (волокнисті ПКМ – ВПКМ, армовані пластики, або *Composite Materials*) [2].

Як відомо, комплекс властивостей ВПКМ визначається властивостями складаючи їх компонентів (матриця, наповнювач), їх мікро- і макроструктурою, межею поділу фаз та її станом, реакцією цих структур на зовнішні впливи. ВПКМ – це гетерофазні матеріали, в яких безперервна полімерна матриця (термореактивна або термопластична), що взаємодіє з безперервним наповнювачем (скляні, вуглецеві, органічні або інші волокна), сприймає зовнішні навантаження і перерозподіляє їх на високоміцний волокнистий наповнювач [1 – 2]. При цьому особливий вплив на властивості матеріалу здійснює міжфазний шар, який є своєрідним «серцем» ПКМ (так, наприклад, площа контакту на кордоні розподілу «матриця – наповнювач» в об'ємі ВПКМ в 1 мм^3 зі ступенем наповнення 50% об. становить $450\text{--}600 \text{ мм}^2$) [2].

Тому ПКМ найчастіше використовують в якості оболонок конструкцій у формі тіл обертання силового (або спеціального) призначення. У них за рахунок введення датчиків (конформні датчики, мікросенсори), виконавчих механізмів (актюатори, матеріали і процеси мікромеханіки), систем зв'язку та управління (мікро- та оптоелектроніка, мікропроцесорна техніка) реалізуються можливості самодіагностики (ІМ, що самоінформуються, самодіагностуються) та адаптування (ІМ, що саморегулюються, «приспосовуються», адаптуються) [1, 2]. Нижче дається коротка характеристика ПКМ, що самодіагностуються, та ПКМ, що адаптуються.

Інтелектуальні матеріали, що самодіагностуються. У загальному випадку під ІМ, що самодіагностуються, розуміють матеріали, які здійснюють «самоконтроль» («самодіагностику») свого стану в експлуатаційних умовах за такою тріступеневою схемою: 1) отримання сигналу від конформного датчика [10], попередньо введеного в ІМ, що «несе» інформацію про зміни, що виникли в матеріалі (напруження, деформації, переміщення); 2) ідентифікація цього сигналу; 3) прийняття (оператором) рішення на підставі обробки за певним алгоритмом отриманого сигналу [1, 2].

Наприклад, в ПКМ, що самодіагностуються, самоконтроль стосовно процесу виникнення і локального поширення втомних тріщин здійснюється за допомогою наступних конформних датчиків: датчиків опору (розриви волокон армуючого наповнювача збільшують опір датчика) або діелектричних датчиків; п'ездатчиків, що уловлюють акустичні хвилі, які з'являються у момент виникнення дефекту (на базі використання методу акустичної емісії); оптичних волокон (їх руйнування легко фіксується).

Констатується, що для самодіагностування ПКМ ефективним є застосування насамперед волоконних оптичних хвилеводів, безпосередньо вбудованих в конструкцію з ПКМ. Адже оптичні хвилеводи дозволяють отримати інформацію про можливі ушкодження і дефекти (перш за все тріщини) в конструкції, що виникають в процесі її експлуатації. Світлові сигнали, що передаються по волоконних хвилеводах, обробляються за допомогою мікропроцесорів. Інформація від останніх відтворюється за певним алгоритмом на дисплеї або за допомогою мовного синтезатора [1, 2]. Більш детально особливості оптоволоконних датчиків описуються нижче.

Оптоволоконні датчики. У разі інтелектуальних структур, порівняно з традиційними («класичними») структурами, з'являються додаткові вимоги, обумовлені специфікою досліджуваної структури. Перш за все, це необхідність розміщення безлічі різних за функціональним призначенням датчиків, за допомогою яких проводиться моніторинг різних структурних параметрів контрольованої системи. Крім того, необхідно забезпечити надійну і достовірну передачу отримуваних датчиками сигналів до системи аналізу та синтезу, а споживання енергії датчиком повинно бути невеликим. Також необхідно забезпечити близькість датчика до досліджуваної ділянки інтелектуальної системи.

При цьому необхідно коротко охарактеризувати насамперед оптичне волокно (див. рис.1).

Оптичне волокно – це зазвичай кварцове, скляне або полімерне волокно, призначене для передачі світла на відстань. Як світловоди можуть використовуватися також трубки із дзеркальним внутрішнім покриттям [1, 2].

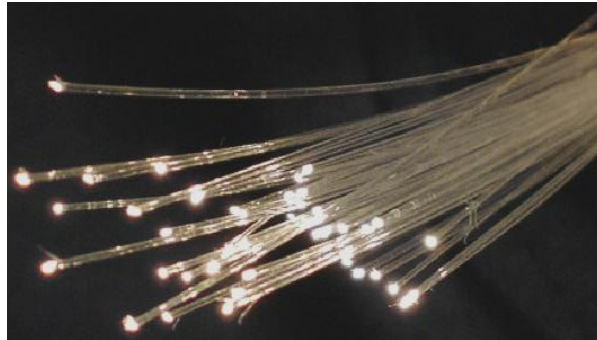


Рис. 1. Пучок оптичних волокон [9]

Нитки з оптично прозорого матеріалу використовуються для передачі інформації світловими імпульсами з використанням ефекту повного внутрішнього відображення.

У даний час використовують два типи оптичного волокна: багатомодові і одномодові. Всі сучасні оптичні волокна, які використовуються для побудови мереж передачі даних, мають однаковий зовнішній діаметр, рівний 125 мкм. Для механічного захисту оптичні волокна покривають оболонкою (первинне буферне покриття), а її товщина становить приблизно 250 мкм [1, 2].

Для спрощення роботи з багатоволоконними кабелями буферне покриття волокон, що розташовані в одному кабелі, фарбують у різні кольори. Для кабелів, в яких використовується велика кількість волокон, оптичні волокна склеюються в плоскі шлейфи (найчастіше по 8 волокон). Далі ці шлейфи укладають паралельно в «стопки» і поміщають у спеціальні порожнини всередині оболонки кабелю. Таким чином досягається максимально щільне пакування волокон у кабель з обмеженим зовнішнім діаметром.

Оптичні волокна, що використовуються для кабелів, призначених для прокладки всередині приміщень, та для кабелів, що застосовуються для виготовлення з'єднувальних шнурів, зазвичай покривають ще однією оболонкою (вторинне буферне покриття), а її товщина складає 900 мкм. У багатоволоконних кабелях цю оболонку також роблять різних кольорів.

Використання оптоволоконних датчиків, у порівнянні з іншими типами датчиків, є одним з найбільш перспективних напрямків розвитку і моніторингу стану інтелектуальних структур. Декларується, що волоконні датчики забезпечують новий, більш високий, рівень інтеграції сенсорної системи з контрольованою інтелектуальною структурою. Адже вони дозволяють об'єднати оптоволоконний датчик зі структурою, причому оптичне волокно часто вводиться всередину досліджуваної структури, а не на її поверхню [2].

Окрім цього, оптоволоконні системи дозволяють створювати просту схему волоконної мережі, що охоплює весь інтелектуальний виріб, що практично неможливо реалізувати іншими методами. При цьому одне волокно може забезпечити контроль параметрів у десятках і навіть сотнях точок по довжині волокна внаслідок мікрометричних розмірів його діаметра. Таким чином, усувається необхідність використання складної електронної системи зв'язку для забезпечення адекватного моніторингу досліджуваної інтелектуальної структури.

Наявність волоконно-оптичних датчиків дозволяє в режимі реального часу отримувати інформацію про поведінку виробу з ІМ і вже на початковій стадії виявити зміни його структури задовго до появи незворотних деформацій. У той же час конформне розміщення в структурі ІПКМ оптичних волокон практично не змінює запланованого об'єму та характеру розподілу армуючих волокон й конструкційних властивостей ІВПКМ. Крім того, позитивним моментом є те, що вбудовані в ІПКМ оптичні волокна не створюють електричних перешкод у радіопрозорих ВПКМ.

Так як середній діаметр оптичних волокон, у залежності від відсутності чи наявності захисних оболонок, становить (125 – 900) мкм, то це більше, ніж на порядок, перевищує діаметр армуючих волокон (філамент) середнім діаметром (7 – 15) мкм [1 – 2]. У той же час у ряді випадків вбудовування таких оптоволоконних датчиків не проходить безслідно для структури і властивостей композиційного матеріалу внаслідок виникнення в ІПКМ внутрішніх напружень.

Таким чином, у даний час оптичні волокна є найбільш зручним типом датчиків, що застосовуються для нових інтелектуальних систем. Це обумовлено легкістю отримання безлічі сигналів за допомогою розподілених дифракційних решіток, а також величезними можливостями передачі сигналу через поверхні розподілу між контрольованою інтелектуальною структурою і волокном.

Проте є й інші «підводні рифи» при використанні цього матеріалу. Незважаючи на те, що технічні параметри волоконних датчиків надзвичайно високі, чималою є вартість такого контролю. Тому оцінка ефективності їх застосування досить складна. Проте у багатьох випадках таке застосування виправдане, незважаючи на відносно велику вартість датчиків.

У кінцевому підсумку головним критерієм для використання оптичних волокон в ПКМ є співвідношення «ціна – властивості», що враховує специфічні особливості контрольованої інтелектуальної конструкції на експлуатаційних режимах. Крім того, технологія створення ПКМ на базі волоконно-оптичних датчиків вписується в традиційну технологію суміщення компонентів ВПКМ при мінімальному впливі на властивості одержуваного матеріалу.

Інтелектуальні матеріали, що адаптуються. В ІМ, що адаптуються, використовують компоненти, зроблені з матеріалів, здатних змінювати свої властивості та геометрію конструкції виробу, до складу якого вони входять, контрольованим способом. Наприклад, в конструкційних ПКМ (метали і полімери з «пам'яттю» форми, магніто- і електрореологічні рідини й ін.) аналіз та управління їх експлуатаційними характеристиками здійснюється за допомогою конформних актуаторів, що реагують на зміну частоти власних коливань структурних елементів ПКМ, і, в разі необхідності, знижують їх до необхідного рівня.

Це дає можливість контролювати виникаючу вібрацію, змінювати (незначно) розміри і геометрію елементів конструкцій, здійснювати акустичний контроль, регулювати термічне розширення (стиснення), а також запобігати утворенню та поширенню тріщин [1, 2].

Вищеописані оптичні волокна в складі ПКМ, що адаптуються, є елементами адаптивної системи, яка забезпечує не тільки контроль деформацій, руйнувань, вібрацій, а й їх компенсування відповідною зміною характеристик ПКМ. При цьому принципова відмінність ІМ, що самодіагностуються, до складу яких входять різні мікросенсори, а також системи передачі та аналізу інформації (волоконно-оптичні, мікропроцесорні), від ІМ, що адаптуються (активні конструкції), полягає в тому, що адаптування ІМ здійснюється за допомогою конформних актуаторів, діючих на основі принципів мікромеханіки [1, 2].

Методи оптимізації властивостей конструкційних інтелектуальних полімерних композитів. Як було зазначено вище, в конструкційних ПКМ зміну демпфуючих властивостей фіксують по частотах власних коливань елементів структури ПКМ. Оптимізація властивостей ПКМ забезпечується шляхом введення до їх структури компонентів, що реагують на зміну власних коливань, і виводять їх до необхідних значень. Для цього існує ряд методів [1, 2]:

1) Уведення до структури ПКМ, поряд з армуючими волокнами, волокон або стрічок (до 15% об.) з металів, що володіють ефектом «пам'яті» форми.

2) Використання полімер-полімерних матриць (т.зв. поліматричних ПКМ), в яких одним з компонентів матриці служить полімер з «пам'яттю» форми для «заліковування» дефектів [11] (наприклад, під напругою макромолекули поліакрилатів і полівінілових ефірів здатні змінювати конформацію, в результаті чого реалізується перехід від орієнтованої до клубкоподібної конформації, від кристалів з випрямленими ланцюгами до кристалів складчастої форми, що приводить до зміни об'єму ПКМ).

3) Уведення до матриці ПКМ капсульованих (з діаметром капсул близько 1 мкм) магніто- і електрореологічних рідин. *В'язкі магнітореологічні рідини* – це колоїдні розчини з ферромагнітними частинками діаметром до 10 нм. *Електрореологічні рідини* – це колоїдні розчини кремнійорганічних рідин з сегнетоелектричними (п'єзоелектричними) і електретними частками (полімери, поляризовані в сильному електричному полі шляхом орієнтації дипольних електричних моментів).

4) Ферромагнітні, сегнетоелектричні, електретні частинки в електромагнітному полі орієнтуються в інертній рідині в капсулах, а магніто- і електрореологічні рідини втрачають плинність (заморожування магнітних моментів, або, інакше, магнітне склування). Якщо тривалість впливу електричного поля менше часу релаксації системи, то система стає «жорсткою» в результаті зростання її в'язкості.

5) В іншому випадку система залишається в'язкою, що дозволяє ефективно здійснити вібропоглинання виникаючих коливань. Так, наприклад, на основі гум, полімерних пін,

термоеластопластів одержують ефективні вібропоглинаючі матеріали з прийнятними демпфувальними властивостями.

б) Уведення до матриці ППКМ п'єзоелектричних волокон. При виникненні циклічної деформуючої сили напруження передається п'єзоелектричним волокнам, стискаючи і розтягуючи їх. При цьому механічна енергія перетворюється в електричну напругу, яка сприймається вбудованим мікрочіпом, надалі накопичується, обертається і подається назад на волокна, змушуючи їх відповідним чином розтягуватися і стискатися. Це, в свою чергу, сприяє виникненню протидіючого моменту, що й власне гасить вібрацію.

7) Використання п'єзокераміки з високою електромеханічною активністю (п'єзоактуатори, п'єзодвигуни).

8) Застосування електроактивних полімерів у силових елементах актуаторів, зокрема, у вигляді гелів (наприклад, гель поліакрилової кислоти в слабколужному водному середовищі змінює свій об'єм при пропусканні електричного струму).

9) Використання магнітоеластичних аморфних матеріалів з прямим і зворотним перетворенням електричної енергії в механічну, в тому числі з наповнювачами з порошків самарій-кобальтових сплавів.

10) Застосування механохімічних матеріалів, що забезпечують пряме перетворення хімічної енергії в механічну.

11) Використання мікроактуаторів на основі лазерних технологій.

Нижче буде більш детально розглянута фізична сутність деяких з цих методів.

Ефект «пам'яті» форми конструкційних матеріалів. Під ефектом «пам'яті» форми в загальному випадку розуміють здатність деяких матеріалів, елементів і конструкцій до зміни та подальшого відновлення їх початкових форм і розмірів після термічного чи іншого зовнішнього впливу. Зокрема, в класичному варіанті, це відбувається в результаті термопружного мартенситного перетворення матеріалу (металу) при його термообробці за певним режимом.

Мартенситне перетворення – це один з фундаментальних методів перебудови кристалічної решітки матеріалу. Він характерний для сталей, чистих металів, кольорових сплавів, напівпровідників і навіть деяких полімерів. Зміна форми кристалів – головна особливість мартенситного перетворення, з якою пов'язаний ефект «пам'яті» форми сплавів. Однак ця умова є лише необхідною, але недостатньою для появи «пам'яті» форми [2].

Ефект «пам'яті» форми у деяких випадках пов'язаний з явищем пластичності. Під пластичністю зазвичай розуміють властивості твердих тіл необоротно деформуватися під дією прикладених зовнішніх сил. Однак пластичні деформації в кристалічних тілах у деяких випадках можуть бути оборотними. Наприклад, відомо явище пружного двійникування, яке вже стало загально визнаним [1, 2]. Такі прояви оборотної пластичності, як пружне мартенситне перетворення, надпружність і ефект пам'яті форми в основному реалізуються в металевих кристалах. Вони отримали широке практичне застосування в техніці у вигляді антенних пристроїв, що саморозгортаються в космічному просторі, силових пристроїв у робототехніці і т.п.

Ефект «пам'яті» форми заснований на термопружній рівновазі фаз і керуючій дії прикладеного навантаження. Спеціальна термомеханічна обробка сплавів створює в матеріалі мікронапруження, дія яких при мартенситних переходах аналогічна дії прикладеного зовнішнього навантаження. При охолодженні деталь з таких сплавів мимовільно приймає одну форму, а при нагріванні – повертається до вихідної форми. Наприклад, при охолодженні пластина згортається в кільце або в вигнуту конструкцію, при нагріванні – знову розгортається, чи навпаки.

Зміна форми (при періодичній зміні температури) металів з «пам'яттю» форми супроводжується появою потужних міжатомних сил. Тиск всередині матеріалів такого типу при стисненні процесу розширення може досягати 100 МПа [2]. При цьому залежно від виду матеріалу виробу різного розміру і конфігурації згинаються, розширюються або звиваються (потрібну форму зміни геометрії можна програмувати наперед).

До класичних металів з «пам'яттю» форми відносять такі сплави: нитинол, нитинол-55 (із залізом), никелід титану ВТН-27, сплави титану ВТ-16, ВТ-23, сплав на основі титану з (28 – 34)% марганцю і (5 – 7)% кремнію, терфенол (магнітострикційний сплав, який гасить коливання при низькочастотних вібраціях) [2].

П'єзоелектричні виконавчі пристрої. Використання як актуаторів у силових елементах виконавчих механізмів ІМ п'єзодвигунів, що забезпечують мікро- і нанопереміщення, засноване на високій електромеханічній активності матеріалу п'єзокераміки. П'єзодвигуни працюють за принципом зворотного п'єзо ефекту, згідно з яким ефект переміщення досягається за рахунок

деформації п'єзоелемента при прикладенні до нього зовнішньої електричної напруги. Виникаюча при цьому деформація виконавчого п'єзоелемента п'єзодвигунів залежить від виду та рівня його напруженого стану [2]. Для такого типу виконавчих пристроїв вводиться поняття активного елементу (АЕ). АЕ п'єзоелектричних виконавчих пристроїв є п'єзоелектричні, електромеханічні, резонансні (тобто частота електромагнітних сигналів збігається з частотою власних механічних коливань п'єзоелектричного АЕ) і нерезонансні АЕ.

На базі резонансних електромеханічних перетворювачів розроблені наступні вібродвигуни: з пружним елементом; елементами передачі руху (при підключенні напруги до п'єзоелектричного елементу в ньому збуджуються коливання типу біжучої хвилі, що спричиняють на поверхні п'єзоелемента поздовжньо-поперечні деформації, які викликають радіальні коливання і рух); лінійного переміщення; з фазовим керуванням (при зсуві фаз змінюється амплітуда коливань і швидкість обертання); з лінійним регулюванням швидкості обертання (шляхом використання сегнетоелектричних матеріалів з розмитим фазовим переходом) [1, 2].

На основі нерезонансних електромеханічних перетворювачів розроблені монолітні пристрої мікропереміщень (при цьому використовується поперечний п'єзоелектричний ефект для автоматичного мікропозиціонування в адаптивній оптиці, растрових мікроскопах); з хрестоподібним поперечним перерізом (поперечний п'єзоэффект приводить до поздовжньої деформації, а виникаючий вигин забезпечує переміщення робочого органу по трьох координатах); трикоординатні виконавчі пристрої; п'єзоелектричні двигуни та ін.

Позитивним моментом є те, що п'єзоприводи на основі п'єзоелектричних двигунів відрізняються високою точністю переміщень, малими габаритами, простотою конструкції і управління, а також широким робочим температурним діапазоном. Використання п'єзопривода для нано- та мікропереміщень перспективно насамперед у точних електромеханічних системах технічного оснащення нанотехнологій, нанобіології, мікроелектроніки, електронної мікроскопії, астрономії та адаптивної оптики для позиціонування та суміщення окремих елементів [1, 2].

Електроактивні полімери. Альтернативою актюаторам (мікроелектродвигунам) на основі п'єзокераміки є використання електроактивних полімерів (ЕАП) або інших електроактивних матеріалів (ЕАМ). У разі застосування п'єзокераміки у разі подачі електричної напруги на п'єзокристал він деформується, внаслідок чого відбувається його електризація. Аналогічно поведуться п'єзоелектричні полімери, які змінюють свій об'єм при пропусканні через них електричного струму.

Відомі дві групи полімерів, конструктивні елементи з яких здатні змінювати свою форму під дією прикладеного електричного поля – іонні та електронні ЕАП [1, 2]. *Іонні ЕАП* на основі іонних полімерних гелів використовують при створенні іономерних полімер-металевих композицій, електропровідних полімерів, вуглецевих нанотрубок. Дія іонних ЕАП заснована на електрохімії, що характеризує рух або дифузію заряджених іонів у водному середовищі (гелі).

Відомо, що гелі – це дисперсні системи, які утворюються з мікрогетерогенних колоїдних розчинів (золів) при повній або частковій їх коагуляції в результаті зчеплення частинок дисперсної фази по окремих точках поверхні і утримування (імобілізації) рідкого дисперсійного середовища (вода, вуглеводні) в осередках структури, що виникла. Контакт між частинками гелю здійснюється через тонкий прошарок дисперсійного середовища за рахунок ван-дер-ваальсових сил з енергією взаємодії (2 – 40) кДж/моль. При використанні іонних полімерних гелів конструктивно необхідна еластична герметична оболонка, всередині якої розміщують гель, що змінює геометричні розміри тільки при проходженні через нього струму певної напруги, а в іншому випадку в гелі відбувається тільки електроліз.

Електронні ЕАП є фероелектричні полімери та електрострикційні шеплені еластomers, які володіють високою швидкістю і здатні розвивати значні механічні зусилля при дії на них електричним полем високої напруги (1 – 5 кВ) при малій силі струму. Наприклад, матеріали на основі кремнійорганічних каучуків під дією електричного поля стискаються на (20 – 30)% уздовж силових ліній і розширюються перпендикулярно до них (при цьому відбувається т.зв. максвелівська деформація). У матеріалів на основі діелектричних аморфно-кристалічних електрострикційних акрилових еластомерів (сополімери похідних акрилової кислоти з різними вініловими мономерами) з п'єзоелектричною кристалічною фазою питоме зміщення під дією електростатичного поля може досягати до 380 % [1, 2].

ЕАП з великим питомим зміщенням використовують при виготовленні еластичних (розтяжних) електродів з вуглецевими наповнювачами (сажа, короткі вуглецеві волокна). Вже розроблені і використовуються конструкції, які змінюють свою площу до 50% і зберігають цю

здатність протягом 10 млн робочих циклів. Також попереднє розтягнення полімерів збільшує їх коефіцієнт деформації та електричну міцність на пробій до 100 разів [2].

Як актуатори можуть бути використані гелі, що набухають, на основі ЕАП. Характерні властивості гелів на основі ЕАП – мала міцність, пластичність, невелика еластичність, тиксотропія (здатність мимовільно й оборотно відновлюватися після механічного руйнування). Гелі з ЕАП (наприклад, з поліакрилової кислоти в слабколужному водному середовищі) змінюють свій об'єм при пропусканні крізь них електричного струму.

Актуатори з ЕАП у вигляді діафрагм (у діафрагменних приводах зі зміною об'єму) при включенні напруги та за інших рівних умов здатні до більшим зміщенням, ніж при використанні п'єзоелектриків. При цьому форма плоскої діафрагми прагне до напівсферичної. Для створення високоточних приводів малих переміщень, крім використання мікроактуаторів на основі електромагнітних, магнітострикційних, п'єзоелектричних та електроактивних полімерів, у даний час розробляються мікроактуатори на основі лазерних технологій.

Система датчиків або сенсорів в інтелектуальних структурах. Система датчиків (або сенсорів) – це по суті «нервова система» практично будь-якої інтелектуальної структури, що контролює стан конструкції, визначає рівень механічного навантаження та інших фізичних параметрів (напруження, деформації) [1, 2]. В ідеалі датчики повинні виявляти будь-які зміни контрольованих параметрів у всіх частинах інтелектуальної структури. При цьому розробляються конструкції, подібні існуючим в природі «біологічним моделям» інтелектуальних структур.

Слід зазначити, що всеохоплююча детермінація контрольованої інтелектуальної структури тільки за допомогою однієї мережі сенсорів неможлива. Це обумовлено тим, що в будь-якій вимірювальній системі завжди спостерігаються випадкові флуктуації напруги (або струму) – т.зв. шум. При цьому помилки вимірювань можуть бути зменшені, якщо використовувати відповідні фільтри або усереднювати результати великої кількості вимірювань. Однак на практиці повністю позбутися від флуктуацій неможливо. Крім того, неминуче з'являється проблема обробки величезної кількості отримуваних в режимі on-line даних, що змінюються у часі. В оптимумі кількісний об'єм отримуваних даних повинен адекватно описувати контрольовані параметри у всіх частинах геометрично складної інтелектуальної структури. До того ж у кількісному вимірі їх повинно бути досить для створення адекватної моделі контрольованої інтелектуальної системи.

Але при цьому виникає класичне протиріччя, яке обумовлено тим, що з ускладненням системи різко зростає об'єм отримуваної інформації, особливо якщо стежити за зміною величини сигналу в часі. Так, для запису даних про поведінку конструкції невеликого літака протягом лише однієї секунди необхідний об'єм інформації декількох CD-ROMів [2]. Навіть якби це було реально, адекватно обробити та проаналізувати отримуваний об'єм інформації навряд чи можливо. Крім того, така система датчиків мала б значну вагу і аж ніяк не мініатюрні габарити та й споживала б чимало енергії.

Таким чином, *по-перше*, необхідно мати відповідну систему реагування на отримувану інформацію, що само по собі не є простим завданням. *По-друге*, необхідно постійно (в on-line режимі) вимірювати наступні види впливу на досліджуваний інтелектуальний об'єкт: механічні навантаження; тепловий вплив, пов'язаний зі зміною температури; він, у свою чергу, може ініціювати появу механічного напруження в матеріалі та призводити до зміни (як правило, до зменшення) його механічної міцності; хімічний вплив, пов'язаний зі зміною рН середовища, витоком хімічно активних речовин, присутністю води і т.д.

У всіх випадках інтелектуальна система повинна адекватно реагувати на вищевказані дії. Також, крім вимірювання механічних навантажень, необхідно контролювати ступінь зношеності окремих елементів конструкції та конструкції в цілому. Останнє має проводитися за відсутності будь-яких прикладених навантажень, у тому числі й температурних впливів. Такі вимірювання потрібно проводити при фіксованій температурі, або, принаймні, її зміна повинна бути врахована. Відповідно, вимірюватися повинні як чисто механічні напруження, так і теплові ефекти.

Перспективи використання інтелектуальних полімерних композитів. Таким чином, створення ІПКМ воістину відкриває принципово нові можливості розробки сучасних технологій і техніки. Використання ІПКМ дозволяє експлуатувати цю техніку при критичних навантаженнях і високих температурах в умовах, коли ніякі інші існуючі методи контролю стану матеріалу і коригуючого впливу на нього не можуть бути використані за конструктивних або технологічних причин. Прогнозується [1, 2], що у найближчі 20–30 років близько 90% сучасних матеріалів, що застосовуються в промисловості, можуть бути замінені на нові, зокрема, на ІМ. Це, на думку розробників, дозволить створювати високовідповідальні елементи конструкцій, які будуть визначати технічний прогрес 21 століття.

До ІМ майбутнього відносяться різні як за хімічним, так і за агрегатним станом матеріали. Ці матеріали об'єднують прояв якоїсь однієї або декількох фізичних характеристик (наприклад, оптичних, магнітних, електричних, п'єзоелектричних, механічних), і (або) фізико-хімічних характеристик (наприклад, реологічних), які значно (оборотно або необоротно) змінюються під дією зовнішніх (керованих або випадкових) температурно-силових впливів.

Констатується, що до теперішнього часу повний цикл наукових (теоретичних) досліджень у сфері розробки ІМ практично завершено [1, 2], хоча залишається ще ряд невирішених проблем при апробації цих результатів на практиці. Тому кінцевою метою таких досліджень є створення високовідповідальних несучих конструкцій, в яких ІМ сприятимуть не тільки зміни стану конструкцій, але й їх переміщенню або (в оптимумі) навіть самовідновленню. При цьому саме на армовані пластики (ІВПКМ) серед усього спектра високих технологій покладають найбільші перспективи при створенні ІПКМ. Слід відзначити, що спроби створення більш дешевих матеріалів призводять до отримання неконкурентоспроможних у порівнянні з іншими матеріалами виробів. Незважаючи на вищевказані проблемні ситуації, шляхи розвитку і комерціалізації ВПКМ лежать у сфері високих технологій і, зокрема, в технології ІМ [12, 13].

Висновок. Проаналізовані основні використовувані матеріали, їх властивості, що обумовлені відповідними фізичними ефектами, а також особливості пристроїв та базових технологій, що застосовуються для одержання функціональних полімерних композиційних матеріалів конструктивного призначення, які експлуатуються в умовах складного напружено-деформованого стану та дії термосилових факторів.

Розв'язок досліджуваних задач науково-технічного характеру буде сприяти підвищенню ефективності базових процесів та удосконалення обладнання для одержання виробів з ІПКМ, забезпечить значну економію енергоресурсів, а також поліпшить екологічну обстановку й умови техніки безпеки при виробництві а інтелектуальних полімерних виробів. Це, в кінцевому результаті, буде сприяти економічному та соціальному прогресу в Україні.

1. Уорден К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение [текст] / К. Уорден. М.: Техносфера, 2006. – 224с.
2. Михайлин Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы [текст] / Ю. А. Михайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – 660 с.
3. Тимошков П.Н. Современные технологии производства полимерных композиционных материалов нового поколения / П.Н. Тимошков, Д.И. Коган // Труды ВИАМ. – 2013. – №4 (viam-works.ru).
4. Песецкий С.Н. Полимерные композиты технического назначения / С.Н. Песецкий // Наука и инновации (Москва). – 2013. – №9 (127). – С.7 – 10.
5. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года / Е.Н. Каблов // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №2. – С. 7 – 17.
6. Івіцький І. І. Моделювання введення інтелектуальних датчиків у розплави полімерного композиційного матеріалу / І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський, В. М. Куриленко // Технологічний аудит та резерви виробництва. — 2016. — №5/3(31). — С. 22—26.
7. Sakharov, A. S. Modeling of Polymer Melting Processes in Screw Extruder Channels / A. S. Sakharov, A. E. Kolosov, V. I. Sivetskii, A. L. Sokolskii // Chemical and Petroleum Engineering. – 2013. – Vol. 49, Issue 5-6. – P. 357–363.
8. Колосов О.С., Сівецький В.І., Панов С.М. Технологія одержання багатокомпонентних епоксиполімерів із застосуванням направленої фізико-хімічної модифікації. — К.: НТУУ "КПІ", 2010. — 220 с.
9. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Fibreoptic.jpg>
10. Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material / I. Ivitskiy, V. Sivetskiy, V. Bazhenov, D. Ivitska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. — Vol. 1. — №5(85). — P. 4—9.
11. Kolosov, A. E. Effective hardware for connection and repair of polyethylene pipelines using ultrasonic modification and heat shrinkage. Part 2. Production bases for molding of epoxy repair couplings with shape memory / A. E. Kolosov, O. S. Sakharov, V. I. Sivetskii, D. E. Sidorov, S. O. Pristailov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2011. – Vol. 47, Issue 3-4. – P. 210–215.
12. Сівецький В. І. Методи та пристрої для виготовлення виробів з інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький, О. Є. Колосов, В. М. Куриленко // Вісник НТУ «ХПІ». Механіко-технологічні системи та комплекси. — 2016. — №4. — С. 95—101.
13. Сівецький В.І. Технології і устаткування для формування виробів з традиційних та інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів [текст] / В.І.Сівецький, О.С. Колосов, О.Л. Сокольський, І.І. Івіцький. – К.: ВПІ ВПК «Політехніка», 2017. – 120 с.

Стаття надійшла до редакції 13.04.2017.

Рецензенти: Пащенко Євген Олександрович, професор, доктор технічних наук, зав. відділом ІНМ ім. В.М. Бакуля НАНУ. Тел.: (044) (044) 430-76-94, E-mail: lab6_1@ism.kiev.ua
 Петухов Аркадій Дем'янович, професор, доктор технічних наук, професор кафедри ХТКМ КПІ ім. Ігоря Сікорського. Тел.: (044) 406-86-05, E-mail: petuchov36@ukr.net