

УДК 620.168(045)

**В.О. Краля**, к.т.н., проф.  
**О.М. Джоган**, пров. конст.  
**О.П. Костенко**, асп.

## МЕТОД ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРОСОЧУВАННЯМ РОЗЧИНОМ ЗВ'ЯЗУЮЧОГО

*Запропоновано метод виготовлення деталей просочування розчином паспортизованого зв'язуючого на оснастці під вакуумним мішком.*

*Among a good deal of ways of part manufacturing from composite materials using of infusion methods of impregnation of a fiber reinforcement on/into the mold very increasing now. For eliminating this gap and piling up a knowledge about peculiarities of a process of infusion impregnation under vacuum bag and part manufacturing with infusion ways a method of part making of impregnation by solution of licensed resin on the mold under a vacuum bag is offered.*

**зв'язує, інфузійне просочування, наповнювач, полімерно-композиційні матеріали**

### Постановка проблеми

Композиційні матеріали (КМ) та полімерно-композиційні матеріали (ПКМ) завдяки комплексу унікальних властивостей широко застосовуються у техніці.

На цей час відомо багато технологічних процесів переробки КМ у виробі різних розмірів, конфігурації і призначення.

Основні технологічні процеси формоутворення виробів з ПКМ такі:

- 1) контактне формування:
  - ручне викладання;
  - напилення;
  - автоматизоване викладання;
- 2) формування з еластичною діафрагмою:
  - вакуумне;
  - вакуумно-автоклавне;
  - вакуумно-прес-камерне;
- 3) формоутворення тиском:
  - просочення під тиском;
  - просочення у вакуумі;
- 4) пресування у формах:
  - пряме;
  - виліване;
  - термокомпресійне;
- 5) намотування:
  - «мокре»;
  - «сухе»;
- 6) пултрузія та її аналог – екструзія [1];
- 7) попереднє формування заготовок і матів.

Кожний технологічний процес має свої особливості, переваги і недоліки.

Крім того, кожний процес зумовлений обмежувальними технологічними можливостями формоутворення виробів, параметрами процесу (тиск, температура, швидкість формування),

геометрії, форми, рівнем автоматизації та реалізації вихідної міцності компонентів і т.д. Ці можливості, з одного боку, закладені в самому методі формоутворення, а з іншого – обмежені параметрами технологічного обладнання та оснастки.

Серед багатьох методів виготовлення деталей з ПКМ останнім часом найчастіше обирають інфузійні (формоутворення тиском) методи просочення наповнювача на/в оснастці – VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) [2–4] і RTM (Resin Transfer Molding) [5–9].

### Аналіз досліджень

Технологічний процес виготовлення виробів за методами VARTM і RTM такий:

- на форму або оснастку за необхідності наносять антиадгезійний шар і гелькоат;
- викладають пакет із шарів сухого армуючого наповнювача (скло-, органо-, вуглетканини, мату або стрічки тощо);
- на сухий наповнювач викладають засоби для подання і розповсюдження зв'язуючого, а також засоби для створення вакууму (лише для методу VARTM);
- виготовляють і герметично приклеюють вакуумний мішок поверх викладки (метод VARTM) або встановлюють відповідну форму (метод RTM);
- проводять просочення зв'язуючим унаслідок різниці тиску за допомогою трубок його подачі зв'язуючого.

Основні переваги інфузійних методів :

- висока повторюваність і точність отриманого виробу особливо для методу RTM;

- виготовлення виробу з інтегрованими закладними елементами (втулки, грибки, гайки, посилення, підкріплення);
  - немає обмежень за терміном викладання армуючого наповнювача в умовах цеху (втрата липкості або затвердіння зв'язуючого вище допустимої межі) і пов'язана з цим можливість виготовлення великогабаритних виробів;
  - висока монолітність виробу, пористість не перевищує 0,5–1 %;
  - використання армуючих наповнювачів, недоступних для традиційних методів через певні обмеження (розміри, способи отримання), тканив дво- і тривимірних наповнювачів, пакетів (preforms), утворених з потрібної кількості шарів з різною орієнтацією волокон, витканих або скріплених разом клейкими або липкими сполуками (tackifiers, binders);
  - отримання складної геометрії, зниження обмежень на форму деталей;
  - отримання високої якості поверхні деталі;
  - виключення з технологічного ланцюга операцій виготовлення препрегу, його транспортування і зберігання, а також деякого технологічного обладнання (просочувального обладнання для отримання препрегу, холодильних і морозильних камер для зберігання);
  - підвищення культури виробництва (робота з сухим армуючим наповнювачем, істотне зниження контакту працівника зі зв'язуючими та парами їх компонентів);
  - зменшення кількості шкідливих викидів в атмосферу (розчинники тощо);
  - зниження енергозатрат і собівартості технологічного процесу;
  - зниження невиробничої витрати матеріалів (не більше 1–5 %);
  - можливість механізації та автоматизації операцій;
  - зниження вимог до кваліфікації працівників.
- До недоліків слід віднести:
- немає досвіду застосування подібних технологій в авіації країн СНД, специфічний підхід до створення технологічних процесів, оснастки;
  - наявні зв'язуючі для процесів RTM та VARTM мають невисокі теплостійкість і механічні характеристики у стверділому стані;
  - малу номенклатуру паспортизованих RTM і VARTM зв'язуючих;
  - складну високоточну оснастку, особливо для процесів RTM;
  - необхідність застосування допоміжного обладнання, технологічних матеріалів.

Як приклад аерокосмічних конструкцій, виконаних процесами RTM та VARTM за межами країн пострадянського простору можна назвати:

- елементи основної опори шасі гвинтокрила NH-90;
- лонжерони з синусоїдальними стінками, шпангоути переднього паливного баку, створки повітророзбірника і стрингери для інших агрегатів літака F-22;
- обтікач пілона несучого гвинта, основа навіски редуктора гвинтокрила CH-47;
- кесон кіля літака Falcon 7X.

### Просочування розчином зв'язуючого

Для виготовлення авіаційних конструкцій допускаються матеріали, паспортизовані авіаційною владою. Досвід виготовлення деталей методом RTM в СНД дуже обмежений, зокрема, (баки для хімікатів) [10], майже зовсім немає інформації про застосування VARTM методів.

Як зв'язуючий використано розчин 5-211БН, як оснастку можна використати металеву або пластикову форму будь-якої конфігурації.

До складу розчину зв'язуючого 5-211БН входить:

- епоксидна смола ЕД-20 (ГОСТ 10587): продукти поліконденсації дифенілпропану з епіхлоргідрином в луговому середовищі;
- галагеновісна епоксидна смола УП-631У (ТУ 6-05-1689-79): продукт конденсації епіхлоргідрини з тетрабромдифенілпропаном;
- фенольна смола резольного типу СФ-341А (ГОСТ 18694-80);
- спирто-ацетонова суміш у співвідношенні 1:1 ректифікованого етилового спирту (ГОСТ 5967-67) і технічного ацетону (ГОСТ 2603-71).

Спочатку досліджували вибір належної концентрації зв'язуючого 5-211БН для просочування. Стандартна концентрація зв'язуючого 5-211БН для виготовлення препрегів – 55 %.

Експериментальні роботи було проведено з концентрацією 50, 55, 60 та 65 %. Зменшення концентрації розчину менше ніж 50 % значно погіршує якість майбутнього виробу, а збільшення понад 65 % значно ускладнює процес просочування. Зв'язуюче з потрібною концентрацією отримують двома способами:

- для отримання концентрації понад 55 % зв'язуюче випаровується з допомогою відкритої сушарки у приміщенні;

– для отримання концентрації менше ніж 55% зв'язуюче розбавляють розчинником до потрібної щільності і в'язкості розчину за заданої температури.

При цьому фіксується температура повітря і розчину, щільність розчину зв'язуючого і його в'язкість. Температуру вимірюють термометром, щільність – ареометром АОН-2, в'язкість – вискозиметром ВЗ-246.

Експериментальні зразки виготовлено інфузійним просочуванням з 2, 4 і 8 шарів склотканини Т-10-14 сатинового плетіння, направлення основи тканини – 0°.

Після просочування зразки піддавали вакуумно-автоклавній термообробці за традиційним режимом для розчину зв'язуючого 5-211БН.

Проведено випробовування зразків на розтягнення (ГОСТ 11262-80), стиснення (ГОСТ 4651-82), вигин (ГОСТ 4648-71) та фізико-хімічний аналіз. Механічні характеристики пластику під час просочування розчином зв'язуючого різної концентрації і з різною кількістю шарів наведено в таблиці.

Найбільш якісні результати отримано на пластику з чотирьох шарів після просочення розчином з концентрацією 60–65 %.

Зі зростанням товщини пакета вміст зв'язуючого зменшується, за непрямыми вимірюваннями пористість збільшується. Відносно високі характеристики пластику за концентрації 50 % обумовлено значно більшим часом витримки деталі під вакуумом після просочування, що зменшує пористість.

Оскільки виготовлення великогабаритних деталей обмежує процес гелювання зв'язуючого до повного просочування наповнювача, для підвищення швидкості просочування було проведено експерименти з метою виявлення найкращого транспортного каналу.

Для пришвидшення розповсюдження зв'язуючого у наповнювачі було розглянуто різні варіанти транспортних каналів:

- поверхневий шар з лавсанової тканини;
- полоси склорівінгової тканини;
- сітки різноманітних матеріалів з різними розмірами чарунок.

#### Механічні характеристики пластику

Номер експерименту	Концентрація зв'язуючого, %	Кількість шарів	Вміст зв'язуючого, % вагових	Межа міцності, кгс/мм <sup>2</sup>		
				на розтягнення	на стиснення	на вигин
1	50	2	26,9	–	–	–
		4	28,0	55,45	50,4	102,8
		8	27,3	74,0	58,5	58,3
2	55	2	26,8	–	–	–
		4	23,0	54,0	50,6	80,9
		8	20,0	58,9	48,4	42,9
3	60	2	31,1	–	–	–
		4	27,8	56,3	52,4	–
		8	23,4	58,1	54,6	–
4	65	2	29,3	–	–	–
		4	28,1	57,5	49,1	–
		8	24,9	68,0	58,8	–
Паспортні дані	–	–	–	58,0	60,0	86,0

Застосування транспортних каналів пришвидшило просочування у 1,5–3 рази. Найбільша швидкість спостерігалася на склосітці з тефлоновим покриттям з чарунками 3×3 мм.

Наступним етапом роботи було виготовлення з ПКМ розробленим методом плоскої панелі. Основна обшивка панелі складалася з чотирьох шарів склотканини Т-10-14, напрямок основи тканини – 0°.

Стрингер у вигляді рифту виготовлено з пінопласту Rohacell 71 WF трапецевидного профілю. Підсилення на ньому викладено з двох шарів склострічки ЛСК-ВМ-80-79. Для подання зв'язуючого використано поліетиленову спіральну трубку фірми Airtech. Вакуумний мішок виготовлено з м'якої нейлонової плівки високої еластичності Ipplon®КМ 1300 фірми Airtech (рис. 1).



Рис. 1. Панель із пінопластовим стрингером

Деталь просочувалась 60 %–ним розчином зв'язуючого 5-211БН під вакуумним мішком, після чого було проведено термообробку за режимом зв'язуючого 5-211БН.

З виготовленої деталі було вирізано пласкі зразки-свідки, на яких досліджували механічні і фізико-хімічні властивості:

- вміст зв'язуючого 27,0 % вагових;
- пористість 0,9 % об'ємних;

- межа міцності на вигин 52,5 кгс/мм<sup>2</sup>;
- межа міцності на стиснення 37,5 кгс/мм<sup>2</sup>.

Заключним етапом роботи стало виготовлення авіаційної деталі методом інфузії 60 %–ним розчином зв'язуючого 5-211-БН, отримано позитивні характеристики, пористість становила 0 % (рис. 2).



Рис. 2. Натуральна авіаційна деталь

## Висновки

1. Запропонований метод дозволяє використовувати існуючі в авіації паспортизовані зв'язуючі для виготовлення деталей інфузійними процесами.
2. Для тонкошарових конструкцій (до чотирьох шарів тканини наповнювача типу Т-10-14) запропонований метод дає характеристики, які фактично відповідають паспортним. Це дає можливість рекомендувати метод для виготовлення мало- та середньонавантажених елементів техніки.
3. Найбільш якісні результати отримані з 60–65 %–ю концентрацією розчину зв'язуючого. Збільшення концентрації зв'язуючого значно зменшує відстань просочування.
4. Для прискорення просочування запропоновано використовувати транспортні канали у вигляді стрічок з нещільних структур уздовж шляху зв'язуючого.
5. Перспективно застосовувати запропонований метод для ремонту авіаційної техніки.

**Література**

1. Буланов И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учеб. для вузов / И.М. Буланов, В.В. Воробьев. – М.: МГТУ им. Н.С. Баумана, 1998. – 516 с.
2. *Composite materials handbook*. Vol. 3. Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis. VIL-HDBK-17-3F. Vol/ 3 of 5. – 17 June 2002. – 693 p.
3. *Patent* No 6,964,561 B2 (US), Int. Cl.<sup>7</sup> B29C 70/48. High-performance infusion system for VARTM fabrication/ Michael Louderback, Daniel Brennan, Raymond Cabales; V System Composites, Inc. – Appl. No. 10/420,398; Filed: Apr. 22, 2003; Date of Patent: Nov. 15, 2005.
4. *Morgan P.* Carbon fibers and their composites / P. Morgan. – Boca Raton: Taylor&Francis, 2005. – 1153 p.
5. *Patent* No 4,762,740 (US), Int. Cl.<sup>4</sup> B32B 3/02. Resin transfer molding core, perform and process/ Carl F. Johnson, Norman G. Chavka; Ford Motor Comp. – Appl. No. 61,763; Filed: Jun. 15, 1987; Date of Patent: Aug. 9, 1988.
6. *Patent* No 5,187,001 (US), Int. Cl.<sup>5</sup> B29C 45/77. Resin transfer molding apparatus/ James K. Brew; GenCorp Inc. – Appl. No. 806,821; Filed: Dec. 6, 1991; Date of Patent: Feb. 16, 1993.
7. *Patent* No 5,306,448 (US), Int. Cl.<sup>5</sup> B29C 43/10. Method for resin transfer molding process/ Robert V. Kromrey; United Nechnologies Corp. – Appl. No. 138,776; Filed: Dec. 28, 1987; Date of Patent: Apr. 26, 1994.
8. *Patent* No 5,464,337 (US), Int. Cl.<sup>6</sup> B29C 70/44. Resin transfer molding system/ Edward Bernardon, Michael F. Foley; The Charles Stark Draper Laboratories. – Appl. No. 271,561; Filed: Jul. 7, 1994; Date of Patent: Nov. 7, 1995.
9. *Patent* No 5,588,392 (US), Int. Cl.<sup>6</sup> B63B 5/24. Resin transfer molding process/ Francis V. Bailey; Outboard Marine Corp. – Appl. No. 423,783; Filed: Apr. 18, 1995; Date of Patent: Dec. 31, 1996.
10. *Руководство по технологичности самолетных конструкций / под руководством П.Н. Беянина*. – 4-е изд. – М.: НИАТ, 1983. – С. 393.

Стаття надійшла до редакції 04.06.09.