

ПІДХОДИ ДО ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕСУРСОЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИСОКОЯКІСНИХ РЕАКТОПЛАСТИЧНИХ КВМ

Колосова О.П., асистент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут» (Україна, м. Київ)

Анотація – проаналізовано існуючі підходи та особливості геометричного моделювання ресурсоенергоефективних технологічних процесів та обладнання для виготовлення високоякісних реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів із застосуванням інтенсифікуючої ультразвукової обробки.

Ключові слова – структурно-параметричне геометричне моделювання, композиційно-волокнистий матеріал, реактопласт, ультразвук, міцність, бездефектність, проектування, комп'ютер.

Вступ. Останнім часом у багатьох галузях промисловості (авіаційній, ракетно-технічній, машинобудівній, суднобудівній, електротехнічній, автомобільній та ін.), у сільському господарстві, вітроенергетиці, медицині, спортивній індустрії тощо значно збільшилось використання різноманітних конструкцій та виробів з високоміцних реактопластичних композиційноволокнистих матеріалів (КВМ), одержуваних методом «мокрого» намотування безперервного армуючого наповнювача, просоченого полімерним зв'язуючим (ПЗ). Це зумовлює актуальність автоматизованого проектування технологій та обладнання для їх виробництва [1].

Протягом останніх десятиріч цей напрямок конструкторсько-технологічного проектування розвивається досить активно. Проте у багатьох випадках, незважаючи на досягнутий прогрес у виконаних дослідженнях щодо проектування ряду технологічних операцій і обладнання для виготовлення КВМ, й дотепер відсутня ґрунтовна теоретична та експериментальна база для автоматизованого проектування т.зв. «базових» процесів і технологічного обладнання, що використовується при їх реалізації.

Загалом під базовими розуміють процеси, що складають основу будьякого технологічного циклу виробництва досліджуваних виробів з КВМ [1]. До них, насамперед, відносять процеси обробки просочувального рідкого ПЗ, процеси: «вільного» просочування орієнтованого волокнистого наповнювача (ОВН) рідким ПЗ, дозованого нанесення ПЗ на попередньо просочений ОВН, а також безперервного «мокрого» намотування за заданим законом просоченого ОВН (волокон, тканин або джгутів) на оправку.

Використовувані для виготовлення джгутів або склотканин нитки, з яких сформовано ОВН, складаються з численних елементарних мікрОВОЛОКОН діаметром 3–100 мкм (лінійною щільністю до 0,1 текс), а їх кількість у нитці становить 1000 або більше.

Причому в структурі нитки більш ніж 25% від її об'єму становлять мікропори, в яких знаходиться защемлене повітря, яке при «вільному» просочуванні необхідно витіснити [1].

Тому у мікропорах при заміщенні защемленого повітря просочувальною рідиною діють капілярні закони. Відомо, що класичні задачі просочування капілярно-пористих тіл зводяться до знаходження ефективного (еквівалентного) капілярного радіуса циліндричного капіляра та знаходження його структурних характеристик (пористості, внутрішньої поверхні) [2]. Окрім того, внаслідок стохастичного розміщення мікрОВОЛОКОН у реальній структурі просочуваного ОВН за певного зусилля натягнення при просочуванні і намотуванні [3] є доцільним застосування функції розподілу пор за розмірами для коректного знаходження еквівалентного капілярного радіусу [2].

Отримати шукану функцію розподілу пор за розмірами в принципі можливо чисто експериментальним шляхом, наприклад, методом ртутної порометрії [4] або рентгенівської комп'ютерної томографії. Однак такі підходи вимагають використання коштовного обладнання. Тому в роботі [5] був вибраний інший підхід, який полягає в попередній побудові віртуальної (комп'ютерної) моделі структури нитки і отриманні необхідних даних за результатами її дослідження. На думку автора [5], це дозволяє вивчити розподіл пор за розмірами на рівні мікрОВОЛОКОН і на цій основі розробити нові технічні рішення для вдосконалення процесу «вільного» просочення.

Завдання в [5] полягало в знаходженні міжцентрових відстаней контурів перетинів волокон (кіл) по вертикалі і горизонталі, що відповідають заданій пористості структури нитки, якщо наперед відомий радіус волокна. При цьому передбачається, що пористість нитки може досягати 50%, що досить далеко від реальності. Рішення поставленого в [5] завдання зводиться до багаторазового обчислення за відомою формулою величини пористості до отримання необхідної її величини при зміні міжцентрових відстаней між волокнамиколами.

Причому під пористістю автор [5] розуміє міжцентрову відстань між волокнами, що є не досить коректним з геометричної (й фізичної) точки зору. Однак значні величини отриманих допустимих похибок (у т.ч. за величиною пористості) і суттєве відхилення модельної кривої розподілів від експериментальної кривої зумовлюють обмежене застосування розробленої методики (в основному для приблизної попередньої оцінки).

Безперервне «мокре» намотування просочених рідким ПЗ волокон здійснюється на оправку, яка, зазвичай, має конфігурацію внутрішньої поверхні майбутньої конструкції. При цьому просочені волокна укладаються з деяким натягом. Останній є одним з найбільш значущих технологічних чинників, що дозволяє істотно впливати на формування структурних та міцних

показників затверділих КВМ. Адже натяг забезпечує «прямолінійність» волокон (й відповідно міжволоконних капілярних радіусів) та їх щільну укладку у структурі.

Залежно від типу армуючого матеріалу (ОВН), його геометрії, використовуваного полімерного зв'язуючого, а також габаритів виробу, що формується (т.зв. «масштабний ефект»), може змінюватися характер впливу зусилля натягу на структуру та властивості КВМ [1]. Таким чином, натяг при просочуванні і «мокрому» намотуванні – це фактор, який регулює початковий напружений стан двокомпонентної системи КВМ. Змінюючи зусилля натягу ОВН при просочуванні і «мокрому» намотуванні за певним автоматизованим алгоритмом, можна змінювати умови (кінетику) протікання вищезгаданих базових процесів формування КВМ.

Так як кінцевою метою геометричного моделювання базового процесу «вільного» просочування є його комп'ютерна модель, в якій можна аналізувати і коригувати схему укладки волокон у структурі ОВН, у тому числі в залежності від зусилля натягу ОВН при просочуванні, а також прогнозувати кінетичні параметри процесу просочення в залежності від значення ефективного капілярного радіуса, то відсутність адекватних підходів до його коректного, визначення розподілу волокон у мікроструктурі ОВН з урахуванням його стохастичного характеру, є основною важкістю при реалізації такої моделі.

Тому не дивно, що формули для знаходження теоретичного еквівалентного капілярного радіусу були отримані переважно для регулярних (тканини), а не для стохастичних волокнистих структур [1].

Незважаючи на досягнутий прогрес у сфері автоматизованого проектування виробництва КВМ, у багатьох випадках проектні рішення, що приймають розробники у тій чи іншій ситуації, ґрунтуються на їх особистому досвіді та часто будуються переважно на евристичних засадах. Вирішення цієї проблеми у значній мірі можливе шляхом використання інформатизації виконуваних проектно-технологічних робіт у хімічному та спеціальному машинобудуванні.

У свою чергу, фундаментальну основу інформатизації становлять саме геометричні моделі тих чи інших процесів чи обладнання, які формуються за допомогою різноманітних комп'ютерних автоматизованих систем, що, у свою чергу, дозволяють здійснювати оптимізацію геометричних параметрів досліджуваних технічних об'єктів.

З цієї точки зору також є важливою геометрична оптимізація конструкційних параметрів застосовуваного технологічного обладнання, що широко використовується для інтенсифікації технологічних процесів [6] та для одержання бездефектної структури затверділих КВМ, а саме у вигляді ультразвукових (УЗ) хвилеводів-концентраторів та дозаторів.

Таким чином, можна стверджувати, що проведення комплексної оптимізації при виготовленні високоякісної технічної продукції з реактопластичних КВМ обумовлює доцільність проведення комплексних наукових досліджень щодо розроблення більш досконалих прийомів, методів

та алгоритмів математичного відтворення досліджуваних технічних об'єктів та процесів.

Перспективним інструментарієм реалізації вищезазначеного напрямку є комп'ютерне структурно-параметричне геометричне моделювання (СПГМ), яке можна вважати ефективним методом сучасної прикладної геометрії. Адже методологія СПГМ дозволяє інтегровано реалізувати базові засади сучасного автоматизованого проектування технологічних процесів та обладнання [7], зокрема, для виготовлення намотувальних виробів з реактопластичних КВМ.

Таким чином, можна констатувати, що методи сучасної прикладної геометрії, що використовуються на практиці, і які дозволяють досліджувати вплив геометричної форми структурних елементів (ОВН) реактопластичних КВМ та поверхонь формуючого (УЗ) технологічного обладнання на властивості затверділих композитів, набувають широкого застосування, і тому є актуальними [8], у т.ч. з точки зору досягнення ресурсоенергоефективності.

Напрацювання науковців кафедри НГІКГ НТУУ «КПІ» та інших науковців з досліджуваної проблематики. На кафедрі нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки (НГІКГ) НТУУ «КПІ» науковою школою під керівництвом д.т.н., професора, заслуженого працівника народної освіти України Ваніна В.В. уперше в Україні розроблено сучасну методологію структурно-параметричного варіантного формоутворення (геометричного моделювання) складних технічних систем у машинобудуванні в умовах сучасних інтегрованих інформаційних технологій [9].

В рамках виконаних досліджень науковцями вищевказаної наукової школи запропоновано застосування структурно-параметричних геометричних засобів для пошуку глобальних екстремумів у різноманітних задачах оптимізації. Зокрема, розроблено алгоритм візуалізації багатовимірних об'єктів, здійснено програмну реалізацію розроблених математичних моделей та проведено комп'ютерні експерименти для апробації одержаних результатів у машинобудуванні та у літакобудуванні [9].

Нині на кафедрі НГІКГ продовжуються теоретичні та експериментальні роботи з геометричного моделювання окремих процесів та обладнання для виготовлення реактопластичних КВМ. Так, у роботі [10] вирішувалась актуальна проблема геометричного моделювання формоутворення оболонок нерозгортних поверхонь, виготовлених із полімерних композиційних матеріалів на тканинній основі.

Ці дослідження були продовжені в роботах [11–12]. У праці [11] вивчались окремі аспекти щодо автоматизації намотувального обладнання шляхом геометричного моделювання процесу намотування, зокрема, дослідження форми поверхні полімерної стрічки з волоконних оправок різної форми при виробництві композитних деталей.

В роботі [12] започатковано застосування комп'ютерного СПГМ для здійснення комплексної оптимізації технологічного процесу створення технічних виробів з композитних матеріалів на прикладі виготовлення частини трубопроводу методом намотування з вуглецевих композитів.

В роботах інших вітчизняних науковців, що не входять до наукової школи кафедри НГІКГ, наприклад, [13], вивчались питання геометричного моделювання структурних армуючих елементів КВМ на прикладі намотування одиночної нитки на поверхні обертання. В результаті проведених досліджень була розроблена і впроваджена комплексна модель розрахунку форми меридіану фасонних поверхонь обертання, у яких середня кривизна змінюється вздовж осі за наперед заданим законом, та за умови зміцнення цих поверхонь шляхом геодезичного намотування нитки.

Проблема автоматизації намотувального обладнання шляхом геометричного моделювання процесу намотування та вдосконалення використовуваних для цього адаптивних верстатів з системою «технічного зору» досліджувалась в роботі [14], де аналізувались базові схеми армування виробів у вигляді поверхонь обертання, використовуючи для армування плоску полімерну стрічку.

Що стосується робіт зарубіжних вчених, то в них проблема розроблення підходів до геометричного моделювання технологічних процесів намотування і викладення конструкцій з КВМ також займає чільне місце [15 – 17]. Так, в монографії [15] для математичного опису поверхонь оправок використовували метод Кунса, створюючи на його основі тривимірні об'єкти. Інший клас модельованих об'єктів створювався за допомогою плоских паралельних перерізів на точковому каркасі.

Серед найбільш значних результатів останніх років, що стосуються досліджуваної проблеми [16, 17], можна відзначити такі. Розроблено новий математичний апарат для геометричного моделювання технологічних процесів намотування і викладення конструкцій з КВМ. Створено теоретичні основи цих процесів, узагальнюючі всі існуючі методи моделювання цих процесів. Розроблено комп'ютерні моделі, що слугують для якісного аналізу обраної схеми укладання стрічки на поверхню на предмет можливості виготовлення виробу за даною схемою армування.

Що стосується особливостей геометричного моделювання нестационарного технологічного процесу як такого, то тут насамперед слід відзначити труднощі в геометричному та комп'ютерному моделюванні зазначених процесів у порівнянні зі стаціонарними процесами, до яких можна віднести процеси геодезичного намотування та викладки нитки чи стрічки на оправку різної форми геометричної поверхні.

Як приклад, можна навести роботу [18], в якій описано створену методологію геометричного моделювання для проектування технологічних параметрів процесів на прикладі перебігу фізичних процесів та розв'язання на визначених засадах завдань прогнозування й управління цими процесами. Як практична реалізація проведених досліджень, автором була запропонована оптимізація технологічного процесу фільтрування суспензій на камерних фільтр-пресах з вертикальним розташуванням фільтрувальних плит та впровадження розроблених методик у процес проектування й експлуатації фільтрувального обладнання в промисловості, комунальному господарстві та інших галузях.

Висновки. Таким чином, вище було проаналізоване коло вирішених задач з позицій геометричного моделювання досліджуваних процесів та обладнання для одержання високоміцних й бездефектних реактопластичних КВМ.

Бібліографічний список

1. *Цыплаков О.Г.* Научные основы технологии композиционноволокнистых материалов. Ч.1. / *О.Г. Цыплаков.* – Пермь, 1974. – 317 с.
2. *Аксельруд Г. А.* Введение в капиллярно-химическую технологию / *Г. А. Аксельруд, М. А. Альтишулер.* — М.: Химия, 1983. — 264 с.
3. *Ванин Г. А.* Основы статистической теории волокнистых сред / *Г. А. Ванин* // Механика композитных материалов. — 1982. — № 6. — С. 1043—1051.
4. *Чизмаджев Ю. А.* Макрокинетика процессов в пористых средах / *Ю. А. Чизмаджев, В. С. Маркин, М. Р. Тарасевич и др.* — М.: Наука, 1971. — 364 с.
5. *Сыс В. В.* Оценка распределения межволоконных пор по размерам методом моделирования структуры нити / *В.В. Сыс* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №6/10 (66). – С. 47–51.
6. *Новицкий Б.Г.* Применение акустических колебаний в химикотехнологических процессах / *Б.Г. Новицкий.* – М.: Химия, 1983. – 192 с.
7. *Ванін В.В.* Визначення та основні положення структурнопараметричного геометричного моделювання / *В.В. Ванін, Г.А. Вірченко* // Геометричне та комп'ютерне моделювання: зб. наук. праць. – Вип. 23. – Харків: ХДУХТ, 2009. – С. 42-48.
8. *Колосова О.П.* Моделювання процесів виготовлення реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів [монографія] / *О.П. Колосова, В. В. Ванін, Г.А Вірченко, О.Є. Колосов.* – К.: ВПК «Політехніка» НТУУ «КПІ», 2016. – 164 с.
9. <http://ng-kg.kpi.ua/>
10. *Залевський С.В.* Геометричне моделювання тканинних наповнювачів текстолітових конструкцій технічних виробів : автореф. дис ... канд. техн. наук : 05.01.01 - прикладна геометрія, інженерна графіка / *С.В. Залевський*; Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. МОНУ.– К.: 2011.– 23 с.
11. *Ванін В.В.* Дослідження форми поверхні полімерної стрічки при виробництві композитних деталей / *В.В. Ванін, Г.П. Грязнова* // Сучасні проблеми моделювання. – 2014. – №3. – С. 34 – 38.
12. *Ванин В.В.* Структурно-параметричний метод для моделювання технологічного процесу створення виробів з композитів / *В.В. Ванин, Г.П. Грязнова, А.Г. Допира, С.Л. Шамбина* // SWorld [ел. ресурс]. – 16–26 December,

2014. Режим доступу: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences414/applied-geometry-engineering-graphics-ergonomics-and-safety-of-life-414/23604-414-053>

13. *Руденко С. Ю.* Геометричне моделювання фасонних поверхонь обертання, зміцнених намотуванням нитки: автореф. дис ... канд. техн. наук : 05.01.01 – прикладна геометрія, інженерна графіка / *С. Ю. Руденко*; Нац. ун-т цив. зах. ДСУНС. – Х., 2013. – 24 с

14. *Куценко Л.М.* Поверхні обертання зі змінної уздовж осі кривиною меридіанів та їх зміцнення шляхом намотування кевларової нитки / *Л.М. Куценко, С.Ю. Руденко* // Міжвузівський збірник "Комп'ютерноінтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – Вип. 6. – Луцьк: ЛНТУ, 2011 р. - С. 148-153.

15. *Аюшев Т.В.* Геометрические вопросы адаптивной технологии изготовления конструкций намоткой из волокнистых композиционных материалов / *Т.В. Аюшев.* – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2005. – 212 с.

16. *Калинин В. А.* Теоретические основы геометрического моделирования процессов намотки и выкладки конструкций из волокнистых композиционных материалов: автореф. дис. доктора техн. наук: 05.01.01– инженерная геометрия и компьютерная графика / *В.А. Калинин*; Моск. гос. авиац. ин-т. – М., 1997. – 49 с.

17. *Битюков Ю.И.* Геометрическое моделирование технологических процессов намотки и выкладки конструкций из волокнистых композиционных материалов: автореф. дис. докт. техн. наук : 05.01.01 – инженерная геометрия и компьютерная графика / *Ю.И. Битюков*; Моск. гос. авиац. ин-т. – М., 2010. – 34 с.

18. *Черніков О.В.* Геометричне та комп'ютерне моделювання динаміки процесів зміни об'єктів під впливом заданих чинників (на прикладі фільтрування): автореферат дис. на здобуття наук. ступ. докт. техн. наук: спец. 05.01.01 – «Прикладна геометрія, інженерна графіка» / *О.В. Черніков*; Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. МОНУ. – К., 2008. – 36 с.