

КОЛОСОВА О. П., ас.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ РЕАКТОПЛАСТИЧНИХ КОМПОЗИЦІЙНО-ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

Досліджено перспективність застосування геометричного моделювання технічних засобів для одержання реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів. Проаналізовано базові принципи методології структурно-параметричного геометричного моделювання. Здійснено вибір і обґрунтовано перспективні напрями досліджень. Зазначено, що можливими напрямками досліджень є створення нових або удосконалення існуючих геометричних моделей базових процесів технологічного циклу формування композиційно-волокнистих матеріалів, розвиток методів комп'ютерного моделювання цих процесів та більш широке розповсюдження розроблених методик для моделювання технічних і технологічних засобів формування композиційно-волокнистих матеріалів на базі системного підходу. Це також передбачає розроблення конкретних комп'ютерних моделей ультразвукових трансформаторів швидкості, здійснення їх всебічного аналізу та впровадження отриманих результатів у виробництво.

Перспективи подальших досліджень полягають у збільшенні номенклатури ультразвукових концентраторів, які можна автоматизовано конструювати за допомогою розроблених методик структурно-параметричного геометричного моделювання та розширенні класу кривих, використовуваних для цього, наприклад, за рахунок неоднорідних раціональних параметричних сплайнів вищих порядків.

Ключові слова: параметр, конструкція, технологія, полімер, композит, волокно, реактопласт, геометрія, моделювання.

© Колосова О. П., 2016.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку хімічної, машинобудівної, будівельної, інших галузей промисловості характеризується існуванням величезної кількості реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів (КВМ), сформованих на основі армуючих орієнтованих волокнистих наповнювачів (ОВН) і рідких полімерних зв'язуючих (ПЗ), зокрема епоксидних (ЕЗ) [1]. Тому вибір та обґрунтування режимних параметрів формування КВМ, а також конструктивно-технологічних параметрів формувального обладнання, мають важливе значення. При цьому суттєвою є інтенсифікація технологічних процесів формування КВМ, наприклад, за допомогою низькочастотного ультразвуку (УЗ).

Для обґрунтованого вибору оптимальних технологічних параметрів базових процесів і конструктивних елементів обладнання, призначеного для виготовлення виробів із реактопластичних КВМ, доцільним є використання різних методів моделювання (геометричного і комп'ютерного, а також експериментально-статистичного). При цьому застосування підходу, що передбачає геометричне параметричне моделювання конструктивних елементів обладнання й технологічних параметрів формування КВМ, і використання математичних методів планування експерименту для оптимізації режимних параметрів, дозволяє істотно скоротити кількість необхідних експериментів, а також зменшити затрати на їхнє проведення. Водночас, знайдені оптимальні конструктивні параметри УЗ-обладнання та інструментів, а також технологічні параметри УЗ-оброблення (частота, амплітуда, інтенсивність, тривалість), можуть використовуватись для детермінації конструктивно-технологічних параметрів хвилеводів-концентраторів, просочувального й дозувального обладнання на базі п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) тощо [1].

Метою статті є визначення можливих напрямів застосування геометричного моделювання технічних засобів, призначених для одержання реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів із використанням ультразвукової дії.

Особливості проектування технології та устаткування для одержання реактопластичних КВМ. Складність вирішення задачі проектування технології і устаткування для виробництва реактопластичних КВМ обумовлена необхідністю дослідження комплексу питань, спрямованих на виявлення й вивчення взаємозв'язків між структурно-механічними і геометричними параметрами одержуваних виробів із КВМ, з одного боку, й технологічними факторами їхнього виробництва, з іншого.

При цьому, попри широке використання досягнень і методів фізики, теоретичної механіки та опору матеріалів, чітко вимальовується головний предмет теорії, властивий лише технології одержання виробів із реактопластичних КВМ [1, 2].

Предметом дослідження технології одержання виробів із КВМ є (математичні) закономірності, що встановлюють не тільки взаємозв'язки, але й взаємовплив технологічних чинників, що обумовлюють за тих чи інших наперед заданих (або розрахункових) виробничих умов отримання необхідних експлуатаційних характеристик виробів у межах розрахункових відхилень.

Наявність зазначеного вище предмета досліджень, причинна обумовленість взаємозв'язків різнохарактерних процесів та операцій, спрямованих на одержання виробів заданої якості з мінімальними

затратами праці (за даних умов і часу), математична теорія, що відображає внутрішні технологічні закономірності, свідчать, що аналізовані питання утворюють єдиний комплекс теоретичного базису моделювання (проектування) технології виготовлення виробів із реактопластичних КВМ.

Слід відзначити особливість об'єкта дослідження, яка полягає в тому, що виробництво виробів із КВМ складається з різнохарактерних технологічних процесів, кожен з яких потребує проектування, оснащення та підготовки фахівців певної кваліфікації. Ці процеси проектуються під конкретне обладнання та реалізуються за певних виробничих умов відповідно до теорій, розроблених для кожного з них.

Наприклад, процеси «вільного» просочення ОВН (склоарматури) ґрунтуються на власній теоретичній базі капілярного просочення з використанням геометричних (структурних) моделей наповнювачів і проектуються під конкретні просочувально-сушильні машини. Формування виробів (намотування та ін.) базується на законах механіки нитки. Інші закономірності (фізичні, хімічні і технологічні) покладено в основу одержання рідкого полімерного зв'язуючого для просочення, дозованого нанесення, затвердіння, механічного оброблення тощо.

Попри таке різноманіття, ці процеси взаємно обумовлені та утворюють єдиний виробничий цикл виготовлення конкретного виробу. Усі вони мають загальну особливість – перетворення вихідних матеріалів у готові продукти (заданої якості та експлуатаційних властивостей) з найменшими затратами уречевленої і живої (розумової й фізичної) праці за даних умов.

Тому галузевим конструкторам і технологам потрібні наукові знання, відповідний математичний апарат і програмні продукти, що дозволяють проектувати (моделювати) процеси та обладнання (інструмент) для формування виробів із реактопластичних КВМ, які б із мінімальними затратами забезпечували задані фізико-механічні властивості продукції, точність і чистоту, а також задані геометрію та взаємне розташування утворюваних поверхонь [1].

Загальновідомо, що проектування технологічного процесу передбачає теоретичне вирішення поставлених технічних завдань, оформлених відповідним чином. Структура технологічного процесу визначається поставленими завданнями. Його не проектують взагалі, а розробляють для вирішення конкретних задач виготовлення виробів високої якості з наперед заданими характеристиками за максимальної економічної ефективності виробництва [1, 2].

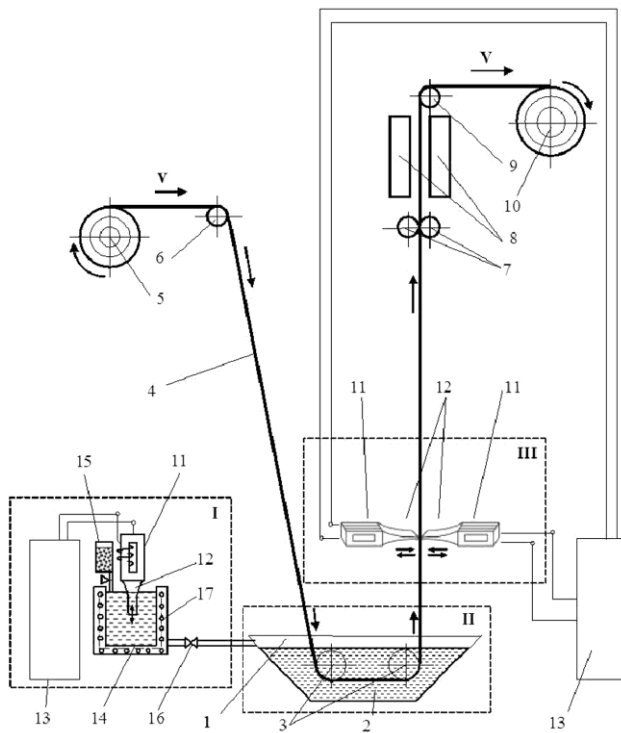
Перед створенням технологічного циклу (процесу) та обладнання (інструменти) для формування виробів із КВМ у проектувальника, зазвичай, є такі вихідні дані: робоче креслення виробу (деталі); технічні вимоги на КВМ і його розгорнута характеристика; технічні вимоги на вихідні матеріали; технічні вимоги на готовий виріб і методи його випробування; відомості про технологічні методи переробки КВМ; дані про обладнання та технологічну оснастку; дані про використовувані типові технологічні процеси; виробничі завдання й характер виробництва; наявність обладнання та його стан, виробничі можливості тощо [1].

Щоб мінімізувати затрати, використовують ефективні методи прогнозування (моделювання) конструкційно-технологічних параметрів з урахуванням специфіки модельованих об'єктів, зокрема, шляхом адаптування методології СПГМ до вирішення конкретних завдань [3].

Типовий технологічний цикл одержання виробів із реактопластичних КВМ. Оптимізація ефективних режимних параметрів виробництва КВМ базується на аналізі типового циклу їхнього формування, що складається з таких стадій (базових технологічних процесів): приготування полімерної (епоксидної) композиції (ЕК) зі складових компонентів та її модифікування наповнювачами, твердниками, розбавлювачами, пластифікаторами тощо (приготування вихідної ЕК); підготовка армуючого ОВН; поєднання ЕК з армуючим ОВН і забезпечення певного співвідношення ЕК у структурі просоченого ОВН за допомогою формоутворювального і формувального оснащення та устаткування (просочування і дозоване нанесення); сушіння просоченого армуючого ОВН; збирання заготовки; фіксація матеріалу або виробу з КВМ заданої форми і розмірів із подальшим твердінням зв'язуючого; механічне оброблення виробу (збирання, твердіння й формування) [1, 2].

Варто відзначити високу ефективність застосування УЗ у формуванні реактопластичних КВМ, зокрема під час приготування рідкого ПЗ, просочення й дозованого нанесення ПЗ на просочений ВН. Це обумовлює необхідність оптимізації конструктивно-технологічних параметрів відповідного обладнання.

На рис. 1 наведено загальну схему виробництва реактопластичних КВМ із використанням комплексного низькочастотного УЗ-оброблення [4], а на рис. 2 – складові елементи однохвильового УЗ-диспергатора [5] на базі складеного ПЕП, що використовується для УЗ-оброблення.



I – блок приготування просочувального ПЗ; II – блок просочування ОВН рідким ПЗ; III – блок дозованого нанесення ПЗ на ОВН; 1 – просочувальна ванна; 2 – рідке ПЗ; 3, 6, 9 – валки; 4 – довговимірний ОВН; 5 – бобіна з сухим ОВН; 7 – відтисні валки; 8 – сушильно-полімеризаційна камера; 10 – бобіна; 11 – УЗ-інструменти; 12 – концентратор УЗ; 13 – УЗ-генератор; 14 – збірник ЕЗ; 15 – збірник твердника ЕЗ; 16 – кран; 17 – терморегулятор

Рис. 1 – Схема приготування рідкого ПЗ, просочення і дозованого нанесення рідкого ПЗ на довговимірний ОВН із використанням комбінованого УЗ-оброблення [4]

Залежно від обраної геометрії, а також розмірів УЗ-концентратора 12 на виході (на торці) отримують певне значення амплітуди A та інтенсивності I УЗ-коливань, що вводяться в рідку ЕК. Контрольованими параметрами під час приготування ЕК є час τ , температура T , амплітуда A , інтенсивність I . Після УЗ-оброблення ЕК у збірнику 14 зі збірника 15 надходить твердник ЕС, відбувається змішування ЕК з її твердником за допомогою УЗ-концентратора 12 протягом декількох секунд, після чого одержують вихідну просочувальну композицію (або ЕЗ). Далі відкривають кран 16 і просочувальну композицію подають у ванну 1. Після цього відбувається змотування з бобіни 5 сухого довговимірного ОВН 4, який після проходження валка 6 надходить у ванну 1, де він просочується рідким ПЗ 2, уже обробленим за допомогою УЗ (блок II на рис. 1). При цьому можливими є декілька структурних форм розташування волокон у перерізі просоченого ОВН, що відповідним чином впливає на кінетику «вільного» просочення ОВН рідким ПЗ.

Після виходу з ванни 1 забезпечують попереднє нанесення ПЗ 2 на довговимірний ОВН 4. Цей матеріал у зоні дозування (блок III на рис. 1) обробляють з обох боків УЗ-інструментами 11 з індивідуальними приводами від УЗ-генератора 13. Інструменти 11 можуть бути розташовані зі зміщенням за довжиною оброблюваного матеріалу 4. Варіювання вмісту ПЗ, рівномірність його розподілу в матеріалі і видалення надлишку зв'язуючого здійснюють, змінюючи потужність інструментів 11 і зусилля їхнього притискання до оброблюваного матеріалу. Остаточне відтискання зв'язуючого здійснюють на валках 7. Потім матеріал надходить у сушильно-полімеризаційну камеру 8, а після сушіння намотується на бобіну 10.

У разі використання ОВН тканого типу використовують УЗ-дозатори у вигляді прямокутних пластин, до основи якої кріплять у регулярному порядку хвилеводи-концентратори з живленням від УЗ-генераторів [4].

Базові принципи методології структурно-параметричного геометричного моделювання. Проектування процесів формування реактопластичних КВМ є складною задачею, оскільки відсутні теоретичні уявлення, математичні залежності й відповідні методики, що дозволяють прогнозувати їхні режимні параметри з достатньою точністю [2, 6]. Тому доцільним є створення обґрунтованої системи уявлень про досліджувані процеси із застосуванням методології структурно-параметричного геометричного моделювання (СПГМ), що дозволяє за невеликих затрат часу отримувати залежності, що описують взаємозв'язки між параметрами і характеристиками проєктованих об'єктів, зокрема деталей та інструментів, а також технологічних процесів їхнього виготовлення [7–12].

Під *структурно-параметричною геометричною моделлю* (СПГМ) розуміють математичний опис досліджуваного геометричного об'єкта або процесу формування з використанням параметричного підходу для визначення його складових елементів (точок, кривих, поверхонь, об'ємних тіл тощо) та варіантних структурних зв'язків поміж



Рис. 2 – Складові елементи типового однохвильового УЗ-диспергатора, виконаного з симетричним пакетним ПЕП [5]

ними із забезпеченням можливості виокремлення необхідних фігур і комплексного ефективного (оптимального) керування формоутворення виробу (елементами технології), чи параметрами технологічного процесу (операції). Під *структурно-параметричним геометричним моделюванням* розуміють сукупність використовуваних прийомів побудови, дослідження та використання об'єктів і процесів, що відтворені за допомогою методології СПГМ.

Виділяють такі принципи математичної реалізації структурно-параметричної методології [3, 7–11]:

– *системного підходу*, що передбачає аналіз досліджуваного об'єкта одночасно і як множини пов'язаних між собою елементів, і як потенційного компонента геометричної фігури вищого ієрархічного рівня;

– *комплексного підходу*, який полягає у пристосуванні геометричної моделі до узгодженого врахування потреб інших математичних описів досліджуваного об'єкта;

– *варіантності*, що полягає у можливості забезпечення геометричною моделлю гнучкого, ефективного, прогнозованого та зручного для користувача створення параметричних і структурних різновидів досліджуваного об'єкта;

– *оптимальності*, який обумовлює наявність у розроблюваній моделі засобів для визначення раціональних прогнозованих параметрів і характеристик відтворюваного предмета чи явища;

– *відкритості та розвитку*, що передбачає можливість оновлення й розширення складових СПГМ.

Під час безпосереднього формоутворення наведений вище перелік може доповнюватися докладними умовами згідно з конкретними вимогами щодо досліджуваного об'єкта.

Адаптація базових принципів СПГМ до конкретних задач передбачає [3, 7–11]:

– аналіз досліджуваного об'єкта та розчленування його на окремі елементи;

– визначення зв'язків між виокремленими елементами, тобто розроблення структури об'єкта;

– опрацювання порядку синтезу об'єкта, формування інтегральних характеристик і параметрів для забезпечення зручного та ефективного залучення об'єкта до складу систем вищої ієрархії;

– розроблення нових чи застосування існуючих математичних моделей для наявних елементів і зв'язків між ними;

– реалізація оптимального, відповідно до заданих умов, формоутворення досліджуваного об'єкта.

Виходячи із зазначеного вище, доцільним є виокремлення в схемі приготування рідкого ПЗ, просочення і дозованого нанесення рідкого ПЗ на довговимірний ОВН із використанням комбінованого УЗ-оброблення (див. рис. 1) укрупнених блоків І–ІІІ, що є визначальними для одержання якісних виробів із КВМ [1].

Напрацювання науковців з геометричного моделювання технічних засобів для одержання КВМ.

Науковою школою В. Ваніна і Г. Вірченка розроблено сучасну методологію структурно-параметричного варіантного формоутворення складних технічних систем у машинобудуванні [13]. Науковці цієї школи здійснюють, зокрема, геометричне моделювання процесів та обладнання для виготовлення висококомічних реактопластичних КВМ [14–16].

Інші вітчизняні науковці вивчали моделювання структурних армуючих елементів КВМ на прикладі намотування нитки на поверхні обертання [17]. Розроблено комплексну модель розрахунку форми меридіану фасонних поверхонь обертання, в яких середня кривизна змінюється вздовж осі за наперед заданим законом, та за умови зміцнення цих поверхонь шляхом геодезичного намотування нитки. У праці [18] проаналізовано базові схеми армування плоскою полімерною стрічкою виробів у вигляді поверхонь обертання.

Зарубіжні вчені описували поверхні оправок за методом Кунса, створюючи на його основі тривимірні об'єкти [19]. Інший клас модельованих об'єктів створювався за допомогою плоских паралельних перерізів на точковому каркасі. Серед найбільш вагомих результатів можна відзначити праці [20, 21]. Розроблено новий математичний апарат для моделювання намотування і викладення конструкцій із КВМ. Закладено теоретичні основи цих процесів, розроблено комп'ютерні моделі для якісного аналізу схем укладання стрічки на поверхню.

Таким чином, актуальним є створення геометричних та комп'ютерних моделей, що забезпечують автоматизоване проектування процесів та обладнання для приготування рідких полімерних композицій і виготовлення висококомічних й бездефектних виробів із реактопластичних КВМ із використанням УЗ-дії. У такій постановці цю задачу ще не досліджено.

Проблемні питання геометричного моделювання технічних засобів. Під час вирішення завдань геометричного моделювання процесів та обладнання для виготовлення висококомічних й бездефектних реактопластичних КВМ із використанням УЗ-дії варто враховувати такі особливості, притаманні цим об'єктам досліджень.

По-перше, завдання з геометричного моделювання зазначених об'єктів, є більш складними порівняно з моделюванням топографічних поверхонь, що є стаціонарними в часі і для яких є наперед відомим закон зміни руху армуючих елементів (ниток, джгутів, стрічок сталого перерізу).

По-друге, для автоматизації «мокрого» намотування (геодезичне намотування нитки) необхідно «перевести» отримувані поверхні в геометричні моделі за допомогою відповідних алгоритмів. За цією аналогією, для базового процесу «вільного» просочування слід створити узагальнену геометричну модель, що надасть можливість для аналізу і коригування схеми армування ОВН і геометричних параметрів змотувального й просочувального обладнання.

По-третє, властивості КВМ на основі ОВН жгутового чи тканого типу залежать від розташування мікронаповнювачів у структурі КВМ. Мікроструктуру таких ОВН моделюють спеціальними методами (наприклад, геометричних ймовірностей та інтегральної геометрії), що вимагає спеціальних алгоритмів. Як

типове завдання можна навести таке: дослідити залежність якості тканого КВМ від початкових (технологічних) умов, або від того, що задано проектувальниками на вході (наприклад, відсоток тканого наповнювача в структурі КВМ). А вже після змінення початкових умов слід змінити й геометричні параметри формувального обладнання для виробництва таких КВМ.

По-четверте, завдання з геометричного моделювання зазначених об'єктів можна вирішити із застосуванням методології комп'ютерного СПГМ, яка лише починає розвиватися.

Вибір та обґрунтування перспективних напрямів досліджень. Методологія СПГМ дозволяє на стадії конструкторсько-технологічного проектування створити єдиний і наскрізний автоматизований процес розробки технології й технологічного інструменту із залученням різних дисциплін. При цьому поєднання структурного і параметричного підходів забезпечує належне відтворення складу модельованого об'єкта, високоєфективне комп'ютерне варіювання багатьох його параметрів і характеристик, а також можливість проведення комплексної оптимізації. Аналіз «вузьких» місць застосування принципів автоматизованого проектування на базі методології СПГМ для детермінування конструкторсько-технологічних параметрів технічних засобів, зокрема, базових процесів і обладнання (інструменту), призначених для виготовлення реактопластичних КВМ із застосуванням УЗ, дозволяє зробити такі висновки.

Майже не досліджені питання, пов'язані з науковим обґрунтуванням методології СПГМ для проектування конструкторсько-технологічних параметрів технічних засобів у вигляді базових процесів та обладнання (інструменту), призначених для виготовлення реактопластичних КВМ із застосуванням УЗ.

Одним із прогресивних напрямів реалізації методології є раціональне конструювання акустичних хвилеводів-концентраторів. Важливою є також інтегроване врахування вимог інженерних дисциплін для комплексної оптимізації промислової продукції.

Із досліджуваною проблематикою пов'язано проектування процесу та обладнання для «вільного» просочування. Важливим є одержання прогностичних кінетичних рівнянь просочування ОВН рідкими ЕЗ із врахуванням структурних характеристик ОВН як капілярно-пористого тіла. Таке прогнозування доцільно вести на базі певної схеми розташування волокон в структурі ОВН, що асоціюється з відповідною геометричною (фізичною) моделлю [2]. Подальші кроки передбачають можливість зведення досліджуваних структур до регулярних (подвійноперіодичних) модельних із застосуванням теорії інтегральної геометрії й геометричних ймовірностей. Результатом моделювання є визначення ефективного (еквівалентного) капілярного радіуса модельної структури ОВН для обчислення кінетичних параметрів «вільного» просочення [12].

УЗ-вплив на ОВН, що просочується у ванні, а також на просочений ОВН можна розглядати як ефективний засіб для підтримання необхідного вмісту рідкого ПЗ у просоченому ОВН (дозування). Таке дозування для ВН на основі тканих структур доцільно здійснювати з прямокутної пластини, до якої прикріплені ПЕП, що утворюють складений дозувальний пристрій. При цьому слід вирішити задачі раціонального вибору, зокрема, товщини випромінювальної пластини, розмірів і місць розташування ПЕП тощо.

Таким чином, зазначений напрям досліджень передбачає вирішення таких задач:

- розроблення узагальненої структурно-параметричної моделі технологічного циклу (або окремих процесів чи операцій) одержання реактопластичних КВМ із застосуванням УЗ-оброблення;
- розроблення методики варіантного конструювання акустичних концентраторів із використанням комп'ютерних геометричних моделей, що відображують варіаційні взаємозв'язки між параметрами форми і розмірів досліджуваних виробів, а також наведення прийомів формоутворення, що сприяють підвищенню продуктивності комп'ютерного варіантного проектування зазначених виробів;
- детермінація параметрів адекватної геометричної моделі упаковки волокон у структурі ОВН із застосуванням теорії інтегральної геометрії та геометричних ймовірностей шляхом зведення реальних стохастичних структур ОВН до подвійноперіодичних регулярних, та визначення структурних характеристик геометричної моделі, що входять до уточненого прогностичного кінетичного рівняння «вільного» просочення ОВН рідкими ПЗ;
- розроблення удосконаленої аналітичної методики розрахунку та методики варіантного структурно-параметричного конструювання складеного УЗ-кавітаційного пристрою з прямокутною випромінювальною пластинною, що здійснює вигинні коливання, для дозованого нанесення ПЗ на просочений ВН тканого типу, що передбачає розрахунок резонансних акустичних розмірів елементів коливальної системи на базі ПЕП і трансформаторів швидкості, а також здійснення геометричної візуалізації отриманих співвідношень;
- упродовження розробок, зокрема, в хімічному та спеціальному машинобудуванні.



Рис. 3 – Послідовність досліджень з конструкторсько-технологічного проектування технічних засобів для одержання реактопластичних КВМ

Послідовність досліджень з конструкторсько-технологічного проектування технічних засобів для одержання реактопластичних КВМ з використанням УЗ-дії наведено на рис. 3.

У подальшому доцільним є створення нових та удосконалення існуючих геометричних моделей базових процесів технологічного циклу формування КВМ, розвиток методів комп'ютерного моделювання цих процесів і поширення розроблених методик. Цей напрям, зокрема, передбачає розроблення і всебічний аналіз комп'ютерних моделей трансформаторів швидкості з впровадженням результатів у виробництво, що збільшить номенклатуру

УЗ-концентраторів, які можна буде конструювати з використанням методології СПГМ.

Висновки. Досліджено перспективність застосування геометричного моделювання технічних засобів для одержання реактопластичних КВМ. Проаналізовано базові принципи методології структурно-параметричного геометричного моделювання. Здійснено вибір та обґрунтування перспективних напрямів досліджень. Зазначено, що подальшими напрямками досліджень є створення нових та вдосконалення існуючих геометричних моделей базових процесів технологічного циклу формування КВМ, розвиток методів їхнього комп'ютерного моделювання й поширення методик моделювання технічних і технологічних засобів формування КВМ на базі системного підходу.

Список використаної літератури

1. Цыплаков О. Г. Научные основы технологии композиционно-волоконистых материалов / О. Г. Цыплаков. – Пермь, 1974. – Ч. 1. – 317 с.
2. Колосов О. Є. Одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, О. П. Колосова. – К. : Політехніка, 2015. – 295 с.
3. Ванін В. В. Визначення та основні положення структурно-параметричного геометричного моделювання / В. В. Ванін, Г. А. Вірченко // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Вип. 23. – Харків : ХДУХТ, 2009. – С. 42-48.
4. Колосов А. Е. Конструкторско-технологическое проектирование технических средств для получения реактопластичных композиционно-волоконистых материалов на базе структурно-параметрического моделирования / А. Е. Колосов, Г. А. Вирченко, Е. П. Колосова, Г. И. Вирченко // Хим. и нефтегазовое машиностр. – 2015. – № 7. – С. 41–46.
5. http://storage.flyback.org.ru/files/01_ae_ae____249.jpg.
6. Новицкий Б. Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах / Б. Г. Новицкий. – М. : Химия, 1983. – 192 с.
7. Ванін В. В. Продукція машинобудування та процеси її виготовлення як об'єкти структурно-параметричного геометричного моделювання / В. В. Ванін, Г. А. Вірченко // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Вип. 84. – К. : КНУБА, 2010. – С. 28–32.
8. Ванін В. В. Применение комбинаторно-вариационного подхода для компьютерного геометрического моделирования инженерных конструкций и сооружений / В. В. Ванін, С. Л. Шамбина, В. Г. Вирченко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2013. – № 4. – С. 3–8.
9. Вирченко В. Г. Модульное вариантное геометрическое моделирование сложных технических объектов / С. Л. Шамбина, В. Г. Вирченко // Вестн. Росс. ун-та дружбы народов. Инж. иссл. – 2013. – № 2. – С. 5–8.
10. Virchenko V. G. Computer combinatorial-variation geometric modeling of engineering objects / V. G. Virchenko, I. P. Taras // The Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timisoara, Transactions on Hydrotechnics. – 2013. – Tom 58(72), Fascicola suplimentara. – P. 173–176.
11. Ванін В. В. Структурно-параметричні моделі як засіб інтеграції автоматизованого проектування сучасного літака / В. В. Ванін, Г. А. Вірченко // Вісн. Херсон. нац. техн. ун-ту. – 2014. – Вип. 3 (50). – С. 571–574.
12. Аксельруд Г. А. Введение в капиллярно-химическую технологию / Г. А. Аксельруд, М. А. Альтшулер. – М. : Химия, 1983. – 264 с.
13. Кафедра нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://ng-kg.kpi.ua>.
14. Залевський С. В. Геометричне моделювання тканинних наповнювачів текстолітових конструкцій технічних виробів : автореф. дис ... канд. техн. наук : 05.01.01 / С.В. Залевський. – К.: 2011. – 23 с.
15. 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.
16. Структурно-параметричний метод для моделювання технологічного процесу створення виробів з

- композитів [Електронний ресурс] / В. В. Ванін, Г. П. Грязнова, А. Г. Допира, С. Л. Шамбина // SWorld. – 16-26 December, 2014. – Режим доступу : <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences-414/applied-geometry-engineering-graphics-ergonomics-and-safety-of-life-414/23604-414-053>.
17. Руденко С. Ю. Геометричне моделювання фасонних поверхонь обертання, зміцнених намотуванням нитки : автореф. дис ... канд. техн. наук : 05.01.01 / С. Ю. Руденко; Нац. ун-т цив. зах. ДСУНС. – Х., 2013. – 24 с.
 18. Куценко Л. М. Поверхні обертання зі змінної уздовж осі кривиною меридіанів та їх зміцнення шляхом намотування кевларової нитки / Л. М. Куценко, С. Ю. Руденко // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво : міжвузівський зб. – Вип. 6. – Луцьк : ЛНТУ, 2011. – С. 148–153.
 19. Аюшев Т. В. Геометрические вопросы адаптивной технологии изготовления конструкций намоткой из волокнистых композиционных материалов / Т. В. Аюшев. – Улан-Удэ : БНЦ СО РАН, 2005. – 212 с.
 20. Калинин В. А. Теоретические основы геометрического моделирования процессов намотки и выкладки конструкций из волокнистых композиционных материалов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.01.01 / В. А. Калинин ; Моск. гос. авиац. ин-т. – М., 1997. – 49 с.
 21. Битюков Ю. И. Геометрическое моделирование технологических процессов намотки и выкладки конструкций из волокнистых композиционных материалов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.01.01 / Ю. И. Битюков ; Моск. гос. авиац. ин-т. – М., 2010. – 34 с.
 22. Черніков О. В. Геометричне та комп'ютерне моделювання динаміки процесів зміни об'єктів під впливом заданих чинників (на прикладі фільтрування) : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.01.01 / О. В. Черніков ; Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. – К., 2008. – 36 с.
- Надійшла до редакції 13.11.2015