

УДК 678.02:678.5.059

Колосов О.Є., д.т.н., с.н.с., академік АНВОУ, патентний повірений України
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

**ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
ВУЗЛІВ ПРОСОЧУВАННЯ І ДОЗОВАНОГО НАНЕСЕННЯ ПРОСОЧУВАЛЬНО-
СУШИЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ, ПРИЗНАЧЕНОГО ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ
НАМОТОЧНИХ ВИРОБІВ З ВОЛОКНИСТИХ РЕАКТОПЛАСТИЧНИХ ПОЛІМЕРНИХ
КОМПОЗИТІВ**

Було встановлено, що базові технологічні процеси, а саме просочування і дозоване нанесення, є ключовими ланками при виробництві препрегів-напівфабрикатів для намоточних полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). Це обумовлено тим, що якість просочення залежить від таких факторів, як наявність або відсутність повітряних включень (так званого «пляшкового ефекту») в структурі просоченого волокнистого наповнювача в процесі його просочення, однорідності й в'язкості полімерного зв'язуючого, хорошої змочуваності поверхні волокнистого наповнювача тощо. Суть розроблених енергоефективних технологічних методик полягає в комплексному використанні ультразвуку для базових процесів виробництва препрегів для подолання зазначених недоліків при їх одержанні. Дослідження показали, що ефективна дія ультразвуку сприяє поліпшенню гомогенізації полімерного зв'язуючого, активації поверхні волокнистого наповнювача для того, щоб поліпшити змочуваність полімерним зв'язуючим поверхні волокнистого наповнювача безпосередньо перед просоченням і підвищити продуктивність процесу просочення та дозованого нанесення полімерного зв'язуючого за рахунок збільшення швидкості протягування волокнистого наповнювача з одночасним поліпшенням властивостей кінцевого затверділого ПКМ.

Крім того, було встановлено, що використання ультразвукового впливу просоченого волокнистого наповнювача в просочувальній ванні, а також в просякнутому волокнистому наповнювачі можна розглядати як ефективний метод автоматичної підтримки необхідної величини вмісту полімерного зв'язуючого в просякнутому волокнистому наповнювачі. Результатом застосування розроблених технологічних основ і устаткування є підвищення продуктивності процесів просочення і дозованого нанесення полімерного зв'язуючого, тобто швидкості протягування матеріалу і швидкості видалення надлишку полімерного зв'язуючого при одержанні однорідного просоченого матеріалу практично без повітряних включень. Це дозволяє рекомендувати розроблені нові методики, в тому числі тріступеневої ультразвукової обробки, і реалізує їх обладнання як надійний засіб для підтримання заздалегідь заданого значення величини (стабілізації) вмісту полімерного зв'язуючого в просоченому тканинному наповнювачі. На ряді прикладів (у тому числі з використанням просочувально-сушильної машини МПТ-3М) було досліджено, що розроблені методики та обладнання забезпечують енергозбереження процесів підготовки полімерного зв'язуючого, просочення волокнистого наповнювача і дозованого нанесення на них полімерної матриці з використанням ультразвуку.

Методика, технологія, обладнання, просочування, дозування, сушіння, склотканина, епоксид, полімер, зв'язуюче, ультразвук, енергозбереження.

Вступ. Домінуюча тенденція останніх років, що характеризує розвиток ринку полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), полягає в тому, що у світі сучасні композити все впевненіше витісняють «класичні» матеріали. Це виявляється у тому, що нові волокна, тканини і просочені полімерним зв'язуючим (ПЗ), зокрема, епоксидними композиціями (ЕК) волокнисті наповнювачі (ВН), т. зв. напівфабрикати-препреги, отримали широке поширення в авіаційній, космічній, атомній промисловості, у трубопровідному транспорті тощо [1, 2].

Так, наприклад, препреги застосовуються при виготовленні корпусів літаків і вертольотів, крил, обтічників, гвинтів. Адже використання цих матеріалів дозволяє знизити вагу і, як наслідок, витрату палива повітряних суден, збільшити характеристики міцності і експлуатаційний термін їх служби. Також на основі препрегів виготовляють сучасні будівельні матеріали [3], що відрізняються рядом унікальних властивостей. Не менш перспективним ринком застосування препрегів є їх використання у вітроенергетиці при виготовленні лопатей вітроенергетичних установок [2]. Крім того, препреги можуть застосовуватися в автомобіле- і суднобудуванні.

ні, для виготовлення суднових корпусів і ненесучих деталей автокузовів; в будівництві, в тому числі для армування бетонних конструкцій. У медицині препреги застосовуються при виготовленні ортезів.

Номенклатура виробів товарів народного споживання, що виготовляються з препрегів, також надзвичайно широка: автобампери особливої міцності, шоломи та інше захисне обладнання для будівельників [3], прохідників, спортсменів, товари для туризму і відпочинку (рибальські вудки), а також спортивний інвентар (ключки для гольфу, оснастка велосипедів, роликів ковзанів) тощо.

Тому є актуальним дослідження особливостей проектування конструктивно-технологічних параметрів функціональних вузлів просочувально-сушильного комплексу, а саме вузлів просочування і дозованого нанесення, з одночасним урахуванням інтенсифікуючих факторів базового технологічного циклу виготовлення цих виробів у вигляді низькочастотного ультразвуку (УЗ), що сприятиме енергозощадженню при формуванні препрегів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Типовий цикл одержання препрегів, як правило, складається з наступних основних стадій (базових процесів) [1]: 1) приготування ЕК (просочувальної або заливочної) чи ПЗ, що містить розчинники (процес приготування вихідної ЕК); 2) підготовка армуючого ВН (включаючи процес модифікування поверхні ВН); 3) поєднання ЕК з армуючим ВН у певному ваговому (процентному) співвідношенні за допомогою формоутворювального і формуючого оснащення і устаткування (процеси просочування і дозованого нанесення ПЗ на ВН); 4) видалення розчинника і сушка армуючого волокнистого напівфабрикату по певному температурно-часовому режиму (процеси попереднього і остаточного сушіння); 5) збирання заготовки пошаровим викладенням, намотуванням, протягуванням або іншими методами; фіксація матеріалу або виробу заданої форми і розмірів з подальшим твердінням зв'язуючого; механічна обробка виробу (процеси твердіння і остаточного формування ПКМ).

При цьому слід відзначити, що застосовуваний при формуванні препрегів інтенсифікуючий процес УЗ-обробки рідких полімерних композицій повністю визначає тип і конструктивні особливості реалізуючого технологічного УЗ-пристрою, в якому енергія механічних коливань активно впливає на рідину, що обробляється [4, 5], а саме пакету і випромінюючої УЗ системи, а також амплітуду і характер коливань випромінюючої поверхні.

Для здійснення ефективного режиму УЗ-обробки будь-якої рідини необхідно визначати ефективні значення інтенсивності I і частоти f УЗ-коливань (УЗК). Так як більшість УЗ-рідких процесів пов'язано із кавітацією та звукокапілярним ефектом [4], то змінюючи умови протікання кавітації, можна підсилювати або послаблювати різні кавітаційні ефекти. Крім того, фізико-хімічна дія пружних УЗК у рідині, як правило, виявляється в полях середньої і великої інтенсивності УЗ, коли істотними, окрім УЗ-кавітації, стають такі ефекти, як радіаційний тиск і звуковий вітер. У свою чергу, проведені дослідження [5–8] показали перспективність здійснення УЗ-модифікації ЕК у різночастотних УЗ-діапазонах, а також доцільність використання надлишкового статичного тиску при УЗ-модифікації. Адже при цьому в оптимумі зростає інтенсивність і водночас скорочується кумулятивний час УЗ-обробки рідких ЕК.

Слід наголосити, що базові процеси просочування і дозованого нанесення, які використовуються у просочувально-сушильному технологічному комплексі, є найлогічнішими ланками при виготовленні препрегів. На якість просочування впливають такі чинники, як наявність чи відсутність повітряних включень (т.зв. «пляшкового ефекту») в структурі просочуваного ВН, гомогенність і в'язкість ПЗ, добра змочуваність поверхні ВН тощо [4].

У свою чергу, забезпечення певного вмісту ПЗ в наповнювачі, що просочився (тобто дозування), є не менш важливим, ніж рівномірний розподіл ПЗ по перетину і довжині наповнювача [1,2]. Це, наприклад, можна забезпечити точним регулюванням в'язкості (варіюванням вмісту розчинника) просочувального розчину в поєднанні з певною швидкістю проходження V наповнювача через просочувальний пристрій (швидкістю протягування), а також контактною дією УЗ на просочений ВН.

Таким чином, у технології одержання препрегів ключовою ланкою є саме просочувально-сушильні лінії, які у сучасних умовах вимагають зовсім інших технологічних підходів, зокрема, підвищення продуктивності і забезпечення енергоресурсозбереження за рахунок використання УЗ з одночасним підвищенням умов безпеки при виробництві препрегів. Адже пари наявних летючих розчинників у ПЗ при сушінні препрегів можуть утворювати вибухонебезпечні концентрації.

Крім того, актуальним завданням є покращення гомогенізації ЕК УЗ-дією, УЗ-активації поверхні передпросоченого ВН для поліпшення його змочуваності ЕК, дегазація структури ВН безпосередньо перед просочуванням і збільшення продуктивності процесу просочування та дозованого нанесення ЕК у структурі ВН за рахунок збільшення швидкості протягування ВН при покращенні властивостей кінцевого затверділого ПКМ [5 – 8].

Вирішення поставлених завдань насамперед пов'язано зі створенням нових методик проектування «ключових» вузлів просочувально-сушильного комплексу, а саме вузлів просочування і дозованого нанесення, для одержання намоточних виробів з реактопластичних полімерних композитів покращеної якості на базі застосування ефективних режимів УЗ.

Постановка проблеми. Метою роботи є аналіз нових розроблених методик проектування «ключових» вузлів просочувально-сушильного комплексу, а саме вузлів просочування і дозованого нанесення, призначених для одержання намоточних виробів з реактопластичних полімерних композитів покращеної якості на базі застосування ефективних режимів УЗ.

Аналі особливостей просочувально-сушильного комплексу. Вітчизняний просочувально-сушильний комплекс для формування ПКМ побудовано на базі просочувально-сушильної машини МПТ-3М (див. рис. 1).



Рис. 1. Просочувально-сушильна машина МПТ-3М

Ця машина призначена для просочування полімерними зв'язуючими й високоінтенсивного сушіння рулонних тканих наповнювачів, що застосовуються у виробництві шаруватих пластиків, фольгованих діелектриків, електро- і теплоізоляційних матеріалів, а також для виробництва рулонних склопластиків типу РСТ.

Блок поглибленого дозованого просочення машини МПТ-3М відповідає кращим світовим аналогам. Він містить автономний регульований привід прецизійних віджимних валків, а також вузли попереднього поверхневого змочування полотна, рівномірного розподілу по ширині полотна й проміжного віджиму, що пов'язаний з механізмами тонкого регулювання зазору між валками. Аеродинамічний спосіб нагрівання й циркуляції теплоносія в сушильних зонах вигідно відрізняє машину МПТ-3М від закордонних і вітчизняних аналогів, забезпечуючи їй високу економічність [9].

Сушильна камера машини містить два роторні теплогенератори, що забезпечують нагрівання й автономну підтримку заданої температури теплоносія в кожній із зон сушіння. При цьому дві сушильні зони використовуються для сушіння просоченого полотна, а третя (середня) зона використовується для попереднього сушіння полотна перед його просочуванням. У свою чергу система автоматичного регулювання забезпечує контроль і регулювання основних параметрів, що гарантує високу якість препрега й виробів з нього.

Основні технічні характеристики машини МПТ-3М такі:

продуктивність по склотканині, м/год	– 10–130
ширина полотен, що просочуються, мм	– 1200
температура термозварювання полотен, °С	– 275
питомий тиск при термозварюванні, МПа	– 05
кількість полотен, що одночасно просочуються	– 1
максимальна температура в зонах сушіння, °С	– 150
максимальне зміщення кромки при намотуванні просоченого полотна в рулон, мм	– 1,5–5
регулювання основних режимних параметрів	– автоматичне
номінальна потужність, що споживається, кВт	– 120
габарити, мм	– 8100x4400x7400
маса, кг	– 9500

Виходячи з мети роботи, здійснювали адаптацію двох нижченаведених розроблених методик проектування конструктивно-технологічних параметрів «ключових» вузлів просочувально-сушильного комплексу на базі машини МПТ-3М, а саме вузлів просочування і дозованого нанесення, призначених для одержання намоточних виробів з реактопластичних полімерних композитів покращеної якості, на базі застосування ефективних режимів УЗ.

Аналіз методики розрахунку конструктивних параметрів УЗ-кавітаційного пристрою з випромінюючою пластиною.

Удосконалена методика розрахунку УЗ-кавітаційного пристрою з випромінюючою пластиною, що здійснює згинальні коливання [9 – 12], передбачає розрахунок резонансних акустичних розмірів елементів коливальної системи на базі п'єзокерамічних перетворювачів і трансформаторів швидкості, а також експериментальну перевірку отриманих співвідношень.

Методика також дозволяє розраховувати гаму типорозмірів кавітаційних апаратів для різних розмірів випромінюючої пластини й різних умов УЗ-обробки, наприклад, для УЗ-модифікації і інтенсифікації процесів просочування і дозованого нанесення, а також різних видів армуючих ВН.

Вихідними даними для розроблення цієї методики є резонансна частота УЗК $f_{\text{ст}}$, характерна для конкретного процесу УЗ-модифікації (наприклад, це може бути робоча частота УЗ-генератора), інтенсивність УЗ-кавітації, а також ширина оброблюваного тканого наповнювача (або об'єм УЗ-ванни для озвучування ЕК).

Підведення акустичної енергії до кавітаційного апарата на базі випромінюючої пластини 1 (рис. 2) здійснювали за допомогою випромінювачів УЗ 5, які фіксували щільно до пластини за допомогою нарізного сполучення й зварювання. Уздовж (рис. 3) і поперек (див. рис. 2) випромінюючої пластини 1 регулярно розміщували кілька секцій з випромінювачами УЗ, що давало можливість забезпечити необхідну площу випромінюючої поверхні. Резонансна частота згинальних коливань $f_{\text{ст}}$ випромінюючої пластини 1 і необхідна площа випромінювання кавітатора дають можливість вибирати необхідну кількість УЗ-випромінювачів, які можна встановити на її нижній поверхні.

Задіяні в кавітаційному апараті випромінювачі УЗ були зібрані за схемою однохвильової акустичної системи (рис. 4). Джерелом УЗК був складений п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП), зібраний із двох установлених послідовно п'єзокілець 6, підключених паралельно до УЗ-генератора 7.

Необхідне значення резонансної частоти коливань ПЕП досягається вибором акустичних розмірів і властивостей матеріалу демфера 10 і трансформатора швидкості 11.

Як контрольовані параметри низькочастотних коливань УЗ-діапазону (16 кГц – 24 кГц) вибирали частоту f , інтенсивність I й амплітуду A пружних коливань, генеруємих зовнішньою поверхнею випромінюючої пластини в навколишнє середовище.

Пропонована методика розрахунку розглядає УЗ-кавітаційний апарат з випромінюючою пластиною як резонансну механічну систему й передбачає розрахунок резонансних акустичних розмірів утворюючих її елементів. При цьому робили такі припущення:

- 1) взаємний вплив УЗ-перетворювачів, установлених у регулярному порядку по ширині й довжині випромінюючої пластини, є незначним;
- 2) зневажаємо взаємним впливом згинальних хвиль у поздовжньому й поперечному напрямках випромінюючої пластини, тобто не враховуємо коливання, що викликані гармоніками n -го порядку;
- 3) вплив озвучуваного середовища (рідини, сухої або просоченої тканини) на коливальну систему також є незначним.

Послідовність проведення розрахунків відповідно до розробленої методики полягає в наступному:

1. Задаються бажаною резонансною частотою УЗК $f_{\text{ст}}$, характерною для конкретного технологічного процесу, і визначають інтенсивність УЗ-кавітації (наприклад, це може бути частота УЗК УЗ-генератора 7).

2. Вибирають матеріал ($c_{\text{пл}} = c_4$, $E_{\text{пл}} = E_4$) і товщину $H_{\text{пл}}$ випромінюючої пластини 1 (див. рис. 2), виходячи з конструктивно-технологічних особливостей реалізації конкретного технологічного процесу (озвучування ЕК, просочування, дозованого нанесення).

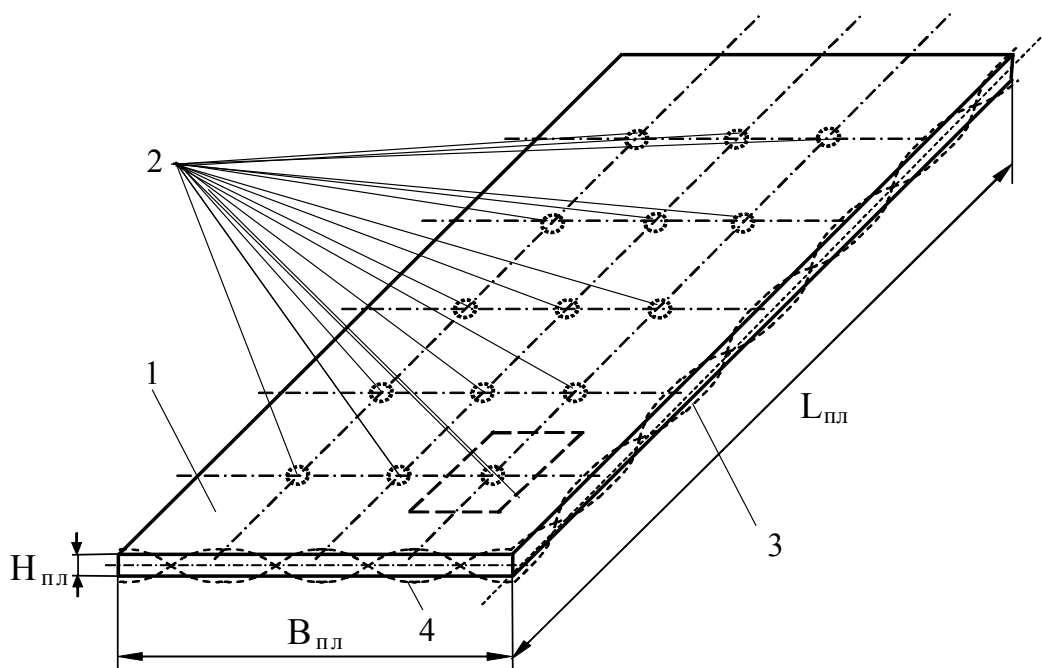


Рис. 2. Схема регулярного розміщення УЗ-вібраторів на нижній поверхні робочої випромінюючої пластини, що здійснює резонансні згинальні коливання (пунктирною лінією позначені границі подібної ділянки пластини з елементами її кріплення до вібратора УЗК):

1 – випромінююча пластини; 2 – місця кріплення УЗ-вібраторів на нижній поверхні робочої випромінюючої пластини; 3 – хвилі згинальних коливань по довжині $L_{пл}$ пластини; 4 – хвилі згинальних коливань по ширині $B_{пл}$ пластини

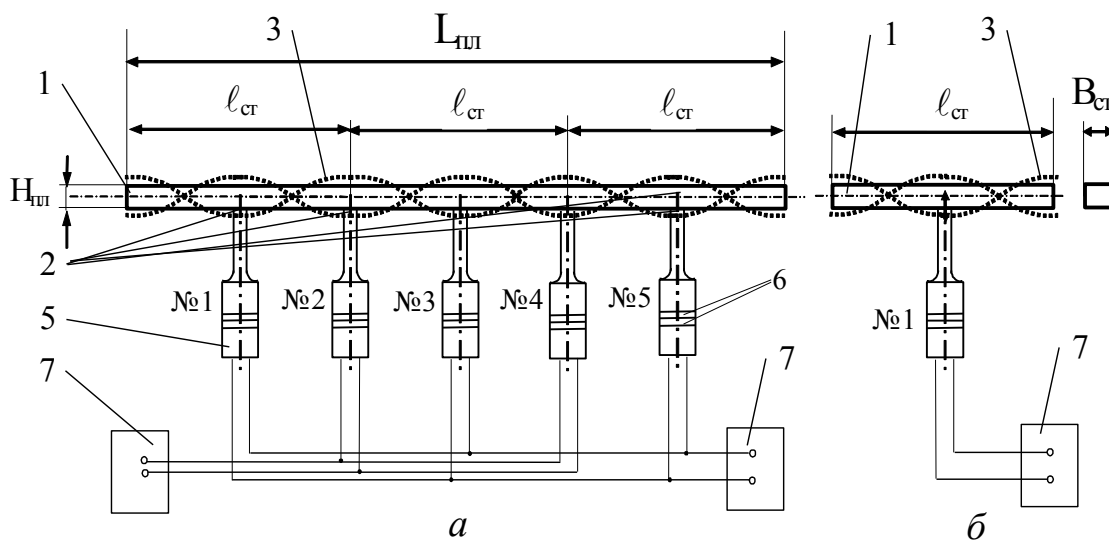


Рис. 3. Порядок розміщення й підключення УЗ-вібраторів, зібраних на ПЕП, на нижній частині випромінюючої пластини по її довжині (а) і на стрижні (хвильоводі) шириною $B_{ст}$, що здійснюють згинальні коливання (б): 1 – випромінююча пластини (стрижень); 2 – місця кріплення УЗ-вібраторів на нижній поверхні робочої випромінюючої пластини; 3 – хвилі згинальних коливань; 5 – УЗ-вібратори (№№ 1–5), що зібрані на базі п'єзокерамічних перетворювачів 6; 7 – УЗ-генератор

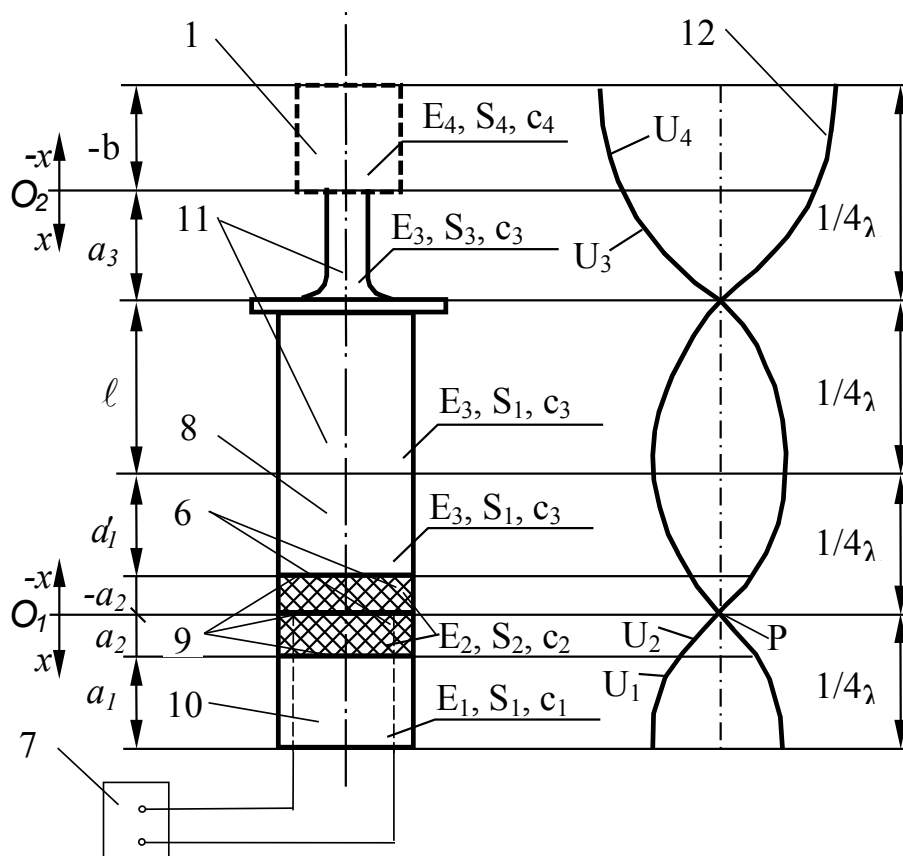


Рис. 4. Розрахункова схема однохвильового УЗ-диспергатора із симетричним п'єзоелектричним пакетним перетворювачем: 1 – випромінюючий циліндр еквівалентного перетину; 6 – п'єзокерамічні перетворювачі; 7 – УЗ-генератор; 8, 10 – накладки, що понижають частоту; 9 – електроди товщиною (0,2–0,3) мм; 11 – концентратор УЗК (трансформатор швидкості); 12 – хвиля поздовжніх коливань довжиною λ

3. Для обраної резонансної частоти УЗК $f_{\text{ст}}$ визначають по формулі (1) довжину хвилі $\ell_{\text{ст}}$ згинальних коливань випромінюючої пластини 1 з урахуванням бажаної моди коливань n_k (або порядку частоти $\lambda_{\text{ст}}$):

$$\ell_{\text{cm}} = \frac{\lambda_{\text{cm}}}{2} \sqrt{\frac{c_{\text{cm}} \cdot H_{\text{cm}}}{\pi \cdot \sqrt{3} \cdot f_{\text{cm}}}}, \quad (1)$$

де λ_{cm} – так званий порядок частоти, що є безрозмірною величиною, і який для випадку УЗК низькочастотного діапазону вибирається залежно від порядку коливань (моди коливань) n_k з наступного ряду:

4,750 ($n_k = 1$); 7,853 ($n_k = 2$); 10,996 ($n_k = 3$); 14,137 ($n_k = 4$); 17,279 ($n_k = 5$);

H_{cm} – товщина випромінюючої пластини;

$f_{\text{ст}}$ – резонансна частота згинальних коливань;

c_{cm} – швидкість поширення звуку при поздовжніх коливаннях, яка для твердих матеріалів (стрижня) щільністю ρ має наступну залежність (2) [10]:

$$c_{\text{cm}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2)$$

де E – модуль пружності матеріалу стрижня щодо розтягання.

4. Загальні розміри випромінюючої пластини 1, тобто її довжину $L_{\text{пл}}$ і ширину $B_{\text{пл}}$ вибирають кратними величині довжини хвилі $\ell_{\text{ст}}$, тобто $L_{\text{пл}} = N_L \ell_{\text{ст}}$, $B_{\text{пл}} = M_B \ell_{\text{ст}}$. При цьому на ширину пластини $B_{\text{пл}}$ може накладатися також умова перекриття пластиною ширини тканого ВН.

5. Залежно від отриманої кількості пучностей, що утворюються при згинальних коливаннях з довжиною хвилі $\ell_{ст}$, по довжині й ширині випромінюючої пластини 1, визначають кількість УЗ-випромінювачів, установлених по довжині й ширині пластини. При цьому максимальна кількість УЗ-випромінювачів, установлених по довжині пластини $L_{пл}$ для одержання рівномірної інтенсивності випромінюючої поверхні дорівнює: $N = 2N_L - 1$, а максимальна кількість УЗ-випромінювачів, які встановлюються по ширині випромінюючої пластини $B_{пл}$, дорівнює $M = 2M_B - 1$.

6. Розраховують масу елементів кріплення УЗ-випромінювача з урахуванням приєднаної маси окремої ділянки (секції) випромінюючої пластини, тобто характеристики еквівалентного циліндра [10].

7. Під резонансну частоту $f_{ст} = f_{пл}$ випромінюючої пластини 1 розраховують акустичні розміри елементів складеного УЗ-випромінювача (a_1, a_3, ℓ). Вихідними даними для розрахунку акустичних розмірів УЗ-випромінювача є геометричні розміри і фізичні параметри застосовуваного п'єзоматеріала 6 (a_2, c_2, E_2, S_2), трансформатора швидкості 11 (c_3, E_3, S_3), частотопонижаючих накладок 8, 10 (c_1, E_1, S_1), а також питома акустична потужність.

В результаті експериментальної апробації розробленої методики було знайдено, що для досягнення ефективних результатів при одержанні ПКМ, зокрема, при контактній УЗ-обробці тканини шириною 1120 мм, просоченої ЕК, необхідно мати такі значення технологічних параметрів кавітаційної обробки: частота УЗК $f_{уз} = f_{ст} = (18 - 22)$ кГц (для розрахунку приймали $f_{уз} = 22$ кГц); амплітуда УЗК (3 – 5) мкм; інтенсивність (2 – 4) Вт/см².

Як вказувалось вище, на ширину пластини $B_{пл}$ може накладатися також умова перекриття пластиною ширини тканого волокнистого наповнювача (яка у нашому випадку становить (1100 – 1200) мм – див. рис. 5).

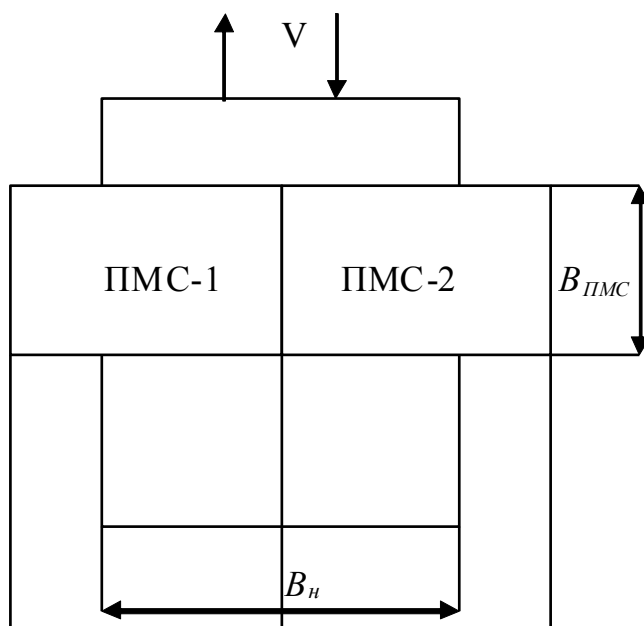


Рис. 5. Розташування двох ПМС (ПМС-1 і ПМС-2) у залежності від ширини B_n оброблюваного УЗ тканого наповнювача

Для цього використовували по дві ($K = 2$) пластини з магнітострикційними (або п'єзоелектричними) перетворювачами шириною $B_{пл} = B_{ПМС} = 0,15$ м і довжиною $L_{пл} = L_{ПМС} = 0,6$ м кожна, розташовані поряд і з кожного боку від тканого наповнювача, тобто задовольняли умову $B_n \leq K \cdot L_{пл}$ (див. рис. 2 – 4).

Обрана товщина випромінюючої пластини 1 становить $H_{пл} = 0,01$ м; матеріал – нержавіюча сталь марки 1ХН18Н9Т з такими характеристиками: швидкість звуку $c_{пл} = c_4 = 5,2 \cdot 10^3$ м/с; модуль пружності щодо розтягання $E_4 = 20,5 \cdot 10^4$ МПа. Обчислена по формулі (1) довжина згинальних коливань пластини при $\lambda_{ст} = 4,750$ ($n_k = 1$) складе: $\ell_{ст} = 0,05$ м.

Тоді максимальна кількість перетворювачів, яку можна встановити по довжині випромінюючої пластини $L_{пл} = 0,6$ м, дорівнює:

$N = 2N_L - 1 = 2 \cdot 12 - 1 = 23$, а максимальна кількість перетворювачів M , що можна встановити по ширині випромінюючої пластини $B_{пл} = 150$ мм = 0,15 м, дорівнює: $M = 2M_B - 1 = 2 \cdot 3 - 1 = 5$. Для матеріалу частотопонижуючих накладок 8 і 10 (демпферів) на основі сталі 40Х13 маємо: швидкість звуку $c_l = 5,2 \cdot 10^3$ м/с; модуль пружності $E_l = 2,05 \cdot 10^5$ МПа; вибраний наріжний діаметр частотопонижуючих накладок 8, 10 складає 0,042 м, а їх внутрішній діаметр – 0,012 м.

Задамо конструктивно необхідне значення розміру товщини a_2 для випадку збирання на базі чотирьох п'єзокерамічних кілець 6 марки 841 зовнішнім діаметром $d_6 = 38$ мм, а саме: $a_2 = 25,6$ мм = 0,0256 м. Швидкість поширення звуку в матеріалі кільця 6 дорівнює: $c_2 = 2,5 \cdot 10^3$ м/с; модуль пружності $E_2 = 6,3 \cdot 10^4$ МПа. Питому акустичну потужність для п'єзокераміки при (18 – 22) кГц звичайно приймають рівною (1 – 3) Вт/см². Значення товщини a_1 частотопонижуючих накладок 8 і 10 склало 15,73 мм, значення довжини ступені a_3 ділянки ступені ℓ більшого діаметра концентратора склало 55,91 мм. Рівномірність руйнування тонкої алюмінієвої фольги, установленної паралельно випромінюючій поверхні пластини 1, дала можливість припустити про рівномірність кавітаційного поля пластини.

Порівняльний аналіз розрахункових параметрів, отриманих відповідно до пропонованої методики, і експериментальних параметрів, отриманих на виготовленому й впроваджену в технологічний процес кавітаційному апараті з випромінюючою пластиною, що здійснює згинальні коливання, підтверджує, що погрішність розробленої методики не перевищує 10 %. Розроблена методика розрахунку УЗ-кавітатора з випромінюючою пластиною була перевірена при створенні декількох моделей кавітаційних апаратів для хімічної промисловості, зокрема, для регулювання дозованого нанесення полімерного зв'язуючого у просоченій скловолокнистій тканині електроізоляційного призначення шириною 1120 мм.

Розроблена методика дає можливість створювати широку гаму типорозмірів кавітаційних апаратів для різних розмірів випромінюючої пластини й різних технологічних умов. Конструкція УЗ-кавітаторів розглянутого типу дозволяє за рахунок зміни кількості секцій з випромінювачами змінювати потужність апаратів у широких межах. Експлуатація експериментальних зразків розглянутого типу УЗ-кавітаторів різних потужностей підтвердила їхню високу ефективність, надійність і легкість в обслуговуванні.

Методика вибору ефективних конструктивно-технологічних параметрів пристроїв для процесу УЗ-модифікації рідких ЕК.

Відомо, що основними чинниками, які зумовлюють вибір акустичної апаратури для роботи в рідинах, потрібно вважати такі: інтенсивність I і частота f коливань; час озвучування τ ; продуктивність Q апарату або пристрою; температуру T , тиск P та інші умови проведення процесу в УЗ-полі.

Перші два чинники (інтенсивність I і частота f коливань) є такими, що впливають на вибір *типу апарату*. Інші чинники визначають *кількість апаратів*, що встановлюються в дану технологічну лінію, або їх *конструктивні особливості*, наприклад, захист від корозії, міцність, систему охолодження, створення надлишкового статичного тиску й ін.

Пропонована друга методика вибору ефективних конструктивно-технологічних параметрів пристроїв для процесу УЗ-модифікації рідких ЕК [10 – 11] полягає в наступному.

По-перше, вибирають *тип апарату* у відповідності з необхідними значеннями інтенсивності I , частоти f і амплітуди A УЗ-коливань, що визначаються особливостями конкретного технологічного процесу. Так, проведені дослідження показали доцільність вибору для УЗ-обробки рідких ЕК диспергатора типу УЗВД-6, який є найбільш потужною по акустичному полю установкою, і який був зібраний на магнітострикційних перетворювачах (ПМС) типу ПМС-15А-18 потужністю 4 кВт, частотою (18 ± 4) кГц.

Живлення диспергатора здійснювалось від генератора УЗГ 3-4. Використання автоматичного підстроювання частоти з акустичним зворотним зв'язком забезпечувало стабільність параметрів озвучування.

При роботі у низькочастотному діапазоні на резонансному режимі досягається значення інтенсивності I коливань до $(5 - 10)$ Вт/см² для ПМС і до $(20 - 25)$ Вт/см² для УЗ-концентраторів. Шукану інтенсивність I УЗ розраховують по відомим залежностям [10].

Частоту пружних коливань f вимірювали за допомогою частотоміра марки ЧЗ-49. Для ПМС (випромінююча пластина) максимальні значення амплітуди коливань складали $A_{\max} = (5 - 6)$ мкм, а для УЗ-концентраторів продольних коливань $A_{\max} = (30 - 40)$ мкм.

Якість озвучування (рівномірність кавітаційного поля випромінювача) у низькочастотному діапазоні оцінювали по рівномірності руйнування тонкої алюмінієвої фольги, установлені паралельно випромінюючій поверхні.

По-друге, проводять вибір технологічних і конструктивних параметрів пристроїв УЗ-обробки рідинних ЕК, тобто визначають продуктивність Q , температуру T , тиск P і час τ озвучування. З розмірами випромінюючої пластини кавітаційного апарата при її розташуванні у просочувальній ванні корелює об'єм ванни для просочування (УЗ-обробки), або ефективна маса наважки m_c озвучуваного полімерного зв'язуючого.

Так, при дослідженнях технологічних характеристик ЕК і експлуатаційних характеристик затверділих ПКМ на їх основі було встановлено, що для ефективного озвучування ЕК відношення площі випромінювача поздовжніх УЗК S_e до маси наважки ЕК m_c , що обробляється, повинно становити $S_e/m_c = (4 - 5) \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$.

Таким чином, маючи геометричні розміри випромінюючої пластини S_e , можна знайти ефективне значення маси наважки зв'язуючого m_c , або мінімальний з точки зору продуктивності озвучування Q об'єм ванни для просочування. Відповідно до проведених досліджень, об'єм ванн УЗ-диспергування, що були виготовлені із нержавіючої сталі і забезпечені звукоізоляційним корпусом, становив 700 мл і 1100 мл. Для регулювання необхідної температури T озвучування корпус ванни мав сорочку водяного охолодження, сполучену по воді послідовно з бачком охолодження пакету перетворювача.

Згідно розробленої методики, границі інтервалу ефективного часу озвучування τ ЕК оцінювали по зміні крайового кута змочування θ і змочувальної здатності $\sigma \cos \theta$, залежності яких мають, як правило, екстремальну залежність від часу озвучування τ . В результаті вибирають шуканий інтервал часу озвучування (в досліджуваному випадку це 25 хв – 35 хв).

Необхідне значення (інтервал значень) надлишкового тиску P при УЗ-обробці ЕК визначають за результатами вимірювань експлуатаційних властивостей затверділих ЕК, отриманих при певних значеннях надлишкового тиску P . У використуваному диспергаторі можливе досягнення значень надлишкового тиску P до 10 МПа.

По-третє, проводять вибір режимних і конструктивних параметрів пристроїв для реалізації процесу УЗ-обробки ВН (як просочених, так і не просочених, як коротковолокнистих, так і регулярної структури – однонаправлених або тканих).

Серед серед конструктивних параметрів пристроїв УЗ-обробки волокнистих тканих наповнювачів визначають: розміри робочої пластини ПМС, а саме $B_{\text{пл}} = B_{\text{ПМС}}$ (див. рис. 5), а серед режимних параметрів процесу УЗ-обробки – час контактної УЗ-обробки $t_{\text{УЗ}}$ тканого (або коротковолокнистого) наповнювача.

Так, зокрема, експериментально було встановлено, що для досягнення прийнятних величин здрибнювання і стану контактної поверхні коротковолокнистих наповнювачів із скла необхідно, щоби час УЗ-активації $t_{\text{УЗ}}$ був в діапазоні $(30 - 45) \text{ с}$ [9–11].

У свою чергу, час контактної УЗ-обробки $t_{\text{УЗ}}$ тканого наповнювача регулярної структури (як просоченого, так і непросоченого) визначають за розмірами робочої пластини ПМС і швидкістю протягування наповнювача V . Або визначають швидкість протягування тканого наповнювача V за часом контактної УЗ-обробки наповнювача $t_{\text{УЗ}}$.

Крім цього, знаючи другий розмір робочої пластини ПМС, а саме $B_{\text{пл}} = B_{\text{ПМС}}$ і швидкість протягування тканого наповнювача V , можна визначити час контактної УЗ-обробки наповнювача $t_{\text{УЗ}}$ (як непросоченого, так і просоченого): $t_{\text{УЗ}} = B_{\text{ПМС}}/V$. І навпаки, знаючи час контактної УЗ-обробки наповнювача $t_{\text{УЗ}}$ (як просоченого, так і непросоченого), можна визначити швидкість протягування тканого наповнювача V .

Аналіз результатів апробації розроблених методик. Результати дослідження ефективності розроблених методик (технологічних засад) просочування ВН і дозованого нанесення ЕК на просочені ВН із застосуванням УЗ-модифікації наведені на рис. 6, де зображена залежність величини нанесення $C_{\text{ПЗ}}$, коефіцієнта варіації нанесення зв'язуючого в матеріалі $k_{\text{вс}}$ і коефіцієнта однорідності матеріалу, що просочився $k_{\text{о}}$, від швидкості протягування тканого наповнювача V за традиційною та розробленими технологічними засадами тристадійної контактної УЗ-обробки [9–11].

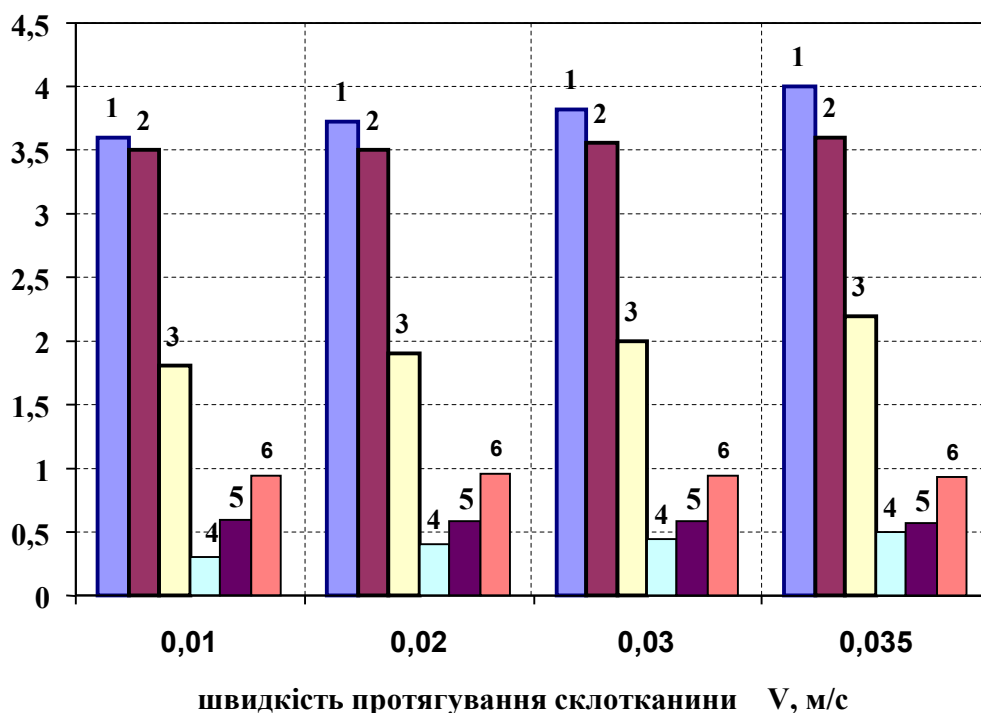


Рис. 6. Залежність величини нанесення зв'язуючого C , %, коефіцієнта варіації нанесення зв'язуючого в матеріалі k_{vc} і коефіцієнта однорідності матеріалу k_o , що просочився, від швидкості протягування тканого наповнювача V за традиційною технологією та за розробленими технологічними засадами тристадійної контактної УЗ-обробки: 1 – величина нанесення зв'язуючого $C \cdot 0,1$, %, в матеріалі за традиційною технологією [1]; 2 – величина нанесення зв'язуючого в матеріалі $C \cdot 0,1$, %, за розробленими технологічними засадами; 3 – коефіцієнт варіації нанесення зв'язуючого в матеріалі $k_{vc} \cdot 0,1$, %, за традиційною технологією [1]; 4 – коефіцієнт варіації нанесення зв'язуючого в матеріалі $k_{vc} \cdot 0,1$, %, за розробленими технологічними засадами; 5 – коефіцієнт однорідності матеріалу, що просочився, $k_o \cdot 0,1$, %, за традиційною технологією [1]; 6 – коефіцієнт однорідності матеріалу, що просочився, $k_o \cdot 0,1$, %, за розробленими технологічними засадами.

З аналізу рис. 6 слідує, що при використанні розроблених технологічних засад тристадійної УЗ-обробки рівномірність розподілу ЕК по матеріалу після видалення надлишків зв'язуючого (коефіцієнт однорідності) збільшилася в (1,5 – 2) рази в порівнянні з технологією [1]. Величина в'язкості складів, що використовуються, зросла в (1,2 – 1,3) рази при однаковій з технологією [1] швидкості протягування і зусиллі притискання.

При однакових же значеннях в'язкості швидкість протягування V зросла в (1,2 – 1,5) рази при одночасному збільшенні коефіцієнта однорідності в 1,2 рази і зменшенні коефіцієнта варіації нанесення C в (1,2 – 1,5) рази. Відбувається також збільшення швидкості видалення надлишків зв'язуючого за рахунок збільшення швидкості протягування, що забезпечує задане нанесення ЕК. Величина робочої в'язкості просочувальних складів зросла щонайменше на (10 – 15)% при однаковій з технологією [1] швидкості протягування (0,01 м/с) і зусиллі притискання (10 Н).

Таким чином, передпросочування ВН ЕК та його комбінована УЗ-обробка у просоченому стані за розробленими технологічними засадами приводить до: видалення шару замаслювача з поверхні волокнистого наповнювача (тканини) безпосередньо перед його «вільним» просочуванням ЕК; збільшення продуктивності процесів просочування і дозованого нанесення ЕК, тобто швидкості протягування матеріалу і швидкості видалення надлишків ЕК при одержанні однорідного матеріалу, що просочився, практично без повітряних включень.

Отримані результати явили основу для детермінації режимів нових УЗ-технологічних засад і конструктивно-технологічних параметрів реалізуючого її технологічного УЗ-обладнання. Більш детальна інформація може бути надана за запитом: www.kolosov.kiev.ua, www.kolosov.ua.

Висновки. 1. Проаналізовано розроблені методики вибору ефективних конструктивно-технологічних параметрів пристроїв та режимів УЗ-модифікації рідких епоксидних композицій та волокнистих наповнювачів, які можуть застосовуватись для підвищення продуктивності озвучування й інтенсифікації процесів просочування і дозованого нанесення.

2. Використання контактної низькочастотної ультразвукової дії є ефективним методом стабілізації вмісту ЕК в просоченому тканому наповнювачі, а також сприяє збільшенню продуктивності процесів просочування і дозованого нанесення ЕК, тобто швидкості протягування матеріалу і швидкості видалення надлишків ЕК при одержанні однорідного матеріалу, що просочився, практично без повітряних включень. Отримані результати доцільно використовувати на серійному просочувально-сушильному обладнанні.

1. Цыплаков О.Г. Научные основы технологии композиционно-волокнистых материалов. Часть 1/ Цыплаков О.Г. — Пермь, Пермское книжное изд-во, 1974. — 317с.

2. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии: [учебное пособие] / М.Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин и др.; под ред. А. А. Берлина. — С-Пб.: Профессия, 2008. — 560 с.

3. Воронков А.Г. Эпоксидные полимеррастворы для ремонта и защиты строительных изделий и конструкций: учебное пособие / А.Г.Воронков, В.П. Ярцев. — Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. — 92 с.

4. Колосов А.Е. Предпосылки использования ультразвуковой обработки для интенсификации технологических процессов получения полимерных композиционных материалов / Колосов А.Е. //Химическое и нефтяное машиностроение (Москва). — 2014 — №1. — С. 7–12.

5. Колосов О.Є. Формування полімерних композиційних матеріалів із застосуванням фізико-хімічної модифікації (у двох частинах). Частина 1. Дослідження передумов направленої здійснення фізико-хімічної модифікації / Колосов О.Є. — К: НТУУ КПІ. — 2005. — 251 с.

6. Колосов О.Є. Формування полімерних композиційних матеріалів із застосуванням фізико-хімічної модифікації (у двох частинах). Частина 2. Ефективні режими та обладнання для здійснення фізико-хімічної модифікації / О.Є.Колосов, В.І.Сівецький. — К: НТУУ КПІ, 2006. — 196 с.

7. Колосов О.Є. Технологія одержання багатокомпонентних епоксиполімерів із застосуванням направленої фізико-хімічної модифікації / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, Є.М. Панов. — К: НТУУ КПІ, 2010. — 220 с.

8. Колосов О.Є. Математичне моделювання базових процесів виготовлення полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвукової модифікації / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, Є.М. Панов та ін. — К.: ВД «Едельвейс», 2012. — 268 с.

9. Колосов О.Є. Аналіз особливостей просочувально-сушильного обладнання для виготовлення препрегів, а також перспективності використання ультразвуку для їх енергоощадного одержання / Колосов О.Є. // Вісник НТУУ «КПІ», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». — 2013. — №1(11). — С. 5–16.

10. Колосов О.Є. Методики розрахунку конструктивних параметрів і перевірки працездатності ультразвукового кавітаційного пристрою та особливості їх патентування / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, К.О. Луговська // Вісник НТУУ КПІ. Сер. Машинобудування». — 2011. — №6 3. — С. 53—60.

11. Колосов А.Е. Методика выбора эффективных конструктивно-технологических параметров устройств для ультразвуковой модификации жидких полимерных композиций и волокнистых наполнителей / А.Е. Колосов, А.С. Сахаров, В.И. Сивецкий, Д.Э. Сидоров, А.Л. Сокольский //Химическое и нефтяное машиностроение (Москва). — 2012. — №7. — С. 42–47.

12. Колосов А.Е. Методика расчета ультразвукового кавитационного устройства с излучающей пластиной / А.Е. Колосов, А.С. Сахаров, В.И. Сивецкий, Е.П. Колосова, Е.А. Луговская // Химическое и нефтяное машиностроение (Москва). — 2012. — №11. — С. 11–17.