

УДК 632.382: 620.179.4

С.Л. ГОРЯЩЕНКО

Хмельницький національний університет

ФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРНОГО ПОКРИТТЯ УЛЬТРАЗВУКОВИМ РОЗПИЛЮВАЧЕМ

В статті розглядаються процеси утворення частинок полімерних композицій під час їх розпилення ультразвуковим розпилювачем. Зазначено, що для утворення м'яких краплинок повинні відбутися певні процеси, що викликані дією ультразвукового резонатора. Отримані значення частинок для трьох видів полімерних композицій, що використовуються для нанесення на тканини з метою захисту. Проведені експериментальні випробування на спеціально розробленому пристрої. Отримані тонкі шари покриттів, що підтвердили можливість використання ультразвукового розпилювача для формування полімерних покриттів.

Ключові слова: полімерні покриття, пристрої для нанесення плівок, нанесення захисних покриттів, частинки полімерів

С.Л. ГОРЯЩЕНКО

Хмельницький національний університет

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ РАСПЫЛИТЕЛЕМ

В статье рассматриваются процессы образования частиц полимерных композиций во время их распыления ультразвуковым распылителем. Отмечено, что для образования мелких капель должны произойти определенные процессы, вызванные действием ультразвукового резонатора. Полученные значения частиц для трех видов полимерных композиций, используемых для нанесения на ткани с целью защиты. Проведенные экспериментальные испытания на специально разработанном устройстве. Полученные тонкие слои покрытий подтвердили возможность использования ультразвукового распылителя для формирования полимерных покрытий.

Ключевые слова: полимерные покрытия, устройства для нанесения пленок, нанесение защитных покрытий, частицы полимеров

S. HORIASHCHENKO

Khmelnyskyi National University

FORMATION OF POLYMERIC COATINGS BY ULTRASOUND SPRAYER

The article deals with the formation of particles of polymer compositions during their spraying with an ultrasonic nebulizer. It is noted that for the formation of small droplets certain processes must occur that are caused by the action of an ultrasonic resonator. The obtained particle values for the three kinds of polymer compositions used for applying to the fabric for protection purposes. Carried out experimental tests on a specially designed device. The resulting thin layers of coatings confirmed the possibility of using an ultrasonic atomizer to form polymer coatings.

Keywords: polymer coatings, devices for film deposition, application of protective coatings, polymer particles

Постановка проблеми

Вибір способу нанесення покриття залежить від декількох факторів. Вони полягають у типі підкладки, формулі полімеру і його в'язкості для нанесення покриття, бажаний кінцевий продукт і точність покриття, економіка процесу.

Розпилення різних рідин і напилення покриттів є основою значної кількості технологічних процесів в виробництвах, що відносяться, в першу чергу, до високотехнологічних секторів економіки. Сюди відносяться: розпилювачі, призначені для роботи в складі установок спектрального аналізу в авіаційному двигунобудуванні, напилення фоторезистів в мікроелектронній промисловості, поліруючих рідин в оптико-електронному приладобудуванні, нанесення покриттів у виробництві медичної техніки та імплантів, розпорошення рідин при виробництві функціональних наноматеріалів і багато іншого. Існують різні способи нанесення покриттів, що ґрунтуються на застосуванні полімеру до текстилю. Вони можуть бути класифіковані за типом устаткування, використовованого методу, обліку та формі покриття.

Серед безлічі різних способів найбільш ефективним є УЗ розпилення [1], що володіє унікальними перевагами: низькою енергоємністю і високою продуктивністю процесу; можливістю

забезпечення дрібнодисперсного і монодисперсного розпилення; можливістю розпилення високов'язких рідин без додавання розчинників; можливістю розпилення розплавів металів; високою якістю і рівномірністю формованих покриттів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогоднішній день найбільш поширеною теорією, яка описує механізм ультразвукового розпилення рідин, є теорія кавітаційно-хвильового розпилення рідин, запропонована Богуславським [2] і Екнадіосянцем [3] і, згодом, розвинена Новицьким [4]. Ця теорія заснована на припущенні, що розпорощення здійснюється шляхом відриву крапельок рідини з гребнів стоячих капілярних хвиль, що параметрично порушуються на поверхні розділу середовищ рідина-повітря внаслідок обурення поверхні рідини, що коливається поверхнею випромінювача.

Виходячи з цього, в ультразвуковому способі розпилення рідин енергія зазнає кілька стадій перетворення:

- коливання поверхні, що випромінює ультразвукового перетворювача створює звуковий тиск в розпилюваному шарі рідини;
- звуковий тиск зумовлює утворення кавітаційних порожнин (бульбашок) в рідині, і здійснює запас енергії в кавітаційній бульбашці, викликаючи її розширення;
- при закритті кавітаційного пухирця, запасеного в бульбашці, енергія перетворюється в енергію ударної хвилі;
- енергія ударної хвилі витрачається на утворення на поверхні рідини капілярної хвилі;
- енергія капілярної хвилі витрачається на збільшення вільної поверхні рідини, тобто на утворення крапель рідини, що викликає її розпилення.

В роботі [3] вивчався вплив фізичних властивостей газу, рідини в розпилювачі типу Вентурі. Порівняння даних по розпилюванні азотом і етаном показало, що зменшення в'язкості газу на 60% призводило приблизно до такого ж збільшення середнього діаметра крапель. Зменшення ж щільності газу приблизно в 7 разів при заміні азоту гелієм призвело до збільшення середнього діаметра крапель приблизно в 2 рази, незважаючи на деяке збільшення швидкості.

Формулювання мети дослідження

Метою досліджень було перевірити можливість ультразвукового розпилення полімерних композицій з різною в'язкістю на тканину з метою створення певного шару покриття.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розглядаючи процеси, що виконують різні ультразвукові розпилювачі та математичні процеси, що їх описують [1, 2] ми можемо зауважити, що процес розпилення в тонкому шарі полімеру не охоплює всі параметри, які характеризують процеси, що там відбуваються.

Ультразвукове розпилення можливо завдяки подачі синусоподібного електричного сигналу на п'єзоелектричний перетворювач. Цей перетворювач породжує стоячі хвилі в системі. На відміну від існуючих ультразвукових розпилювачів рідини [1] при розпиленні полімерів постає кілька нових задач. Особливо складно описати процес розпилення полімеру за рахунок потоку газу. В цьому випадку передача енергії коливань відбувається через газ до краплин полімеру, що рухається в ньому. На цих краплинах будуть утворюватися капілярні хвилі, що призводять до розпаду краплин на більш мілкіші. Рівняння енергетичного балансу в цьому випадку буде:

$$E_{ак} = E_{від} + E_{утв} + E_{кап} + E_{газ} + E_{кав} + E_{темп}, \quad (1)$$

де $E_{ак}$ – енергія акустичного резонатора, що підводиться до системи;

$E_{від}$ – енергія, що необхідна для відриву каплі від основного потоку, $E_{від} = E_{коз} + E_{вз}$;

$E_{коз}$ – енергія, що необхідна для подолання когезії;

$E_{вз}$ – енергія, що необхідна для подолання в'язкого тертя в полімері;

$E_{утв}$ – енергія, що необхідна для утворення каплі;

$E_{кап}$ – енергія краплини, що рухається в потоці;

$E_{газ}$ – енергія, яку необхідно передати через газове середовище;

$E_{кав}$ – енергія, що необхідна для кавітаційних процесів в полімері;

$E_{темп}$ – енергія, що витрачається на нагрівання середовища.

При розрахунках та проектуванні ультразвукових розпилювачів слід враховувати їх резонансний тип роботи. Стояча хвиля пружної деформації утворюється нормально до потоку розпилення. Тиск в таких хвилях визначається формулою:

$$p = p_K \sin kx \cdot \cos \omega t. \quad (2)$$

Сама хвиля характеризується наявною в неї кінетичною та потенційною енергіями, що визначаються як [1]:

$$E_{пот} = \frac{1}{8} \frac{1}{\rho_K c_K^2} p_K^2 (1 - \cos 2kx), \quad (3)$$

$$E_{кін} = \frac{1}{8} \frac{1}{\rho_K c_K^2} p_K^2 (1 + \cos 2kx),$$

де - ρ_K, c_K^2 відповідно щільність та швидкість звуку в матеріалі сопла;
 k – волнове число;
 p_K – амплітуда коливального тиску в хвилі;
 x – відстань від вузла до хвилі;
 Враховуючи, що $E_{розб} = E_{пот} + E_{кін}$ запишемо:

$$E_{пот} = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho_K c_K^2} p_K^2 \sin^2 kx \cdot \cos^2 \omega t, \quad (4)$$

$$E_{кін} = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho_K c_K^2} p_K^2 \cos^2 kx \cdot \cos^2 \omega t,$$

$$\zeta_1 = \frac{\rho_K c_K}{\rho_p c_p}. \quad (5)$$

де ρ_p, c_p - відповідно щільність та швидкість звуку в рідкому полімері.
 $E_{подв} = \zeta_1 S_{\partial} h_p E_{дисп}$ - енергія, що подається на шар полімеру, який є в стоячих хвилі.

$$E_{подв} = \frac{1}{2} \frac{S_{\partial} h_p}{\rho_K c_K^2} p_K^2 \cos^2 \omega t, \quad (6)$$

S_{∂} - площа рідкого полімеру
 h_p - товщина шару рідкого полімеру.

Враховуючи те, що товщина рідкого шару полімеру, який подається в сопло, дуже мала, вважаємо, що у нас утворюються плоскі хвилі довжиною λ , тоді $h_p < \frac{S_{\partial}}{\lambda}$,

Для визначення оптимальної товщини шару рідини, що розпилюється необхідно розглянути механізм кавітаційного утворення краплин рідини. Як відомо, розпилення рідини в шарі під дією капілярних хвиль.

Сили інерції зі сторони газового потоку, що призводить до деформації каплі, при певному її розміру викликають в решті решт подрібнення каплі. Як відомо, загальної теорії подрібнення краплин не існує, однак зрозуміло, що деформація краплини і подальше її подрібнення пов'язане з дотичним напруженням зі сторони газового потоку, що діє на поверхню краплини. Це описується рівнянням [2]

$$\tau_i = c_i \rho'' u_{\infty}^2 / 2, \quad (7)$$

де c_i – коефіцієнт тертя на межфазній границі.
 Деформації протидіють загальновідомі сили поверхневого натягу:

$$f_{\sigma} = \sigma / d, \quad (8)$$

де σ - поверхневий натяг, d – діаметр краплі.

Отже, подрібнення крапель визначається деяким значенням числа Вебера, яке може бути згідно з [5] $We_{кр} = 7 - 10$. Крапля, що втрачає стійкість, спочатку перетворюється у тор, а потім розпадається на менші. Швидкість руху краплини перед подрібненням визначається так:

$$U_{\infty} = const \sqrt[4]{\frac{\sigma a (\rho' - \rho'')}{(\rho'')^2}} \quad (9)$$

де ρ', ρ'' - щільність твердої та повітряної фази, a - прискорення, що діє на потік.

При розпиленні, зазвичай, швидкість руху краплин співпадає з швидкістю руху потоку газу, однак, якщо розпилення відбувається зверху, то до швидкості газу для краплин слід додати U_{∞} з підставленим значенням прискорення вільного падіння. Умовний граничний розмір краплини $d_{гр}$ в долях капілярної константи можна виразити як:

$$We_{кр} = \frac{\rho'' U_{\infty} d_{гр}}{\sigma} = \frac{\rho'' d_{гр} (const)^2}{\sigma \rho''} = 7 - 10 \quad (10)$$

При $const = 1,6 - 1,8$ отримаємо:

$$d_{rp} = (2 - 3)b \quad (11)$$

$$b = \sqrt{\frac{\sigma}{a(\rho' - \rho'')}}.$$

Підставивши значення, отримаємо розміри крапель для потоку полімеру в повітрі при його розпиленні, які представлені на рис. 1 та 2, де позначено: *I* – латекс СВХ, *II* – акрилонитрильний латекс СКН-40-ГП, *III* – фтормістний полімер БФ-1.

Відомо [4, 5, 6], що розчини мають від 2% до 5% полімерів, акрилова емульсія та латекс має 20% дисперсію з частинками 0.1 мкм.

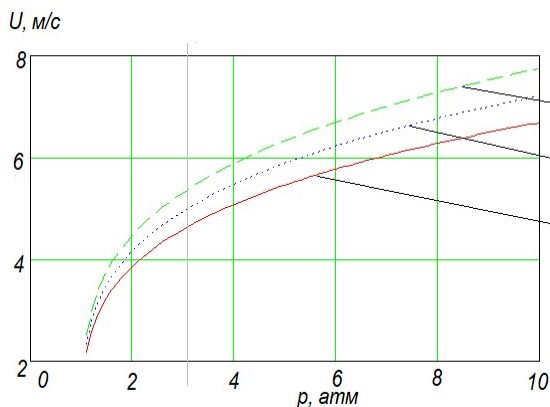


Рис. 1. Розрахункові значення швидкості потоку краплин в залежності від тиску

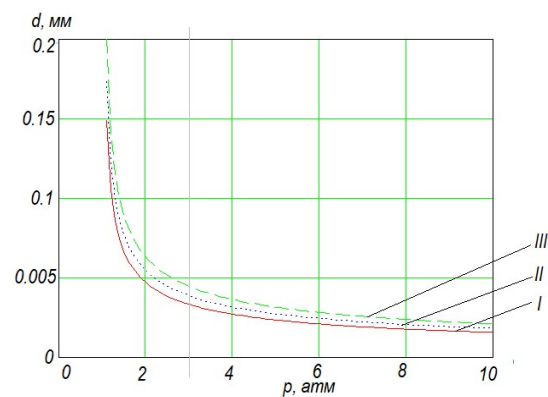


Рис. 2. Розрахункові значення діаметри краплин в залежності від тиску

Проведені розрахунки показали, що наявність більш важких елементів у БФ-1 не дає йому утворювати менші за інших краплини, однак, він має більшу інерційність і тому більші швидкості розпилення, що позитивно може відобразитись на глибині проникнення плівки у структурі тканини.

Крім того, граничні значення різних полімерів залежать від прискорення при розпиленні, яке залежить не тільки від тиску а й від форми сопла.

Була розроблена експериментальна установка [7, 8], що складається з розпилювача та ультразвукового резонатора навколо сопла. Розпилення полімерів відбувалось на відстані 20 см на вертикально розташовану тканину (рис.3). Результат отриманого покриття показано на рис.4.



Рис. 3. Процес ультразвукового розпилення та нанесення полімеру на тканину



Рис. 4. Результати нанесення полімерів на тканину

Для контролю потоків розпилення використовуються оптичні (в основному, лазерні) лічильники частинок - фотоелектричні прилади, що визначають кількість частинок, прокатаних через вимірювальний об'єм приладу, шляхом підрахунку кількості імпульсів світла, розсіяного кожної окремої часткою при її прольоті через світловий промінь.

Узагальнена оптична і пневматична схема такого приладу представлена на рис. 5. Тонкий струмінь факелу розпиленого полімеру прокачується через сфокусований промінь світла від джерела випромінювання (лазера), причому діаметр струменя підбирається таким чином, щоб в промені знаходилось, як правило, не більше однієї аерозольної частинки. Для запобігання поширення частинок усередині вимірювальної камери аерозольна струмінь обдувається коаксіальним струмом чистого повітря. Світло, розсіяне часткою, збирається оптичною схемою і направляється на фотоприймаючий пристрій. Опорний діод використовується для стабілізації рівня випромінювання джерела світла. Світлові імпульси перетворюються фотоприймачем в електричні імпульси, амплітуда яких пропорційна геометричному розміру частинок.

Одночасно прилад вимірює той чи інший об'єм повітря, що пройшов через вимірювальний об'єм, що дозволяє шляхом простої арифметичної дії (здійснюваного зазвичай електронним блоком приладу без втручання оператора) визначити значення рахункової концентрації часток.

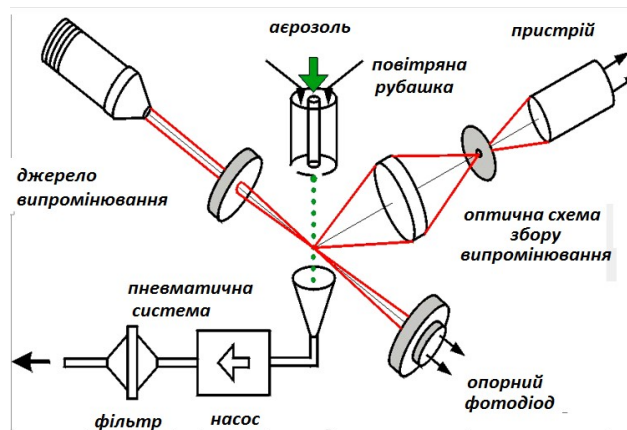


Рис. 5. Узагальнена оптична і пневматична схеми оптичного лічильника часток

Найважливішими характеристиками як лічильників, так і спектрометрів частинок потоку є:

- діапазон розмірів вимірюваних часток (від 0.5 мкм до 0.3 мкм);
- число розмірних діапазонів (каналів), на які ділиться інтервал розмірів частинок; як правило, чисельне значення - від 6 до 12 каналів
- швидкість пробовідбору, діапазон можливих значень зазвичай від 2,8 л / хв до не скільки десятків (зазвичай - 28) літрів за хвилину;
- максимальна рахункова концентрація, яка вимірюється приладом без попереднього розведення (в межах 500 - 1000 частинок / см³);
- власний фон приладу - число імпульсів, що фіксуються приладом протягом заздалегідь обраного часу в умовах, коли на вхід приладу подається очищене повітря. Таким чином, цей параметр характеризує число помилкових спрацьовувань електроніки приладу.

Аналізатори розміру крапель збирають і фіксують дані, як правило, у вигляді кількості рахунків за розміром класу. Дані впорядковані в математичне подання, яке називається розподілом розміру краплі. Математичне подання найчастіше залежить від використовуваного аналізатора. Проте останнім часом деякі виробники аналізаторів дозволили користувачеві вибрати зі списку функцій розподілу, а не за замовчуванням функцію розподілу розмірів падіння. Деякі з найпоширеніших функцій розподілу падіння розмірів, що використовуються в промисловості - це функція розподілу Rosin-Rammler [5] та аналіз ASTM® Standard E799-03 [10, 11]

Функція розподілу Rosin-Rammler:

$$F(d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{X}\right)^N\right]. \quad (12)$$

Параметри (X і N), отримані в результаті вимірювання, використовуються в цьому рівнянні для розрахунку розподілу та характеристик або середніх діаметрів:

$$d_{pq} = \frac{\sum N_i d_i^p}{\sum N_i d_i^q}. \quad (13)$$

Стандарт ASTM E799-03 [10,11] найкраще підходить для використання з аналізаторами, які класифікуються як одиночні частки, такі як потоки. Цей стандарт використовується для класифікації діаметрів краплі, а також для розрахунку розподілу та характеристик або середніх діаметрів.

Отримані дані з аналізатора про формування краплин ультразвуковим розпилювачем були в адекватних межах розрахункових значень. Відхилення склали не більше 10%.

Висновки

Після проведених експериментальних досліджень було встановлено, що густина обраних полімерних композицій достатня для розпилення з використанням ультразвукового розпилювача, причому краплини полімеру проникають у структуру матеріалу. Товщина покриття складала від 3 до 10 мкм. Експериментально підтверджено, що зі збільшенням тиску та частоти ультразвукових коливань діаметр краплин при розпилення зменшується. Оптимальний діапазон 70-80 кГц. Таким чином зберігається якість матеріалу, а крапкове проникнення полімеру в його структуру піднімає її жорсткість та змінює властивості, надаючи нові, наприклад, захисні. Крім того, крапкове проникнення в структуру тканини матеріалу не призводить до значного її потовщення.

Список використаної літератури

1. Хмелев, В. Н. Ультразвуковое распыление жидкостей/ В. Н. Хмелёв, А. В. Шалунов, А. В. Шалунова – Барнаул АлтГТУ, 2010. – 272 с.
2. Розенберг, Л. Д. Физика и техника мощного ультразвука. В 3 т. Т. 3: Физические основы ультразвуковой технологии / Под редакцией Л. Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – 270 с.
3. Экнадиосянц, О. К. Получение аэрозолей / О. К. Экнадиосянц, // Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л. Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – С. 337-395.
4. Новицкий, Б. Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / Б. Г. Новицкий. – М.: Химия, 1983. – 192 с.
5. Spread coating processes, R. A. Park, in *Plastisols and Organosols*, H. A. Sarvetnick, Ed., Van Nostrand Reinhold, New York, - 1972, pp. 143–181.
6. Experimental research drop size in polymers sprayed onto textile materials. Horiashchenko S./Interdisciplinary integration of science in technology, education and economy// Monograph: edited by Shalapko J. and Zoltowski B. Poland. Bydgoszcz – 2013, p.402-408
7. Horiashchenko S. Research Spray and Device for Polymer Coatings on Fabric // Proceedings of the 20th International Scientific Conference: Mechanika-2015, Kaunas - 2015, p.101-104
8. Serhiy Horyashchenko. Simulation of particle flow of the polymer droplets using ultrasonic spraying /Serhiy Horyashchenko, Ievgeniia Golinka/ 22th International Scientific Conference: Mechanika-2017 – Proceedings, Kaunas – 2017, p.134-137
9. Modeling and reserch of polymer coating on clothing materials. S. Horyashchenko, G. Paraska, S. Petegerych. // Innovation in textile materials&protective clothing. Monograph, Warsaw, 2012, c.151-159.
10. E799-03: Standard Practice for Determining Data Criteria and Processing for Liquid Drop Size Analysis. Book of ASTM® Standards, General Methods and Instrumentation, Volume 14.02: 535-539.
11. E1620-97: Standard Terminology relating to liquid particle statistics. Book of ASTM Standards, General Methods and Instrumentation, Volume 14.02: 810-812.