

Для прикладу, максимальне відхилення прямолінійності (у площині) порожнистого клеєного бруса (лінія 10) після проведення експериментальних досліджень становило $EFL_{max}=0,067$ мм (див. рис. 5, в), а до їх проведення – $EFL_{max}=0,059$ мм (див. рис. 5, а), що менше $EFL_{дон}$. Найбільше максимальне відхилення прямолінійності (у площині) порожнистого клеєного бруса становило $EFL_{max}=0,090$ мм (брус № 14, лінія 7).

Результати порівняння фактичного відхилення від площинності порожнистих клеєних брусів (для всіх ліній) на різних етапах експериментальних досліджень (EFL) з допустимим значенням ($EFL_{дон}$), яке регламентується нормативними документами, зокрема [3] і для номінальних розмірів від 400 до 630 мм становить 0,5 мм (за 13 ступенем точності), свідчать про відповідність брусів встановленим вимогам. Для прикладу, найбільше максимальне відхилення від площинності порожнистого клеєного бруса становило $EFL_{max}=0,140$ мм (брус № 14, лінії 7, 8).

Результати порівняння фактичного відхилення від паралельності порожнистих клеєних брусів (для всіх ліній) на різних етапах експериментальних досліджень (EPA) з допустимим значенням ($EPA_{дон}$), яке регламентується нормативними документами, зокрема [3] і для номінальних розмірів від 400 до 630 мм становить 0,8 мм (за 13 ступенем точності), свідчать про відповідність брусів встановленим вимогам. Для прикладу, найбільше максимальне відхилення від площинності порожнистого клеєного бруса становило $EPA_{max}=0,210$ мм (брус № 14, лінії 7, 8 та 1, 2).

Результати розрахунків величини зміни лінійних розмірів (всихання, розбухання) порожнистих клеєних брусів за товщиною і шириною, отримані на різних етапах експериментальних досліджень, засвідчили, що для усіх брусів величина зміни лінійних розмірів знаходилася у допустимих межах. Граничні відхилення лінійних розмірів порожнистих клеєних брусів для столярних виробів, регламентовані нормативними документами, зокрема [7] і для номінальних розмірів від 30 до 120 мм становлять $\pm 0,15$ мм (за класом точності "точний"), тобто для товщини бруса $69^{\pm 0,15}$ мм, а для ширини – $81^{\pm 0,15}$ мм.

Вплив величини зміни лінійних розмірів порожнистих клеєних брусів, в основному, відображений у результатах їхніх відхилень від прямолінійності (у площині), площинності і паралельності.

Висновок. Результати експериментального дослідження формостійкості порожнистих клеєних брусів засвідчили їх придатність для використання у виробництві столярних виробів, оскільки значення, що характеризують формостійкість брусів, зокрема їхні відхилення від прямолінійності (у площині), площинності і паралельності та величина зміни лінійних розмірів за товщиною і шириною, відповідають встановленим нормативним вимогам.

Література

1. Безкоровайний А.Г. Особливості технології виготовлення пустотілого клеєного бруса / Безкоровайний Андрій Григорович. – Львів : Вид-во НЛТУ України, 2008. – 53 с.
2. Маевский В.О. Использование пустотелых клееных брусев в столярных изделиях / В.О. Маевский, В.М. Максмыив, А.Г. Безкоровайный // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов : матер. Междун. науч.-практ. конф., 25-27.11.2009 г. – Минск : Изд-во БГТУ, 2009. – С. 246-250.

3. ГОСТ 6449.3-82. Изделия из древесины и древесных материалов. Допуски формы и расположения поверхностей. – М. : Изд-во Стандартов, 1982. – 7 с.
4. ГОСТ 6449.1-82. Изделия из древесины и древесных материалов. Поля допусков для линейных размеров и посадок. – М. : Изд-во Стандартов, 1982. – 20 с.
5. ДСТУ 2500-94. Основні норми взаємозамінності. Єдина система допусків та посадок. Терміни та визначення. Позначення та загальні норми. – К. : Вид-во Держстандарту України, 1994. – 57 с.
6. ГОСТ 24642-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения. – М. : Изд-во Стандартов, 1982. – 45 с.
7. ГОСТ 6449.5-82. Изделия из древесины и древесных материалов. Неуказанные предельные отклонения и допуски. – М. : Изд-во Стандартов, 1982. – 8 с.

Надійшла до редакції 13.12.2016 р.

Безкоровайний А.Г., Маевский В.О., Мыскив Е.М. Динамика изменения формоустойчивости пустотелых клееных брусев для столярных изделий

Охарактеризована методика проведения экспериментального исследования формоустойчивости пустотелых клееных брусев для столярных изделий при условии влияния переменных температурно-влажностных полей в течении длительного времени. Проанализированы показатели формоустойчивости пустотелых клееных брусев, в частности их отклонения от прямолинейности (в плоскости), плоскостности и параллельности, а также величину изменения линейных размеров по толщине и ширине, и показано, что эти величины соответствуют установленным нормативным условиям. Это свидетельствует о пригодности использования таких брусев для изготовления столярных изделий по показателям формоустойчивости.

Ключевые слова: пустотелый клееный брус, формоустойчивость, переменные температурно-влажностные поля, климатическая камера, прямолинейность, плоскостность, параллельность.

Bezkorovainyi A.H., Mayevskyy V.O., Myskiv Ye.M. Dynamics of Shape Stability Changes in Hollow Glued Laminated Beams Used for Joinery

The method of experimental performing of shape stability of hollow glued laminated beams for joinery under variable temperature and humidity fields for a long time is characterized. The parameters of shape stability of hollow glued laminated beams, e.g. straightness error in plane, deviation of flatness and deviation of parallelism as well as the value of linear dimension change at depth and width have been analysed. It is shown that these parameters correspond to established normative regulations. The available data indicates that these beams with appointed shape stability are suitable for joinery production.

Keywords: hollow glued laminated beam, shape stability, variable temperature and humidity fields, climatic chamber, straightness, flatness, parallelism.

УДК 66.047.74

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОДНОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ДИСПЕРСІЇ МЕТОДАМИ НЕІЗОТЕРМІЧНОГО АНАЛІЗУ

Р.І. Гаєрлів¹, В.В. Кочубей², С.Р. Філяс³, О.В. Сабінін⁴

За допомогою термогравіметричних досліджень проаналізовано процес сушіння водної полімерної дисперсії на основі поліметилметакрилат-полістиролу. Визначено термічну поведінку зразків матеріалу в неізотермічних умовах нагрівання, встановлено механізм сушіння та кінетичні особливості процесу. Результати досліджень на основі те-

¹ доц. Р.І. Гаєрлів, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка";

² доц. В.В. Кочубей, канд. хім. наук – НУ "Львівська політехніка";

³ магістрант С.Р. Філяс – НУ "Львівська політехніка";

⁴ магістрант О.В. Сабінін – НУ "Львівська політехніка"

оретичних та експериментальних даних дають змогу запропонувати оптимальні режими проведення процесу в промислових умовах для досягнення заданої кінцевої вологості.

Ключові слова: полімерна дисперсія, волога, сушіння, термогравіметричний аналіз.

Постановка проблеми. Кінцевою стадією в загальній технологічній схемі виготовлення полімерної продукції є процес сушіння, що дає змогу отримати товарний продукт високої якості у вигляді твердого порошку, гранул, зерен, таблеток і належить до великотоннажних процесів хімічної технології, які характеризуються значними енергетичними затратами [1].

У промислових умовах сушіння полімерів здійснюється переважно в установках розпилювального типу або в апаратах псевдозрідженого шару. Використання розпилювальних сушарок має низку переваг порівняно з апаратами інших типів, що зумовлено, передусім, розвиненою поверхнею контакту фаз, і, відповідно, високою інтенсивністю процесу, простотою конструкції, можливістю поєднати процеси диспергування та сушіння в одному апараті, високим ступенем автоматизації [2]. До недоліків потрібно віднести певні особливості сушіння для широкого спектра продуктів, що вимагає відпрацювання оптимальних технологічних режимів в промислових умовах та призводить до значних економічних втрат.

Основною причиною такого стану треба вважати невідповідність розрахункових і дійсних параметрів, що здебільшого пов'язано з відсутністю експериментальних даних з кінетики сушіння цілого ряду матеріалів, фізичного механізму перебігу термодинамічних і масообмінних процесів, надійних розрахункових методик та математичного опису тепломасоперенесення у системі газ – тверда частинка [3,4].

Окрім цього, вважається, що якість висушених полімерів дуже часто залежить не тільки від кінетики видалення вологи, але й від гідродинаміки у сушильній камері та кінетики нагрівання матеріалу, що особливо актуально для продуктів, в яких, під дією високих температур, можуть відбуватися різноманітні фізичні переходи та хімічні перетворення [5]. Присутність вологи у полімерному порошку навіть у невеликій кількості може призвести до браку під час перероблення його у готові вироби, що потребує проведення процесу "глибокого сушіння" у достатньо складних технологічних умовах.

Отже, організація ефективного процесу в апаратах розпилювального типу та впровадження у виробництво енергоефективного сушильного обладнання є актуальною задачею, вирішення якої знаходиться в площині наукових досліджень на основі експериментального вивчення технологічних аспектів сушіння того чи іншого матеріалу і встановлення відповідних розрахункових залежностей для його математичного опису.

Мета дослідження – полягає в експериментальному визначенні поведінки водної полімерної дисперсії під час нагрівання її в неізотермічних умовах та встановленні механізму процесу сушіння.

Об'єктом дослідження є водна полімерна дисперсія на основі поліметилметакрилат-полістиролу із вмістом твердої фази 45-47 %.

Матеріали та методика дослідження. Найбільш надійним методом вивчення будь-якого процесу є, звичайно, експериментальні дослідження. Традиційно, сушіння матеріалів представляють у вигляді "кривих сушіння" і "кривих швидкості сушіння" для вибраних температурних режимів, які отримують в ізотермічних умовах [6]. Однак, з погляду процесів, які відбуваються в камері розпилювальної сушарки, доцільно було б розглядати сушіння для окремої частинки або краплі, розміри якої в реальних умовах можуть змінюватися від 50 до 150 мкм [7]. Відтворити такі умови на лабораторних установках традиційними експериментальними методами є досить складно.

Останнім часом широко використання набули методи термічного аналізу, які використовують для вивчення термодеструкції, гетерогенних реакцій, сушіння, десорбції та інших процесів, для яких характерним є виділення або поглинання газоподібних компонентів із зразків матеріалу невеликої маси [8-10]. Цей метод аналізу може бути реалізований в ізотермічних (за постійної температури) і динамічних (за постійної швидкості нагрівання) умовах. Динамічна термогравіметрія дає змогу не тільки отримати кількісні характеристики процесу розкладання (температура початку і закінчення процесу, ступінь розкладання як функція температури й ін.), а й описати цей процес з достатньою точністю у вигляді кінетичних рівнянь [11].

У цій роботі термогравіметричний аналіз проводили на дериватографі Q-1000 системи F. Paulik, J. Paulik, L. Erdey з платино-платинородієвою термопарою під час нагрівання зразків у вигляді тонкого шару у керамічних тиглях від 16 до 125°C. Швидкість нагрівання становила 1°C за хвилину. Еталоном слугував прожарений оксид алюмінію. Маса зразка матеріалу становила 50 мг. Фіксували криві: T – зміна температури; TG – зміна маси; DTG – диференціальна крива зміни маси; DTA – характеризує зміну різниці температур зразка та інертної речовини і характеризує тип та величину теплового ефекту.

Результати дослідження. Швидкість сушіння окремих краплинок полімерної суспензії в розпилювальній сушарці насамперед визначається енергією і формою зв'язку вологи з матеріалом, яку загалом класифікують як вільну і зв'язану. Виділення вільної вологи з поверхні частинок може відбуватися протягом кількох секунд, тоді як виділення зв'язаної вологи вимагає проведення "глибокого процесу сушіння" і характеризується дифузійними процесами перенесення вологи зі середини крапель (гранул) матеріалу до його поверхні та може тривати відносно довго. На основі таких припущень існує класифікація дисперсних полімерних матеріалів за тривалістю їх сушіння, що визначається лімітуючою стадією зовнішньо- чи внутрішньо-дифузійного перенесення вологи.

На першому етапі експериментальних досліджень методами термічного аналізу вивчали закономірності сушіння полімерної дисперсії на мікрокінетичному рівні в межах диференційно тонкого шару матеріалу у вигляді тонкої плівки. Результати представлено на рис. 1 у вигляді кривих TG, DTG і DTA, які відображають зміну маси зразка, швидкість зміни маси і зміни тепловмісту зразка від температури, відповідно. Склад водної полімерної дисперсії та її фізичні властивості наведено в таблиці.

Табл. Фізичні властивості водної полімерної дисперсії

№ з/п	Параметр	Значення	Од. вимір
1	Вміст твердої фази (поліметилметакрилат-полістирол)	45-47	%
2	Розмір частинок твердої фази	0,2-0,4	мкм
3	В'язкість за 25 °С (по DIN 53019-1)	200-500	мПа·с
4	Густина дисперсії	1108	кг/м ³
5	Рівень рН (за DIN ISO 2115)	8,0-8,8	-
6	Температура плівкоутворення (за DIN ISO 2115)	93	°С
7	Температура склування (за DIN ISO 2115)	104	°С

Згідно з результатами, представленими на рис. 1, у процесі збільшення температури від 16 °С до 120 °С спостерігається втрата маси зразка, що пов'язано з виділенням вологи (термічної деструкції за таких низьких температур не спостерігається). Криві DTA і DTG характеризуються трьома ендотермічними ефектами: в інтервалі температур 16-40 °С, 40-80 °С та невеликим ендоефектом в інтервалі 80-110 °С, що відображає певні фізичні перетворення у досліджуваному зразку, які відбуваються з різною інтенсивністю. Основна втрата маси спостерігається в межах перших двох інтервалів і становить 19 % до температури 40 °С та 47,6 % до температури 80 °С, відповідно. Враховуючи початкову вологість матеріалу, до кінця другого інтервалу видаляється, приблизно, W=98,4 % від загальної кількості вологи у матеріалі (рис. 2).

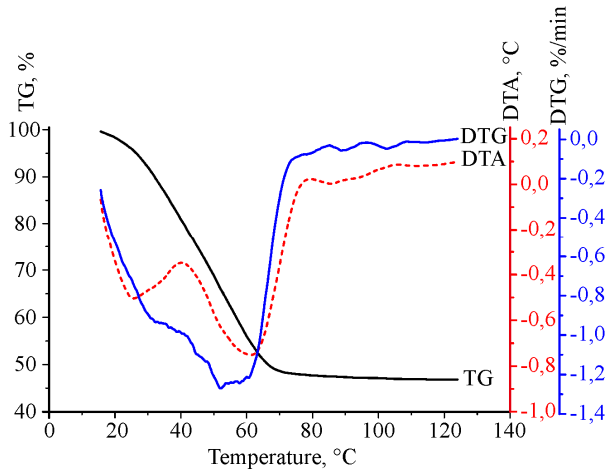


Рис. 1. Дериватограма вологого зразка матеріалу

Відносну кількість вологи W у матеріалі розраховували як

$$W = \frac{M - M_k}{M_0 - M_k}, \quad (1)$$

де: M_0 – початкова маса зразка, мг; M_k – кінцева маса зразка, мг; M – маса зразка в певний момент часу τ , мг. В неізотермічних умовах нагрівання співвідношення між температурою зразка t (°С) і швидкістю нагрівання β (°С/хв) виражали залежністю

$$t = t_0 + \beta\tau, \quad (2)$$

де: t_0 – температура початку сушіння, °С; τ – час сушіння, хв.

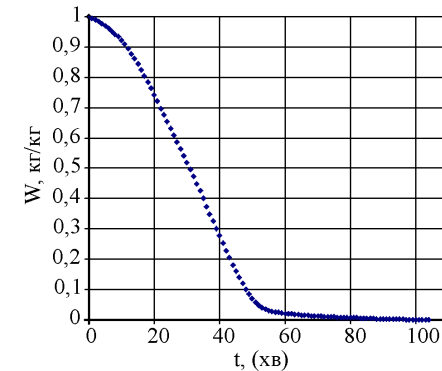


Рис. 2. Крива зміни відносної вологості матеріалу в неізотермічних умовах нагрівання

Появу першого ендоефекту в області низьких значень температур 20-40 °С, очевидно, можна пояснити виділенням летких складників з полімерної композиції, тоді як другий ендоефект пов'язаний з виділенням поверхневої вологи. Такі припущення добре узгоджуються з даними кривої швидкості втрати маси DTG (див. рис. 1) та кривої швидкості сушіння (рис. 3), де спостерігається відповідне збільшення інтенсивності процесу в два етапи, а характерний пік випаровування вологи існує в межах другого ендоефекту за температури 50-52 °С.

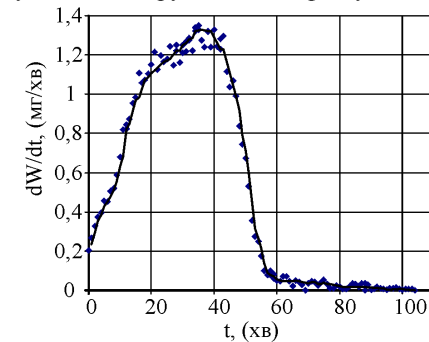


Рис. 3. Крива зміни швидкості сушіння матеріалу в неізотермічних умовах нагрівання

У разі потреби "глибокого сушіння" полімерних матеріалів процес продовжують до кінцевої вологості, яка дуже часто може бути менше 0,1 %. Для досліджуваного зразка в міру зростання температури від 80 до 120 °С спостерігається різке зменшення швидкості сушіння та супроводжується третім ендоефектом з характерним піком в області фазового перетворення води 90 °С. Треба звернути увагу на криву сушіння (див. рис. 2), де в області температур 70-80 °С відбувається досить різкий перехід від процесу масоперенесення із зов-

нішньо-дифузійної області (видалення летких і зовнішньої вологи) до внутрішньо-дифузійної області (видалення внутрішньої вологи).

Окремо можемо відзначити вплив температури та вологості матеріалу на зміну властивостей зразка у процесі сушіння. У міру зростання температури та видалення зовнішньої вологи поверхня зразка висихає, утворюючи тонку плівку за температури плівкоутворення 93 °С. Утворена плівка створює додатковий дифузійний опір видалення вологи зі середини матеріалу.

Після досягнення зразком температури 100-105 °С, що відповідає температурі фазового перетворення води і температурі склування полімеру (104 °С), плівка руйнується внаслідок того, що тиск насиченої пари води в середині зразка матеріалу стає достатнім для деформації поверхневої структури матеріалу. На рис. 4 представлено фотографії зразків за різних температур процесу, що свідчить про рух рідини на пізніх етапах сушіння шляхом дифузії через новоутворену пористу зруйновану структуру. Кінцева рівноважна вологість зразка 0,07 % досягається за температури 119 °С.

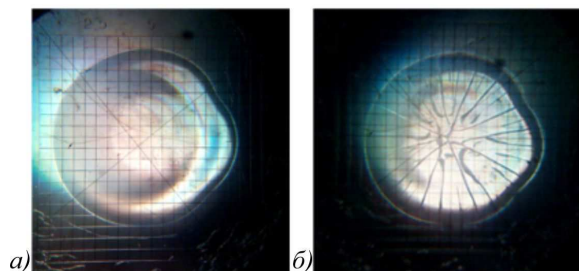


Рис. 4. Фотографії зразків за різних температур процесу:
а) температура зразка 20 °С; б) температура зразка 100 °С

Зважаючи на представлений аналіз експериментальних даних, встановлені температурні зони сушіння досліджуваного зразка дають змогу вибрати ефективні технологічні параметри промислового проведення процесу в межах 100-105 °С та отримати продукт з кінцевою вологістю 1-2 %.

Висновки. Представлені результати термічного аналізу в неізотермічних умовах дають змогу уточнити складний механізм процесу сушіння водної полімерної дисперсії та представити його у вигляді трьох окремих основних стадій: виділення летких компонентів до температури 40 °С, виділення вільної вологи до 80 °С і виділення зв'язаної вологи до 110 °С.

Кожна стадія характеризується різною швидкістю втрати маси зразка та енергією зв'язку вологи з матеріалом. У разі потреби глибокого сушіння матеріалу в промислових умовах потрібно враховувати зміну фізичних властивостей матеріалу на механізм і кінетику процесу.

Отримані експериментальні дані будуть використані для подальшого розвитку теорії розрахунку та моделювання процесів тепломасоперенесення у процесі сушіння полімерних матеріалів, прогнозування режимних параметрів, розроблення та проектування енергоефективного сушильного обладнання.

Література

1. Долинский А.А. Эффективные методы управления кинетикой сушки / А.А. Долинский // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) : тр. 1-й Междунар. науч.-практ. конф. – М. : Изд-во "Наука", 2002. – С. 26-35.
2. Фролов В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / В.Ф. Фролов. – Л. : Изд-во "Химия". – 1987. – 208 с.
3. Дмитриев В.М. Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление процесса конвективной сушки гранулированных и плёночных полимерных материалов : дисс. ... д-ра техн. наук / В.М. Дмитриев. – Тамбов, 2003. – 20 с.
4. Рудобашта С.П. Теплообмен в процессах сушки / С.П. Рудобашта // Труды 4-го Минского международного форума по теплообмену. – Минск, 2000. – С. 41-48.
5. Леонтьева А.И. Научные основы техники сушки термолабильных материалов / А.И. Леонтьева, К.В. Брянкин, А.А. Дегтярев, В.С. Орехов. – М. : Изд. дом "Академия Естествознания", 2011. – 100 с.
6. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – Изд. 2-ое, [перераб. и доп.]. – М. : Изд-во "Энергия", 1968. – 236 с.
7. Leontieva, A.I. Heat and mass transfer during of liquid film from the surface of a single inert particle / A.I. Leontieva, K.V. Bryankin, V.I. Kononov, N.P. Utrobin // Drying Technology. An International Journal. Special Issue On Drying And Dewatering Of Sludges. – 2002. – Vol. 20(4&5). – Pp. 729-747.
8. Павлова С.А. Термический анализ органических и высокомолекулярных соединений / С.А. Павлова, И.В. Журавлева, Ю.И. Толчинский. – М. : Изд-во "ПроИнвест", 1983. – 144 с.
9. Королев Д.В. Определение физико-химических свойств компонентов и смесей дериватографическим методом / Д.В. Королев, К.А. Суворов. – СПб. : Изд-во "Питер", 2003. – 33 с.
10. Берг Л.Г. Введение в термографию / Л.Г. Берг. – М. : Изд-во "ПроИнвест", 1969. – 368 с.
11. Брянкин К.В. Новые подходы при выборе технологических режимов сушки продуктов органического синтеза / К.В. Брянкин, А.И. Леонтьева, Б.И. Манелюк, Д.М. Ковальчук // IX научная конференция: пленарные докл. и краткие тез. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – С. 65-66.

Надійшла до редакції 02.12.2016 р.

Гаврылиев Р.И., Кочубей В.В., Филяс С.Р., Сабьнин А.В. Исследование процесса сушки водной полимерной дисперсии методами неизотермического анализа

С помощью термогравиметрических исследований проанализирован процесс сушки водной полимерной дисперсии на основе полиметилметакрилат-полистирола. Определено термическое поведение образцов материала в неизотермических условиях нагревания, установлен механизм сушки и кинетические особенности процесса. Результаты исследований на основе теоретических и экспериментальных данных дают возможность предложить оптимальные режимы проведения процесса в промышленных условиях для достижения заданной конечной влажности.

Ключевые слова: полимерная дисперсия, влага, сушка, термогравиметрический анализ.

Havriliy R.I., Kochubei V.V., Filias S.R., Sabyin O.V. Examination of the Drying Process of an Aqueous Polymer Dispersion Using a Non-isothermal Analysis

The process of drying an aqueous polymer dispersion based on polymethylmethacrylate-polystyrene was analyzed by using thermogravimetric studies. The thermal behaviour of material samples in the non-isothermal heating conditions was defined and mechanism and kinetics of the drying process was established. The results are based on theoretical and experimental data and make it possible to offer the best rehearse of the process in and industrial environment to achieve the engagement final moisture.

Keywords: polymer dispersion, moisture, drying, thermogravimetric analysis.