

УДК 621.763:504.174.2

DOI 10.36910/6775.24153966.2020.70.5

О.Л. Садова, В.П. Кашицький, М.Д. Мельничук, О.О. Смолянкін, С.В. Мисковець
Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІОКОМПОЗИТІВ, НАПОВНЕНИХ ВИСОКОДИСПЕРНИМ ПОРОШКОМ КРОХМАЛЮ

В статті визначено вплив вмісту крохмалю на адгезійну та ударну міцність покриттів на основі біокомпозитів, а також досліджено твердість, міцність при стисканні, ударну в'язкість, напружений стан, вміст гель-фракції та хімічну стійкість біокомпозитів з середнім та високим вмістом крохмалю. Проаналізовано вплив наповнювача на фізико-механічні характеристики наповнених крохмалем біокомпозитів залежно від ступеня наповнення системи та оптимізовано вміст наповнювача в епоксиполімерній матриці, що дозволяє рекомендувати отриманий біокомпозитний матеріал для виготовлення виробів в різних сферах застосування залежно від умов експлуатації.

Ключові слова: епоксидне в'язуче, адгезійна міцність, структурування, напружений стан, твердість, ударна в'язкість, хімічна стійкість.

О.Л. Садовая, В.П. Кашицкий, Н.Д. Мельничук, О.А. Смолянкин, С.В. Мисковец ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БИОКОМПОЗИТОВ, НАПОЛНЕННЫХ ВИСОКОДИСПЕРСИОННЫМ ПОРОШКОМ КРАХМАЛА

В статье определено влияние содержания крахмала на адгезионную и ударную прочность покрытий на основе биокмпозитов, а также исследовано твердость, прочность при сжатии, ударную вязкость, напряженное состояние, содержание гель-фракции и химическую устойчивость биокмпозитов со средним и высоким содержанием крахмала. Проанализировано влияние наполнителя на физико-механические характеристики наполненных крахмалом биокмпозитов в зависимости от степени наполнения системы и оптимизировано содержание наполнителя в эпоксиполимерной матрице, что позволяет рекомендовать полученный биокмпозитный материал для изготовления изделий в различных сферах применения в зависимости от условий эксплуатации.

Ключевые слова: эпоксидное вяжущее, адгезионная прочность, структурирование, напряженное состояние, твердость, ударная вязкость, химическая стойкость.

O. Sadova, V. Kashytskyi, M. Melnychuk, O. Smoljankin, S. Myskovets INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF BIOCOMPOSITES FILLED WITH THE HIGHLY DISPERSED STARCH POWDER

The influence of starch content on the adhesive strength and impact strength of biocomposite coatings is determined in the article. Hardness, compressive strength, impact strength, stress state, gel fraction content and chemical stability of biocomposites with medium and high starch content were studied. The influence of the filler on the physical and mechanical characteristics of biocomposites filled with starch depending on the degree of filling of the system is analyzed. The filler content in the epoxy polymer matrix is optimized. This allows us to recommend the obtained biocomposite material for the manufacture of products in different applications depending on operating conditions.

Keyword: epoxy binder, adhesive strength, structuring, stress state, hardness, impact strength, chemical resistance.

Постановка проблеми. На сьогодні європейські виробники побутових товарів значно розширили асортимент виробів на основі біокомпозитів з використанням наповнювачів природного походження. Завдяки розвитку технологій значний прогрес отримано в напрямку формування композитних виробів на основі поліетилену з використанням волокон технічної коноплі. Використання наповнювачів природного походження обумовлено зменшенням вмісту полімерної складової, яку зазвичай отримують з різних фракцій нафтових продуктів, що є обмеженим ресурсом. Ще одним істотним недоліком звичайних полімерів є їх утилізація після використання, що потребує розробки технологій переробки або знищення, оскільки, потрапляючи на смітник, вони розкладаються протягом декількох тисяч років. Водночас полімери з нафтових продуктів, розкладаючись, своїми агресивними складовими забруднюють ґрунт і воду, а в деяких випадках, коли їх концентрація досягає критичних значень, створюються умови для виникнення техногенної катастрофи та непридатності територій для ведення господарської діяльності або проживання на ній людей.

На відміну від звичайних полімерів або пластмас, біокомпозити без особливих труднощів піддаються утилізації, а в подальшому і швидкому розкладанню на безпечні для навколишнього середовища і людини складові. Потрапляючи на звалище виробу на основі біокомпозитних матеріалів розкладаються протягом 5-7 років, на відміну від звичайних пластмас, яким для цього необхідно десятки століть. Тому розробка біокомпозитів, що містять в складі гранично допустимий вміст наповнювачів природного походження, дозволить частково вирішити вищевказані проблеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В процесі пошуку альтернативних конструкційних матеріалів значна увага приділяється дослідженням, що стосуються розробки композитних матеріалів, які містять наповнювачі природного походження. Це пов'язано з розвинутою сировинною базою, здатністю до відновлювання природних ресурсів, низькою собівартістю сировини та високою екологічністю природних матеріалів [1, 2]. Крім того, доцільність використання біокомпозитів обумовлена обмеженнями на викиди вуглекислого газу, який виділяється в процесі синтезу полімерів із нафтохімічної сировини. Можливість отримання конструкційних матеріалів на основі біокомпозитів має перспективу особливо в сільськогосподарських країнах, що мають великі запаси біомаси [3, 4].

Найчастіше полімеркомпозитні матеріали на основі термопластичних полімерів армують природними волокнами, використання яких постійно зростає порівняно з синтетичними волокнами [5]. Серед різноманітних природних волокон, таких як льон, бамбук, сизаль, технічна конопля, рамі, джут, особливий науковий інтерес представляють деревні волокна [6]. Окрім переваг економічного та екологічного характеру, волокна природного походження порівняно із синтетичними волокнами мають меншу вагу, піддають меншому абразивному зношуванню технологічне обладнання, вирізняються вищою технологічністю обробки поверхні сформованих деталей, задовільними механічними та експлуатаційними властивостями [5].

Природні наповнювачі забезпечують задовільні механічні властивості біокомпозитів порівняно полімеркомпозитами наповненими мінеральними або синтетичними добавками за умови високої адгезії між компонентами композиту, оскільки низька стійкість до вологи зменшує потенціал природних наповнювачів [5, 7]. Попередня обробка частинок або природних волокон може очистити та хімічно модифікувати поверхню наповнювача, зупинити процес поглинання вологи та збільшити шорсткість поверхні. Найкращими методами поверхневої модифікації природних волокон є сополімеризація в'язучого та обробка плазмою. Прищеплені сополімери природних волокон з вініловими мономерами забезпечують кращу адгезію між матрицею та волокном. Авторами робіт [5, 6] отримано позитивний результат використання попередньо оброблених природних волокон у композитах на основі полімерної матриці та визначено вплив модифікації поверхні природних волокон на властивості волокон та армованих волокнами полімерних композитів.

Біокомпозити, наповнені дискретними природними волокнами, мають вищу стійкість до динамічних навантажень, однак є менш технологічними в процесі формування виробів з високою чистотою поверхні, складної конфігурації та тонкими стінками. Тому часто для наповнення біокомпозитів використовують дисперсні наповнювачі природного походження (деревне борошно, крохмаль). При цьому більшість робіт стосується дослідженню технологічних властивостей

композицій [8, 9], зокрема оцінці квазістатичної та в'язкопружної поведінки в'язучого, армованого порошками крохмалю або деревного борошна. Для цього необхідно підібрати добавки, що дозволяють проводити екструзію композиції на максимальній швидкості, але зберігаючи при цьому високу якість поверхні.

Подрібнену деревину можна розглядати як універсальний і дешевий наповнювач, що здатний знизити вміст полімерного в'язучого, покращити механічні властивості і підвищити зносостійкість виробів на основі термопластичних матриць. Використання деревного борошна забезпечує формування широкого асортименту виробів з різними механічними і декоративними властивостями [9].

Введення крохмалю до складу лінійних блок-поліуретанів забезпечує здатність виробів руйнуватися під впливом мікроорганізмів під час утилізації. Встановлено, що зі збільшенням вмісту крохмалю в поліуретанових композитах інтенсифікуються процеси біодеструкції полімеру, збільшується кількість утворень колоній мікроорганізмів на поверхні композитних зразків, зменшується густина досліджуваних матеріалів, що є наслідком зменшення молекулярної маси полімеру внаслідок руйнуючої дії мікроорганізмів. Оптимальне співвідношення наповнювача в полімерному в'язучому забезпечує ініціювання процесів руйнування наповнених крохмалем біокомпозитів, який слугує поживною речовиною для розвитку мікроорганізмів. Продукти біорозкладання поліуретану після їх асиміляції мікроорганізмами і мікробами збагачують ґрунт корисними елементами і виконують роль додаткових добрив [10].

Задовільні фізико-механічні властивості біокомпозитів, що містять природні наповнювачі, сприяють розширенню сфери їх застосуванню у багатьох галузях промисловості, таких як ландшафтний дизайн, автомобілебудування, меблева та будівельна галузь, отримання пакувальних

матеріалів [5]. При цьому для підвищення надійності та тривалості експлуатації виробів на основі біокомпозитних матеріалів необхідно досліджувати вплив вмісту наповнювачів на фізико-механічні та теплофізичні властивості біокомпозитів, проводити оптимізацію складу та режимів формування виробів.

Постановка завдань. Метою роботи є дослідження впливу крохмалю на фізико-механічні характеристики біокомпозитних матеріалів та оптимізація вмісту наповнювача для отримання виробів конструкційного призначення.

Викладення основного матеріалу. У якості в'язучого компонента використано епоксидну смолу марки ЕД-20, молекули якої утворюють полімерну сітку при додаванні твердника. Для структурування епоксидного в'язучого у композитному матеріалі використано твердник поліетилеполіамін (ПЕПА), що являє собою рідину від світло-жовтого кольору без механічних включень.

Для наповнення системи використано крохмаль, що являє собою дрібнодисперсний білий порошок з частинками розміром від 3 нм до 100 нм, який не плавиться, стійкий до нагрівання за відсутності вологи. Такі властивості роблять крохмаль можливим до використання в якості наповнювача в ряді поліолефінів (поліетилен, полістирол) та поліпропілену. Композитні матеріали на основі таких полімерів в компості повністю руйнуються мікроорганізмами протягом 2-3 місяців з утворенням CO_2 і H_2O . Для виготовлення полімеркомпозитних виробів може слугувати картопляний або кукурудзяний крохмаль [10-11]. Вміст крохмалю в біокомпозитному матеріалі варіювався в межах 20-110 мас. ч.

Формування дослідних зразків полягало в отриманні однорідної композиції, до складу якої входили необхідні компоненти. Залежно від об'єму зразків розраховували кількісний вміст компонентів у співвідношенні у масових частинах на 100 мас.ч. епоксидної смоли ЕД-20.

Тверднення біокомпозитних зразків за нормальних умов тривало 24 год. Після чого зразки термічно обробляли за ступінчастим режимом: 1 год за температури 50 °С, 2 год – 100 °С і 4 год – 120 °С [11].

Границю адгезійної міцності за нормального відриву визначали за ГОСТ 14759-69. Границю міцності при стисненні визначали за ГОСТ 4651-82. Твердість матеріалу визначали методом Брінеля за ГОСТ 9012-59. Залишкові напруження визначали консольним методом за ГОСТ 13036-67. Ударну в'язкість визначали методом Шарпі ГОСТ 9454-78.

Ударну міцність біокомпозитних покриттів визначали за методикою (ГОСТ 4765-73), яка полягає у визначенні енергії удару, необхідної для наскрізного пошкодження захисних покриттів під час падіння з певної висоти ударника з сферичним наконечником каліброваного розміру (8 мм).

Ступінь тверднення матеріалів і покриттів визначали за вмістом гель-золь-фракції. Метод заснований на здатності частини матеріалу (плівки), не зв'язаної в полімерну сітку, вимиватися органічним розчинником в екстракторі Сокслета, який працював в автоматичному режимі.

Дослідження біокомпозитів на хімічну стійкість проводили шляхом зважування на лабораторних вагах (ВЛР – 200) з точністю до 0,0001 г зразків розміром 60×10×10 мм до та після занурення у 10 % розчини H_2SO_4 , HNO_3 , HCl , NaCl , NaOH .

Встановлено, що адгезійна міцність біокомпозитів, наповнених порошком крохмалю, зростає у 1,4 рази (рис. 1) при збільшенні вмісту наповнювача від 50 мас. ч. (9,4 МПа) до 60 мас. ч. (13,7 МПа). Найвищу адгезійну міцність (13,45 МПа) мають біокомпозити, наповнені крохмалем в кількості 60-70 мас. ч., що пояснюється оптимальним вмістом вискодисперсного наповнювача. При цьому відбувається утворення додаткових хімічних зв'язків між активними групами макромолекул епоксидного в'язучого та частинками наповнювача, які рівномірно розподілені в об'ємі полімерної матриці. Відповідно це забезпечує однорідність композитного матеріалу та формування системи з низьким напруженим станом, що призводить до зростання адгезійної та когезійної міцності біокомпозитів. При подальшому збільшенні вмісту крохмалю до 80 мас. ч. відбувається різке зниження адгезійної міцності в 2,3 рази, що пов'язано з формуванням системи з надлишковим вмістом наповнювача. При цьому композиція значно змінює в'язкість, оскільки збільшення вмісту наповнювача на 10 мас. ч. призводить до значного зростання об'єму наповнювача в епоксидній матриці через низьку густину крохмалю (1,5 г/см³). За більшого вмісту наповнювача частинки знаходяться на меншій відстані між собою, що призводить до зменшення товщини прошарку епоксидної матриці, яка забезпечує високі значення когезійної міцності біокомпозитного матеріалу. Введення крохмалю в кількості 80-110 мас. ч. призводить до подальшого зниження адгезійної міцності біокомпозитів, оскільки відбувається подальше зниження товщини прошарків та утворення дефектів структури у вигляді скупчень частинок

наповнювача. Формування біокомпозитів з вмістом наповнювача 120 мас. ч. і вище призводить до зниження технологічності композиції, що пов'язано із недостатнім змочуванням частинок в'язучим та утворенням конгломератів.

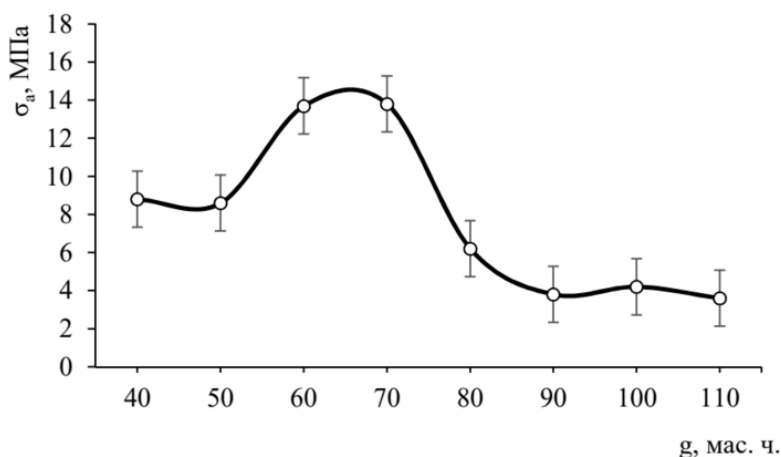


Рис. 1. Залежність адгезійної міцності біокомпозитів, наповнених порошком крохмалю, від вмісту наповнювача

Експериментально встановлено, що межа міцності при стисканні (рис. 2, а) зменшується в 1,8 раз при збільшенні кількості порошку крохмалю від 20 мас. ч. (70,7 МПа) до 50 мас. ч. (40,4 МПа). Це пояснюється низькою твердістю та межею міцності при стисканні частинок крохмалю порівняно з епоксиполімерним в'язучим, в результаті чого відбувається руйнування стінок епоксиполімерного каркасу під впливом менших значень питомого навантаження. При збільшенні вмісту порошку крохмалю до 70 мас. ч. відбувається підвищення даної характеристики в 2,3 рази і становить 94,5 МПа. Отримані високі значення межі міцності при стисканні зумовлені компактним розташуванням частинок наповнювача в епоксиполімерному в'язучому та формуванням додаткових хімічних зв'язків між функціональними групами макромолекул епоксидної смоли та активними групами на поверхні частинок, що підтверджено високими значеннями адгезійної міцності за даного вмісту наповнювача.

При збільшенні порошку крохмалю до 80 мас. ч. відбувається різке зниження даної характеристики в 1,7 раз порівняно із межею міцності при стисканні біокомпозитів, що містять наповнювача 70 мас. ч. При подальшому підвищенні вмісту наповнювача до 110 мас. ч. межа міцності при стисканні майже не змінюється. Це пов'язано із появою більшої кількості конгломератів, які утворюються за рахунок високої дисперсності порошку крохмалю та виступають концентраторами напружень, що значно полегшує руйнування біокомпозитного матеріалу.

Твердість біокомпозитних матеріалів зростає на 25 % (рис. 2, б) при підвищенні вмісту порошку крохмалю від 20 мас. ч. (115 МПа) до 50 мас. ч. (155 МПа). Підвищення твердості пояснюється формуванням додаткових хімічних зв'язків між макромолекулами епоксидної смоли та активними групами на поверхні частинок крохмалю, що забезпечує вищий ступінь структурування біокомпозитного матеріалу. При цьому екстремум значень твердості зміщений на 20 МПа в сторону нижчого вмісту високодисперсного наповнювача порівняно з межею міцності при стисканні біокомпозитів, що пов'язано в даному випадку з опором статичному навантаженню матеріалу лише поверхневого шару, в результаті чого відбувається ущільнення або руйнування матеріалу в локальній зоні, в якій когезійна міцність біокомпозиту є вищою у випадку меншого вмісту наповнювача.

Встановлено, що найвищу твердість (155 МПа) має біокомпозитний матеріал, наповнений порошком крохмалю в кількості 50 мас. ч. Це забезпечується формуванням однорідної структури біокомпозитного матеріалу за рахунок оптимального співвідношення між вмістом наповнювача і епоксиполімерним в'язучим.

При підвищенні вмісту наповнювача від 50 мас. ч. (155 МПа) до 110 мас. ч. (39 МПа) відбувається рівномірне зниження твердості біокомпозитів у 4 рази. Зниження твердості пов'язане з погіршенням змочування високодисперсних частинок наповнювача епоксидним в'язучим через їх високу поверхневу енергію, що призводить до утворення конгломератів, а також низькою твердістю порошку крохмалю. Це підтверджується отриманими попередніми результати

дослідження міцності при стисканні.

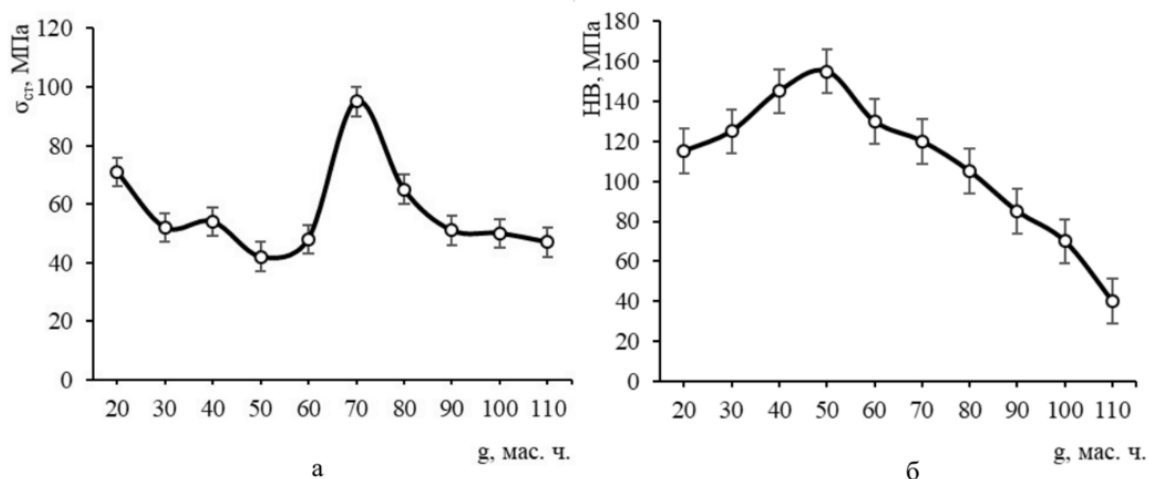


Рис. 2. Залежність міцності при стисканні (а) та твердості (б) біокомпозитів, наповнених порошком крохмалю, від вмісту наповнювача

Найвищі значення ударної в'язкості $5,6 \text{ кДж/м}^2$ отримано для біокомпозитного матеріалу, наповненого порошком крохмалю в кількості 20 мас. ч. (рис. 3, а). При підвищенні вмісту наповнювача від 20 мас. ч. до 60 мас. ч. відбувається зниження ударної в'язкості в 2 рази, що пов'язано із зменшенням об'єму епоксиполімерного в'язучого, яке здатне чинити опір руйнуванню під впливом динамічного навантаження. Поява екстремуму за вмісту наповнювача 70 мас.ч. обумовлено додатковим структуруванням системи за рахунок появи додаткових хімічних зв'язків, що підтверджується підвищенням адгезійної міцності.

Низькі значення ударної в'язкості біокомпозитів з підвищеним вмістом наповнювача (80-110 мас. ч.) пояснюються утворенням конгломератів порошку в об'ємі полімерної матриці, які є дефектами структури та виступають концентраторами напружень. Це сприяє інтенсивному поширенню тріщин в біокомпозитах під час дії динамічного навантаження та полегшує руйнування матеріалу.

При збільшенні вмісту високодисперсного порошку крохмалю від 20 мас. ч. ($A = 3,9 \text{ Дж}$) до 50 мас. ч. ($A = 17,2 \text{ Дж}$) відбувається різке підвищення ударної міцності біокомпозитних покриттів в 4,4 рази (рис. 3, б), що пов'язано з наявністю перешкод для поширення тріщин у вигляді частинок крохмалю. Максимальну ударну міцність мають покриття з вмістом крохмалю 50 мас. ч., оскільки в межах товщини покриття біокомпозит містить значно меншу кількість хімічних зв'язків порівняно із зразками, що призначені для визначення ударної в'язкості. Тому для збільшення ударної міцності необхідно підвищувати вміст епоксидного в'язучого в біокомпозитному покритті до 50 мас. ч. порівняно з меншим вмістом (30 мас. ч.) епоксидного в'язучого, вміст якого є достатнім для забезпечення максимальної ударної в'язкості зразків з квадратним поперечним перерізом. При збільшенні кількості крохмалю в біокомпозитних покриттях від 50 мас. ч. ($A = 17,2 \text{ Дж}$) до 110 мас. ч. ($A = 7,7 \text{ Дж}$) ударна міцність знижується в 2,2 рази, оскільки формується дефектна структура.

Експериментально встановлено, що найнижчі залишкові напруження (0,23-0,26 МПа) мають біокомпозити в діапазоні наповнення 60-80 мас. ч., а найвищий ступінь напруженого стану (1,2 МПа) характерний для біокомпозитів (рис. 4, а), наповнених порошком крохмалю в кількості 20-30 мас. ч., що обумовлено локальним зшиванням макромолекул матриці та формуванням жорсткого каркасу епоксиполімерної матриці.

При підвищенні вмісту порошку крохмалю від 20 мас. ч. до 40 мас. ч. відбувається зниження залишкових напружень у 2 рази, що пов'язано із збільшенням відстані між кінцевими групами епоксидної смоли за рахунок введення у систему частинок крохмалю, що підвищує рухливість сегментів епоксиполімерної сітки.

Підвищення вмісту наповнювача до 60 мас. ч. супроводжується подальшим спадом залишкових напружень через підвищення вмісту частинок наповнювача. В діапазоні наповнення 60-90 мас. ч. напружений стан стабілізується, оскільки збільшення вмісту наповнювача, який знижує залишкові напруження, компенсується утворенням хімічних зв'язків між частинками та в'язучим, що частково підвищує локальну жорсткість епоксиполімерної сітки.

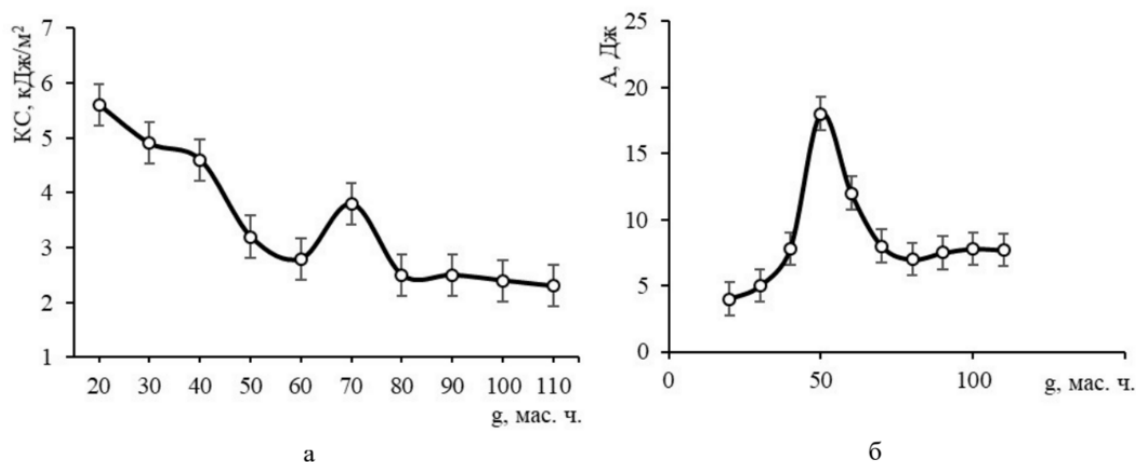


Рис. 3. Залежність ударної в'язкості (а) та ударної міцності (б) біокомпозитів, наповнених порошком крохмалю, від вмісту наповнювача

При наповненні епоксисистеми порошком крохмалю вище 90 мас. ч. відбувається підвищення значень залишкових напружень у 2,3 рази, що пояснюється схильністю високодисперсного порошку крохмалю до утворення конгломератів та формування неоднорідної структури.

Для розроблених біокомпозитів відбувається підвищення ступеня структурування на 2,5 % при збільшенні кількості наповнювача від 20 мас. ч. до 50 мас. ч. і становить 96 % та 98,5 % відповідно (рис. 4, б).

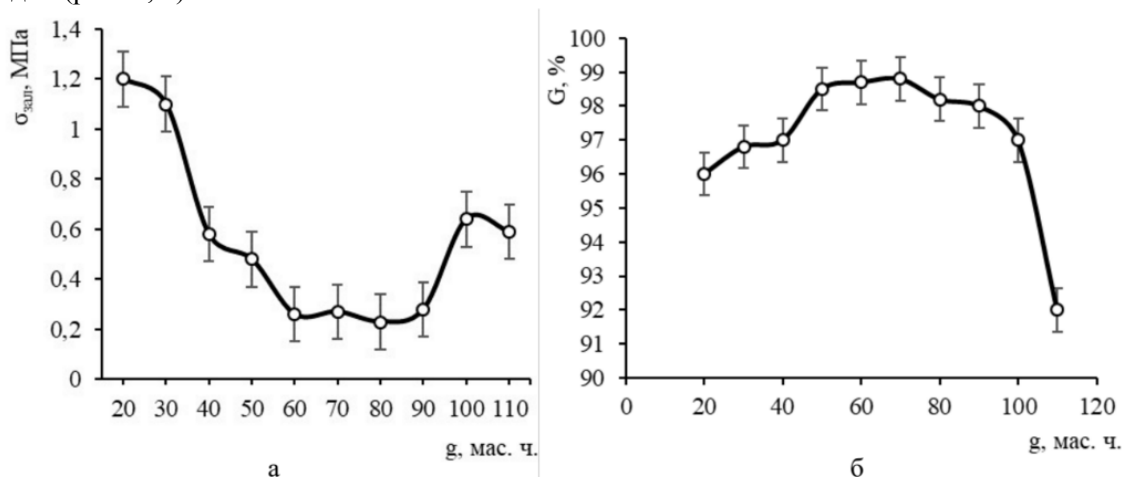


Рис. 4. Залежність залишкових напружень (а) та вмісту гель-фракції (б) біокомпозитів, наповнених порошком крохмалю, від вмісту наповнювача

Максимальний вміст гель-фракції наповнених високодисперсним порошком крохмалю біокомпозитів складає 98,8 % у випадку використання наповнювача в діапазоні 50-70 мас. ч. Це пояснюється утворенням максимальної кількості фізичних та хімічних зв'язків між макромолекулами полімерного в'язучого та наповнювачем.

За підвищення вмісту порошку крохмалю до 100 мас. ч. ступінь структурування біокомпозитів знижується на 1,8 % і становить 97 %. При збільшенні вмісту крохмалю до 110 мас. ч. відбувається зниження даної характеристики на 5 %. Різне зниження ступеня структурування пов'язане з надлишковим вмістом наповнювача, який утворює конгломерати, що зменшує кількість утворених хімічних зв'язків між полімерною матрицею і наповнювачем, що дозволяє легко видалити неструктуровані макромолекули епоксидної смоли та частинки наповнювача розчинником під час екстрагування.

При низькому вмісті порошку крохмалю (20 мас. ч.) біокомпозити мають найменше водопоглинання (табл. 1), що супроводжується невеликим приростом маси зразка (+1,13). При вищих ступенях наповнення (40-80 мас. ч.) відбувається зростання маси зразків, що зумовлено більшим вмістом порошку крохмалю, який легко поглинає воду, та більшою кількістю повітряних мікропор, які сприяють проникненню молекул води.

В результаті досліджень хімічної стійкості розроблених біокомпозитних матеріалів

встановлено, що меншу зміну маси мають біокомпозити (табл. 1) із вищим ступенем наповнення (60-80 мас. ч.). Після занурення зразків в розчин HCl відбувається найбільша втрата маси (-10,38) при вмісті наповнювача 40 мас. ч., що пов'язано з розчиненням і видаленням матеріалу.

Таблиця 1.

Водопоглинання та хімічна стійкість біокомпозитів

Вміст наповнювача, мас. ч.	Середовище занурення					
	H ₂ O	NaOH	HCl	HNO ₃	H ₂ SO ₄	NaCl
20	+1,13	+1,22	+17,65	+17,97	+2,09	-25,5
40	+2,11	+2,42	-10,38	+12,79	+2,62	+2,57
60	+1,75	+1,34	+2,68	-3,79	-4,45	+2,02
80	+1,94	+1,62	+2,2	+2,18	+3,24	+2,87

Експериментально встановлено, що після занурення зразків із низьким вмістом наповнювача (20-40 мас. ч.) в розчин HNO₃ відбувається високий приріст маси (+12,79...+17,97), а на поверхні зразки з вищим вмістом порошку крохмалю продуктів корозії утворюється менше.

При зануренні біокомпозитних матеріалів в розчини H₂SO₄ та NaCl приріст маси зразків є значно меншим, що вказує на вищу хімічну стійкість даних зразків. Після витримки в розчині NaCl зразків з вмістом наповнювача 20 мас. ч. відбувається велика втрата маси (-25,5), що пов'язано з руйнуванням структури біокомпозитного матеріалу.

Найвищу хімічну стійкість мають біокомпозити із більшим вмістом порошку крохмалю (80 мас. ч.), що вказує на здатність наповнювача забезпечувати вищу хімічну стійкість композиту порівняно з ненаповненою епоксиполімерною матрицею. Порівняно з дослідженнями зразків на водопоглинання встановлено, що біокомпозити мають антибатну залежність поглинання води відносно вмісту наповнювача, оскільки частинки крохмалю здатні поглинати воду у великій кількості.

Висновки.

Розроблені біокомпозитні матеріали залежно від функціонального призначення можуть мати різний вміст порошку крохмалю, який забезпечує підвищення фізико-механічних характеристик залежно від розмірів виробів. Оптимальний вміст крохмалю для виробів з великою товщиною стінки становить 70 мас. ч., що призводить до підвищення межі міцності при стисканні та ударної в'язкості. Це зумовлено компактним розташуванням частинок наповнювача в епоксиполімерному в'язучому та формуванням додаткових хімічних зв'язків між функціональними групами макромолекул епоксидної смоли та активними групами на поверхні частинок, що підтверджено високими значеннями адгезійної міцності та ступеня структуривання за оптимального вмісту наповнювача.

В біокомпозитних покриттях оптимальний вміст крохмалю складає 50 мас. ч., що забезпечує високу ударну міцність матеріалу за рахунок формування однорідної структури з рівномірним розподілом наповнювача. Використання наповнювача в біокомпозитній системі збільшує відстань між макромолекулами матриці, що знижує напружений стан системи за рахунок підвищення рухливості елементів жорсткої епоксиполімерної сітки.

Біокомпозити з вищим ступенем наповнення (60-80 мас. ч.) характеризуються високим водопоглинанням, що зумовлено більшим вмістом порошку крохмалю, який легко поглинає воду. При цьому високонаповнені біокомпозити є більш стійкими до впливу розчинів хімічно агресивних речовин, що вказує на здатність наповнювача забезпечувати вищу хімічну стійкість композиту порівняно з ненаповненою епоксиполімерною матрицею.

Оптимізація складу та визначення режимів формування виробів на основі наповнювачів органічного походження є актуальним напрямком розробки нових біокомпозитних матеріалів, які характеризуються екологічністю, відновлюваністю сировини та мають меншу вартість порівняно з аналогічними полімеркомпозитами за рахунок вмісту дешевого наповнювача.

Література

1. Ark, Planet. Plastic Bag Reduction. 1 December 2011. 29 January 2013.
2. Treacy M. "Biodegradable Plastics are Adding to Landfill Methane Emissions". 10 June 2011. 29 January 2013.
3. Alshehrei F. Biodegradation of synthetic and natural plastic by microorganisms // J. Appl. Environ. Microbiol. – 2017. – Vol.5. – No. 1. – P.8-19.
4. Проект "Техническая конопля в Украине и других странах". Режим доступу: <http://www.tku.org.ua/uk/news/4664>
5. Sanjay M.R., Arpitha G.R., Laxmana Naik L., Gopalakrishna K., Yogesha B. Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview. Natural Resources, Vol. 7, No. 3, 108 – 114 (2016). DOI:10.4236/nr.2016.73011
6. Kalia S., Kaith B.S., Kaur I. Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites – A review. Polymer Engineering and Science, Vol. 49, No. 7, 1253 – 1272 (2009). DOI: 10.1002/pen.21328
7. Nabi Saheb D., Jog J. P.. Natural fiber polymer composites: A review. Advances in Polymer Technology, Vol. 18, No. 4, 351 – 363 (1999). DOI: 10.1002/(SICI)1098-2329(199924)18:4<351::AID-ADV6>3.0.CO;2-X
8. Papanicolaou G.C., Kontaxis L.C., Koutsomitopoulou A.F., Zaoutsos S.P. Stress relaxation behavior of starch powder-epoxy resin composites. Journal of Applied Polymer Science, 132 (12), [41697] (2015). DOI: 10.1002/app.41697.
9. Севастьянов Д.В. Полимерные биокompозиты на основе биоразлагаемых связующих, армированных натуральными волокнами / Д.В. Севастьянов, И.В. Сутубалов, М.И. Дасковский, Е.А. Шейн // Композиционные материалы. – 2017. – №4 (49). – С. 42-50.
10. Ситар В.І., Анісімов В.М., Мітіна Н.Б., Гармаш С.М. Дослідження біодеградації лінійних блок-кополіуретанів, наповнених крохмалем, в процесі вермикультивування. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2018, No. 6, pp. 133-138.
11. Кашицький В.П. Дослідження фізико-механічних характеристик епоксикомпозитів з органічним наповнювачем / В. П. Кашицький, О. Л. Садова, С.М. Щеглов // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (МІНТТ-2018): збірка матеріалів X Міжнародної науково-практичної конференції (29-31 травня 2018 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2018. – С. 308-309.