

УДК 676.038.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/08>**Мовчанюк О.М.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Остапенко А.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ПАПЕРУ ДЛЯ ГОФРУВАННЯ З ВТОРИННОГО ВОЛОКНА КУКУРУДЗЯНИМИ КРОХМАЛЯМИ

Стаття присвячена актуальній проблемі – підвищенню механічної міцності паперу для гофрування з вторинного волокна. Для цього найчастіше використовують крохмалі зубоподібної кукурудзи, що має величезний обсяг світового виробництва. Воскова кукурудза також використовується для виготовлення паперу.

Метою дослідження було оцінювання впливу витрати та ступеня заміщення крохмалю зубоподібної й воскової кукурудзи для проклеювання в масі на механічні показники паперу для гофрування з макулатури.

Для дослідження було обрано макулатуру марки МС-5Б-2, що широко використовується у виробництві паперу для гофрування, а також модифіковані кукурудзяні крохмалі з різними значеннями ступеня заміщення від 0,035 до 0,053. Витрата крохмалів варіювалася від 0,8 до 1,5 %.

Встановлено вплив крохмалів на показники механічної міцності лабораторних зразків паперу для гофрування. Запропоновано раціональні значення витрати та ступеня заміщення крохмалів для здійснення масного проклеювання макулатурного паперу для гофрування задля досягнення максимальних показників його механічної міцності. У разі необхідності покращити марку паперу з марки Б-3 до Б-2 пропонується застосувати мінімальні з досліджених значень витрати і ступеня заміщення (0,8 % і 0,035 відповідно) крохмалю зубоподібної кукурудзи, як більш економічний варіант. У випадку необхідності знизити масу 1 м² паперу за збереження його механічної міцності необхідно використати крохмаль зі ступенем заміщення 0,042 і збільшити витрату до 1 %.

Отримані результати допоможуть підвищити ресурсоощадність виробництва макулатурного паперу для гофрування, обрати найбільш ефективний і економічний крохмаль для масного проклеювання паперу. У подальшому планується провести аналогічні дослідження з крохмалями іншого походження, насамперед, з пшеничним та картопляним.

Ключові слова: макулатура, модифікований кукурудзяний крохмаль, витрата, ступінь заміщення, папір для гофрування, механічна міцність.

Постановка проблеми. Папір для гофрування разом з картоном для плоских шарів забезпечує міцність гофрованого картону [1, с. 98–99]. Тому чим міцнішим є цей папір, тим рентабельнішим він буде для виробників і більш популярним серед споживачів. Міцніший папір можна виготовляти зі зниженою масою 1 м² за дотримання нормативних вимог до нього, а, отже, раціональніше використовувати волокнисті напівфабрикати, зменшуючи при цьому масу тари і упаковки.

Порівняно з папером і картоном з первинного волокна, для яких характерна відносна сталість міцності та інших властивостей, вторинне волокно відрізняється широким інтервалом мінливості властивостей. А, враховуючи, що основна маса таропакувальних видів паперу та картону ви-

робляється із застосуванням вторинного волокна, або повністю з нього, неважко зрозуміти особливу актуальність стабілізації та підвищення властивостей міцності цих матеріалів [1, с. 101, 111].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пильна увага зазначеної теми простежується у більшості досліджень, присвячених вторинному волокну, оскільки макулатура – це ресурсозберігаюче джерело придатного для багаторазового використання волокна, що для України має особливе значення, оскільки більшість вітчизняних паперових підприємств виробляють свою продукцію з макулатури. Однак через багаторазову участь вторинного волокна у технологічних процесах переробки, спостерігається тенденція постійного зниження якості макулатури, що, в свою чергу,

призводить до зниження якості готової картонно-паперової продукції з неї [2, с. 266].

Одним із сучасних способів підвищення механічної міцності макулатурного паперу є хімічні речовини, що вводяться в паперову масу або наносяться на його поверхню [1, с. 3; 3, с. 6–10]. Крохмалепродукти залишаються затребуваним зміцнюючим засобом у технології тарних видів паперу та картону [4, с. 45; 5, с. 54].

Крохмаль є основною складовою зернових і бобових, а також коренеплодів і бульб, таких як маніок і картопля. Незалежно від джерела, крохмальна гранула складається з двох основних полімерів: лінійної амілози та розгалуженого амілопектину [3, с. 20–21; 6, с. 1546; 7, с. 14]. Основними факторами, що впливають на властивості крохмалю, є: співвідношення між амілозою та амілопектином; середня довжина ланцюга амілози та амілопектину; і спосіб упаковки амілопектину всередині напівкристалічних доменів крохмальних гранул [6, с. 1546].

Найважливішим рослинним джерелом крохмальних продуктів є кукурудза. Сортом кукурудзи, який найчастіше використовують як джерело крохмалю для виготовлення паперу, є зубоподібна кукурудза, що має величезний обсяг світового виробництва. Воскова кукурудза вирощується виключно для нехарчових цілей і також використовується для виготовлення паперу [8, с. 1936; 3, с. 22].

Постановка завдання. Метою даного дослідження було оцінювання впливу витрати та ступеня заміщення крохмалю зубоподібної й воскової кукурудзи під час проклеювання в масі на механічні показники паперу для гофрування з макулатури.

Виклад основного матеріалу. Макулатура марки МС-5Б-2 [9, с. 5], що широко використовується у виробництві паперу для гофрування, піддавалася розпуску та розмелюванню на лаборатор-

ному комплекті ЛКР-1. Після розпуску протягом 20 хв. макулатурну масу розмелювали з відбором проб, до досягнення ступеня помелу маси 45 °ШР.

Для складання композиції паперової маси використовували крохмаль зубоподібної кукурудзи зі ступенем заміщення 0,035; 0,042; 0,053 та крохмаль воскової кукурудзи зі ступенем заміщення 0,037; 0,043; 0,050.

Варіння крохмального клею відбувалося у герметичному реакторі, що оснащений двошвидкісною мішалкою лопатевого типу. Підйом температури (з 20 до 85°C) проводився з заданою швидкістю, після чого температура підтримувалася на рівні 85°C до готовності клею. Концентрація крохмального клею становила 30 г/дм³.

Паперова маса готувалась з різною витратою крохмального клею (0,8 %; 1,0 %; 1,5 %). Лабораторні зразки паперу масою 140 г/м² виготовляли на листовідливному апараті типу Нобель-Вуд. Дозування крохмалю здійснювалося у формувальну камеру апарату після наповнення її водою і додавання маси. Після кондиціонування за відносної вологості повітря (50±2)% та температури (23±1)°C упродовж не менше 2,5 год зразки випробовувалися. Випробування зразків проводилося за стандартними методиками. Визначалися такі показники: опір площинному стисненню гофрованого зразка паперу; абсолютний опір продавлюванню; опір торцевому стисненню гофрованого зразка паперу; міцність під час розтягування.

Відомо, що до складу крохмалю входять два типи полімерів – амілоза й амілопектин, які складаються з ланок α -D-глюкози, пов'язаних між собою глікозидними зв'язками. Амілоза має лінійну будову та V-спіральну конформацію, а амілопектин – розгалужену будову (рис. 1) [8, с. 1936; 10, с. 284].

Амілоза складається з лінійних ланцюгів, у яких альфа-глікозидні зв'язки з'єднують C1 однієї одиниці з C4 наступної. Залежно від рос-

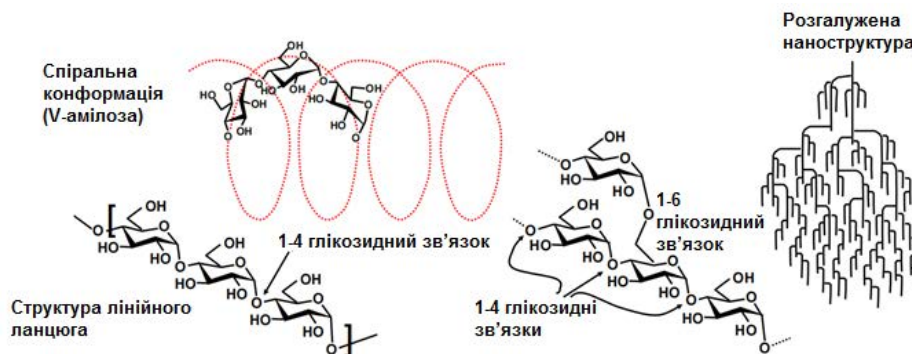


Рис. 1. Дві форми макромолекул крохмалю, що співіснують у більшості крохмалистих рослинних матеріалів

линного джерела амілоза часто має ступінь полімеризації від 800 до 3000. Більш складною формою є амілопектин. Високий рівень розгалуження в амілопектині призводить до відносно щільних, компактних молекул зі ступенем полімеризації близько 20000 [8, с. 1936].

Молекула амілози, коли її розчиняють у воді, набуває різних спіральних конформацій. Ланцюги амілози можуть бути або у вигляді подвійних спіралей (амілоза типу А та В), або у вигляді спіралі, що утворена з одного ланцюга (V-амілоза). В амілозних компонентах нативного кукурудзяного крохмалю, як правило, переважає А-амілоза [8, с. 1936].

Одноланцюгові спіралі V-типу мають центральну порожнину, яка є відносно гідрофобною. Орієнтація –ОН груп спіралей є такою, що вони в основному роблять зовнішню частину котушок гідрофільною, тоді як всередині спіралей полярні групи відсутні. Як наслідок, будь-які гідрофобні компоненти матеріалу, такі як мономери жирних кислот, ймовірно, будуть міститися як сполуки включення в V-спіралі. Схоже, що частка V-амілози зростає пропорційно до кількості присутніх олеофільних мономерів. Зі збільшенням частки амілози збільшується вміст V-амілози в кристалічній фазі. Однак іноді домінують дво-спіральні форми амілози [8, с. 1936].

Амілоза і амілопектин мають різні властивості, відповідно поведуть себе по-різному і під час варіння, і в готових дисперсіях. Амілозна форма крохмалю, як правило, демонструє найбільш значні ефекти ретроградації. Спочатку розчиняється частина амілози і набуває вигляду непошкоджених V-спіралей. Розчинена амілоза з кукурудзи поступово набуває форми подвійної спіралі (А-спіралі), яка може самоасоціювати. Цей процес, що називають ретроградацією, як правило, погіршує здатність крохмалю як сполучного агента у папері. Ретроградації також сприяє низький рН і присутність катіонів металів, таких як кальцій або алюміній (рис. 2) [3, с. 19–20].

Амілопектин зазвичай характеризується невисоким рівнем ретроградації, відносно швидко після процесу клейстеризації він може піддаватися агломерації, що призводить до багатоланцюгових структур, але такі зміни вареного амілопектину вважаються «оборотними» [3, с. 19]. Рівень амілопектину у крохмалі складає приблизно 72 %, решту становить амілоза. Амілоза в кукурудзі має середній ступінь полімеризації близько 960–990. Оскільки її молекулярна маса є відносно низькою, амілоза крохмалю зубоподібної кукурудзи більш

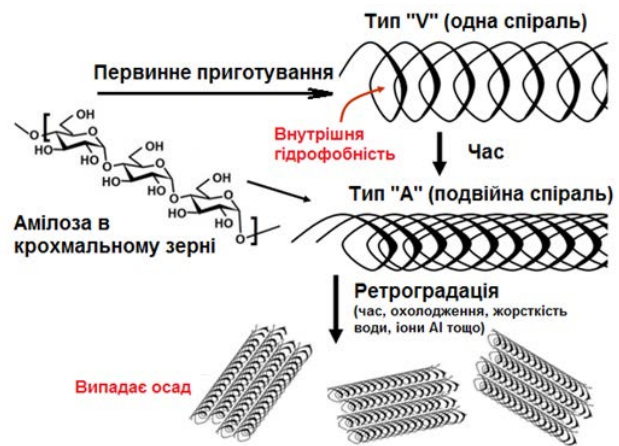


Рис. 2. Зміни у конформації та колоїдній формі амілози крохмалю в результаті варіння, зберігання та впливу інших чинників

схильна до ретроградації. Температура клейстеризації такого крохмалю становить 75–80°C [3, с. 22–24].

Крохмаль воскової кукурудзи практично не містить амілози і майже вільний від ефектів ретроградації після приготування. Температура клейстеризації такого крохмалю є нижчою (65–70°C) [3, с. 24], тому він є більш привабливим з огляду на собівартість приготування і стабільність готових клеїв.

Результати випробування отриманих зразків паперу представлені в таблиці 1. Зразки, що виготовлені без додавання крохмального клею (базовий варіант), відповідають паперу для гофрування марки Б-3, що з усіх марок стандарту має найнижчі норми за показниками механічної міцності [11, с. 6].

Після введення у масу крохмалю обох сортів кукурудзи всі визначені показники зростають. Але зростання показників для крохмалів різного ступеня заміщення і витрати не було однаковим. В таблиці 2 подано порівняльний аналіз приросту показників механічної міцності зразків паперу для всіх досліджених крохмалів. Помітно, що показники покращуються для крохмалів воскової кукурудзи від 5,3 до 37,5 %, для зубоподібної – від 5,3 до 35 %. Більш чутливим до додавання крохмалів виявився показник абсолютного опору продавлюванню, що є вкрай важливим для витримування деформаційних зусиль від рифлених валів під час гофрування паперу на гофромашині [1, с. 99]. Максимальний приріст показника зафіксовано за витрати крохмалю зубчастій кукурудзі 1 % і ступеня заміщення 0,035, а у випадку воскової кукурудзи – за витрати крохмалю 1,5 % і ступеня заміщення 0,050.

Показники механічної міцності паперу

Витрата крохмалю, %	Ступінь заміщення крохмалю	Опір площинному стисненню гофрованого зразка паперу, Н	Абсолютний опір продавлюванню, кПа	Опір торцевому стисненню гофрованого зразка паперу, кН/м	Міцність під час розтягування, кН/м
0 (базовий варіант)	–	175	323	1,30	5,7
Крохмаль зубоподібної кукурудзи					
0,8	0,035	190	403	1,63	6,3
1,0	0,035	210	436	1,68	6,7
1,5	0,035	215	431	1,63	7,3
0,8	0,042	205	407	1,56	6,3
1,0	0,042	220	434	1,74	6,7
1,5	0,042	205	397	1,51	6,7
0,8	0,053	200	394	1,52	6,0
1,0	0,053	220	409	1,57	6,1
1,5	0,053	210	387	1,68	6,4
Крохмаль воскової кукурудзи					
0,8	0,037	220	403	1,57	6,5
1,0	0,037	220	411	1,68	7,1
1,5	0,037	205	398	1,63	6,7
0,8	0,043	210	397	1,61	6,0
1,0	0,043	220	399	1,68	6,2
1,5	0,043	220	397	1,76	6,1
0,8	0,050	205	362	1,58	6,3
1,0	0,050	210	414	1,56	6,5
1,5	0,050	220	444	1,68	6,7

Шляхом використання для масного проклеювання модифікованого крохмалю з обох сортів кукурудзи, всіх досліджених значень витрати і ступеня заміщення, було отримано зразки паперу марки Б-2, з вищими показниками механічної міцності.

Опір торцевому стисненню гофрованого зразка паперу, який характеризує здатність протистояти силам, що стискають гофрокартон вздовж гофрів під час штабелювання ящиків [1, с. 99], найбільше зростає (на 33,8 %) за витрати 1,0 % для крохмалю зубоподібної кукурудзи зі ступенем заміщення 0,042 і на 35,4 % за витрати 1,5 % для крохмалю воскової кукурудзи зі ступенем заміщення 0,043.

Показник міцності під час розтягування паперу для гофрування має велике значення для забезпечення жорсткості ребер ящика з гофрокартону [1, с. 99]. Цей показник максимально (на 28,1 %) зростає за витрати 1,5 % крохмалю зубоподібної кукурудзи зі ступенем заміщення 0,035 і на 24,6 % – за витрати 1,0 % крохмалю воскової кукурудзи зі ступенем заміщення 0,037.

Найбільше зростання водночас і показника опору площинному стисненню гофрованого зразка паперу, що забезпечує його жорсткість і здатність

протистояти зім'яттю гофрів в процесі виготовлення гофрокартону та його перероблення [1, с. 98], і абсолютного опору продавлюванню, і опору торцевому стисненню гофрованого зразка (на 25,7; 34,4 і 33,8 % відповідно) спостерігається при додаванні крохмалю зубоподібної кукурудзи зі ступенем заміщення 0,042, за витрати 1,0 %. У випадку додавання крохмалю воскової кукурудзи максимальні значення перших двох вказаних показників (на 25,7 і 37,5 % відповідно) досягнуто за ступеня заміщення 0,050, за витрати 1,5 %. Третій показник демонструє максимальне зростання за ступеня заміщення 0,043 і такої ж витрати 1,5 %.

Висновки. Виконаний лабораторний комплекс наукових досліджень довів можливість підвищення механічних властивостей паперу для гофрування з макулатури марки МС-5Б-2 шляхом масного проклеювання модифікованими крохмалю зубоподібної та воскової кукурудзи з різними значеннями ступеня заміщення і витрати.

У разі необхідності покращити марку паперу з Б-3 до Б-2 достатньо застосувати мінімальні з досліджених значень витрати і ступеня заміщення (0,8 % і 0,035 відповідно) крохмалю зубо-

Приріст показників механічної міцності зразків

Витрата крохмалю, %	Ступінь заміщення крохмалю	Приріст показника від базового, %			
		Опір площинному стисненню гофрованого зразка паперу	Абсолютний опір продавлюванню	Опір торцевому стисненню гофрованого зразка паперу	Міцність під час розтягування
Крохмаль зубоподібної кукурудзи					
0,8	0,035	8,6	24,8	25,4	10,5
1,0	0,035	20,0	35,0	29,2	17,5
1,5	0,035	22,9	33,4	25,0	28,1
0,8	0,042	17,1	26,0	20,0	10,5
1,0	0,042	25,7	34,4	33,8	17,5
1,5	0,042	17,1	22,9	16,2	17,5
0,8	0,053	14,3	22,0	16,9	5,3
1,0	0,053	25,7	26,6	20,8	7,0
1,5	0,053	20,0	19,8	29,2	12,3
Крохмаль воскової кукурудзи					
0,8	0,037	25,7	24,8	20,8	14,0
1,0	0,037	25,7	27,2	29,2	24,6
1,5	0,037	17,1	23,2	25,4	17,5
0,8	0,043	20,0	22,9	23,8	5,3
1,0	0,043	25,7	23,5	29,2	8,8
1,5	0,043	25,7	22,9	35,4	7,0
0,8	0,050	16,4	12,1	21,5	10,5
1,0	0,050	20,0	28,2	20,0	14,0
1,5	0,050	25,7	37,5	29,2	17,5

подібної кукурудзи, як більш економічний варіант. За необхідності знизити масу 1 м² паперу при збереженні його механічної міцності рекомендовано крохмаль зі ступенем заміщення 0,042, з витратою 1 %. Крохмаль воскової кукурудзи є більш прива-

ливими з точки зору стабільності готових клеїв і нижчих тепловитрат на варіння. У подальшому планується провести аналогічні дослідження з крохмалю іншого походження, насамперед, з пшеничним і картопляним.

Список літератури:

1. Астратов М.С., Гомеля М.Д., Мовчанюк О.М. Технологія переробки паперу та картону: навчальний посібник. ч. 1. Київ.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 270 с.
2. Мовчанюк О. М. Вплив температури води на швидкість просочення відходів пакування Пюр-Пак. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2022. Т. 33 (72). № 5. С. 266–269. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/40>
3. Мовчанюк О. М., Остапенко А. А. Проклеювання паперу та картону [Електронний ресурс] : Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 120 с.
4. Chen G, Zhu P H, Kuang Y D, Liu Y, Lin D H, Peng C X, Wen Z C, Fang Z Q. Durable superhydrophobic paper enabled by surface sizing of starch-based composite films. *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 409. P. 45–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.02.201>
5. Wei Q, Zheng H, Zhu M, et al. Starch-based Surface-sizing Agents in Paper Industry: An Overview. *Paper and Biomaterials*. 2021. Vol. 6. №4. P. 54–61. DOI: 10.1213/j.issn.2096-2355.2021.04.007
6. Vanier N L, Halal S, Dias A, Zavareze E. Molecular structure, functionality and applications of oxidized starches: A review. *Food Chemistry*. 2017. Vol. 221. P.1546–1559. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.138>
7. Wang S Q, Zhang J L, Wu G Q. Experiment on wheat starch modification and its application as paper surface sizing agent. *China Pulp & Paper Industry*. 2013. Vol. 4. P. 14–16.
8. Hubbe M. A. Size press practices and formulations affecting paper properties and process efficiency: A Review. *BioResources*. 2024. №19 (1). С. 1925–2002. DOI:10.15376/biores.19.1.Hubbe
9. ДСТУ 3500:2019. Макулатура паперова і картонна. Технічні умови. Київ, 2019. 14 с. ДСТУ 3500:2009.
10. Zhao M X, Bao Y L, Liu P L. Progress in research on fine microstructure of starch granules. *Food Science*. 2018. Vol. 39 (11), 284–294.
11. ДСТУ 7798:2021 Папір для гофрування. Технічні умови. Київ, 2022. 17 с. ДСТУ 7798:2015.

Movchaniuk O.M., Ostapenko A.A. INCREASING THE STRENGTH OF PAPER FOR CORRUGATING FROM SECONDARY FIBER WITH CORN STARCH

The article is devoted to the actual problem of increasing the mechanical strength of paper for corrugating from secondary fiber. For this, the starches of tooth-shaped corn, which has a huge volume of world production, are most often used. Waxy corn is also used to make paper.

The purpose of study was to evaluate the influence of consumption and the degree of substitution of starch of tooth-like and waxy corn for sizing in mass on the mechanical parameters of paper for corrugating from waste paper:

Waste paper of the MS-5B-2 brand, which is widely used in the production of paper for corrugating, as well as modified corn starches with different values of the degree of substitution from 0.035 to 0.053 were chosen for the study. Starch consumption varied from 0.8 to 1.5%.

The influence of starches on the mechanical strength indicators of laboratory samples of paper for corrugating has been established. Rational values of consumption and degree of substitution of starches for mass sizing of paper for corrugating in order to achieve maximum indicators of its mechanical strength are proposed. If it is necessary to improve the grade of paper from grade B-3 to B-2, it is suggested to apply the minimum of the studied values of consumption and degree of substitution (0.8% and 0.035, respectively) of starch of tooth-like corn, as a more economical option. If it is necessary to reduce the mass of 1 m² of paper while maintaining its mechanical strength, it is necessary to use starch with a degree of substitution of 0.042 and increase the consumption to 1%.

The obtained results will help to increase resource efficiency in the production of waste paper for corrugation, to choose the most effective and economical starch for sizing of paper in mass. In the future, it is planned to conduct similar studies with starches of other origins, primarily wheat and potato starches.

Key words: waste paper, modified corn starch, consumption, degree of substitution, paper for corrugating, mechanical strength.