

ЛІГНІН ЯК ОСНОВА ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІОПЛАСТИКУ

А.В. Юрченко^{1*}, Н.Б. Голуб¹, І. Чжу²

¹КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

²Інститут нових матеріалів Академії наук провінції Шаньдун, Шаньдун, Китай

*Corresponding author: raidmax23@gmail.com

Received 13 July 2019; Accepted 20 September 2019

Проблематика. Обмеженість запасів викопних органічних джерел (нафти та біогазу), необхідність вирішення проблем утилізації та переробки пластику ставить задачу пошуку альтернативних матеріалів традиційним пластмасам. Одним із таких джерел є біопластики, до складу яких входить лігнін, – другий найпоширеніший (після целюлози) відновлюваний біополімер. Лігнін може бути включений у різні полімерні матриці, серед яких є як синтетичні полімери (поліетилен, поліпропілен, полістирол тощо), так і полімери, одержані з продуктів життєдіяльності мікроорганізмів (полілактидна кислота, полібутиленсукцинат, полігідроксибутират тощо). Метою сучасних досліджень є пошук і створення полімерів, які б мали властивості пластмас та характеризувались головною особливістю – здатністю до біорозкладу.

Мета. Аналіз властивостей біополімерів, до складу яких входить лігнін, залежно від методів його одержання, структури полімерів і відсоткового вмісту лігніну.

Висновки. Серед розглянутих типів лігніну найбільш перспективним для подальших досліджень є лужний лігнін, який має структуру, подібну до природнього лігніну і краще сполучається з природніми полімерами, що здатні до біорозкладу (полілактидна кислота, целюлоза, полігідроксибутират тощо). Додавання лігніну до біополімерів сповільнює процес розкладу, а при взаємодії із синтетичними полімерами надає їм властивість до незначної біодеструкції. Найкращу здатність до сполучання з лігніном мають полімери, що містять велику кількість полярних груп, серед біополімерів – це поліестери полігідроксибутират та поліетилентерефталат. За використання лігніну в полімерних сумішах покращуються механічні властивості у випадку повної гомогенізації з полімерною матрицею, відбувається стабілізація пластмас, зменшується швидкість горіння. Серед усіх розглянутих сумішей природніх полімерів і лігніну найкращі механічні властивості відзначалися у суміші лігніну та целюлози.

Ключові слова: лігнін; біополімери; пластик; механічні властивості; матриця; біорозклад.

Вступ

Щорічно у світі виробляється пластичних матеріалів понад 300 млн т, зі щорічним приростом у 5-6% [1]. Згідно з дослідженнями співробітників Інженерного університету Джорджії [2], до 2030 р. тільки у Китаї обсяг відходів неутілізованої пластмаси досягне 111 мільйонів метричних тон. Тому актуальним напрямом досліджень сьогодення є пошук новітніх технологій виробництва біопластику, який мав би властивості, подібні до властивостей традиційних пластмас, але водночас характеризувався би ключовою відмінністю – здатністю до біорозкладу, що допоможе вирішити сучасні проблеми утилізації відходів полімерних матеріалів [3].

Основний недолік існуючих біопластиків – їх висока ціна. Так, наприклад, 1 кг поліпропілену коштує 0,9 €, а кг полілактату – 1,72 € [3]. Очевидно, що така вартість робить біопластик

неконкурентоспроможним. Один із підходів, що використовуються для зниження собівартості, – це використання відходів виробництва. Такий підхід здешевлює продукцію, створює безвідходні технології і дає змогу утилізувати відходи, що утворюються в процесі виробництва. Одним із таких відходів є лігнін, який утворюється як залишок від виробництва целюлозного етанолу. З урахуванням сучасних тенденцій щодо виробництва целюлозного етанолу, кількість одержаного лігніну становить від 100 000 до 200 000 т/рік [4, 5]. За рахунок своєї неоднорідності він не набув широкого використання [6].

За даними Міжнародного інституту лігніну, щорічно в світі виробляється від 40 до 50 млн т лігніну на рік, і лише близько 1,5% комерціалізується як лігносульфонат або крафтовий лігнін [7]. Тому розробка технологій, які дають можливість утилізувати лігнін, є актуальною.

Лігнін також є другим найпоширенішим біополімером після целюлози. Його вміст у клітинній стінці рослини може досягати 15–35 % [8]. Кількість лігніну, яка утворюється в природі щорічно, оцінюється в діапазоні від 5×10^8 до 36×10^8 т [9]. Тобто лігнін є відновлюваною сировиною, яка утворюється у достатній кількості для забезпечення промислового виробництва сировиною.

Одним із методів утилізації лігніну як відходу виробництва є розробка технологій одержання біополімерів на його основі, що можуть стати альтернативою традиційним видам пластмас [10].

Метою роботи є аналіз властивостей біополімерів, до складу яких входить лігнін, залежно від методів його одержання, структури та вмісту лігніну.

Для досягнення мети розв'язували такі задачі:

(1) з'ясування відмінностей між типами лігніну залежно від методів отримання;

(2) порівняння впливу структури полімерів на їх здатність до сполучення з лігніном.

(3) визначення зміни властивостей полімерів, що містять лігнін, залежно від полімерної матриці.

(4) дослідження впливу лігніну на здатність полімерів до розкладу.

Властивості лігніну залежно від умов отримання

Біопластик, який отримано з лігніну без домішок, є крихким, що унеможливує його промислове використання. Частіше лігнін застосовують як додатковий компонент для інших полімерів.

Властивість лігніну як добавки утворювати захисний шар при нагріванні за високих температур в інертній атмосфері зменшує швидкість горіння полімерних матеріалів [11, 12]. Також додавання лігніну за рахунок його антиоксидантних властивостей призводить до стабілізації пластмас [13]. Він впливає на термічні властивості композитів, збільшуючи температуру плавлення [14]. Лігнін можна використовувати як зародкоутворювач під час кристалізації різних термопластичних полімерів. Також він може вбудовуватись у їх надмолекулярну структуру [15]. Він також може виступати як компатибілізатор між природними волокнами і полімерною матрицею [16, 17].

Використання лігніну в біополімерах залежить від його властивостей, які своєю чергою

залежать від способу його одержання. В табл. 1 наведено властивості технічного лігніну залежно від процесу виділення з біомаси.

Технічний лігнін дещо відрізняється від структури природнього лігніну. Ці відмінності залежать головним чином від методів і параметрів процесів його отримання [20].

Крафт-процес – це варка деревини за наявності NaOH і Na₂S. У результаті процесу гідролізу ароматичні ефірні зв'язки в структурі лігніну руйнуються гідроксидними та гідросульфідними аніонами, що призводить до зменшення розчинності у воді/лузі фрагментів лігніну, отриманих у ході термообробки [9].

Сульфітна варка – процес, який може відбуватись у кислому, нейтральному або лужному середовищі. Головна його відмінність від попереднього процесу полягає в тому, що після руйнування ароматичних ефірних зв'язків на місця розриву стають іони сульфату. Отримані таким чином лігносульфонати мають кращу розчинність порівняно із крафт-процесом [21].

Сульфітна варка була найпоширенішим процесом у ХХ ст., але її замінив крафт-процес, оскільки в його результаті отримувалися волокна більшої міцності [9].

Інший процес, який вважається традиційним, – це лужна варка (або сода-антрахінон). Особливість цього процесу полягає в тому, що сода (NaOH, який утворюється) і антрахінон каталізують деполімеризацію лігніну і сповільнюють процес лужного відщеплення вуглеводів. Відмінність від крафт-процесу – вища швидкість руйнування ефірних зв'язків [21].

На відміну від традиційних методів видалення лігніну, в процесах Oganocell та Alcell використовуються органічні речовини. Як видно з табл. 1, лігнін, одержаний у процесах Oganocell і Alcell, має у своєму складі етерифіковані гідроксильні групи, що впливає на якість матеріалу. За такого методу одержання він не містить геміцелюлози, що робить його більш однорідним за складом. Лігнін, одержаний за використання методів Oganocell та Alcell, має вищу температуру склування, що повинно позначитись на термостійкості біопластику, до якого входить лігнін.

Різні види лігніну мають здатність поглинати УФ-випромінення. Ця властивість, разом із властивістю зменшувати набухання і водонепроникність матеріалів, створює підґрунтя для отримання нових пакувальних матеріалів, які не були б чутливими до умов навколишнього середовища [22, 23].

Таблиця 1: Властивості лігніну залежно від способу одержання

Показник	Значення				
Лігнін	Крафт [18]	Сульфитний (кислотний) лігносульфонат [9]	Лужний [9]	Oganocell [9]	Alcell [9]
Методи розділення	Осадження за рахунок зміни рН, ультрафільтрація	Ультрафільтрація	Осадження, ультрафільтрація	Осадження, флотація розчиненим повітрям	
Вміст сульфуру, %	1,0–0,3	3,5–8,0	–	–	–
Вміст нітрогену, %	0,05	0,02	0,2–1,0	0–0,3	
Молярна маса, $\times 10^3$ г/моль	1,5–5 (до 25)	1–50 (до 150)	0,9–3 (до 15)	0,5–5	
Полідисперсність	2,5–3,5	6–8	2,5–3,5	1,5–2,5	
Розчинність у кислоті, %	1–5	–	1–11	~2	
Розчинність	Луг, ДМФА*, піридин і ДМСО**	Вода (нерозчинний в органічних розчинниках)	Луг (частково розчинний в органічних розчинниках)	Органічні розчинники	Органічні розчинники
T_g , °C	140–150	130	140	90–110	
T_d , °C	340–370	250–260	360–370	390–400	
Наявність геміцелюлози	+	+	+	–	–
Якість	Варіюється	Варіюється	Варіюється	Постійна	Постійна
Вміст аліфатичних/фенольних груп	Високий	Низький	Високий	Етерифіковані	Етерифіковані
Ціна [19]	210–500 \$/т	180 \$/т	250 \$/т	520 \$/т	750 \$/т

Примітки. *ДМФА – диметилфторамід; **ДМСО – диметилсульфоксид; T_g – температура склування; T_d – температура термічного розкладу.

Вплив структури полімерів на їх сполучення з лігніном

У табл. 2 наведено властивості біоплімерів різного вихідного складу, що містять лігнін. Аналіз даних свідчить про те, що вміст і ступінь сполучення лігніну з традиційними полімерами та біополімерами залежить від структури вихідного полімеру.

Лігнін характеризується термопластичністю, і ця властивість може бути покращена завдяки селективній етерифікації фенольних гідроксильних груп лігніну [24]. Наприклад, алкілований крафт лігнін (еКЛ) має структуру та властивості, подібні до полістерину, тому може легко сполучатися з аліфатичними поліестеринами. В цьому випадку лігнін сполучається з утворенням неглибокого сферичного супрамолекулярного домену, і полієфір може бути використаний як пластифікатор для поліпшення еластичних властивостей модифікованого матеріалу: збільшення модуля пружності, покращення показників пружної деформації тощо [25].

Як видно з табл. 2, лігнін може бути сполучений з різноманітними полімерними структурами, в т.ч. з отриманими з біомаси. Він

сполучається з поліестерами: полілактидною кислотою (ПМК), полігідроксибутиловим естером (ПГБ), полігідроксибутиратом гідроксивалеріатом (ПГБГВ), поліетилентерефталатом (ПЕТ), полібутилен сукцинатом (ПБС), полібутилен-терефталатом (ПБТ). Серед наведених полімерів найкращу здатність до сполучання з лігніном мають ПГБ і ПЕТ. За досить низького вмісту лігніну (10–40 %) він майже повністю поєднується з полімерною матрицею. Це відбувається за рахунок наявних водневих зв'язків між наповнювачем (лігніном) і полімерною матрицею (ПГБ або ПЕТ) [12, 24].

Лігнін і його похідні можуть бути поєднані з поліолефінами, серед яких поліетилен (високої та низької щільності (ВЩПЕ, НЩПЕ), а також лінійний поліетилен низької щільності (ЛНЩПЕ)), поліпропілен (ПП), полівінілхлорид (ПВХ), поліметилметакрилат (ПММА), поліетилен оксид (ПЕО), етилен-вініл ацетат (ЕВА). У цьому випадку жорстка структура лігніну надає матеріалу термостабільні властивості та здатність до фоторозкладу [27]. У випадку, коли полімерна матриця має достатню кількість полярних груп, як, наприклад, поліметилметакрилат (ПММА), відзначається майже повна гомогенізація матриці з лігніном [28].

Таблиця 2: Особливості матеріалів, до складу яких входить лігнін (опис механічних, термічних властивостей матеріалів, а також окремі особливості, такі як здатність до біорозкладу і проникність водяної пари)

Назва полімеру	Параметри для порівняння											Посилання
	Вид і вміст лігніну	Розмір та молярна маса частинок лігніну	Метод отримання матеріалу	Допоміжні речовини	T_g , °C	σ , МПа	ϵ , %	E , ГПа	Здатність до біорозкладу	Температура термічного руйнування, °C	Особливості отриманих матеріалів	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Поліестери												
ПМК	30 % ЦЛФЛ	$d = 5,54\text{--}147,57$ мкм	Двошнекове екструзійне змішування	–	–	48,4	2,69	1,99	+	360	Ударна в'язкість (кДж/м ²) = 1,4; твердість за Шором = 85,9	[36]
	5 % аЛЛ	$M_w = 9295$ г/моль	Екструзія	–	59,8	47,5	4,8	2,35	+	325–360	Кут змочування матеріалів $\theta = 65\text{--}95$	[33]
	25% еОЛ (М)	$M_w = 10300$ г/моль	Лиття розчинів	Хлороформ (розчинник)	–	16,1	28	1,1	+	270,7–357,1	Матеріали мають меншу жорсткість порівняно з нативною ПМК	[37]
ПГБ	20 % ЛЛ	$M_w = 2160\text{--}2460$ г/моль	Двошнекове екструзійне змішування з подальшим компресійним формуванням	–	9	–	–	–	+	–	$T_m = 173$ °C	[34]
	5 % LPC+H	$M_n = 17,5$ кДа, розмір частинок – 125 нм	Електропрядіння	ГФП	3	3,13	–	0,0861	+	–	Діаметр частинок утвореного матеріалу – 350 нм, матеріал не цитотоксичний, високобіосумісний, підходить для біомедичних застосувань	[38]
ПГБГВ	10 % КЛ	$M_w = 2790$ г/моль	Двошнекове екструзійне змішування	–	–	23,1	10	0,71	+	–	–	[39]

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
ПЕТ	20 % ГЛ	0,3–8 мкм	Одношнекова екструзія	–	–	–	–	–	–	–	У отриманого матеріалу відзначаються добра змішуваність між компонентами і зменшення температури кристалізації порівняно з нативним ПЕТ	[12]	
ПБС	30 % ЛЛ	$M_w = 2160\text{--}2460$ г/моль	Формування під тиском	МДІ (компатибілізатор)	–33,2	21,17	4,07	0,81	+	–	$T_m = 110,8$ °С, поглинання води – 6,8 %	[40]	
ПКЛ	5 % SE-Л + 5 % ЛС	$M_w = 3000$ г/моль (SEЛ); $M_w = 1,3 \times 10^5$ г/моль (ЛС)	Формування під тиском	N,N-диметил-аміноетил-метакрилат	–	9,4	370	0,43	+	–	Стабілізація ПКЛ від УФ-випромінювання	[29]	
ПС													
	5 % Со(II)-ЛЛ	–	Двошнекове екструзійне змішування	KNO_3 , $\text{CoCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$	86,7	0,96	1,44	–	–	–	–	[41]	
Поліолефіни													
ПЕ	ВЩПЕ	30 % ЛЛ	<210 мкм	Лиття під тиском	Малеїновий ангідрид, привитий до ВЩПЕ	–	20,1	–	1,6	–	250	$T_m = 128$ °С, ударна в'язкість = 18 Дж/м	[42]
	ЛНЩПЕ	20 % SE-Л	$M_w = 3000$ г/моль	Екструзія	–	–111	4,4	112,5	–	–	–	$T_m = 113,7/119,9$ °С, стабілізатор проти УФ-виромінювання	[43]
	НЩПЕ	20 % SE-Л	$M_w = 3000$ г/моль	Екструзія	–	–118	5,5	58,3	–	–	–	$T_m = 112,5$ °С, стабілізатор проти УФ-виромінювання	[43]
	ПЕО	30 % ЛЛ	$M_w = 2160\text{--}2460$ г/моль	Лиття розчину	Метанол (розчинник)	–	2,8	17	0,28	–	164,4–425	Добра змішуваність між лігніном і полімерною матрицею	[44]

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
ПП	5 % ЛС	$M_w = 1,3 \times 10^5$ г/моль	Двошнекове екструзійне змішування	ПМК, кавові зерна (перемелені)	62,7	19	–	1,27	±	170,1	Лігнін і поліпропілен у цьому матеріалі виступають у ролі компатибілізатора, що покращує змішувальність між іншими речовинами	[16]	
ПММА	22,1 % КЛ	5 нм	РПЗПА	–	77	–	23	0,056	–	–	Міцність = 1,0 МДж/м ³	[28]	
ЕВА	62,5 % ОЛ	$M_w = 1100$ – 1600 г/моль	Лиття під тиском	–	4,8	8,2	52	0,0837	–	290–494	Міцність при згинанні = = 0,27 МПа	[45]	
Інші біополімери													
Білки	Зеїн	10 % ЛЛ	$M_w = 2160$ – 2460 г/моль	Лиття під тиском	ПЕГ (пластифікат ор)	–	5,6	130	0,18	Не дослід- жувалося	200–450	Межа міцності = = 5,55 МДж/мм ³	[46]
	Глютен	20 % КЛ	–	Лиття під тиском	Гліцерол	73,3	3,3	125	0,078	+	–	Поглинання водяної пари = 12 %	[47]
		20 % ЛС	–			59,3	0,8	248	0,005	+	–	Поглинання водяної пари = 14 %	[47]
	Соевий протеїн	0,6 % ЛЛ	$M_w = 2160$ – 2460 г/моль	Лиття розчину	Ефірна олія цитронели, формальдегід	–	–	–	–	+	–	Товщина плівки = 0,2948 мм, світлопоглинальна здатність, антимікробна дія проти мікроскопічних грибів (особливо проти <i>F. oxysporum</i>)	[30]
	Желатин	40 % ЛЛ	–	Лиття розчину	Гліцерол	–	0,28	–	–	+	100–245–350	Товщина = 0,13 мм, вміст вологи = 16,2 %, розчинність у воді = 32,57 %, розривний індекс = 5,91 кг/см ² , матеріал може бути використаний як антимікробний, без шкідливого впливу на організм, матеріал має світлопоглинальну здатність	[22]

Закінчення таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Целюлоза	4 % ЛЛ	$M_w = 2160-2460$ г/моль	Лиття розчину	Крохмаль, іонна рідина, АМІМХ (коагулятор)	–	40,1	72,8	–	+	–	σ (зволоженого зразка) = 17,5 МПа, ϵ (зволоженого зразка) = 94,0 %	[48]
Крохмаль	12,5 % ЛЛ	$M_w = 2160-2460$ г/моль	Лиття розчину	Гліцерол, нанокристали целюлози	–	6,201	27,114	0,209	+	326	–	[49]
	5 % КЛ	$M_w = 2790$ г/моль	Формування під тиском	Гліцерол	–	0,73	33,52	–	+	190–270–361	Водопоглинання = 18,6 %	[50]
	5 % еКЛ	–			–	0,8	31,17	–	+	190–270–356	Водопоглинання = 14,3 %	[50]
Хітозан	5 % ЛС	–	Лиття розчину	–	–	0,69	–	–	+	–	Матеріал має антимікробну дію (проти <i>E. coli</i> , <i>Klebsiella</i>), модуль пружності = 0,42 МПа, розширення при розриві = 2,98 мм	[31]
Агар-агар	10 % ЛЛ	–	Лиття розчину	Гліцерол	–	51,8	22,1	1,47	+	–	Товщина плівки = 57,8 мкм, вміст води = 14,8%, коефіцієнт набування = 1185,1 %, розчинність у воді = 34 %	[51]
Ізоціонат	5 % фЛЛ	–	Лиття розчину	Дибутіл тин ділауріат	–	21,4	38,03	0,105	Не досліджувалося	–	Енергія розриву = 1,31 Дж, в'язкість = 3,1 Па·с	[52]

Примітки. аЛЛ – ацетилований лужний лігнін; АМІМХ – 1-аліл-3-метилімідазол хлорид; ГЛ – гідролітичний лігнін; ГФП – 1,1,1,3,3,3-гексафторо-2-пропанол; ЕВА – етиленвінілацетат; еОЛ (м) – естерифікований органосольвентний лігнін (із м'яких порід дерев); КЛ – крафт лігнін; ЛЛ – лужний лігнін; ЛС – лігносульфонат; МДІ – метилдифеніл діізоціонат; ПБС – полібутиленсукцинат; ПБТ – полібутилентерефталат; ПВС – полівініловий спирт; ПВХ – полівінілхлорид; ПГБ – полігідроксибутират; ПГБГВ – полігідроксибутират гідроксивалеріат; ПЕ – поліетилен; ПЕГ – поліетиленгліколь; ПЕО – поліетиленоксид; ПЕТ – поліетилентерефталат; ПКЛ – полікапролактон; ПМК – полілактидна кислота; ПММА – поліметилметакрилат; ПП – поліпропілен; ПС – полістирол; РПЗПА – радикальна полімеризація з переносом атомів; фЛЛ – функціоналізований за допомогою 4,4'-дифеніл метан діізоціанату лужний лігнін; ЦЛФЛ – целюлозолітичний ферментний лігнін; LPC + H – особлива форма лігніну, яка отримана в результаті варки лужного лігніну з ϵ -капролактоном, що змінюється варкою з β -бутиролактоном; SEL – steam explosion лігнін; T_m – температура плавлення; T_g – температура склування; ϵ – відносне видовження в момент розриву; σ – модуль міцності; E – модуль Юнга.

Оскільки до структури лігніну входить багато полярних функціональних груп, то він має низьку здатність до сполучення з неполярними полімерами, такими як ПП або поліетилен (ПЕ). Для вирішення проблеми взаємодії лігніну з неполярними полімерами використовують додавання або додаткових речовин (компатибілізаторів), які сприяють поєднанню компонентів суміші, або каталізаторів при приготуванні полімерних сумішей методом розплаву.

Для покращення властивостей суміші полімерних матеріалів використовують додаткові пластифікатори. Так, наприклад, при сполученні лігніну і полікапролактону (ПКЛ) з малеїною кислотою як пластифікатором покращуються механічні властивості отриманого матеріалу порівняно зі зразком без використання малеїнової кислоти [29].

Найбільший інтерес з екологічної точки зору становлять матеріали, які отримані при сполученні лігніну з біополімерами різного походження. Ці матеріали здатні до біорозкладу. Це стосується як природних біополімерів, таких як білок, целюлоза, агар-агар, крохмаль, так і синтетичних; первинний матеріал для одержання такого полімеру отримано за допомогою біотехнологічного синтезу – ПГБ, ПМК тощо.

При взаємодії лігніну з природними біополімерами деякі одержані полімери не тільки здатні до біорозкладу, але і мають антимікробні властивості. Так, при сполученні з ізолятом соєвого протеїну полімерна плівка набуває антимікробної властивості проти деяких мікроскопічних грибів (*F. oxysporum*, *P. expansum* D) [30]. Антимікробні властивості також відзначалися в сумішій хітозану з лігніном [31, 32]. Окрім антимікробних властивостей, матеріал має достатню пластичність і здатність швидше загоювати рани, тому є перспективним для подальшого використання як пластиру.

Таким чином, найкраща здатність до сполучення з лігніном притаманна полімерним матеріалам, які мають полярні групи. Сполучення з лігніном змінює властивості полімерів, що сприяє більш широкому спектру їх використання.

Зміна властивостей полімерів, що містять лігнін, залежно від полімерної матриці

Кожен з отриманих матеріалів має свою характерну особливість, що обумовлює його подальше використання.

Наприклад, матеріали, отримані при сполученні лігніну з полікапролактоном (ПКЛ), з лінійним поліетиленом низької щільності (ЛНЩПЕ), з целюлозою та з глютенем, мають найбільші значення відносного видовження в момент розриву. Якщо розмістити їх за зниженням значення цього показника, то отримаємо такий ряд:

ПКЛ > Глютен > Зеїн > ЛНЩПЕ > Целюлоза.

Це означає, що ці матеріали є досить міцними і можуть витримувати розтягання без розриву матеріалу.

Інша властивість, яка є важливою для полімерних матеріалів, – межа міцності (σ). Чим вище це значення, тим вищі механічні навантаження може витримувати отриманий полімер. Найкращі показники межі міцності відзначаються у матеріалів такого ряду (ряд починається з найбільшого значення):

Агар-агар > ПМК > Целюлоза >
> ПГБГВ > ПБС > ВЩПЕ > ПП.

Модуль Юнга – характеристика пружності матеріалу. Якщо розмістити отримані матеріали за зменшенням модуля, отримаємо такий ряд:

ПМК > ВЩПЕ > Агар-агар > ПП.

Таким чином, властивості суміші полімерів із лігніном залежать насамперед від структури полімеру, що утворюється, та властивостей полімерної матриці, з якою сполучається лігнін.

Вплив вмісту лігніну на властивості отриманих матеріалів

Серед запропонованих методів отримання лігніну найбільш оптимальним для промислового використання є саме лужний (сода-антрахіноновий) метод. Це пов'язано з тим, що лігнін такого типу найбільш схожий на природний лігнін і має низьку молекулярну масу та низьку ціну виробництва. Тому для наступної порівняльної характеристики був вибраний саме лужний лігнін.

У цілому гомогенність сумішей, що містять лігнін, була пояснена на основі взаємодій водневих зв'язків між гідроксильними групами в лігніну та ділянками, що містять акцепторний водень, у змішувальному полімері [13].

Можливість змішуватися з лігніном обумовлює кількість лігніну, яку можна додати до суміші до появи крихкості матеріалу, і визначає його подальше використання.

Вміст лігніну своєю чергою обумовлює механічні властивості матеріалів. У табл. 3 наведено порівняння механічних властивостей різних полімерних сумішей залежно від вмісту лужного лігніну.

Згідно з наведеними даними можна зробити висновок, що додавання лігніну до ПМК і желатину погіршує механічні властивості суміші порівняно з чистими полімерами.

У випадку з агар-агаром, целюлозою, ізоціонатом, ПЕО, ВЦПЕ, ПБС та зеїном механічні властивості полімерних матеріалів покращуються.

Найкращі механічні властивості зазначених вище сумішей наведені в табл. 2.

Таблиця 3: Механічні властивості полімерних сумішей залежно від вмісту лужного лігніну

Полімерна матриця	Вміст лігніну						Загальна тенденція при збільшенні вмісту лігніну	Посилання
	0 %	<1 %	1–5 %	6–10 %	11–20 %	>20 %		
ПМК	$E = 2,8$ ГПа, $\epsilon = 2,1$ %, $\sigma = 48$ %	$E = 2,7$ ГПа, $\epsilon = 3,2$ %, $\sigma = 51$ МПа	$E = 2,35$ ГПа, $\epsilon = 4,8$ %, $\sigma = 47,5$ МПа	$E = 2,3$ ГПа, $\epsilon = 4,1$ %, $\sigma = 45$ Мпа	$E = 2,2$ ГПа, $\epsilon = 3$ %, $\sigma = 39$ МПа	–	E – зменшується; ϵ – спочатку збільшується, потім зменшується; σ – збільшується, потім зменшується	[30]
ПБС	$E = 0,52$ ГПа, $\epsilon = 18$ %, $\sigma = 44$ МПа	–	$E = 0,53$ ГПа, $\epsilon = 15$ %, $\sigma = 33$ МПа	$E = 0,59$ ГПа, $\epsilon = 9$ %, $\sigma = 28$ МПа	$E = 0,63$ ГПа, $\epsilon = 7$ %, $\sigma = 24$ МПа	$E = 0,81$ ГПа, $\epsilon = 5$ %, $\sigma = 21$ МПа	E – збільшується; ϵ – зменшується; σ – зменшується	[37]
ВЦПЕ	$E = 0,9$ ГПа, $\sigma = 17$ МПа	–	–	$E = 1,2$ ГПа, $\sigma = 17,3$ Мпа	$E = 1,35$ ГПа, $\sigma = 17,2$ МПа	$E = 1,6$ ГПа, $\sigma = 20,1$ МПа	E – збільшується; σ – збільшується	[39]
ПЕО	$E = 0,12$ ГПа, $\epsilon = 17$ %, $\sigma = 2,1$ МПа	–	–	$E = 0,17$ ГПа, $\epsilon = 20$ %, $\sigma = 2,2$ Мпа	$E = 0,2$ ГПа, $\epsilon = 21$ %, $\sigma = 2,4$ МПа	$E = 0,28$ ГПа, $\epsilon = 17$ %, $\sigma = 2,8$ МПа	E – збільшується; ϵ – збільшується при збільшенні вмісту лігніну до 20 %, а за $\omega(\text{ЛЛ}) = 30$ % – зменшується; σ – збільшується	[41]
Зеїн	$E = 0,11$ ГПа, $\epsilon = 180$ %, $\sigma = 1,8$ МПа	–	$E = 0,16$ ГПа, $\epsilon = 90$ %, $\sigma = 4,5$ МПа	$E = 0,18$ ГПа, $\epsilon = 130$ %, $\sigma = 5,6$ Мпа	–	–	E – збільшується; ϵ – за вмісту лігніну 3 % – зменшується, за 10 % лігніну – збільшується; σ – збільшується	[43]
Желатин	$\sigma = 1,22$ МПа	–	–	$\sigma = 0,74$ Мпа	$\sigma = 0,87$ МПа	$\sigma = 0,28$ МПа	σ – зменшується	[21]
Целюлоза	$\sigma = 31,3$ МПа, $\epsilon = 60,5$ %	–	$\sigma = 40,1$ МПа, $\epsilon = 72,8$ %	–	$\sigma = 29,7$ МПа, $\epsilon = 64,7$ %	–	σ – збільшується за $\omega(\text{лігніну}) = 4$ %, далі зменшується; ϵ – збільшується (максимальне значення за $\omega(\text{лігніну}) = 4$ %)	[45]
Агар-агар	$E = 1,07$ ГПа, $\epsilon = 26,7$ %, $\sigma = 45,5$ МПа	$E = 1,15$ ГПа, $\epsilon = 27,6$ %, $\sigma = 48,2$ МПа	$E = 1,45$ ГПа, $\epsilon = 22,4$ %, $\sigma = 50,7$ МПа	$E = 1,47$ ГПа, $\epsilon = 22,1$ %, $\sigma = 51,8$ Мпа	–	–	E – збільшується; ϵ – зменшується; σ – збільшується	[48]
Ізоціонат	$E = 0,02$ МПа, $\epsilon = 44,95$ %, $\sigma = 8,55$ МПа	–	$E = 0,11$ ГПа, $\epsilon = 38,03$ %, $\sigma = 21,4$ МПа	$E = 0,46$ ГПа, $\epsilon = 9,91$ %, $\sigma = 12,5$ Мпа	$E = 0,71$ ГПа, $\epsilon = 5,64$ %, $\sigma = 16,6$ МПа	–	E – збільшується; ϵ – зменшується; σ – збільшується	[49]

Вплив лігніну на здатність полімерних сумішей до розкладу

Додавання лігніну до будь-яких полімерів сповільнює процес руйнування полімерної суміші. Наприклад, 5 % лужного лігніну в суміші з ПМК сповільнює процес гідролізу суміші на 5 % порівняно із чистою ПМК [33].

Інші автори відзначали, що при захороненні у ґрунт плівок, які склалися з чистого ПГБ та суміші ПГБ із лігніном, плівки, що склалися із суміші полімерів, мали на 33 % меншу втрату маси [34].

У дослідженні [32] відзначалось, що наявність лігніну в полімерних сумішах із синтетичними полімерами (з поліпропіленом та з поліетиленом низької щільності) спричиняло часткове руйнування фрагментів поліолефінів за допомогою гідролітичних ферментів *P. chrysosporium* [35].

Таким чином, введення лігніну сповільнює процес біорозкладу за використання суміші з біополімерами і прискорює процес біорозкладу при сполученні із синтетичними полімерами.

Висновки

Серед розглянутих типів лігніну, вважаємо, найбільш перспективним для подальших досліджень є лужний лігнін, який має структуру, подібну до природнього лігніну, і який краще сполучається з природніми полімерами, здатними до біорозкладу (ПМК, целюлоза, ПГБ тощо).

Додавання лігніну до біополімерів сповільнює процес розкладу, а модифікація ним синтетичних полімерів надає їм властивість до незначної біодеструкції.

Найкращу здатність до сполучання з лігніном мають полімери, що містять значну кількість полярних груп, серед біополімерів – це поліестери ПГБ і ПЕТ.

За використання лігніну в полімерних сумішах покращуються механічні властивості у випадку повного змішування з полімерною матрицею, відбувається стабілізація пластмас, зменшується швидкість горіння. Серед усіх розглянутих сумішей природніх полімерів і лігніну найкращі механічні властивості відзначалися в суміші лігніну та целюлози.

References

- [1] Denysenko TM. Research of modern technologies of plastic products processing. Visnyk of Chernihiv State University of Technology. 2014;1(71):55-64.
- [2] Brooks AL, Wang S, Jambeck JR. The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade. Sci Adv. 2018;4(6):1-8. DOI: 10.1126/sciadv.aat0131
- [3] Karan H, Funk C, Grabert M, Oey M, Hankamer B. Green bioplastics as part of a circular bioeconomy. Trends Plant Sci. 2019;24(3):237-49. DOI: 10.1016/j.tplants.2018.11.010
- [4] Ragauskas AJ, Beckham GT, Biddy MJ, Chandra R, Chen F, Davis MF, et al. Lignin valorization: improving lignin processing in the biorefinery. Science. 2014 May 16;344(6185):1246843. DOI: 10.1126/science.1246843
- [5] Mullen CA, Boateng AA. Catalytic pyrolysis-GC/MS of lignin from several sources. Fuel Process Technol. 2010;91(11):1446-58. DOI: 10.1016/j.fuproc.2010.05.022
- [6] Kai D, Tan MJ, Chee PL, Chua YK, Yap YL, Loh XJ. Towards lignin-based functional materials in a sustainable world. Green Chem. 2016;18(5):1175-200. DOI: 10.1039/c5gc02616d
- [7] Toledano A, Garcna A, Mondragon I, Labidi J. Lignin separation and fractionation by ultrafiltration. Sep Purif Technol. 2010;71(1):38-43. DOI: 10.1016/j.seppur.2009.10.024
- [8] Zhao C, Xie S, Pu Y, Zhang R, Huang F, Ragauskas AJ, et al. Synergistic enzymatic and microbial lignin conversion. Green Chem. 2016;18(5):1306-12. DOI: 10.1039/c5gc01955a
- [9] Abdelaziz OY, Brink DP, Prothmann J, Ravi K, Sun M, Garcna-Hidalgo J, et al. Biological valorization of low molecular weight lignin. Biotechnol Adv. 2016;34(8):1318-46. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2016.10.001
- [10] Collins MN, Nechifor M, Tanasă F, Zănoagă M, McLoughlin A, Strózyk MA, et al. Valorization of lignin in polymer and composite systems for advanced engineering applications – A review. Int J Biol Macromol. 2019;131:828-49. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.03.069
- [11] Canetti M, Bertini F, De Chirico A, Audisio G. Thermal degradation behaviour of isotactic polypropylene blended with lignin. Polym Degrad Stab. 2006;91(3):494-8. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2005.01.052
- [12] Canetti M, Bertini F. Supermolecular structure and thermal properties of poly(ethylene terephthalate)/lignin composites. Compos Sci Technol. 2007;67(15-16):3151-7. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.04.013
- [13] Kadla JF, Kubo S. Lignin-based polymer blends: Analysis of intermolecular interactions in lignin-synthetic polymer blends. Compos Part A Appl Sci Manuf. 2004;35(3):395-400. DOI: 10.1016/j.compositesa.2003.09.019

- [14] Sen S, Patil S, Argyropoulos DS. Thermal properties of lignin in copolymers, blends, and composites: a review. *Green Chem.* 2015;17(11):4862-87. DOI: 10.1039/C5GC01066G
- [15] Bertini F, Canetti M, Cacciamani A, Elegir G, Orlandi M, Zoia L. Effect of ligno-derivatives on thermal properties and degradation behavior of poly(3-hydroxybutyrate)-based biocomposites. *Polym Degrad Stab.* 2012;97(10):1979-87. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.03.009
- [16] Lee HJ, Lee HK, Lim E, Song YS. Synergistic effect of lignin/polypropylene as a compatibilizer in multiphase eco-composites. *Compos Sci Technol.* 2015;118:193-7. DOI: 10.1016/j.compscitech.2015.08.018
- [17] Park SY, Kim J-Y, Youn HJ, Choi JW. Utilization of lignin fractions in UV resistant lignin-PLA biocomposites via lignin-lactide grafting. *Int J Biol Macromol.* 2019 Oct 1;138:1029-34. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.07.157.
- [18] Saake B, Lehnen R. Lignin. In: Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. 2007.
- [19] Jablonsky M, Andrea S, Haz A. Lignin, potential products and their market value. *Wood Res.* 2015;60(6):973-86.
- [20] Constant S, Wienk HLJ, Frissen AE, de Peinder P, Boelens R, van Es DS, et al. New insights into the structure and composition of technical lignins: a comparative characterisation study. *Green Chem.* 2016;18:2651-5. DOI: 10.1039/C5GC03043A
- [21] Chung H, Washburn NR. 2 - Extraction and types of lignin. In: *Lignin in polymer composites.* Elsevier; 2016. p. 13–25. DOI: 10.1016/B978-0-323-35565-0.00002-3
- [22] Aadil KR, Barapatre A, Jha H. Synthesis and characterization of Acacia lignin-gelatin film for its possible application in food packaging. *Biores Bioproc.* 2016;3(1). DOI: 10.1186/s40643-016-0103-y
- [23] Zhang Y, Zhou S, Fang X, Zhou X, Wang J, Bai F, et al. Renewable and flexible UV-blocking film from poly(butylene succinate) and lignin. *Eur Polym J.* 2019;116:265-74. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2019.04.003
- [24] Sadeghifar H, Cui C, Argyropoulos DS. Toward thermoplastic lignin polymers. Part 1. Selective masking of phenolic hydroxyl groups in kraft lignins via methylation and oxypropylation chemistries. *Ind Eng Chem Res.* 2012;51(51):16713-20. DOI: 10.1021/ie301848j
- [25] Materials LT, Synthetic LT, Materials P, Natural LT, Materials P. Lignin-modified thermoplastic materials. In: *Lignin chemistry and applications.* Elsevier; 2019. p. 135-61. DOI: 10.1016/B978-0-12-813941-7.00005-9
- [26] Weihua K, He Y, Asakawa N, Inoue Y. Effect of lignin particles as a nucleating agent on crystallization of poly(3-hydroxybutyrate). *J Appl Polymer Sci.* 2004;94(6):2466-74. DOI: 10.1002/app.21204
- [27] Reddy N, Salam A, Yang Y. Effect of lignin on the heat and light resistance of lignocellulosic fibers. *Macromol Mater Eng.* 2007;292(4):458-66. DOI: 10.1002/mame.200600446
- [28] Hilburg SL, Elder AN, Chung H, Ferebee RL, Bockstaller MR, Washburn NR. A universal route towards thermoplastic lignin composites with improved mechanical properties. *Polymer.* 2014;55(4):995-1003. DOI: 10.1016/j.polymer.2013.12.070
- [29] Pucciariello R, Auria MD. Lignin/poly (ϵ -Caprolactone) blends with tuneable mechanical properties prepared by high energy ball-milling. *J Polymers Environ.* 2010;18(3):326. DOI: 10.1007/s10924-010-0212-1
- [30] Arancibia MY, López-Caballero ME, Gómez-Guillén MC, Montero P. Release of volatile compounds and biodegradability of active soy protein lignin blend films with added citronella essential oil. *Food Control.* 2014;44:7-15. DOI: 10.1016/j.foodcont.2014.03.025
- [31] Jaganathan G, Manivannan K, Lakshmanan S, Sithique MA. Fabrication and characterization of Artocarpus heterophyllus waste derived lignin added chitosan biocomposites for wound dressing application. *Sustain Chem Pharm.* 2018;10:27-32. DOI: 10.1016/j.scp.2018.08.002
- [32] Ravishankar K, Venkatesan M, Desingh RP, Mahalingam A, Sadhasivam B, Subramaniam R, et al. Biocompatible hydrogels of chitosan-alkali lignin for potential wound healing applications. *Mater Sci Eng C.* 2019;102:447-57. DOI: 10.1016/j.msec.2019.04.038
- [33] Gordobil O, Egüés I, Llano-Ponte R, Labidi J. Physicochemical properties of PLA lignin blends. *Polym Degrad Stab.* 2014;108. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2014.01.002
- [34] Mousavioun P, George GA, Doherty WOS. Environmental degradation of lignin/poly (hydroxybutyrate) blends. *Polym Degrad Stab.* 2012;97(7):1114-22. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.04.004
- [35] Alexy P, Kac F, Urgelova E. Effect of blending lignin biopolymer on the biodegradability of polyolefin plastics. *World J Microbiol Biotechnol.* 2001;17:601-7. DOI: 10.1023/A:1012415023385
- [36] Ouyang W, Huang Y, Luo H, Wang D. Poly(lactic acid) blended with cellulolytic enzyme lignin: mechanical and thermal properties and morphology evaluation. *J Polym Environ.* 2012;20(1):1-9. DOI: 10.1007/s10924-011-0359-4
- [37] Gordobil O, Egüés I, Labidi J. Modification of Eucalyptus and Spruce organosolv lignins with fatty acids to use as filler in PLA. *React Funct Polym.* 2016;104:45-52. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2016.05.002
- [38] Kai D, Chong HM, Chow LP, Jiang L, Lin Q, Zhang K, et al. Strong and biocompatible lignin/poly(3-hydroxybutyrate) composite nanofibers. *Compos Sci Technol.* 2018;158:26-33. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.01.046
- [39] Kovalcik A, Machovsky M, Kozakova Z, Koller M. Designing packaging materials with viscoelastic and gas barrier properties by optimized processing of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) with lignin. *React Funct Polym.* 2015;94:25-34. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2015.07.001

- [40] Huang J. Structure and properties of alkaline lignin-filled poly (butylene succinate) plastics. *Iranian Polymer J.* 2011;20(1):3-14.
- [41] El-Zawawy WK, Ibrahim MM, Belgacem MN, Dufresne A. Characterization of the effects of lignin and lignin complex particles as filler on a polystyrene film. *Mater Chem Phys.* 2011;131(1-2):348-57. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2011.09.054
- [42] Sameni J, Jaffer SA, Sain M. Thermal and mechanical properties of soda lignin/HDPE blends. *Compos Part A Appl Sci Manuf.* 2018;115:104-11. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.09.016
- [43] Pucciariello R, Villani V, Bonini C, D'Auria M, Vetere T. Physical properties of straw lignin-based polymer blends. *Polymer.* 2004;45(12):4159-69. DOI: 10.1016/j.polymer.2004.03.098
- [44] Jayaramudu T, Ko HU, Kim HC, Kim JW, Choi ES, Kim J. Adhesion properties of poly(ethylene oxide)-lignin blend for nanocellulose composites. *Compos Part B Eng.* 2019;156:43-50. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.08.063
- [45] Dörrstein J, Scholz R, Schwarz D, Schieder D, Sieber V, Walther F, et al. Effects of high-lignin-loading on thermal, mechanical, and morphological properties of bioplastic composites. *Compos Struct.* 2018;189:349-56. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.12.003
- [46] Verdolotti L, Oliviero M, Lavorgna M, Iannace S, Camino G, Vollaro P, et al. On revealing the effect of alkaline lignin and ammonium polyphosphate additives on fire retardant properties of sustainable zein-based composites. *Polym Degrad Stab.* 2016;134:115-25. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.10.001
- [47] Duval A, Molina-Boisseau S, Chirat C. Comparison of Kraft lignin and lignosulfonates addition to wheat gluten-based materials: Mechanical and thermal properties. *Ind Crops Prod.* 2013;49:66-74. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.04.027
- [48] Wu RL, Wang XL, Li F, Li HZ, Wang YZ. Green composite films prepared from cellulose, starch and lignin in room-temperature ionic liquid. *Bioresour Technol.* 2009;100(9):2569-74. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.11.044
- [49] Miranda CS, Ferreira MS, Magalhães MT, Bispo APG, Oliveira JC, Silva JBA, et al. Starch-based films plasticized with glycerol and lignin from piassava fiber reinforced with nanocrystals from eucalyptus. *Mater Today Proc.* 2015;2(1):134-40. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.04.038
- [50] Kaewtatip K, Thongmee J. Effect of kraft lignin and esterified lignin on the properties of thermoplastic starch. *Mater Des.* 2013;49:701-4. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.02.010
- [51] Shankar S, Reddy JP, Rhim JW. Effect of lignin on water vapor barrier, mechanical, and structural properties of agar/lignin composite films. *Int J Biol Macromol.* 2015;81:267-73. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2015.08.015
- [52] Chauhan M, Gupta M, Singh B, Singh AK, Gupta VK. Effect of functionalized lignin on the properties of lignin-isocyanate prepolymer blends and composites. *Eur Polym J.* 2014;52(1):32-43. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2013.12.016

.....

A.В. Юрченко, Н.Б. Голуб, И. Чжу

ЛИГНИН КАК ОСНОВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОПЛАСТИКА

Проблематика. Ограниченность запасов ископаемых органических источников (нефти и биогаза), необходимость решения проблем утилизации и переработки пластика ставит задачу поиска альтернативных материалов на замену традиционным пластмассам. Одним из таких источников являются биопластики, в состав которых входит лигнин, – второй самый распространенный возобновляемый биополимер. Лигнин может быть включен в различные полимерные матрицы, среди которых как синтетические полимеры (полиэтилен, полипропилен, полистирол и др.), так и полимеры, полученные из продуктов жизнедеятельности микроорганизмов (полимолочная кислота, полибутиленсукцинат, полигидроксibuтират и др.). Целью современных исследований является поиск и создание полимеров, которые бы обладали свойствами традиционных пластмасс и характеризовались главной особенностью – способностью к биоразложению.

Цель. Анализ свойств биополимеров, в состав которых входит лигнин, в зависимости от методов его получения, структуры полимеров и содержания лигнина.

Выводы. Среди рассмотренных типов лигнина наиболее перспективным для дальнейших исследований является щелочной лигнин, который имеет структуру, подобную структуре природного лигнина, и поэтому лучше сочетается с природными полимерами, способными к биоразложению (полимолочная кислота, целлюлоза, полигидроксibuтират и др.). Добавление лигнина к биополимерам замедляет процесс разложения, а при взаимодействии с синтетическими полимерами придает им свойство к незначительной биодеструкции. Лучшую способность к сопряжению с лигнином имеют полимеры, содержащие большое количество полярных групп, среди биополимеров – полиэферы полигидроксibuтират и полиэтилентерефталат. При использовании лигнина в полимерных смесях улучшаются механические свойства (при условии полного смешивания лигнина с полимерной матрицей), происходит стабилизация пластмасс, уменьшается скорость горения. Среди всех рассмотренных смесей природных полимеров и лигнина лучшие механические свойства отмечались у смеси лигнина и целлюлозы.

Ключевые слова: лигнин; биополимеры; пластик; механические свойства; матрица; биоразложение.

.....

A.V. Yurchenko, N.B. Golub, Y. Zhu

LIGNIN AS THE BASIS FOR OBTAINING BIOPLASTICS

Background. The limited reserves of fossil organic sources (petroleum and biogas), the need to solve the problems of utilization and recycling of plastic raises the task of finding alternative materials for traditional plastics. One such source is bioplastics, which include lignin, the second most widespread renewable biopolymer. Lignin can be included in various polymer matrices, including both synthetic polymers (polyethylene, polypropylene, polystyrene, etc.) and polymers derived from products of microorganisms' vital activity (polylactic

acid, polybutylene succinate, polyhydroxybutyrate, etc.). The purpose of modern research is to search and create bioplastics that have similar properties to traditional plastic and are characterized by the main feature – the ability to biodegradation.

Objective. Analysis of the properties of biopolymers, which include lignin, depending on the methods of its obtaining, polymers structure, and lignin content.

Conclusions. Among the types of lignin considered, alkaline lignin, which has a structure similar to natural lignin, is the most promising for further research and is better suited to natural polymers that are capable of biodegradation (polylactic acid, cellulose, polyhydroxybutyrate, etc.). The addition of lignin to biopolymers slows down the process of decomposition, and when interacting with synthetic polymers, it gives them the property of minor biodegradation. The best ability to combine with lignin is made up of polymers containing a large number of polar groups, among biopolymers – polyesters polyhydroxybutyrate and polyethylene terephthalate. When using lignin in polymer mixtures, the mechanical properties improve (provided that the lignin is completely mixed with the polymer matrix), the plastics stabilize, and the combustion rate decreases. Among all the considered mixtures of natural polymers and lignin, the best mechanical properties were observed for the mixture of lignin and cellulose.

Keywords: lignin; biopolymers; plastic; mechanical properties; matrix; biodegradation.