



УДК 678.5-9

DOI: 10.37128/2520-6168-2021-4-11

**ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ В
АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

Паладійчук Юрій Богданович, к.н.т., доцент
Телятник Інна Анатоліївна, магістр
Вінницький національний аграрний університет

Yuriy Paladiichuk, Ph.D., Associate Professor
Inna Telyatnuk, Student Master
Vinnytsia National Agrarian University

Розвиток промисловості спричинив необмежене технологічне застосування полімерів, починаючи з поліетиленових пакетів, гуми, тканин, паперу та інших матеріалів. Витісняючи традиційні матеріали, полімерні вироби почали використовуватися у сільському господарстві. З полімерів виготовляють плівки для укриття ґрунту (мульчування), анти градові сітки, втулки валів, шестерні, корпусні деталі, резервуари для зберігання та транспортування добрив та робочих рідин та багато інших деталей.

Експлуатаційні властивості полімерних виробів стають все більш досконаліми, але одночасно з цим розвиваються та ускладнюються методи поводження з полімерними відходами та їх утилізація. З часом вони вже не можуть використовуватись за прямим призначенням, тож вони вибраковуються і відправляються на сміттєзвалища, в той час як полімери є цінним конструкційними матеріалами і їх повторне використання буде позитивним не лише для навколишнього середовища, а й може стати прибутковою галуззю аграрно-промислового комплексу.

Виробництво гранул є одним із методів утилізації полімерних відходів, які в майбутньому можуть застосовуватися для виробництва нових деталей, а також додаватися до складу композитних матеріалів на основі органічних чи мінеральних наповнювачів.

В даній статті досліджується проблема утилізації полімерних відходів шляхом вдосконалення технологій їх переробки. Проведений аналіз існуючих методів утилізації та переробки полімерних відходів, що утворюються в сільському господарстві. Визначенні фізико-механічні властивості полімерних відходів, зокрема термопластів. З врахуванням отриманої інформації, зроблені висновки та проведений аналіз способів утилізації та переробки полімерних відходів у вторинну сировину.

Ключові слова: сільськогосподарські машини, полімерні відходи, екологія, утилізація, гранули.

Ф. 2. Рис. 9. Табл. 1. Літ. 9.

1. Постановка проблеми

Сучасний прогрес нових технологій у сільському господарстві неодмінно викликає утворення відходів. Зношені деталі, відпрацьовані рідини, супутні матеріали особливо полімерного походження, створюють серйозну загрозу довкіллю. Тому актуальним є питання збору, сортування та розробки ефективних технологій утилізації відходів що утворюються в наслідок застосування полімерних матеріалів [1].

Утилізація полімерних відходів, які утворюються в процесі експлуатації машин і обладнання в Україні знаходиться практично на нульовому рівні.

Щорічно в Україні утворюється приблизно 11 млн. т твердих побутових відходів, сортуванню та переробці піддаються лише 4%, решта опиняються на сміттєзвалищах [1]. В Європі близько третини пластикового сміття підлягає вторинній переробці, інші відходи експортуються [2].

Сьогодні загальна площа сміттєзвалищ в Україні вже пододала позначку в 7% території країни. Щороку забруднюється до 10 тис. га родючих земель, що вилучаються з сільськогосподарського використання. Також важливим є питань, пов'язане з охороною навколишнього середовища, вирішення даних питань вимагає значних матеріальних та людських ресурсів. Так, вартість утилізації пластикових відходів в 3 рази перевищує витрати на утилізацію побутових відходів [1, 2].



Вторинна переробка полімерних відходів стає все більш актуальною не лише з позицій охорони навколишнього середовища, але й забезпечить умови дефіциту полімерної сировини. Відходи пластмас стають потужним сировинним і енергетичним ресурсом.

Переробка пластику забезпечує позитивний ефект в плані екологічної ситуації в країні, крім цього переробка пластику може стати високоприбутковим видом економічної діяльності, необхідно лише створити ефективну систему накопичення, сортування та переробки полімерних відходів [2, 3].

Вторинна полімерна сировини може застосовуватися для виробництва: [3].

- термопластичних композиційних матеріалів;
- нових пластикових виробів;
- палива для сільськогосподарської техніки;
- деталей для сільськогосподарських машин і агрегатів;
- елементів споруд тваринницьких ферм;
- виробничого та експлуатаційного обладнання.

Однак зважаючи на різноманіття видів полімерних матеріалів до сьогодні не існує технології, що забезпечувала б можливість вторинної переробки наявної номенклатури видів полімерних матеріалів, композитів в виробі методом безперервного формування, а також експлуатаційні та технологічні характеристики одержуваних виробів [4].

Сьогодні використовується чотири основних методи переробки полімерних відходів. Перший термічний піроліз. В процесі якого утворюються напівфабрикати-мономери, які в подальшому можуть бути використані при синтезі нових полімерних матеріалів. Інший популярний метод базується на розкладанні матеріалів до низькомолекулярних продуктів. Отримана сировина може бути використана для виготовлення ливарних пластмас і легкорозчинних клеїв.

В Україні найбільшого поширення набув третій метод вторинної переробки полімерних матеріалів, який називається механічним рециклінгом, в результаті якого може бути отриманий гранулянт, придатний для вторинного виробництва пластмас. У більшості європейських країн, а також в США і Японії механічному рециклінгу піддаються 90% пластикових відходів, а отримані інгредієнти йдуть на вторинне виготовлення виробів із пластику [4].

Однак, на сьогоднішній день тільки 10% відходів полімерних матеріалів піддаються рециклінгу, а ті полімерні відходи, що залишаються в багатьох країнах, включаючи і Україну, компостуються на певних полігонах, або накопичуються на місцевих сміттєзвалищах і несанкціонованих звалищах. Для багатьох міст України, таких як Львів, Київ, Одеса та ін., це стало значною екологічною проблемою. [4].

Також важливим є те що вторинна переробка дозволяє заощаджувати до 90% електроенергії, тобто для того щоб виготовити туж кількість нового полімеру буде необхідно значно більше електроенергії, в загальному вторинна переробка дозволить знизити витрати електроенергії, а в перспективі і навантаження на електростанції, та навколишнє середовище [4].

Останній четвертий метод базується на термічному розплавленні полімерних відходів, та виробництві з них композиційних сумішей, що можуть бути використані для виробництва різного роду виробів.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Полімери – це хімічні сполуки з високою молекулярною масою (від декількох тисяч до багатьох мільйонів), молекули яких (макромолекули) складаються з великого числа повторюваних угруповань (мономерних ланок). Атоми, що входять до складу макромолекул, з'єднані один з одним силами головних і (чи) координаційних валентностей [5].

Класифікація полімерів, за походженням полімери поділяються на:

- ❖ природні – біополімери (наприклад білки, нуклеїнові кислоти, смоли природні);
- ❖ синтетичні (наприклад поліетилен, поліпропілен, феноло-формальдеговані смоли).

Атоми або атомні групи можуть розташовуватися в макромолекулі у вигляді: відкритого ланцюга чи ланцюга витягнутої в лінію послідовності циклів – лінійні полімери (каучук натуральний); ланцюга з розгалуженням – розгалужені полімери (амілопектин); тривимірної сітки – зшиті полімери (затверділі епоксидні смоли). Полімери, молекули яких складаються з однакових мономерних ланок, називаються гомополімерами (полівінілхлорид, полікапроамід, целюлоза) [5].

види полімерів:

- ❖ термопласти;
- ❖ реактопласти.



Реактопласти, при нагріванні розм'якшуються проте після надання йому форми виробу, вони вже не можуть бути знову розм'якшені без хімічної деградації. Незворотне твердіння є реакцією зшивання полімерних ланцюгів[5].

Термопласти – вид пластмаси, в основі якого лежать термопластичні полімери. Головна особливість цього типу пластику – можливість повторної переробки [5].

Термопласти під дією високих температур розм'якшуються і переходять в стан в'язко-текучості, а при охолодженні повертаються у твердий стан. Усадка цього матеріалу становить 1-3%, що гарантує зручну і просту переробку. Середня робоча температура – 90 ° С.

Різноманітність властивостей полімерних матеріалів дозволяють використовувати їх у виробництві сучасної техніки, механізмів та обладнання.

Сьогодні композитні матеріали на основі полімерів за своєю міцністю можуть в декілька разів перевищувати міцність сталі, вони витримують високі та низькі температури, вплив агресивних середовищ, легко обробляються. Проте після втрати здатності виконувати своє пряме призначення, вони перетворюються у відходи.

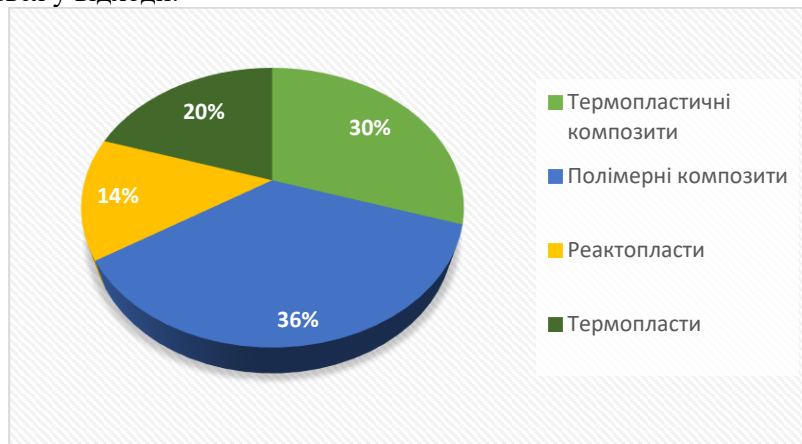


Рис.1. Полімерні матеріали для автомобілебудування [5].

Таблиця 1.

Різновиди термопластів [5].

Назва	Особливості
Поліетилен (PE, PE – polyethylene)	Органічна сполука полімерів етилену. Стійкий до низьких температур до -60°C, впливу хімічних речовин агресивних середовищ. Не проводить електричний струм, міцний до ударів. При впливі високих температур від 80°C розм'якшується і плавиться, що є його основним недоліком. Відрізняється високою газопроникністю і низькою стійкістю до дії масел. З поліетилену виготовляють кабель, плівки, труби, контейнери технічного, побутового призначення та багато іншого.
Поліетилен низької щільності (LDPE LowDensity PE).	Друга назва – поліетилен високого тиску (ПЕВТ). Утворюється шляхом полімеризації етилену за участю кисню і пероксидних сполук під температурою 200–300 ° С.
Поліетилен високої щільності (HDPE HighDensity PE).	Друга назва - поліетилен низького тиску (ПЕНТ). Утворюється на каталізаторах Ціглерра-Нагта шляхом полімеризації в суспензії або газовому середовищі під температурою 80 ° С і тиском 0,3–0,5 МПа.
Поліетилен середнього тиску і високої щільності (песто)	Отримують в результаті полімеризації з використанням оксидів кобальту і молібдену під температурою 130–170 ° С і тиском 3,5–4 МПа.
Поліпропілен	Неполярний полімер пропілену. Не піддається впливу неорганічних агресивних середовищ (кислот, лугів, розчинів солей). Стійкий до вологи і електрики. Міцний, жорсткий, але крихкий при дії низьких температур (до -15 ° С). Погано склеюється, накопичує статичну електрику і швидко спалахує. Деякі марки цього типу пластику використовуються в харчовій промисловості (пакувальні плівки). Поліпропілен часто використовують в медицині та електротехніці.



Продовження таблиці 1.

Полістирол	Полімеризований стирол. Безбарвний, твердий, склоподібний. Діелектрик. Відрізняється високою морозостійкістю, хорошою світлопроникністю. Не стійкий до ударів і механічних пошкоджень. Легкий в обробці, легко ріжеться і клеїться. Не має в собі токсичних домішок, стійкий до води і радіації. Часто використовується в електро- і світлотехніці, медичній і харчовій галузях промисловості, а також в побуті (з полістиролу часто виготовляють культурно-побутові вироби).
Полиметилметакрилат (ПММА, органічне скло, PMMA - Polymethyl Methacrylate)	Полімер метилметакрилату. Аморфний, твердий і прозорий. Не піддається впливу води, спиртів, лугів, кислот і низьких температур (-60°C). Має високі фізико-механічними і діелектричними властивостями (крім впливу високих частот). Руїнується при тривалому впливі кисню і високих температур. Відрізняється низьким опором до ударів (крихкий). Виготовляється цільними листами товщиною 0,8-24мм. Органічне скло (друга назва полиметилметакрилата) часто використовують у світлотехніці, авто і авіабудуванні.
Полиетилентерефталат (ПЕТ Ф, PET - polyethylene terephthalate)	Може перебувати в двох агрегатних станах: аморфному (твердий, прозорий, безбарвний) і кристалічному (білий, мутний). Ставати прозорим при нагріванні до температури склоутворень і різкого охолодження. Міцний, не піддається впливу електрики. Руїнується під впливом каустичної соди. ПЕТ часто використовують у виготовленні пластикової тари для їжі і рідин, в автомобілебудуванні.

Основна частина полімерних відходів припадає на ПЕТ (поліетилентерефталат) близько 25%, поліетилен (ПЕТ) – 30%, поліпропілен (ПП) до 13%, полістирол (ПС) – 6%, полівінілхлорид (ПВХ) – 5% і на інші полімерні матеріали – 21% [5].

Вплив температури нагрівання на рухливість макромолекул полімерів.

При нагріванні полімерів відбувається зміна у їх стані, адже підвищена температура провокує збільшення середнього значення теплової енергії макромолекул полімерів. Макромолекули при цьому стають більш рухливими.

Різні стани аморфних пластиків, що обумовлює різниця гнучкості молекул [6]:

Склоподібний або застиглий стан. Характерно для пластиків що перебувають в умовах низької температури. В таких умовах відбувається їх застигання і затвердіння. За даних умов молекули абсолютно знерухомлені, тому що енергії для цього недостатньо. Полімер в такому вигляді може перебувати невизначений час [6].

Високоеластичний стан. Такий стан для пластику характерно при підвищенні температури. В даному випадку молекули можуть значно збільшуватися в довжині. При зворотному застиганні вони повертаються в початковий стан. У стан в'язкотекучості полімер приходить в умовах надсильного нагріву. Полімер розплавляється і навіть при невеликому впливі починає текти [6].

За допомогою такої кривої можна помітити три чітких ділянки, що відповідають кожному зі станів полімеру (рис. 2).

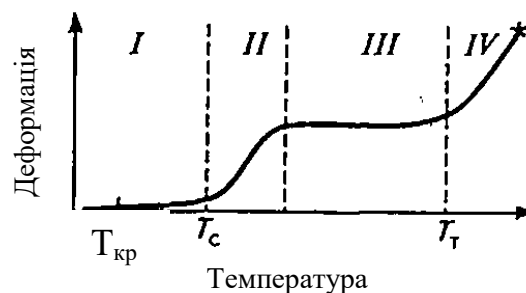


Рис. 2. Графік термомеханічної кривої аморфного полімеру:

I – зона склоутворювального стану; II – перехідна зона; III – зона високоеластичного стану; IV – зона в'язкотекучого стану; $T_{кр}$ – температура крихкості; T_c – температура склоутворення; T_m – температура текучості; Зірочкою позначена точка початку термодеструкції [6]



У процесі поступового нагрівання полімер змінює свій стан в межах певного термічного діапазону. Температурою переходу вважається середня температура інтервалу. Дані переходи можна добре спостерігати на термомеханічній кривій.

Графік показує, що на рівні першої ділянки деформація практично відсутня або ж бачимо в незначній коефіцієнті. $T_{кр}$ – це термічні значення показника крихкості пластика. T_c – температура, при якій відбувається склосклеювання. Тут полімер може переходити від високоеластичного стану до склоподібного і навпаки. Після того, як полімер перейшов зі склоподібного стану в еластичний, настає перехідний період. Підвищення термічних значень в даному випадку провокує деякі деформації, які зберігаються на протязі всього температурного інтервалу еластичного стану. У разі в'язкотекучого стану деформація відбувається дуже швидко. Граничні термічні значення характерні для високоеластичного і в'язкотекучого стану називаються T_T – температура текучості. Деформація наростає до тих пір, поки пластик не розкладеться [6].

У полімерів, які кристалізуються частково температура текучого стану, буде значно більшою, ніж температура плавлення.

В обробці пластиків велике значення має інтервал термічного впливу між станом текучості і розкладання. Від цього інтервалу залежить чутливість процесу переробки до змін налаштування параметрів.

Термічні методи утилізації відходів.

До прогресивних способів утилізації відходів полімерів відносяться термічний і каталітичний піроліз за температури 500-1000°C в безкисневому середовищі або в середовищі з нестачею кисню. Він дозволяє одержувати безсіркові види палива та вуглеводи. Витрати на переробку скупляються за рахунок реалізації продуктів, що утворюються. В результаті термічної дії молекули полімерів розпадаються з утворенням низькомолекулярних продуктів, вихід і характеристики яких залежать від умов проведення процесу, природи і хімічного складу вихідних компонентів [6].

Установка для термічного розкладання відходів полімерів складається із тарілчастого або шнекового живильника, печі розкладання, скрубера, ректифікаційної колони, холодильника, розвантажувального барабану, промивної ємкості, ємкості для масел, камери спалення газів, що відходять, і печі вторинного розкладання. Для попереднього подрібнення відходів може бути встановлена дробарка.

Існують різні способи проведення піролізу:

- піроліз нерухомого шару періодично завантажуваних відходів;
- піроліз в оберткових печах або на рухомому конвеєрі;
- піроліз в псевдозрідженому шарі високодисперсного теплоносія та інші [6].

В більшості випадків рідкі продукти піролізу можна використовувати як паливо, оскільки вони не містять сірки, характеризуються малою в'язкістю і високою теплою спалення. Оптимальним є застосування рідких продуктів піролізу у вигляді добавок до твердого і рідкого палива. Вони можуть також служити додатковим джерелом хімічної сировини для виробництва етилену і ароматичних вуглеводів, соляної кислоти. В окремих випадках тверді продукти піролізу можуть самостійно застосовуватись.

Повторне використання відходів полімерних матеріалів є необхідною частиною будь якого виробничого процесу. З цієї метою відходи перероблюють у вторинний гранульований матеріал або безпосередньо у виробу, регенерують вихідні продукти синтезу полімерів і повертають їх у виробництво у вигляді вторинної сировини, одержують композиційні матеріали. Технологія повторної переробки відходів розроблена для всіх основних видів вертають у виробництво або додають в кількості 5–10% до первинної сировини [6, 7].

Вторинні пластичні маси успішно конкурують з другосортними первинними полімерами. При цьому вони можуть застосовуватися в інших областях (нарівні з первинними). Так, вторинний ПВХ використовується для виготовлення електроізоляції, а регеновані термопластичні полієфіри – для одержання литтєвих композицій, що не поступаються за своїми властивостями поліамідам і полікарбонатам. Волокнисті, плівкові і шматкові відходи ПЕ, ПУТФ, поліамідів і деяких інших термопластів можливо перероблювати методом екструзії (з попереднім подрібненням) у виробу технічного і культурно-побутового призначення [6, 7].

При повторній переробці змінюється структура, фізико-механічні і реологічні характеристики більшості полімерів. Тому дослідження впливу кратності переробки на властивості пластичних мас є необхідною умовою правильного вибору технологічного режиму переробки і областей застосування



матеріалів, виготовлених із відходів. Так, встановлено, що властивості сополімеру стирол + акрилонітріл (САН) залежать від кратності переробки литтям під тиском. Ударна в'язкість і руйнівне напруження при розтязі після перших циклів зростають, а потім монотонно зменшуються і стають нижче вихідних значень. Теплостійкість матеріалу у всьому інтервалі кратності переробки трохи вища за теплостійкість вихідного полімеру.

Середньов'язкісна молекулярна маса САН зменшується після кожного циклу витримки і лиття під тиском за температури 200-240°C. Зі збільшенням кратності переробки молекулярно-масове розподілення зміщуються в низькомолекулярну область. Інтенсивність деструкції САН визначається його молекулярною масою і температурою переробки. Чим нижча температура переробки, тим менша рухливість макромолекул, більша величина здвигу макромолекул, що обумовлює більш інтенсивну деструкцію довгих ланцюгів. При підвищенні температури зростає швидкість термодеструкції [6, 7].

Низькомолекулярні фракції, що утворюються при цьому, діють як мастило, що знижує показник плинності розплаву полімеру. Повторна переробка полімерних матеріалів, як правило, потребує додаткового введення стабілізаторів, що перешкоджають деструкції або уповільнюють її. Одним із ефективних стабілізаторів, що застосовуються для цієї мети, є «Sandostab Р-ЕРО». Він може бути використаний для стабілізації вторинно перероблюваного ПП, ПЕВТ і ПЕНТ, полікарбонату [6, 7].

Регенерація відходів.

Відходи процесів одержання, переробки та експлуатації деяких полімерів можуть бути регенеровані до вихідних продуктів синтезу і повернуті в промисловість. Цей метод є найбільш перспективним напрямком утилізації відходів поліуретанів (ПУ), оскільки їх спалення нерентабельне, а піроліз супроводжується виділенням отруйних газів [7].

Можливість регенерації ПУ визначається структурою і фізико-механічними характеристиками полімерів. ПУ з малим ступенем зшивки, як і термопласти, можна переробляти багатократно. Вторинне застосування лінійних та густосітчатих ПУ з високою температурою плавлення ґрунтоване на використанні сильнополярних розчинників або хімічної деструкції (гідроліз, алкоголіз, аміноліз) [7].

Оптимальною є часткова хімічна деструкція полімеру мінімальною кількістю деструкуючого агенту. Деструкцію доцільно проводити до такого ступеня, коли матеріал здобуває властивість перероблятися і не потребує спеціального очищення.

Такий підхід дозволяє економне використовувати відходи та одержувати полімерні матеріали, близькі за властивостями до вихідних. Але найбільш універсальним методом використання відходів різних типів ПУ являється повний гідроліз до вихідних компонентів (олігодіолів, діамінів). Розроблена промислова технологія гідролізу відходів ПУ. Так, фірма «Upjohn Co» (США) шляхом регенерації відходів жорстких пінополіуретанів і пінополіізоціануратів одержує полііоли для вторинного використання, вартість яких становить 2/3 вартості первинних полііолів [7].

Регенерацію відходів еластичних пінополіуретанів до полііолів і діамінів шляхом гідролізу перегрітою парою здійснюють фірми «Ford Motor Co.» і «General Motors Corp.» (США).

Методи і технологічні режими переробки істотно впливають на властивості виробів. Галузями промисловості, де перспективним є застосування матеріалів із відходів виробництва ПС-пластиків, є деревообробна та лакофарбова. Зношені вироби із ПС застосовують для виробництва клеїв, паст, водорозчинних іонообмінних смол. Матеріали з цінними властивостями одержують на основі відходів ПЕ, капрону, ПА та фенолоформальдегідних смол.

Переробленні полімерні відходи широко використовують в цивільному і дорожньому будівництві. Наприклад, із відходів пластичних мас і піску в Японії виготовляють блоки для будівництва станцій з розведення морської риби, а на основі суміші бетону з відходами пінополістіролу фірма «Секісуй пурасутіккосу» розробила легкий пінобетон. Із зношених капронових сіток одержують високонаповнені литтєві матеріали з високими теплофізичними і антифрикційними характеристиками [7].

Існує достатньо багато способів переробки полімерних матеріалів і використаної тари, найбільш раціональними та безпечними з яких є регенерація, вторинна переробка та піроліз. Розвиток технологій в цих галузях є найбільш динамічним. Як засвідчує практика розвинених країн, утилізація відходів, як правило, не є рентабельною та потребує втручання держави у цей процес, якщо дійсно ставиться мета охорони навколишнього середовища [4-7].

3. Мета і завдання дослідження

Метою є розв'язання проблеми утилізації полімерних відходів шляхом вдосконалення технологій їх переробки.



Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати такі завдання: провести аналіз існуючих методів переробки полімерних відходів; визначити властивості полімерних відходів; дослідження зміни структури полімерних відходів при нагріванні.

4. Основні результати дослідження

Сьогодні проблема утилізації полімерних відходів є доволі актуальною, високі ціни на нафту (сировина для виготовлення полімерів), світова енергетична криза, стан екології спонукають до розробки ефективних систем вторинного використання відпрацьованих полімерів, що в умовах дефіциту нафти стають цінним сировинним і енергетичним ресурсом [7].

Вторинне застосування полімерів дає можливість економити первинну сировину (насамперед нафту) та електроенергію.

Основною проблемою, що негативно впливає на весь ланцюг процесу утилізації полімерних відходів є проблеми з накопиченням, сортуванням та логістикою полімерів, до місць переробки, на другому плані стає проблема обладнання для переробки полімерів. Необхідно розробити систему цін на вторинну сировину, що стимулюють підприємство до його переробки; створити ефективні технології переробки вторинної полімерної сировини. Необхідно також створювати спеціальне обладнання для переробки полімерних відходів; розробляти номенклатуру виробів, що випускаються з вторинної полімерної сировини [7].

Для вторинного використання полімерів потрібно перетворити некондиційну полімерну сировину в напівфабрикат (гранулу), придатний для подальшої переробки у виробі. Вибір технології первинної обробки залежить від джерела утворення відходів та ступеня їх забруднення [8].

Полімерні відходи сільськогосподарського виробництва вимагають складної підготовки сировини до переробки.

Первинна обробка полімерних відходів сільськогосподарського призначення (поліетиленової плівки, мішків, та ін., змішаних полімерів) включає такі етапи підготовки [8]:

1. первинне сортування;
2. визначення типу полімеру;
3. очистка (миття);
4. подрібнення;
5. магнітна сепарація;
6. розділення змішаних відходів (флотаційним, поділом в важких середовищах, сепарації в циклонах, оптичної сепарації, хімічними методами та методами охолодження)
7. кінцева очистка;
8. сушка та завершальний етап грануляція [7, 9].

Первинне сортування це грубий поділ відходів за різними ознаками: кольором, габаритами, формою і, якщо можливо - за видом полімеру. Виконують вручну на стрічкових конвеєрах; під час сортуванні одночасно видаляють сторонні предмети і включення.

Найбільш простим методом поділу полімерів за видом є метод флотації, він дозволяє розділяти суміші таких полімерів як поліетилен (ПЕ), поліпропілен (ПП), полістирол (ПС) і полівінілхлорид (ПВХ). Поділ полімерів базується на різниці властивостей полімерів [7-9].

Метод флотації є найбільш доступним та економічно найбільш дешевим, тому його використання є бажаним.

Для флотаційного сортування подрібнені полімерні відходи з транспортера направляють на миття в ваннах чи під струменем води та сушку стисненим повітрям, потім їх вводять в ванну з флотаційним розчином да полімери під впливом різності властивостей розділяються на фракції, одні осідають осадом інші спливають. Процес переробки полімерів це складний, високотехнологічний процес. Де необхідно використовувати складне обладнання таке як дробарки, агломератори, гранулятори, екструзійні машини.

Подрібнення відходів дозволяє зменшити їх об'єм та підготувати сировину до інших технологічних операцій. Регулювання ступеню подрібнення дозволяє механізувати процес переробки, підвищити якість матеріалу, скоротити час виконання наступних технологічних операцій. Подача подрібненого полімеру відбувається стрічковими транспортерами, шнеками, вібротками чи стисненим повітрям.

Грануляція це кінцева операція з підготовки полімерної сировини до подальшої переробки. В процесі гранулювання сировина ущільнюється під впливом високих температур та тиску, створюється



однорідна суміш полімеру, в результаті чого ми отримуємо напівфабрикат, що придатний для переробки в необхідні вироби, на звичайному обладнанні. Виконаємо огляд технічних засобів для реалізації технології утилізації відпрацьованих полімерів.

Екструзійні машини представлені такими конструктивними виконаннями: одношнекові; двошнекові; поршневі; дискові; багатощнекові екструдери, видувні, плівкові, а також спеціальні екструзійні лінії для виробництва труб [8].

Двошнекові екструдери призначені для промислової переробки пластику, вони більш складні ніж одношнекові краще обробляють полімери вони представлені конічними і паралельними агрегатами. Конічні екструдери переробляють ПВХ, який представлений у вигляді порошку або гранул і призначений для виготовлення профільних виробів.

Паралельні екструдери використовуються у випадках, коли необхідно змішувати декілька видів полімерів рис. 3 [8].



Рис. 3. Двошнековий екструдер

Шнек обертаючись захоплює з накопичувального бункера полімерну сировину, навивка шнека звужується по довжині шнека зменшуючи щільну для проходу полімерів, що викликає ущільнення полімеру в робочому циліндрі в процесі транспортування полімер підігрівается і під тиском виштовхує в фільтр. Одночасно з транспортуванням в шнекові полімери змішуються.

Транспортування полімеру в екструдері відбувається внаслідок різниці в коефіцієнтах тертя матеріалу по шнеку і циліндру. Підігрів полімеру може виконуватись з допомогою підігрівачого пристрою та за рахунок стискання матеріалу [8].

Основними параметрами, що визначають характеристику екструдера є: діаметр робочого циліндра, мм; відношення діаметру циліндра до його довжини; швидкість обертання шнека, хв^{-1} ; потужності двигуна і нагрівача, кВт; продуктивність, кг/год .

Шнеки екструдерів є складним за конструкцію деталями, в порожнині екструдера протікають складні хімічні, механічні та гідравлічні процеси.

Конструкція двошнекових екструдерів значно складніша і відповідно дорожча. Проте вони мають високу продуктивність, та добре змішують полімери, завдяки чому їх використовують в лініях безперервної переробки полімерів Шнеки крім шнекової навивки можуть обладнуватись додатковими змішувачами, та іншими поверхнями, що забезпечують істотну зміну напрямку і характеру руху маси розплавленого полімеру. Наприклад японська фірма Creative Technology & Extruder Co. Ltd для виробництва деревно-полімерних композитів запропонувала комбіновану схему екструдера, в якому в одному циліндрі встановлені двошнековий і одношнековий екструдери [8].

Досить важливим етапом переробки полімерних відходів є їх подрібнення, адже ступінь подрібнення визначає об'ємну щільність, сипучість і розміри частинок одержуваного продукту. Механізований процес переробки дозволяє, регулювати ступень подрібнення при цьому підвищується якість матеріалу за рахунок усереднення його технологічних характеристик, скорочується тривалість інших технологічних операцій [7, 9].

Для забезпечення створення пластичної маси із подрібнених полімерних відходів, необхідно створити умови для нагрівання. Такі умови забезпечує екструдер, що при пресуванні і терті елементарних частин полімерів відбувається нагрів до $200-220^{\circ}\text{C}$, що перетворює подрібнені відходи у пластичну масу.

Забезпечення пластичності полімерної маси досягається шнеками екструдерів (рис. 4).

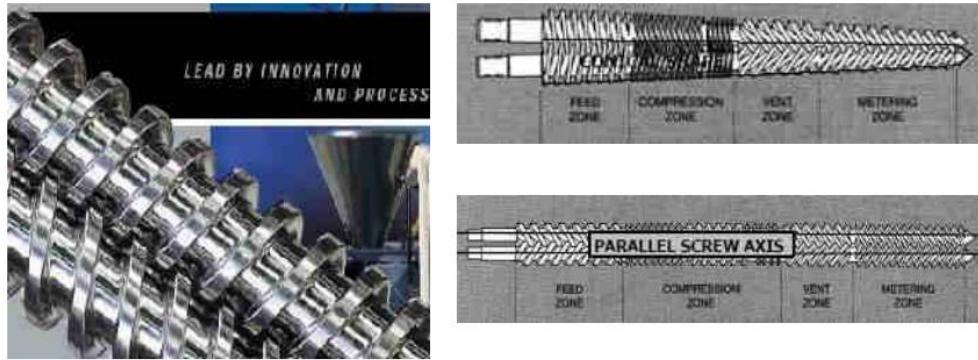


Рис. 4. Схеми шнеків двоциліндрового і двоконусного екструдерів [8,9].

Грануляція є заключною стадією підготовки вторинної сировини. У процесі гранулювання відбувається ущільнення матеріалу, полегшується його подальша переробка, зосереджуються характеристики вторинної сировини, в результаті чого отримують напівфабрикат, який можна переробляти на стандартному обладнанні методами екструзії, лиття під тиском або компресійного формування [6,9].

Будь який виробний процес супроводжується повторним використанням відходів полімерних матеріалів. Для використання відходів як вторинний матеріал їх переробляють у гранульований матеріал або безпосередньо у вироби. Проводять регенерацію вихідних продуктів синтезу полімерів і повертають їх у виробництво у вигляді вторинної сировини при цьому одержують композиційні матеріали. Завдяки регенерації відходів, вторинні продукти повертаються у виробництво або додаються в кількості 5-10% до первинної сировини [9].

Визначення параметрів пристроїв для переробки полімерної суміші.

Транспортування суміші полімеру з твердим наповнювачем по циліндру шнекової камери відрізняється від потоку рідини в трубі. Рідина з наближенням до стінок сповільнює потік, а в центрі пришвидшує (за умови ламінарності потоку рідини). Композиційна суміш рухається як тверде тіло. Також композитна суміш створює тиск на стінки поршневої камери, що викликає додаткове тертя, пропорційне довжині циліндра.

$$F = Q \cdot S \cdot f \quad (1)$$

де F – сила тертя, Н; Q – тиск композиту на стінку поршневої камери, Н/см²; S – площа поверхні контакту композиту з стінками поршневої камери, см²; f – коефіцієнт тертя.

Розподіл сил, що впливають на стінки поршневої камери від тиску композиту і поршня, показані на рис. 5. P – сила тиску що створюється композитом а поршень, Q – епюра впливу сил композиту на стінки поршневої камери, F – силу тертя композиту по стінкам поршневої камери, що є результатом цього тиску.

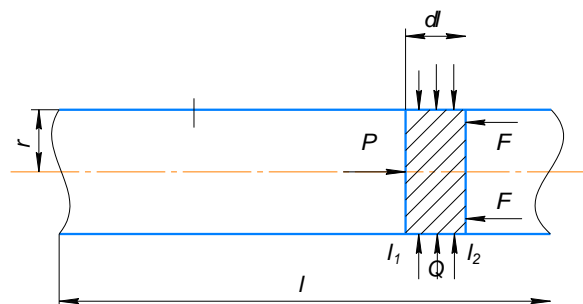


Рис. 5. Розподіл сил в поршневій камері спікання

Так як дослідна установка має циліндричну камеру спікання її площа може бути розрахована за відомою формулою:

$$S = 2\pi r \cdot dl \quad (2)$$

де r – радіус циліндра, мм; l – робоча довжина циліндра, мм.

Виробництво вторинної сировини з полімерних матеріалів нерозривно пов'язане з охолодження готового матеріалу. Теплоємність полімерної суміші яка обрана для досліджень відрізняється від теплоємності чистого полімеру [9].



Температура в робочій камері спікання циліндра становила $120\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\%$. Охолодження виконувалося за допомогою охолоджуючої ванни наповненої водою температурою $15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\%$. Для повного охолодження, що виключає зміну форми виробу необхідно досягти температури нижче $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, за цієї температури деформація поверхні виробу відсутня.

На рисунку 7 наведені графічні залежності температури циліндра від відносного радіуса $r_{\text{від}} = \frac{r}{R}$ в різні моменти часу, при $T_0 = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{п}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 0,03\text{ м}$, $a^2 = 0,284 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$.

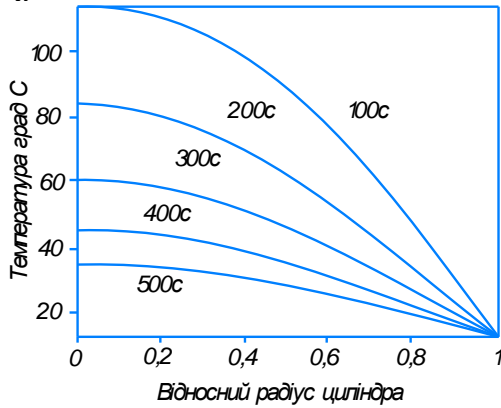


Рис. 6. Залежність температури циліндра від радіуса

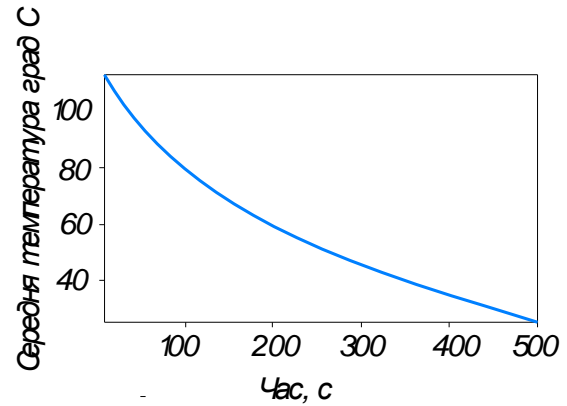


Рис. 7 Залежність середньої температури матеріалу від часу охолодження

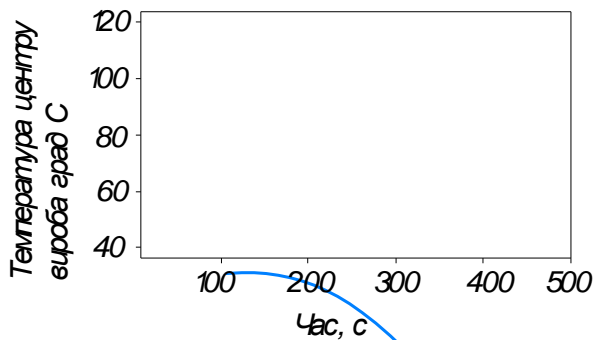


Рис. 8. Залежність температури центра виробу від тривалості охолодження

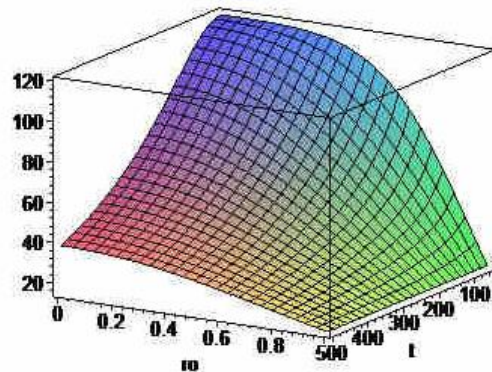


Рис. 9. Зміна градієнта температури матеріалу в залежності від тривалості охолодження

Отже, з отриманих графіків очевидно, що для охолодження виробу циліндричної форми до температури поверхні $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ досить охолодження у ванні протягом 120–140 с.

5. Висновки

Застосування полімерних відходів у подальшому виробництві є однією з основних складових будь-якого виробничого процесу. Для цього відходи переробляють у вторинний гранульований матеріал або безпосередньо у виробу. Використання в якості сировини вторинних термопластичних полімерів дозволяє отримати значний екологічний та економічний ефект при виробництві виробів.

Переробка полімерів є складним, високотехнологічним процесом. Під час даного процесу застосовуються, як дробарки для полімерів, так і спеціалізоване обладнання, як агломератори, гранулятори полімерів, а також екструзійні машини.

Вторинні пластичні маси успішно конкурують з другосортними первинними полімерами. При цьому вони можуть застосовуватися в інших областях (нарівні з первинними). Наприклад вторинний полівінілхлорид використовується для виготовлення електроізоляції, а регеновані термопластичні поліефіри – для одержання пластичних композицій, що не поступаються за своїми властивостями поліамідам і полікарбонатам.

Відходи процесів одержання, переробки та експлуатації деяких полімерів можуть бути регеновані до вихідних продуктів синтезу і повернуті в промисловість.

Методи і технологічні режими переробки істотно впливають на властивості виробів. Галузями промисловості, де перспективним є застосування матеріалів із полімерних відходів виробництва, є



деревобробна та лакофарбова. Зношені полімерні вироби застосовують для виробництва клеїв, паст, водорозчинних іонообмінних смол.

Список використаних джерел

1. Щороку українці створюють близько 11 мільйонів тонн сміття: веб-сайт. URL: <http://www.vin.gov.ua/news/ostanni-novyny/18961-shchoroku-ukraintsi-stvoriuiut-blyzko-11-milioniv-ton-smittia> (дата звернення 24.10.21).
2. Пономарьова В. Т., Лихачова М. М., Ткачик З. А. Використання пластмасових відходів за кордоном. *Пластичні маси*. 2008. № 5. С. 44–48.
3. Використання полімерів в сільському господарстві: веб-сайт. URL: <https://tisprofile.com/info/novini/ispolzovanie-polimerov-v-selskom-hozjajstve> (дата звернення 27.10.21).
4. Денисенко Т. М. Дослідження сучасних технологій переробки пластикових виробів. *Вісник чернігівського державного технологічного університету*. 2014. № 1(71). С. 56–65.
5. Опейда Й., Швайка О. Глосарій термінів з хімії. Ін-т фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Донецький національний університет. Донецьк: «Вебер». 2008. 758 с.
6. Ящук Л. Б. Екологічні аспекти поводження з твердими полімерними відходами в черкаській області. *Екологічна безпека*. 2011. Вип 1 (11). С. 21–25.
7. Мікульонюк І. О. Переробка вторинної сировини екструзією: монографія. Київ: НТУУ «КПІ», 2006. 185 с.
8. Екструдер для пластику: веб-сайт. URL: <http://www.cntomo.com/articles/847-ekstruderi-dlya-plastika.html>: (дата звернення 30.10.21).
9. Мир полимеров – Вторичная переработка полимеров: веб-сайт. URL: http://mirpolimerov.com/stati/article_post/vtorichnaya-pererabotkapolimerov (дата звернення 01.11.21).

References

- [1] Every year Ukrainians create about 11 million tons of garbage: a website. URL: <http://www.vin.gov.ua/news/ostanni-novyny/18961-shchoroku-ukraintsi-stvoriuiut-blyzko-11-milioniv-ton-smittia> (accessed 24.10.21) [in Ukrainian].
- [2] Ponomareva, V.T., Likhachova, M.M., Tkachik, Z.A. (2008). Use of plastic waste abroad. *Plastics*. 5. 44–48 [in Ukrainian].
- [3] The use of polymers in agriculture: website. URL: <https://tisprofile.com/info/novini/ispolzovanie-polimerov-v-selskom-hozjajstve> (access date 27.10.21) [in Ukrainian].
- [4] Denisenko, T.M. (2014). Research of modern technologies of plastic products processing. *Bulletin of Chernihiv State Technological University*. 1(71). 56–65 [in Ukrainian].
- [5] Opeida, J., Schweik, O. (2008). *Glossary of terms in chemistry*. Institute of Physical and Organic Chemistry and Coal Chemistry LM Lytvynenko National Academy of Sciences of Ukraine, Donetsk National University. Donetsk: Weber. [in Ukrainian].
- [6] Iashchuk, L.B. (2011). Ecological aspects of solid polymer waste management in Cherkasy region. *Ecological safety*. 1(11). 21–25. [in Ukrainian].
- [7] Mikulonok, I.O. (2006). Processing of secondary raw materials by extrusion: monograph. Kyiv: NTUU «KPI». [in Ukrainian].
- [8] Extruder for plastic: website. URL: <http://www.cntomo.com/articles/847-ekstruderi-dlya-plastika.html> (accessed 30.10.21) [in Ukrainian].
- [9] The world of polymers - Polymer recycling: website. URL: http://mirpolimerov.com/stati/article_post/vtorichnaya-pererabotkapolimerov (access date 01.11.21) [in Russian].

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Развитие промышленности повлекло за собой неограниченное технологическое применение полимеров, начиная с полиэтиленовых пакетов, резины, тканей, бумаги и других материалов. Вытесняя традиционные материалы, полимерные изделия стали использоваться в сельском хозяйстве. Из полимеров изготавливают пленки для укрытия грунта (мульчирование), антиградовые сетки, втулки валов, шестерни, корпусные детали, резервуары для хранения и транспортировки удобрений и рабочих жидкостей и многие другие детали.

Эксплуатационные свойства полимерных изделий становятся все более совершенными, но одновременно развиваются и усложняются методы обращения с полимерными отходами и их утилизация. Со временем они уже не могут использоваться по прямому назначению, поэтому они выбраковываются и отправляются на свалки, в то время как полимеры являются ценными



конструкционными материалами и их повторное использование будет положительным не только для окружающей среды, но и может стать прибыльной отраслью аграрно-промышленного комплекса.

Введение гранул является одним из методов утилизации полимерных отходов, которые в будущем могут применяться для производства новых деталей, а также добавляться в состав композитных материалов на основе органических или минеральных наполнителей.

В данной статье исследуется проблема утилизации полимерных отходов путем усовершенствования технологий их переработки. Проведен анализ существующих методов утилизации и переработки образующихся в сельском хозяйстве полимерных отходов. Определены физико-механические свойства полимерных отходов, в частности термопластов. С учетом полученной информации сделаны выводы и проведен анализ способов утилизации и переработки полимерных отходов во вторичное сырье.

Ключевые слова: сельскохозяйственные машины, полимерные отходы, экология, утилизация, гранулы.
Ф. 2. Рис. 9. Табл. 1. Лит. 9.

JUSTIFICATION OF METHODS OF POLYMERIC WASTE PROCESSING IN AGRICULTURAL PRODUCTION

The development of industry has led to the unlimited technological application of polymers, ranging from plastic bags, rubber, fabrics, paper and other materials. Displacing traditional materials, polymer products began to be used in agriculture. Polymers are used to make films for soil cover (mulching), anti-hail nets, shaft bushings, gears, body parts, tanks for storage and transportation of fertilizers and working fluids and many other parts.

The operational properties of polymer products are becoming more and more perfect, but at the same time the methods of polymer waste management and their utilization are being developed and complicated. Over time, they can no longer be used for their intended purpose, so they are discarded and sent to landfills, while polymers are valuable structural materials and their reuse will not only be positive for the environment, but can also become a profitable branch of the agro-industrial complex.

Pellet production is one of the methods of recycling polymer waste, which in the future can be used for the production of new parts, as well as added to the composition of composite materials based on organic or mineral fillers.

This article examines the problem of recycling polymer waste by improving their processing technologies. The analysis of existing methods of utilization and processing of polymeric waste generated in agriculture is carried out. Determination of physical and mechanical properties of polymer waste, in particular thermoplastics. Taking into account the received information, conclusions are made and the analysis of methods of utilization and processing of polymeric waste in secondary raw materials is carried out.

Key words: agricultural machines, polymer waste, ecology, utilization, granules.

F. 2. Fig. 9. Table. 1. Ref. 9.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Паладійчук Юрій Богданович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Агроінженерії та технічного сервісу» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: rewet@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4257-9383>).

Телятник Інна Анатоліївна – студентка магістр «208 Агроінженерії», Інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: inna201098@gmail.com).

Паладійчук Юрій Богданович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Агроинженерия и технического сервиса» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: rewet@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4257-9383>).

Телятник Инна Анатольевна – студентка магистр специальности «208 Агроинженерия», Инженерно-технологического факультета Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: inna201098@gmail.com).

Yuriy Paladiichuk – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Agroengineering and Technical Service of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, e-mail: rewet@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4257-9383>).

Inna Telyatnuk – Student Master 208 of Agroengineering, Faculty of Engineering and Technology of Vinnitsia National Agrarian University (3, Solnychna st., Vinnitsia, 21008, Ukraine, e-mail: inna201098@gmail.com).