

А.П. БЕСПАЛЬКО,
М.В. ЯКИМЧУК,
Г.Р. ВАЛІУЛІН,
М.І. ЮХНО

Національний університет харчових технологій, м. Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОДРІБНЕННЯ ПЕТ ПЛЯШОК МЕТОДОМ РІЗАННЯ З ОДНОЧАСНИМ ВІДОКРЕМЛЕННЯ ГОРЛОВИНИ ТА ДНИЩА

Аналіз етапів переробки ПЕТ показує, що її частини відрізняються не тільки геометрією поверхні, а й ступенем орієнтації. Цей фактор суттєво впливає на властивості вторинного ПЕТ, тому завданням фахівців є створення обладнання, яке б могло відділяти горловину та днища ПЕТ — пляшки від середини з подальшим їх сортуванням. Використання різноманітних сумішей та композицій, до складу яких входить вторинний ПЕТ з різним ступенем орієнтації, дозволить удосконалити технологію і обладнання для вторинної переробки, а також збільшити номенклатуру та якість виробів з цих композицій.

Ключові слова: вторинний ПЕТ, обладнання для переробки ПЕТ, аморфні складові, подрібнення ПЕТ.

Оптимальним вирішенням проблеми рециклізації відходів з поліетилентерефталату (ПЕТ, ПЕТФ) в Україні є їх вторинна переробка. Таке застосування використаного ПЕТ економічно вигідно, може здійснюватись на вже існуючому обладнанні, сприяє розв'язанню проблем утилізації відходів, захисту довкілля та забезпеченню якісною вторинною сировиною.

З точки зору переробки ПЕТ у вигляді об'ємних виробів, різні її частини відрізняються не тільки геометрією поверхні, а й ступенем орієнтації. Останній фактор впливає на реологічні, механічні і теплофізичні властивості вторинного ПЕТ. Знання цих властивостей для різноманітних сумішей та композицій, до складу яких входить вторинний ПЕТ з різним ступенем орієнтації, дозволить не тільки удосконалити технологію і обладнання для вторинної переробки, але і збільшити номенклатуру та якість виробів з цих композицій. ПЕТ-пляшка, в залежності від структури полімеру умовно ділиться на дві частини — аморфну складову й орієнтовану складову. Аморфні складові — це частини пляшки, котрі не піддавались орієнтації під час видування в процесі виготовлення. До них відносяться горловина і днище. Вони мають ступінь кристалічності в межах від 8 до 16 %, є прозорими та під час нагрівання вище за 80 °С здатні кристалізуватися, змінюючи при цьому свій колір на білий. Температура плавлення аморфних складових досягає 248 — 254 °С. Слід відмітити, що аморфна складова більш придатна для вторинної переробки. Після її подрібнення утворюється матеріал з низьким вмістом забруднень та відсутністю адгезивів.

Аморфна складова за своїми властивостями наближається до первинної сировини для виготовлення ПЕТ пляшок.

Орієнтованою складовою вважається центральна частина пляшки, бічні стінки якої утворились внаслідок видування в преформі. Матеріал стінок як правило є двовісно-орієнтованим і має ступінь кристалічності в межах 35 — 45 %. Такий полімер залишається прозорим за умови тривалої термообробки, має значну питому поверхню та містить велику кількість адгезивів.

Під час вирішення проблем подрібнення ПЕТ — відходів важливою є інформація про їх фізико-технічні показники [1, 2]. Тому авторами були проведені дослідження властивостей різних типів відходів ПЕТ пляшок. Результати наведено в таблиці 1.

На сьогоднішній день найбільш характерним є подрібнення змішаних відходів ПЕТ-пляшок, які містять від 40 до 70 % аморфної складової, що суттєво знижує якісні характеристики вторинної сировини [3]. Перероблення окремо аморфної та орієнтованої складової передбачає додаткову операцію на їх сортування.

В залежності від розмірів частинок вихідного матеріалу та готового продукту процеси подрібнення поділяються на п'ять класів: велике, середнє, дрібне, тонке та колоїдне.

Подрібнення ПЕТ як правило здійснюється на роторних подрібнювачах. Але будова ПЕТ-пляшки не дає змоги отримувати під час подрібнення матеріал однорідної структури.

Таблиця 1. Властивості різних типів відходів ПЕТ-пляшок

Відходи	Показник текучості розплаву, г/10хв	Розривне напруження, МПа	Подовження під час розриву, %
Подрібнені преформи	1,9 – 2,0	55 – 60	180 – 290
Аморфна складова	2,0 – 2,4	45 – 50	100 – 200
Орієнтована складова	2,8 – 6,0	34 – 45	5 – 23
Змішані	2,5 – 3,5	25 – 40	10 – 35
Змішані з пробками	2,5 – 4,0	23 – 37	35 – 45

Подрібнювачів які здатні ефективно сортувати та одночасно подрібнювати орієнтовані та аморфні частини ПЕТ-пляшки, наразі ще немає. Найкращий спосіб отримати на виході частинки однакового розміру та структури — це подати на подрібнення використану ПЕТ пляшку без горловини та днища [4].

В даній роботі пропонується варіант конструкції подрібнюючого пристрою з одночасним відокремленням та сортуванням горловини, середини та днища ПЕТ пляшки. Конструкція пристрою представлена на рис. 1

Пристрій працює таким чином. Використані пляшки 11 подаються через спеціальний канал 1 і упираються в барабан 3. Під час обертання барабана пляшки попадають між рядами контрножів 7 корпусу 1 і робочих ножів 5. Довжина барабана 3 менша за довжину корпусу 2. За допомогою ножів здійснюється різання пляшок. Виштовхувальні лопатки 6 допомагають спрямовувати подрібнені частинки до виходу, при цьому горловина попадає в отвір 8, днище — в отвір 9, а подрібнені частинки середини пляшки попадають в отвір 10.

Для якісного подрібнення пропонується оригінальні конструкції ножів та контрножів, які забезпечують надійну фіксацію пляшки в момент різання та частково компенсують дію осьових сил (рис. 2).

Процес різання ПЕТ пляшки проходить в декілька етапів. На першому етапі відбувається деформація пляшки під дією сил F_1 . Під час деформації пляшка приймає еліпсоподібну форму. Контакт ножа і поверхні пляшки відбувається по поверхні e (рис. 3).

Процес деформації пляшки відбувається до моменту, коли напруження в точці A не досягне свого критичного значення, що є умовою закінчення першого етапу.

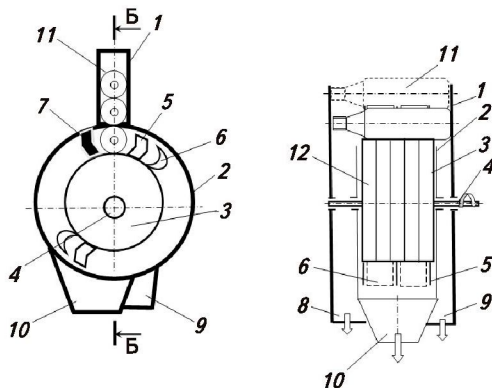


Рис. 1. Схема пристрою для подрібнення ПЕТ-пляшок з одночасним відокремленням та сортуванням днища, середини та горловини

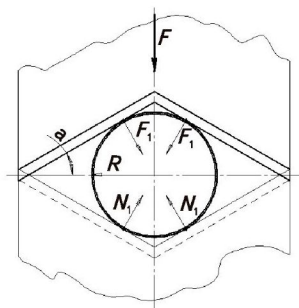


Рис. 2. Конструкція
ножа та контрножа
пристрою для подрібнення

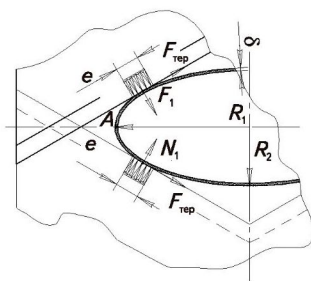


Рис.3. Схема сил,
що діють на пляшку
на першому етапі різання

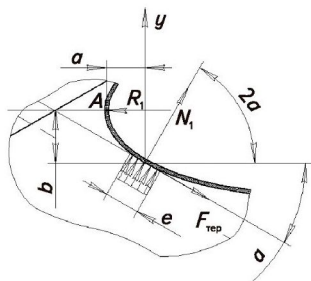


Рис. 4. Схема сил, що діють
на елементарну ділянку пляшки
в зоні контакту з лезом ножа

Для визначення величини даного напруження запишемо рівняння:

$$\tau_{зг}^A = \varepsilon \cdot E \leq [\sigma_{зг}], \quad (1)$$

де ε — видовження; E — модуль пружності матеріалу.

Видовження при цьому буде дорівнювати:

$$\varepsilon = \delta / R, \quad (2)$$

де δ — товщина стінки; R — радіус еліпса.

Розглянемо елементарну ділянку поверхні пляшки в зоні контакту леза ножа та визначимо всі сили, які діють на поверхню пляшки (рис. 4).

Запишемо рівняння моменту згинання поверхні пляшки відносно точки A:

$$M_{зг}^A = N \cdot b \cdot \cos 2\alpha + N \cdot a \cdot \sin 2\alpha + F_{тр} \cdot b \cdot \cos \alpha - F_{тр} \cdot a \cdot \sin \alpha. \quad (3)$$

Сила тертя між ножом та пляшкою буде дорівнювати:

$$F_{тр} = N \cdot f, \quad (4)$$

де f — коефіцієнт тертя ножа з матеріалом; N — нормальне зусилля.

Підставляючи вираз 4 в рівняння 3, отримаємо:

$$M_{зг}^A = N(b \cdot \cos \alpha (2 \cos \alpha + f) + a \cdot \sin \alpha (2 \cos \alpha - f) - b). \quad (5)$$

З умови міцності матеріалу на згинання

$$G_{зг} = M_{зг} / W_{зг}, \quad (6)$$

де $W_{зг}$ — опір поперечного перерізу в точці A. Умовно приймемо, що поперечний переріз в зоні згинання має форму прямокутника. Тоді

$$W_{зг} = \delta \cdot e / 6, \quad (7)$$

де δ — товщина стінки; e — довжина контакту матеріалу з лезом ножа.

Підставимо в рівняння (5) формули (6) і (7) та визначимо N .

$$N = (\tau_{зг} \cdot \delta \cdot e) / 6(b \cdot \cos \alpha (2 \cos \alpha + f) + a \cdot \sin \alpha (2 \cos \alpha - f) - b). \quad (8)$$

Другий етап характеризується різанням стінки ПЕТ — пляшки (рис. 5).

Так як леза ножів мають певний кут нахилу, то сили під час різання діють з урахуванням даного кута

$$(F_1 + G_1 + F_{i1})\sin\alpha = 0, \quad (9)$$

де F — сила різання; G — сила адгезії, визначається як $G_1 = C + k_1(dy/dt)$; F_i — зусилля інерції, в нашому випадку визначається за формулою

$$F_{i1} = m\ddot{y} = m(d^2y / dt^2),$$

де m — приведена маса ножа та всіх рухомих частин приводу.

Підставивши значення адгезії та інерції в рівняння (9), після відповідних перетворень отримаємо систему рівнянь для визначення зусилля різання:

$$\left. \begin{aligned} F1 + \left(C + k1 \left(\frac{dy}{dt} \right) \right) + m \left(\frac{d^2y}{dt^2} \right) &= 0 \\ m \left(\frac{d^2y}{dt^2} \right) + k1 \left(\frac{dy}{dt} \right) + C + F1 &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

де $dy/dt = V_0$ — швидкість руху леза в момент початку занурення в матеріал, враховуючи початкові умови $t = 0, y = 0$, (де t — час на початок занурення ножа в матеріал, y — глибина занурення леза ножа в матеріал).

Розв'язавши систему рівнянь (10), отримаємо остаточне рівняння для визначення зусилля різання:

$$F = \frac{k_1 \frac{dy(t)}{dt} - e^{-\frac{k_1}{m}} \cdot (C + V_0 k_1) + C}{e^{-\frac{k_1}{m_1}}} \quad (11)$$

де $\frac{dy(t)}{dt} = (V_{\text{вх}} + V_{\text{вих}}) / 2$ — швидкість руху леза; $V_{\text{вх}}$ — швидкість на початку занурення леза в матеріал; $V_{\text{вих}}$ — швидкість виходу леза ножа з матеріалу.

Для перевірки адекватності математичної моделі процесу різання була розроблена та виготовлена експериментальна установка (рис. 6).

Подачу стисненого повітря до робочих елементів експериментальної установки забезпечувалось за допомогою компресора з системою трубопроводів. Контроль тиску для рухомого ножа відбувалось за допомогою регулятора тиску 1. Система керування рухомого ножа (рис. 7) складалась із бістабільного розподільника 5/3, який забезпечує подачу повітря для відводу та підводу леза до ПЕТ-пляшки. Тиск вимірювався датчиком тиску з аналоговим сигналом 3 з передачею на АЦП. Переміщення штоку пневмоциліндра контролювалось датчиком переміщення з аналоговим сигналом 6 з передачею на АЦП. З АЦП сигнали в реальному часі вимірів перетворювались з аналогових в цифрові і надходили в ЕОМ, де були представлені у вигляді відповідних графіків (рис. 8).

Експерименти з визначення зусилля різання ПЕТ-пляшки проводились окремо для горловини, середини і днища пляшки.

За результатами аналітичних та експериментальних досліджень були отримані рівняння регресії:

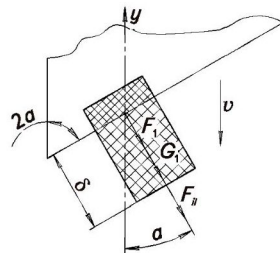


Рис. 5. Схема сил, які діють на лезо ножа на другому етапі різання

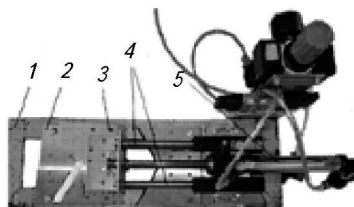


Рис. 6. Загальний вигляд експериментальної установки:

1 — рама; 2 — нерухомий ніж; 3 — рухомий ніж; 4 — напрямні; 5 — пневмоциліндр; 6 — датчик переміщення

для горловини ПЕТ-пляшки:

$$F = 168,4 + 8,8P - 102,6\delta - 1,6\alpha + 39,4P\delta + 0,08P\alpha - 8,3\delta\alpha + 0,6P\delta\alpha, \quad (12)$$

для середини ПЕТ-пляшки:

$$F = -391,9 + 103,7P + 1252,3\delta + 3,9\alpha - 187,5P\delta - 416P\alpha - 6,9\delta\alpha + 0,1P\delta\alpha, \quad (13)$$

для дна ПЕТ-пляшки:

$$F = 55,05 + 32,4P - 173,1\delta - 2\alpha + 35,2P\delta + 0,4P\alpha + 7,7\alpha - 1,4P\delta\alpha. \quad (14)$$

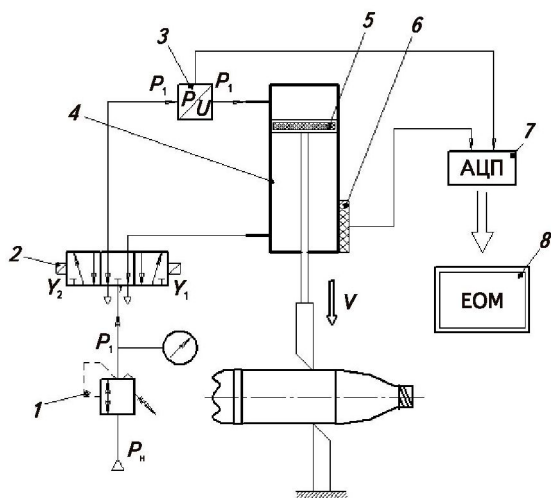


Рис. 7. Схема дослідної установки для визначення параметрів різання ПЕТ-пляшок:
1 — регулятор тиску; 2 — розподільник 5/3 бистабільний; 3 — датчик тиску аналоговий; 4 — пневмоциліндр двосторонньої дії з магнітним кільцем 5 на поршні; 6 — датчик переміщення аналоговий; 7 — перетворювач аналогових сигналів в цифрові; 8 — електронно-обчислювальна машина

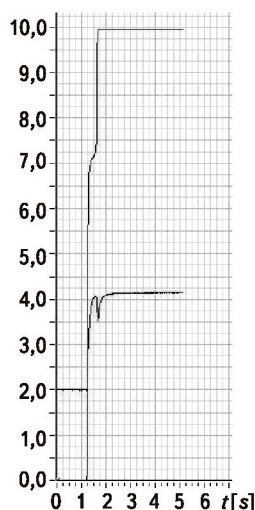


Рис. 8. Графік залежності зміни зусилля різання дна ПЕТ-пляшки та переміщення леза ножа від часу

Було встановлено, що серед факторів, які найбільш впливають на процес подрібнення, є товщина стінки ПЕТ-пляшки і кут заточки ножа. Різниця між коефіцієнтами в рівняннях регресії для різних частин пляшки пояснюється неоднорідністю структури матеріалу по довжині ПЕТ-пляшки. Експериментально доведено, що зусилля різання горловини та дна пляшки є суттєво більшим за зусилля різання середини.

Отримані результати досліджень можна використовувати під час розробки нових зразків обладнання для подрібнення ПЕТ пляшок шляхом різання з одночасним відокремленням горловини та дна.

Анализ этапов переработки ПЭТ показывает, что ее части отличаются не только геометрией поверхности, но и степенью ориентации. Этот фактор существенно влияет на свойства вторичного ПЭТ, поэтому на данном этапе задачей специалистов является создание оборудования, которое могло отделять горловину и днища ПЭТ-бутылки от середины с последующей их сортировкой. Использование различных смесей и композиций, в состав которых входит вторичный ПЭТ с разной степенью ориентации, позволит усовершенствовать технологию и оборудование для вторичной переработки, а также увеличить номенклатуру и качество изделий из этих композиций.

Ключевые слова: вторичный ПЭТ, оборудование для переработки ПЭТ, аморфные составляющие, измельчения ПЭТ.

A.P. Bepalko, M.V. Iakymchuk, G.R. Valiulin, M.I. Yukhno
Research of shredding pet bottles by cutting with simultaneous separation of the neck and bottom

Analysis of PET processing steps shows that its parts differ not only in the surface geometry, but also in the orientation degree. That last factor significantly affects the rheological, mechanical and thermophysical properties of recycled PET. In this paper a design option grinding device with simultaneous separation and sorting of the neck, middle and bottom of PET bottle.

That is why at this stage, the task is to create professional equipment, which could separate the neck and bottom of PET-bottles from the middle with further sorting. In this paper a design option grinding device with simultaneous separation and sorting of the neck, middle and bottom of PET bottle. For quality chopping knives offer a unique design that provide secure fit bottles at the time of cutting and partially offset the effect of axial forces.

The usage of various mixtures and compositions comprising recycled PET with different orientation degrees will improve not only the technology and equipment for recycling, but also will increase the range and quality of products made from these compositions. As practice shows, the first achievements in this direction appear at the point of transformation of quantity into quality.

Key words: recycled PET, equipment for PET processing, amorphous components, PET grinding.