

# Формоутворення пакувальних матеріалів та тари з термопластів

## (дослідження процесу розтягування розплаву)

Г.І. Ведь, к.т.н., І.О. Мікульонок, д.т.н., А.Д. Петухов, д.т.н., В.О. Сенатос, к.т.н., О.М. Шнирук, НТУУ «КПІ», м. Київ

Полімери широко використовуються для виготовлення пакувальних матеріалів (плівки, листи) та безпосередньо самої тари (пляшки, банки, лотки, інше). При цьому процеси переробки термопластичних полімерів і пластмас базуються у першу чергу на деформаціях зсуву та розтягування.

Перший вид деформації — деформація зсуву — характерний для таких технологічних процесів виготовлення матеріалів та тари, як екструзія, вальцювання, каландрування й термоформування. В основі їхнього якісного і кількісного опису лежить закон Ньютона:

$$\tau = \mu \dot{\gamma},$$

де  $\tau$  — напруження зсуву, Па;

$\mu$  — ефективна в'язкість для неньютонівських рідин, Па·с;

$\dot{\gamma}$  — швидкість зсуву, 1/с.

Закон Ньютона описує залежність напруження зсуву від швидкості зсуву через ефективну в'язкість. Переважна

більшість сучасних досліджень у цій галузі переробки полімерів стосуються з'ясування впливу різноманітних чинників (температура, тиск, швидкість, властивості вихідної сировини тощо) на в'язкість розплаву термопласту.

Другий вид деформації — деформація розтягування — не менш поширений і лежить в основі виготовлення пакувальних плівок [1], листів, волокон, а також термоформування тари, одержуваної роздуванням. Базовим уявленням про ці технологічні процеси є розтягування будь-якого елемента до потрібних розмірів і форми. При цьому може мати місце активне змінювання розмірів в одному або двох напрямках (одновісне та двовісне розтягування або одновісна та двовісна орієнтація відповідно).

Процес одновісного розтягування дослідники спочатку намагалися описувати рівнянням Трутона, яке, за аналогією із законом Ньютона, пов'язує

напруження розтягування із швидкістю деформації:

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon},$$

де  $\sigma$  — напруження під час розтягування високов'язкої неньютонівської рідини, Па;

$\eta$  — поздовжня в'язкість (міра опору полімеру зусиллю розтягу), Па;

$\dot{\epsilon}$  — границя швидкості деформації розтягування.

Було встановлено, що відношення зазначених в'язкостей дорівнює трьом, тобто  $\eta/\mu = 3$ . Але подальші, більш ґрунтовні дослідження показали, що це співвідношення має місце лише за дуже малих швидкостей деформації (біля  $7,8 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ ) [2]. За більш високих значень швидкості деформації, характерних для дійсних режимів переробки термопластів, це співвідношення істотно зростає (наприклад, для полістиролу до  $350 \text{ c}^{-1}$ ) [3]).

Така аномалія в'язкості свідчить, що рівняння Трутона і Ньютона можуть бути застосовані лише у певних діапазонах вищезазначених чинників, найбільш істотним з яких є швидкість деформації, котра характеризує інтенсивність процесів переробки термопластичних полімерів.

Розглянемо процес розтягування розплаву термопласту докладніше.

Багатофакторна залежність поздовжньої в'язкості не дає можливості розробити повноцінний математичний опис процесу розтягування розплаву термопласту, обмежує обґрунтування оптимальних параметрів технологій, а також розроблення ефективних конструкцій обладнання. Таким чином, було поставлене питання щодо можливості описання цього процесу за умови зменшення зазначених чинників.





Беручи до уваги, що під час переробки полімерів тандем «напруження — деформація» є основним, поставлене питання, вочевидь, має бути вирішене саме на рівні цих параметрів. Також цілком очевидним є те, що якщо напруження є параметром, який має наслідковий характер, то вся історія розвитку науки про поведінку матеріалів виділяє як один із факторів, що впливає на напруженість середовища, саме деформацію. Значимість цих двох параметрів полягає ще й у тому, що вони безпосередньо впливають на технологію та її апаратне оформлення.

Деформування розплаву здійснюється в різних режимах: за постійної швидкості розтягування ( $v = const$ ) і постійної швидкості зміни відносної деформації ( $\dot{\epsilon} = dv/dt = const$ ). Режим, коли забезпечується умова  $\sigma = const$ , є комбінацією обох зазначених режимів. Розглянемо режим, за якого  $v = const$ . Під час розтягування полімерів розвивається велика деформація, яка приводить до того, що виділений із зразка елемент, якщо розглядати його характеристики в часі, перебуватиме в різних умовах розтягування. Це видно із співвідношення:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{l},$$

де  $l$  — довжина елемента, м.

Величина цього співвідношення у процесі розтягування зменшується, і тому можливі такі режими:

- для  $\dot{\epsilon}_0 \leq \dot{\epsilon}_{np}$ , де  $\dot{\epsilon}_0 = v/l_0$  ( $l_0$  — початкова довжина зразку, м);  $\dot{\epsilon}_{np}$  — швидкість деформації, за якої поздовжня в'язкість ще не залежить від швидкості деформації розтягування  $\dot{\epsilon}$ , а залишається незмінною;
- для  $\dot{\epsilon}_0 > \dot{\epsilon}_{np}$  поздовжня в'язкість буде змінною до того моменту, поки значення швидкості деформації не зрівняється з  $\dot{\epsilon}_{np}$ .

Тобто режим  $v = const$  не відповідає вимогам однозначності щодо в'язкості і для використання отриманих результатів дослідження необхідно фіксувати як мінімум два чинники: швидкість деформації та її величину.

Дослідження одновісного розтягування в режимі  $v = const$  і  $\dot{\epsilon} = const$  показали дуже складну залежність

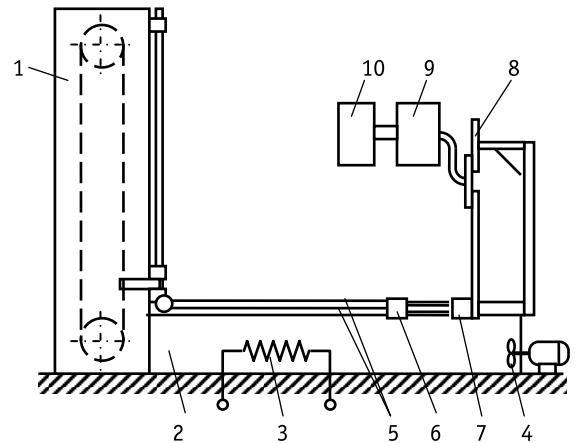


Рис. 1. Схема експериментальної установки [7]

коефіцієнта поздовжньої в'язкості від величини деформації та її швидкості. Під час переходу до режиму двовісного розтягування потрібні інші моделі, оскільки результати, отримані за одновісного розтягування, для нього неприйнятні.

Розглянемо одержану з розплаву полімеру плівку як тіло з розвинутою поверхнею. Макромолекули внутрішніх і зовнішніх шарів цього тіла перебувають у різних умовах, оскільки макромолекули внутрішніх шарів піддаються всебічній дії міжмолекулярних сил, рівнодійна яких спрямована всередину тіла. Це визначає відмінність властивостей матеріалу внутрішніх і зовнішніх шарів [4].

Під час розтягування зазначеного тіла прикладена до нього сила долає опір матеріалу, розміщеного на поверхні, а також опір внутрішніх шарів. Перша складова є поверхневою силою і обумовлює величину вільної енергії, тобто роботи, що витрачається на утворення одиниці поверхні розділу, а друга — залежить від в'язкопружних властивостей матеріалу. Відомо [5], що плівки з меншою товщиною (більшою питомою поверхнею) мають більше значення вільної енергії. Ураховуючи це, можна стверджувати, що залежно від величини питомої поверхні співвідношення цих складових змінюється.

Для плівок переважним буде опір поверхневих (зовнішніх) шарів, який є основною складовою формування

напруження, що виникає під час розтягування плівок з розплаву полімеру. Розраховуючи силу розтягування не на довжину периметру поперечного перерізу зразка (як у разі визначення поверхневого натягу), а до площі поперечного перерізу, отримуємо напруження, яке з урахуванням вищезазначеного має залежати від утвореної вільної поверхні.

Подальші міркування й дослідження базуються на припущенні Г.І. Веда [6], що напруження, яке виникає під час розтягування розплаву полімеру, прямо пропорційне швидкості утворення відносної вільної поверхні:

$$\sigma = K \dot{\xi}, \quad (1)$$

де  $K$  — коефіцієнт пропорційності;  $\dot{\xi} = \xi/t$  — швидкість утворення відносної вільної поверхні;

$t$  — час розтягування;

$\xi$  — відносна вільна поверхня, яка визначається як:

$$\xi = \frac{S - S_0}{S_0}, \quad (2)$$

де  $S$  — поточне значення вільної поверхні, м<sup>2</sup>;

$S_0$  — початкова вільна поверхня зразка, м<sup>2</sup>.

Експериментальну перевірку припущення (1) проводили під час деформування зразків у режимі  $v = const$  на установці (рис. 1) [7], яка складається з механічного приводу 1, ванни-термостата 2, наповненої гліцерином, нагрівника 3, мішалки 4, розміщених

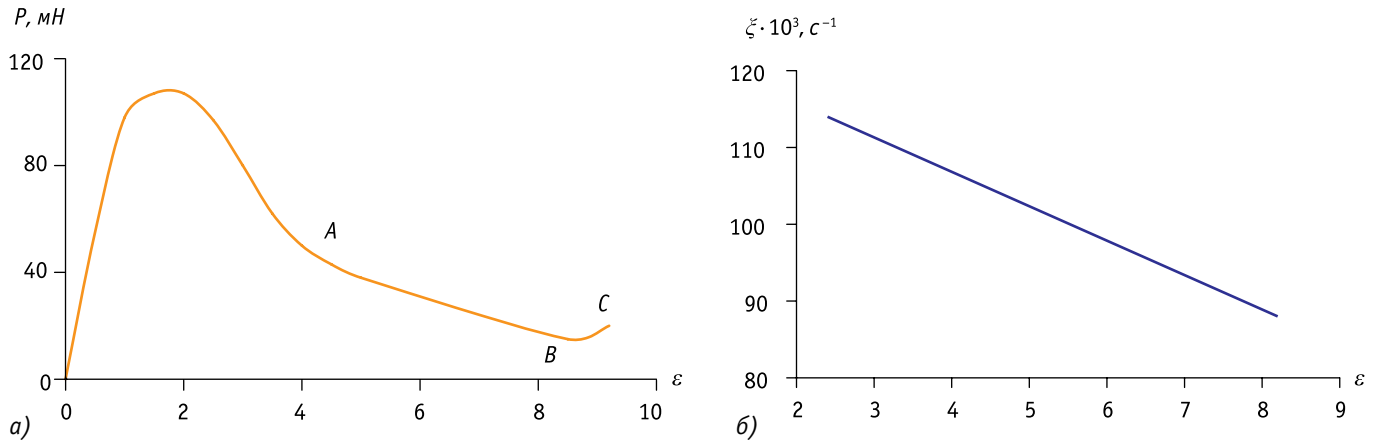


Рис. 2. Залежність сили розтягування  $P$  (а) і швидкості утворення відносної вільної поверхні  $\xi$  (б) від параметра  $\varepsilon$  за температури  $166^\circ\text{C}$  і швидкості руху затискача  $0,025\text{ м/с}$

у ванні на двох струнах-напрямних 5 пересувного затискача 6 і нерухомого затискача 7. Нерухомий затискач через жорстку вимірювальну пластину прикріплено до стояка. На вимірювальну пластину наклеєні тензометричні датчики 8, що входять до складу вимірювального містка, до якого підведений постійний струм напругою 5 В (від джерела стабілізованого живлення). Місток підключено до підсилювача постійного струму 9 типу ИЗ7 (клас точності 0,5) і далі до швидкодіючого самописця 10 типу Н-230-3 (клас точності 2,5).

Установка працює в такий спосіб. Після досягнення у ванні заданої температури і установлення заданої швидкості руху затискача (за допомогою електродвигуна постійного струму з тахогенератором і вузлом регулювання та стабілізації швидкості обертання) у ванну на затискачеві розміщали зразок, прогрівали його до температури гліцерину у ванні, а потім піддавали розтягуванню.

Під впливом сили розтягування  $P$  вимірювальна тарована пластина, яка є частиною містка, вигиналася, а разом з нею деформувався й один із двох датчиків, приклеєних до пластини. Сигнал розбалансу, який відповідає даній силі, з містка надходив до підсилювача і записувався самописцем. Одночасно записували швидкість руху затискача, яка змінювалась в межах  $(8...480) \cdot 10^{-3}\text{ м/с}$ . При цьому температура по об'єму ванни вирівнювалась за допомогою мішалки.

Як дослідні зразки використовували виготовлену методом екструзії плівку (матеріал плівки — поліетилен високого тиску марки 15803-020), термостабілізовану за температури  $150^\circ\text{C}$ . Плівку вважали термостабілізованою, якщо за подальшого нагрівання її розміри не змінювалися. Час стабілізації залежав від товщини плівки і становив 5–10 хв. Із плівки вирізали зразки у вигляді стрічок завширшки 30, 20 і 10 мм з довжиною їхньої робочої частини 60 мм. Товщину зразків контролювали мікрометром у п'яти точках, після чого визначали середнє арифметичне цих замірів. Точність визначення товщини зразків становила 5–10 мкм, а їхні ширини і довжини — 0,5 мм.

Час нагрівання зразків перед розтягуванням залежав від їхньої товщини і визначався у такий спосіб: підбирали зразки однакової товщини, витримували їх у ванні за однакової температури, але протягом різного часу. Зразок піддавали розтягуванню за однакової швидкості руху затискача із записом зусилля. Час нагрівання вважали достатнім, якщо сила розтягування зразків з більшим часом витримки за певної температури дорівнювала силі розтягування з вибраним часом.

Температура у ванні регулювалася автоматично і контролювалася ртутним термометром. Коливання температури по довжині ванни під час експерименту становило  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Швидкість руху пересувного затискача, крім запису самописцем, також контролювали за допомогою секундоміра за

часом проходження затискачем контрольного відрізка шляху.

Основним об'єктом під час оброблення результатів експериментів були діаграми розтягування, на яких зображено залежність сили від подовження зразка. Типова діаграма результатів експериментів наведена на рис. 2а. На ній виділяються три ділянки:  $OA$  — сплеск сили;  $AB$  — плато з незначним зменшенням сили, яке умовно названо ділянкою стабілізації сили розтягування;  $BC$  — певне підвищення сили з наступним розривом зразка.

Визначимо швидкість утворення відносної вільної поверхні, виражаючи складові рівняння (2) через кратність витягування зразка  $k$ :

$$k = 1 + \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l}{l_0}, \quad (3)$$

де  $\Delta l$  — приріст довжини зразка, м;

$l_0$  — початкова довжина зразка, м.

Кратність витягування зразка, яка відповідає точці  $A$ , становить:

$$k_n = 1 + \frac{\Delta l_n}{l_0} = \frac{l_n}{l_0}. \quad (4)$$

Для визначення величини утвореної поверхні зразка потрібно з'ясувати зовнішню картину розтягування зразка, зокрема — зміну його ширини (відомо [8], що розтягування полімерів у твердому стані супроводжується створенням шийки, яка розвивається на ділянці  $AB$ ). Зразки розтягували за різної температури. Після досягнення заданої кратності витягування зразки

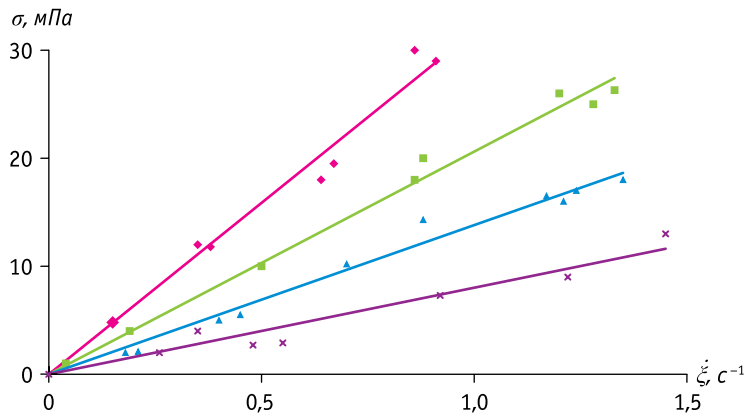


Рис. 3. Залежність  $\sigma_0 = f(\dot{\xi})$  за температури, °C: 120 (—), 141 (—), 166 (—) і 185 (—)

заморожували, а потім вимірювали їхню ширину по всій довжині робочої частини. При цьому було з'ясовано, що під час розтягування розплаву шийка не утворюється, а змінна в часі ширина зразка залишається постійною по його довжині. Цей факт дає можливість зробити висновок, що швидкість руху точки зразка при переході від нерухомого затискача до пересувного змінюється за лінійною залежністю і для будь-якої точки дорівнює  $v x / l$ .

Використовуючи експериментально виявлену рівномірність ширини зразка по його довжині, визначимо швидкість через міру витягування.

Початкова поверхня зразка:

$$S_0 = 2(l_0 b_0 - l_0 \delta_0), \quad (5)$$

де  $l_0$ ,  $b_0$ ,  $\delta_0$  — початкові довжина, ширина і товщина зразка відповідно, м. Поверхня зразка в точці А:

$$S_n = 2(l_n b_n - l_n \delta_n), \quad (6)$$

де  $S_n$  — поверхня зразка перед початком зони стабілізації сили розтягування (ділянка АВ на рис. 2а), м<sup>2</sup>.

Відомо [9, 10], що за одновісного розтягування в'язкопружних рідин (по довжині зразка або одержуваного виробу) відносна деформація по ширині зразка дорівнює відносній деформації по товщині і становить  $\frac{1}{\sqrt{k}}$  (де  $k$  — міра витягування), тобто для точки А:

$$b_n = \frac{b_0}{\sqrt{k}}; \quad \delta_n = \frac{\delta_0}{\sqrt{k_n}}. \quad (7)$$

Підставляючи вирази (4) і (7) у формулу (6), отримаємо:

$$S_n = 2l_0 b_0 \sqrt{k_n} \left(1 + \frac{\delta_0}{b_0}\right). \quad (8)$$

Зміна поверхні зразка в будь-який момент часу описується залежністю:

$$S - S_n = 2l_0 b_0 (\sqrt{k} - \sqrt{k_n}) \left(1 + \frac{\delta_0}{b_0}\right). \quad (9)$$

Залежність (9) отримано за припущення, що питома маса зразка під час розтягування залишалася сталою.

Оскільки  $\delta_0 \ll b_0$ , то  $1 + \delta_0 / b_0 \approx 1$ . Тоді:

$$S - S_n = 2l_0 b_0 (\sqrt{k} - \sqrt{k_n}). \quad (10)$$

Час розтягування зразка на ділянці стабілізації АВ становить:

$$t = \frac{l - l_0}{v}, \quad (11)$$

або через міру витягання (розділимо і помножимо вираз (11) на  $l_0$ ):

$$t = \frac{l}{v} (k - k_n). \quad (12)$$

Швидкість утворення відносної вільної поверхні (рис. 2б) з урахуванням залежностей (3–12) дорівнюватиме:

$$\dot{\xi} = \frac{v}{l_0 (\sqrt{k} - \sqrt{k_n})}. \quad (13)$$

Для визначення напруження силу  $P$  віднесено до початкового перерізу зразка  $F_0$ :

$$\sigma_0 = \frac{P}{F_0}. \quad (14)$$

Дійсні напруження при цьому дорівнюють:

$$\sigma = k \sigma_0. \quad (15)$$

Результати експериментів, оброблені відповідно до рівнянь (13) та (14) і зображені в координатах  $\delta_0 - \dot{\xi}$ , дали пряму лінійну залежність параметрів (рис. 3). З підвищенням температури зразка кут нахилу прямих змінюється, тобто коефіцієнт пропорційності  $K$  припущення (1) не залежить від швидкості деформації  $\dot{\xi}$  і з підвищенням температури зменшується.

Порівнюючи пряму лінійну ділянку АВ (область стабілізації) на рис. 2а і пряму лінійну залежність для тієї ж температури (166 °C) — на рис. 3, побачимо, що кути їхнього нахилу однакові, а отже, справедливе

співвідношення  $\frac{P(\sigma_0)}{k} = \frac{\dot{\xi}}{k}$ , тобто відношення  $\frac{\sigma_0}{\dot{\xi}} = 1$  не залежить від величини деформації.

Таким чином, експериментально підтверджено, що припущення (1) справедливе для поліетилену високого тиску. Розмірність коефіцієнта пропорційності — [Па·с]. Якщо зазначену розмірність записати у вигляді [Н/(м<sup>2</sup>/с)], тоді коефіцієнт пропорційності являтиме собою силу, яка припадає на одиницю швидкості утвореної поверхні і може визначатися як величина, що характеризує здатність розплавів в'язкопружних полімерів утворювати вільну поверхню під час розтягування.

Обробка даних, поданих у вигляді залежностей на рис. 3, дала змогу отримати емпіричну формулу для визначення коефіцієнта  $K$  (Па·с) для поліетилену досліджуваної марки:

$$K = 75 \cdot 10^5 \left( \frac{1}{T} - 4,15 \cdot 10^{-3} \right),$$

де  $T$  — температура, °C.

Таким чином, прийняте припущення про пряму лінійну залежність напруження від швидкості утворення відносної вільної поверхні підтверджено експериментально для поліетилену високого тиску (низької густини) ГОСТ 16337–77 марки 15803-020. Також отримано емпіричну залежність для визначення коефіцієнта пропорційності  $K$  між напруженнями під час розтягування і швидкістю утворення відносної вільної поверхні

для полиэтилену зазначеної марки, яка може бути використана під час аналізу формоутворення виробів з термопластів.

### Література

1. Ведь Г.И., Микulyонок І.О., Петухов А.Д., Сенатос В.О. Формоутворення рукава полімерної плівки (критичні параметри процесу) // Упаковка. — 2013. — № 2. — С. 50–53.
2. Ballman R.L. // Rheol. Acta. — 1965. — № 4. — Р. 137.
3. Karam H.J., Bellinger J.C. // Trans. Soc. Rheol. — 1962. — № 8. — Р. 61.
4. Хоодаков Г.С. Физика измельчения, — М.: Наука, 1972. — 307 с.
5. Дерягин Б.В., Обухов У.В. // Коллоидный журнал. — 1935. — № 1. — С. 398.
6. Ведь Г.И., Сенатос В.А., Петухов А.Д. Некоторые особенности

растяжения расплавов полимеров // Химическая технология. — К.: Наук. думка, 1976. — № 3. — С. 42–44.

7. Ведь Г.И., Сенатос В.А., Петухов А.Д. Исследование процесса растяжения расплавов полимеров при повышенных скоростях // Химическое машиностроение: респ. межвед. научно-технический сборник. — К.: Техніка, 1979. — Вып. 29. — С. 19–23.

8. Малкин А.Я., Вольфсон С.А., Кулезнев В.Н., Файдель Г.И. Полистирол. Физико-химические основы получения и переработки. — М.: Химия, 1975. — 288 с.

9. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. — М.: Химия, 1976. — 438 с.

10. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. — СПб.: Профессия, 2010. — 560 с. *Ж*

### Формообразование упаковочных материалов и тары из термопластов

(исследование процесса растяжения расплава)

Г.И. Ведь, к.т.н., И.О. Микulyонок, д.т.н., А.Д. Петухов, д.т.н., В.А. Сенатос, к.т.н., О.Н. Шнырук  
Приведенные в статье исследования базируются на предположении, что при растяжении расплава полимера напряжение пропорционально скорости образования относительной свободной поверхности. Это предположение экспериментально подтверждено при формообразовании пленок из термопластов.

Ключевые слова: полимер; рукавная пленка; вытяжка; скорость; сила.

### Moulding of packaging materials and containers of thermoplastic (research of the process of stretching the melt)

G.I. Ved, Ph.D., I.O. Mikulenok, Dr., A.D. Petukhov, Dr., V.A. Senatos, Ph.D., O.N. Shnyruk  
Researches are based on the assumption that at a stretching of a polymer melt pressure is proportional to speed of generation of a relative free surface. This assumption is experimentally confirmed at forming films from thermoplastics.

Key words: polymer; tubular film; stretching; speed, force.

# Техимпорт

ВСЕГДА В НАЛИЧИИ  
НА СКЛАДЕ

## Оборудование для производства полимерных изделий



Чиллеры  
наружные



Чиллеры  
внутренние



Бункер сушилки  
PET, PC, PA



Миксеры



Автозагрузчики

ТПА Борче серво серии



Украина, Одесса,  
Тел.: (067) 483 35 76  
Факс: (048) 738 68 97  
[www.borche.com.ua](http://www.borche.com.ua)

Техимпорт