

УДК 621.798: 621.79.03

Б.П.Валецький

Луцький національний технічний університет

### ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТЯГУВАННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНОГО ПАКУВАННЯ

*В роботі проведено обґрунтування параметрів стягування великогабаритних пакетів, що дає можливість розрахунку основних параметрів механізму стягування, оптимального вибору плівкового обгорткового матеріалу та надійного формоутворення самого пакету.*

Сучасна індустрія пакування є однією з тих, що найбільш динамічно розвивається у всіх галузях промисловості. Особливо інтенсивним є розвиток пакування у будівельному виробництві через значну долю великогабаритних вантажів (плити пінополістиролу, рулони мінеральної вати, плити ламінату тощо). Тому виникла проблема створення обладнання для якісного пакування великогабаритних вантажів, особливо плит пінополістиролу, при мінімумі затрат коштів та енергії.

Існують особливості пакування великогабаритних вантажів спільні для всіх машин з плівкозварювальними механізмами, які полягають у забезпеченні щільного стягування пакування та утворенні якісних зварних швів на всій довжині. Конструкція таких машин є специфічною, бо включає як механізми формування пакету, так і механізми обгортання його плівкою з наступним зварюванням. Необхідність стягування великогабаритних пакетів при їх зварюванні, використання нових, у тому числі і багатошарових полімерних комбінованих матеріалів, вимагають зниження енерговитрат, удосконалення існуючих методів пакування та машин, що їх реалізують, заміну термоусадкового стягування на механічне.

Процес ущільнення виробів (особливо м'яких та напівжорстких) є невід'ємною частиною їх якісного групового пакування (рис. 1.).

Процес ущільнення проводиться або до операції групового пакування, або ж безпосередньо при самому пакуванні (обандеролюванні). У першому випадку використовуються окремі механізми стягування та фіксації перед пакуванням, в другому випадку ці механізми можуть бути суміщені з пакувальними.

Як правило, для сучасного групового пакування використовують полімерні чи комбіновані плівкові матеріали, які є досить еластичними.

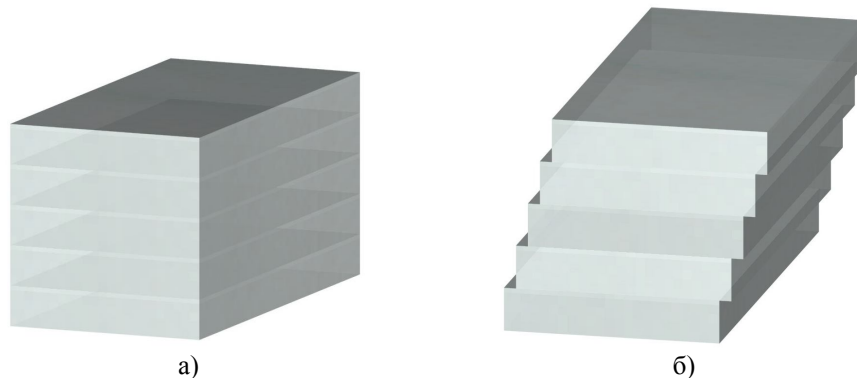


Рис. 1. Групова упаковка плит пінополістиролу:  
а) нормальна, б) деформована.

Основною проблемою при великогабаритному пакуванні є необхідність стягування пакету, що пакується, плівкою для забезпечення його щільності та забезпечення міцності швів, які витримують розтяг плівки після ущільнення утвореного пакету, причому для підвищення надійності пристрою необхідно використовувати мінімальну кількість рухомих вузлів та деталей.

Саме механізм стягування (рис. 2) був оснащений притискним пристроєм, який розміщений на одному коромислі з губкою, а вісь коливання коромисла перебуває у площині переміщення цього механізму, причому інша губка розміщена нерухомо на столі обтягування.

Для проектування даного механізму за заданими властивостями, а отже для його графоаналітичного синтезу [1], була створена математична модель процесу стягування великогабаритного пакета та визначені оптимальні параметри даного механізму.

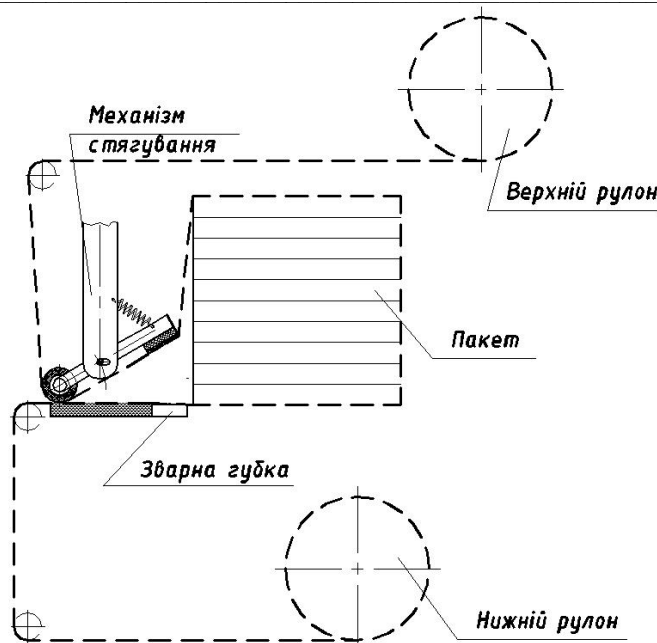


Рис. 2. Схема щільного стягування пакета плит зі зварюванням

Відповідно до закону Гука визначено зусилля  $F_{ВИТ}$ , яке виникає при розтягуванні плівкового матеріалу коромислом з притисною губкою та призводить до розтягу  $\Delta l$ :

$$F_{ВИТ} = \frac{\Delta l \cdot E \cdot A}{l_{ПОЧ}}, \quad (1)$$

де  $\Delta l$  – видовження плівкового матеріалу, м;

$l_{ПОЧ}$  – початкова довжина плівкового матеріалу, м;

$E$  – модуль пружності плівкового матеріалу, МПа;

$A$  – площа початкового перерізу матеріалу, що розтягується,  $m^2$ .  $A = h_{ПЛ} \cdot b_{ПЛ}$ ,

$h_{ПЛ}$  – товщина плівкового матеріалу, м;

$b_{ПЛ}$  – ширина плівкового матеріалу, м.

Або

$$F_{ВИТ} = \frac{(H - \sqrt{(l \cdot (1 - \cos \alpha))^2 + (H - l \cdot \sin \alpha)^2}) \cdot E \cdot h_{ПЛ} \cdot b_{ПЛ}}{l + \sqrt{(l \cdot (1 - \cos \alpha))^2 + (H - l \cdot \sin \alpha)^2}} \quad (2)$$

Очевидно, що

$$F_{ВИТ} \leq [F], \quad (3)$$

де  $[F]$  – допустиме зусилля розтягу полімерного матеріалу.

Граничним напруженням розтягу при статичному навантаженні для пластичних матеріалів є границя текучості, тому:

$$[F] = A \cdot [\sigma] / k = h_{ПЛ} \cdot b_{ПЛ} \cdot [\sigma] / k, \quad (3)$$

де  $h_{ПЛ}$  – товщина плівкового матеріалу, м;

$b_{ПЛ}$  – ширина плівкового матеріалу, м.

$k$  – коефіцієнт запасу міцності для пластичних матеріалів ( $k=1.2 \div 2.0$ )

Загальне зусилля приводу механізму стягування [1] машини для великогабаритного пакування визначається за формулою:

$$F_{ЗАГ} = \frac{F_{ПР} \cdot (l_{П.ПР} - l_1) \cdot \sin \beta_{\min} + P_{ЗВАР} \cdot l_{Г} \cdot b_{Г} \cdot l_2 + F_{ВИТ} \cdot \left( l_2 - \frac{b}{2} \right)}{l_1} + \quad (4)$$

$$+ P_{ЗВАР} \cdot l_{Г} \cdot b_{Г} + F_{ПР} \cdot \sin \beta_{\min} + F_{ВИТ},$$

Аналітична модель, що описана рівнянням 4, визначає необхідні параметри механізму стягування великогабаритних пакетів при їх пакуванні. У її є складова  $F_{ВИТ}$  яка визначає силу

розтягування плівки до того моменту, доки плівка не втрачає свої пружні властивості. Саме вона і буде становити зусилля стягування вже сформованої пачки плит:

$$F_{ВИТ} = F_{ОБТ} \cdot \quad (5)$$

Для визначення загального зусилля обтягування механізму обгортання складено рівняння рівноваги даної системи для умови, коли пакет з комплекту плит пінополістиролу рівномірно обтягнутий плівковим матеріалом, та спирається на одне ребро під кутом  $\alpha$

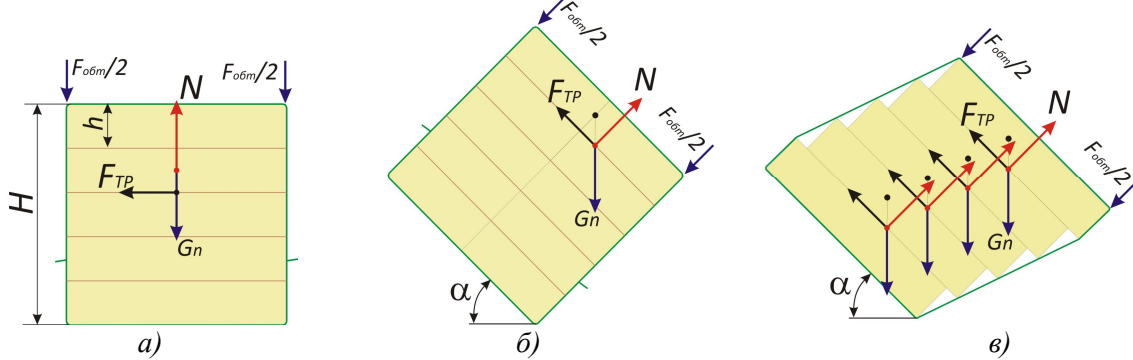


Рис. 3. Схема для визначення загального зусилля обтягування комплекту плит пінополістиролу: а) паралельне розміщення; б) нахилене під кутом без зміщення; в) нахилене під кутом зі зміщенням.

$$\left. \begin{aligned} \sum X = 0, \quad N \cdot \sin \alpha - F_{TP} &= 0 \\ \sum Y = 0, \quad N - G \cdot \cos \alpha - F_{ОБТ} &= 0 \\ \sum M_A = 0, \quad -\frac{F_{ОБТ}}{2} \cdot H - \sum_{i=1}^{n-1} F_{TP} \cdot i \cdot h + \sum_{j=1}^{n-1} N_j \left( \frac{H}{2} - \frac{h}{2} \cdot \sin \alpha \right) + G \cdot \frac{H}{2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де  $N$  – нормальна реакція, Н;

$G$  – вага пачки плит, Н;

$F_{TP}$  – сила тертя між плитами пачки, Н;

$F_{ОБТ}$  – сила натягу обгорткового плівкового матеріалу, що обтягує пачку плит, Н;

$\alpha$  – кут нахилу пачки, град.

$n$  – кількість плит комплекту пачки, шт.;

$h$  – висота однієї плити, м;

$H$  – висота пачки, м.

Звідки:  $N = F_{TP} / \sin \alpha$ ,  $F_{TP} = mg \cdot f$ ,  $G = mg$

Враховавши конструктивні особливості пачки плит у формі прямокутного паралелепіпеда систему рівнянь (6) можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} -\frac{F_{ОБТ}}{2} H - F_{TP} \cdot h \cdot \frac{n}{2}(n+1) + N(n-1) \left( \frac{H}{2} - \frac{h}{2} \sin \alpha \right) + G \cdot \frac{H}{2} &= 0, \\ -F_{ОБТ} - F_{TP} \cdot h \cdot \frac{n}{H}(n+1) + N(n-1) \left( 1 - \frac{h}{H} \sin \alpha \right) + mg &= 0, \end{aligned}$$

де сума ряду натуральних чисел, які використовуються для визначення відстаней плечей нормальної сили становить:  $0.5 \cdot n(n+1)$ .

Отже,  $F_{ОБТ} = F_{TP} \cdot h \cdot \frac{n}{H}(n+1) + \frac{F_{TP}}{\sin \alpha}(n-1) \left( 1 - \frac{h}{H} \sin \alpha \right) + mg$ ,

а, з врахуванням що  $n = H / h$ ,  $F_{TP} = mg \cdot f_{TP}$ , та  $m = V \cdot \rho = H^2 \cdot b \cdot \rho$  отримаємо:

$$F_{обт} = H^2 \cdot b \cdot \rho \cdot g \cdot f_{TP} \cdot \left( (n+1) + \frac{(n-1)}{\sin \alpha} \left( 1 - \frac{1}{n} \sin \alpha \right) + 1 \right). \quad (7)$$

де  $b$  – ширина пакета, зазвичай  $b = 1м$ , а  $V = 0.5 \times 0.5 \times 1 = 0.25м^3$ ;  
 $\rho$  – щільність матеріалу пачки плит ( $\rho = 10 - 220 кг/м^3$ )  
 $f_{TP}$  – коефіцієнт тертя між плитами пачки, ( $f_{TP} = 0,5 \dots 0,8$ ).

Таблиця 1.  
 Основні фізико-механічні характеристики полімерних спінених матеріалів

| Показники   | Пінополівінілхлорид |        |        | Пінополістирол (ППС) |        |               | ППС<br>беспресовий | Пінополіуретан жорсткий |             |             |
|---|---------------------|--------|--------|----------------------|--------|---------------|--------------------|-------------------------|-------------|-------------|
|   | 0, 06               | 0, 1   | 0, 2   | 0, 06                | 0, 1   | 0, 2          |                    | 0, 02 - 0, 04           | 0, 05       | 0, 1        |
| Об'ємна вага, г/см <sup>3</sup>   | 0, 06               | 0, 1   | 0, 2   | 0, 06                | 0, 1   | 0, 2          | 0, 02 - 0, 04      | 0, 05                   | 0, 1        | 0, 2        |
| Границя міцності, кг/см <sup>2</sup>  |                     |        |        |                      |        |               |                    |                         |             |             |
| - при стиску  | 2, 3                | 9      | 26     | 3, 0 - 4, 3          | 10     | 30            | 1, 1 - 3, 0        | 1, 7 - 4, 0             | 5, 5 - 13   | 29 - 39     |
| - при розтягу   | -                   | 20     | 45     | -                    | -      | 30            | 1, 8 - 2, 0        | 2, 5 - 3, 5             | 4, 5 - 12   | 15 - 22     |
| - при статичному згині  | -                   | 20     | 40     | -                    | -      | 65            | 1, 3 - 4, 0        | 4, 5 - 12               | 11 - 24     | 42 - 60     |
| Модуль пружності при стиску, кг/см <sup>2</sup>   | -                   | 900    | 1800   | 400                  | 550    | 1000          | 40 - 100           | 100                     | 300         | 1300        |
| Питома ударна в'язкість кг · см/см <sup>2</sup>   | 0, 7                | 1, 0   | 1, 5   | 0, 94                | 1, 1   | 1, 9          | 0, 1 - 0, 4        | 0, 5 - 0, 6             | 0, 8 - 0, 9 | 1, 3 - 1, 6 |
| Коеф. теплопровідності, ккал/м · година · град  | 0, 022              | 0, 037 | 0, 045 | 0, 22                | 0, 033 | 0, 044        | 0, 027 - 0, 031    | 0, 029                  | 0, 032      | 0, 04       |
| Теплостійкість °С   | 60                  | 60     | 60     | 60                   | 60     | 70            | 60                 | 120                     | -           | 145         |
| Діелектрична проникність при 10 <sup>10</sup> Гц  | -                   | 1, 6   | 2, 4   | -                    | 1, 1   | 1, 28 - 1, 36 | -                  | 1, 1                    | 1, 1        | 1, 25       |
| Тангенс кута діелектричних втрат при 10 <sup>10</sup> Гц ( $\text{tg} \delta \cdot 10^{-3}$ ) | -                   | 3, 6*  | 16, 6* | -                    | 1, 2   | 2, 4          | -                  | 1, 2                    | 1, 5 3, 7   | 4 8         |

\* при 10<sup>6</sup>Гц

Таблиця 2.  
 Основні фізико-механічні характеристики пінопласту ПСБ

| показники   | ПСБ-с-15У | ПСБ-с-15 | ПСБ-с-20 | ПСБ-с-25 | ПСБ-с-35  | ПСБ-с-50  |
|---|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Щільність (кг/м <sup>3</sup> )                              | 18-23     | 10-12    | 13-14    | 15,5-17  | 25,5-26,5 | 35,5-36,5 |
| Міцність на стиск при 10% лінійної деформації не менш (МПа) | 0,04-0,10 | 0,04     | 0,06     | 0,08     | 0,14      | 0,16      |
| Межа міцності при згині, не менш (МПа)                      | 0,08-0,20 | 0,06     | 0,12     | 0,16     | 0,20      | 0,30      |
| Теплопровідність в сухому стані при 25° (Вт/м.К.)           | 0,043     | 0,043    | 0,043    | 0,041    | 0,038     | 0,041     |
| Час горіння, не більш (сек.)                                | 4         | 4        | 6        | 4        | 4         | 4         |
| Вологість, не більш (%)                                     | 12%       | 12%      | 12%      | 12%      | 12%       | 12%       |
| Водопоглинання за 24 години не більш (% за об'ємом)         | 2,5%      | 4%       | 4%       | 3%       | 2%        | 2%        |

З проведеного аналізу рівняння (7) видно, прямо пропорційну залежність зусилля обтягування  $F_{обт}$  від кількості плит пачки, їх фізико-механічних властивостей (табл.1 та табл.2) та кута нахилу.

Часткова графічна інтерпретація рівняння (7) представлена на рис.4 та рис.5, з яких видно, що зі збільшенням кількості плит пачки зростає і сила їх стягування, при чому спостерігається різке її збільшення при куті падіння чи нахилу більше  $75^\circ$ .

Встановлено лінійно зростаючу залежність зусилля обтягування від щільності матеріалу та кількості плит пакету.

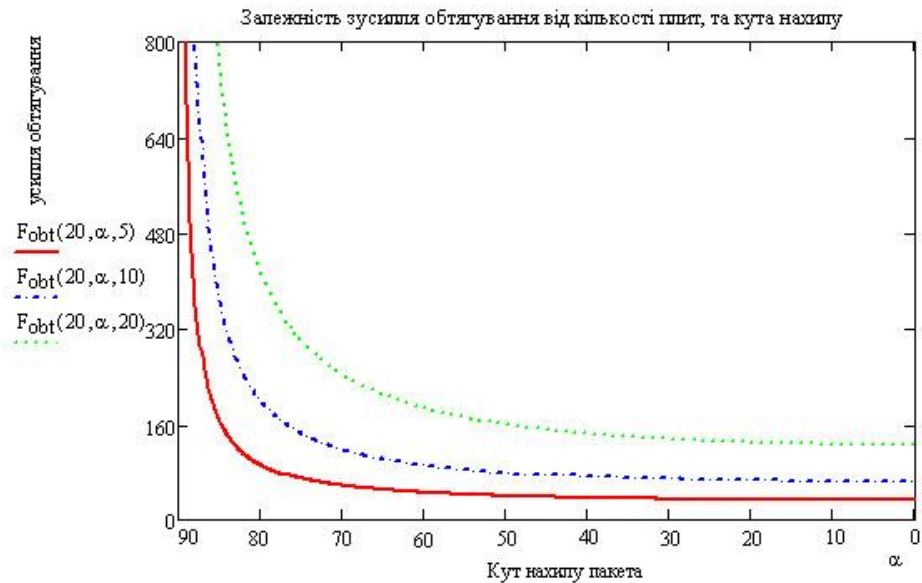


Рис.4. Залежність зусилля обтягування від кількості плит пакету, кута нахилу.

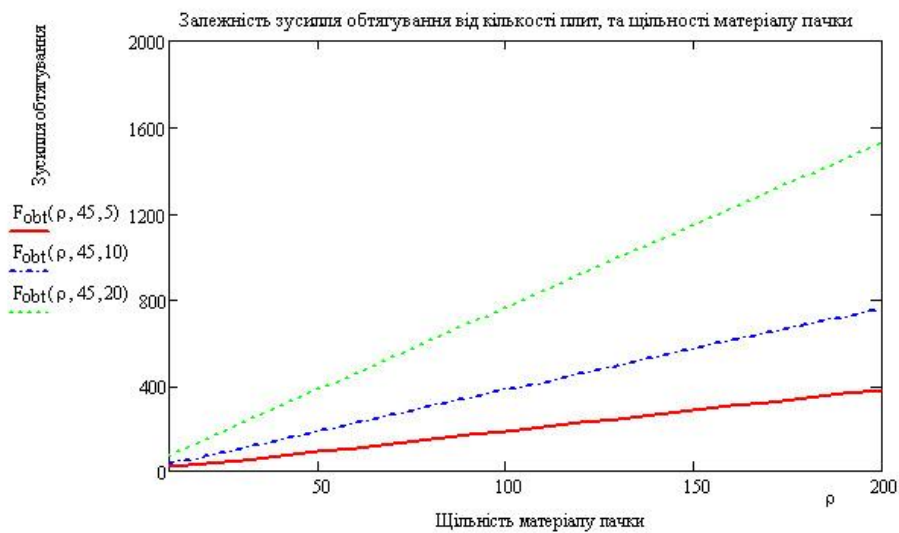


Рис.5. Залежність зусилля обтягування від щільності матеріалу та кількості плит пакету, при куті нахилу в  $45^\circ$ .

Дані теоретичні дослідження проводились для статичних умов. Однак на практиці завжди виникають динамічні навантаження, особливо при транспортуванні та перевантаженні (падінні пакетів плит). Тому необхідно  $K_D$  динамічний коефіцієнт запасу міцності:

$$F_{обт}^D = F_{обт} \cdot K_D, \quad (8)$$

де  $K_D = 2 \dots 10$ .

1. Валецький Б.П. Розрахунок параметрів механізмів стягування пакетів / Б.П. Валецький // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – Випуск 26. – Луцьк, 2009. – С.27-33.
2. Margolis J.M. Engineering thermoplastics: properties and applications. – New York: Marcel Dekker, 1985. – 400pp.