

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.5.104790

УДК 678.027.3.678.073-023.4

Г.І. Ведь, А.Д. Петухов*, І.О. Мікульонок, О.Л. Сокольський, О.М. Шнирук
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

МОДИФІКАЦІЯ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК ДВОВІСНОЮ ОРІЄНТАЦІЄЮ

Проблематика. Для опису поведінки полімерів і полімерних плівок під дією сил розтягу існують різноманітні механічні моделі, які розглядають одновісне розтягання, і тому відповідні параметри процесу також стосуються лише одного напрямку. Проте за умови розтягання твердого тіла виникає не лише поздовжня, а й поперечна деформація, що істотно ускладнює аналіз поведінки полімерних плівок під час одно- або двовісного розтягання (орієнтації).

Мета дослідження. Уточнення фізичної моделі механізму деформації рукавної полімерної плівки при її виготовленні, створення математичної моделі процесу двовісної орієнтації рукава.

Методика реалізації. Поставлена мета досягається за рахунок розгляду механічної моделі полімерної плівки як квадрата, сторони якого є послідовно з'єднаними між собою елементами Гука та Ньютона, а діагоналі – елементами Гука. При цьому точки з'єднання сторін і діагоналей квадрата – шарнірні, а елементи Гука можуть мати різні коефіцієнти пружності.

Результати дослідження. Розроблено механічну модель розтягання полімерів і полімерних плівок, що враховує їх деформацію у двох взаємно перпендикулярних напрямках за умови як одно-, так і двовісного розтягання (орієнтації). Експериментально підтверджено коректність деформації розробленої моделі за умови одновісного розтягання для розплаву полімеру. Показано, що максимальна відносна поперечна деформація за умови одновісного розтягання розплаву полімеру не перевищує 2/3 його відносної поздовжньої деформації.

Висновки. Уточнено фізичну модель механізму деформації рукавної полімерної плівки при її виготовленні, яка базується на комбінації елементів Гука та Ньютона. Модель дійсна для будь-якого моменту релаксаційних процесів у полімерній плівці. Експериментально доведено коректність застосування моделі для реальних об'єктів. Впливу температури на відношення поздовжніх і поперечних деформацій експериментально не виявлено.

Ключові слова: полімерна плівка; орієнтація; механічна модель; експериментальні дослідження.

Вступ

Екструзійні плівки найбільш споживані промисловістю і побутом серед полімерних виробів, а рукавний спосіб їх виробництва дає змогу одержувати полотно шириною до 24 м і ширше, товщиною до 1 мм і товстіші. Завдяки цьому широкоформатні плівки (складені гармошкою ролонні матеріали) перспективні для створення фільтраційних і протифільтраційних екранів штучних водоймищ, каналів, рисових полів, гідроізоляційних та інших споруд. Існує декілька технологій виготовлення рукавних плівок, проте однією зі стадій цих технологій є вільне розтягання відформованої циліндричного перерізу плівкової заготовки в одному або двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Полімерні матеріали в певному температурному інтервалі здатні до великих частково оборотних деформацій. У цьому випадку будь-яку кінцеву деформацію можна розглядати як результат послідовного прояву двох принципово відмінних видів деформації: об'ємного стиснен-

ня (розширення) і зсуву. Взаємне співвідношення цих деформацій визначається коефіцієнтом Пуассона. Будь-яка деформація полімеру – це перехід з рівноважного стану в нерівноважний. Також процес має релаксаційний характер, тому кількісний опис деформації полімерів вимагає паралельного розгляду закономірностей процесів релаксації, найближчим аналогом яких є ньютонівська рідина. Пружна ж частина деформації підкоряється закону Гука. Закони Гука і Ньютона є основою механічних моделей, які віртуально мають окремо властивості пружного тіла і ньютонівської рідини. Найбільш використовуваними раніше і пропонуваними сьогодні є моделі Максвелла, Кельвіна–Фойхта, Каргіна–Слонімського, Віхерта, Бургерса–Френкеля, Сен-Венана та інших.

При накладенні механічного поля прості аморфні полімерні тіла, в т.ч. такі, що складаються саме з асиметричних структурних молекулярних елементів, здатні набувати анізотропії властивостей, зумовленої їх розтяганням. Чим вище асиметрія структурних елементів, тим ін-

* corresponding author: petuchov36@ukr.net

тенсивніше проходять процеси анізотропії. У кристалічних полімерів відбуваються розгортання гнучких надмолекулярних структурних елементів та їх ізотропія відповідно до напрямку дії зовнішніх сил. Важливе значення при цьому мають особливості поведінки як кристалічних, так і некристалічних (аморфних) областей полімеру.

Таке орієнтоване розміщення елементів макромолекул термодинамічно можливе тільки в умовах дії зовнішньої сили. Після зняття деформувального зусилля внутрішній тепловий рух порушує порядок, що було досягнуто при розтяганні, і ланки макромолекул знову прагнуть повернутися в неупорядкований стан. Це прагнення може проявлятися значною мірою тільки за температури, яка вище температури склування або температури плавлення.

У напрямку орієнтації спостерігається істотне збільшення модуля пружності й руйнівного напруження в матеріалі. У той же час залежно від складу полімеру, температури і швидкості деформації механізм структурних перебудов полімерного тіла може бути різним. А різні механізми перебудови приводять до появи різноманітних типів кінцевого орієнтаційного порядку й, відповідно, до різних механічних та інших властивостей орієнтованого полімеру [1, 2].

Деформування одновісним розтяганням полімерів досліджувалось при орієнтації синтетичних волокон [3], двовісній орієнтації плівок, виготовлених плоским способом [4, 5]. При цьому для спрощення аналізу поведінки полімерів під дією сил розтягу використовувалися механічні моделі, складовими яких є елементи Гука і Ньютона, на основі чого аналізуються пружні та пластичні деформації полімерів, їх особливості, співвідношення.

Проте відомо (за Пуассоном), що навіть при одновісному розтяганні твердого тіла виникає не лише поздовжня, а й поперечна деформація, яку не враховують навіть складніші механічні моделі Максвелла, Кельвіна–Фойгта та інших.

Для оптимізації технологій традиційних полімерних плівок, створення технологій широкоформатних рукавних плівок і зі зростанням в умовах всесвітнього технічного прогресу ступеня комп'ютеризації технологій переробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) виникає можливість і необхідність керування процесом анізотропії елементів макромолекул полімер-матриці ПКМ при їх розтяганні. Потрібні математичні моделі механізму деформа-

ції структурних перебудов полімеру в ПКМ при орієнтації.

Постановка задачі

Метою досліджень є уточнення фізичної моделі механізму деформації рукавної полімерної плівки при її виготовленні, застосування для цього графомеханічної моделі (ГММ) і на її основі створення математичної моделі процесу двовісної орієнтації рукава.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення завдання запропонована ГММ, фізична початкова форма якої являє собою квадрат, сторони і діагоналі якого є послідовно з'єднаними між собою елементами Гука та Ньютона (рис. 1). При цьому точки з'єднання сторін і діагоналей квадрата – шарнірні, а елементи Гука можуть мати різні пружності. В ГММ вбудовується механічна модель Кельвіна–Фойгта з наявністю елемента релаксаційних процесів.

Проаналізуємо статичне навантаження зазначеної моделі вздовж осі x , що збігається з однією з діагоналей квадрата (рис. 1). Для цього розглянемо вузол В. Прикладена до нього сила F zdeформує модель уздовж осі x на величину Δx та зумовить появу сил R_1 і R_2 . У випадку зміни сили F згідно з умовою рівноваги змінюються і сили R_1 і R_2 . Зміна сили F може бути спричинена як режимом розтягання (постійна швидкість розтягання, постійна швидкість деформації), так і релаксаційними процесами. Відповідно, сили R_1 і R_2 мають такий же характер, як і сила F . Відповідно, результат для цих сил (величина деформації) має релаксаційний характер:

$$R_1 = G \frac{\Delta x}{\cos \alpha}, \quad (1)$$

$$R_2 = G \Delta x, \quad (2)$$

де G – коефіцієнт пружності, Н/м; α – половина гострого кута zdeформованої моделі в місці прикладення сили, град.

Також розглянемо вузол А, на який по сторонах моделі діють сили R_1 , що утворюють рівнодійну силу $R_3 = R_{\text{поп}}$, яка діє на модель у поперечному напрямку (вздовж осі r) і деформує її на величину Δr :

$$R_{\text{поп}} = G \Delta r \quad (3)$$

або

$$R_{\text{поп}} = 2R_1 \sin \alpha. \quad (4)$$

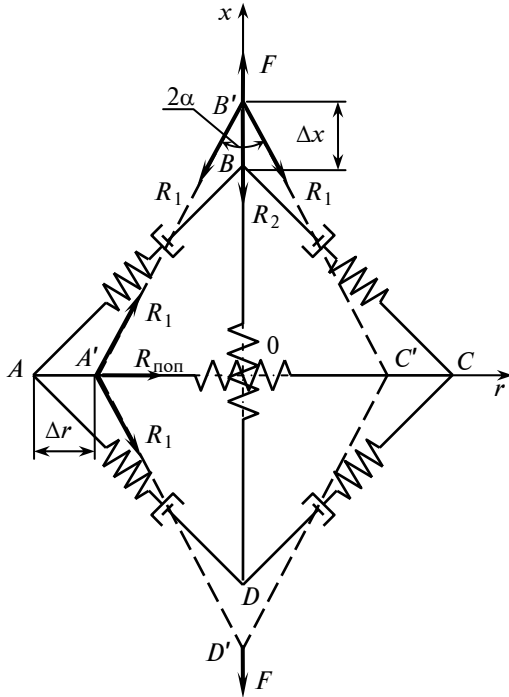


Рис. 1. Графомеханічна модель одновісного розтягання полімерної плівки

Прирівнюючи між собою залежності (3) і (4) з урахуванням рівнянь (1) і (2), отримаємо

$$\Delta r = 2\Delta x \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (5)$$

З геометричних міркувань (див. рис. 1) можна записати

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a - \Delta r}{a + \Delta x}, \quad (6)$$

де a – половина довжини діагоналі квадрата (тобто $a = |AC|/2 = |BD|/2$), м.

Після підстановки (6) у (5) і відповідних перетворень матимемо

$$\frac{\Delta r}{a} = 2 \frac{\frac{\Delta x}{a}}{1 + 3 \frac{\Delta x}{a}}. \quad (7)$$

Позначивши $D_{\text{поп}} = \Delta r/a$ відносну поперечну деформацію, а також $D_{\text{позд}} = \Delta x/a$ відносну поздовжню деформацію, отримаємо вираз (7) у вигляді

$$D_{\text{поп}} = \frac{2D_{\text{позд}}}{1 + 3D_{\text{позд}}}. \quad (8)$$

Якщо залежність (8) записати у вигляді

$$D_{\text{поп}} = \frac{2}{\frac{1}{D_{\text{позд}}} + 3},$$

то очевидно, що за умови, коли відносна поздовжня деформація прямує до нескінченності ($D_{\text{позд}} \rightarrow \infty$), то відносна поперечна деформація прямує до величини $2/3$.

При цьому потрібно зазначити, що силова картина дійсна для будь-якого моменту релаксацийних процесів у полімерній плівці.

Оскільки величини $D_{\text{позд}}$ і $D_{\text{поп}}$ є відносними, тобто незалежними від абсолютних розмірів зразка плівки, то, очевидно, залежність (8) буде коректною і для реальних об'єктів (таблиця). При цьому були досліджені зразки у вигляді плівкових стрічок 60×10 мм завтовшки 0,01 мм з поліетилену високого тиску (ПЕВТ) марки 15803-020.

Таблиця. Зіставлення теоретичних і експериментальних результатів досліджень розтягання плівки з поліетилену високого тиску

Температура, °C	$D_{\text{позд}}$	$D_{\text{поп}}$	
		розрахунковий	експериментальний
160	9,0	0,64	0,66
160	8,0	0,67	0,641
160	9	0,67	0,643
180	8,9	0,63	0,66
185	9,4	0,66	0,64

Впливу температури на відношення деформацій поздовжніх і поперечних експериментально не виявлено.

Отже, експериментально доведено коректність застосування залежності (8) для реальних, а не ідеалізованих, об'єктів.

Розглянемо двовісне навантаження моделі, коли вздовж осі x діє сила F_x , а вздовж осі r – сила F_r (рис. 2).

Позначимо відношення зазначених сил через n :

$$\frac{F_r}{F_x} = n. \quad (9)$$

Тоді рівняння рівноваги для вузла B у проєкціях на вісь x матиме вигляд

$$2R_1 \cos \alpha + R_2 = F_x. \quad (10)$$

Аналогічне рівняння рівноваги для вузла А у проєкціях на вісь r :

$$2R_1 \sin \alpha + R_3 = F_r. \quad (11)$$

У залежностях (10) і (11) введено такі позначення:

$$R_1 = G \frac{\Delta x_{\text{сум}}}{\cos \alpha}; \quad (12)$$

$$R_2 = G \Delta x_{\text{сум}}; \quad (13)$$

$$R_3 = G \Delta r_{\text{сум}}. \quad (14)$$

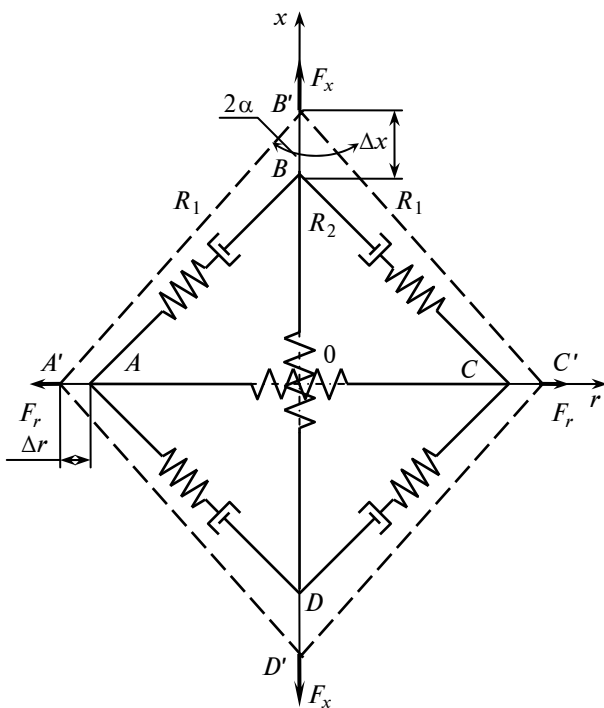


Рис. 2. Графомеханічна модель двовісного розтягання полімерної плівки

Розв'язуючи спільно рівняння (9)–(14), отримуємо

$$\Delta r_{\text{сум}} = (3n + 2 \operatorname{tg} \alpha) \Delta x_{\text{сум}}, \quad (15)$$

де $\Delta r_{\text{сум}}$ і $\Delta x_{\text{сум}}$ – сумарна деформація від дії сил F_x і F_r уздовж осей r і x (м) відповідно.

З рис. 2 видно, що

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a + \Delta r_{\text{сум}}}{a + \Delta x_{\text{сум}}}. \quad (16)$$

References

[1] V.V. Nizhnik, T.Yu. Nizhnik, *Physical Chemistry of Polymers*. Kyiv, Ukraine: Fitosociocentr, 2009, 424 p.
 [2] C. Rauwendaal, *Polymer Extrusion*. Munich, Germany: Carl Hanser Verlag, 2014, 950 p.

З урахуванням (15) і (16) можна отримати

$$D_{\text{поп}} = \frac{D_{\text{позд}}(3n + 3nD_{\text{позд}} - 2)}{1 + 3D_{\text{позд}}}, \quad (17)$$

де $D_{\text{поп}} = \Delta r_{\text{сум}}/a$ – відносна поперечна деформація (вздовж осі r), м; $D_{\text{позд}} = \Delta x_{\text{сум}}/a$ – відносна поздовжня деформація (вздовж осі x), м.

Рівняння (17) за умови $n = 0$ (одновісне навантаження) перетворюється на рівняння (8) (при цьому знак “мінус” вказує на те, що поперечна деформація – стискання).

Висновки

За результатами проведених досліджень можна зазначити:

1. Створено фізичну модель двовісної орієнтації у вигляді графомеханічної моделі розтягання полімерної плівки, яка враховує її деформування у взаємно перпендикулярних напрямках навіть за одновісного розтягання. Проаналізовано деформування полімерної плівки як за одно-, так і за двовісного розтягання.

2. Отримано залежність відносної поперечної деформації полімерної плівки від відносної поздовжньої деформації як за одно-, так і за двовісного розтягання.

3. Експериментально підтверджено коректність значень деформації згідно з розробленою моделлю за умови одновісного розтягання розплаву полімеру.

4. Показано, що максимальна відносна поперечна деформація за умови одновісного розтягання розплаву полімеру не перевищує $2/3$.

5. Запропонована модель не може бути використана для тіл Сен-Венана, оскільки у них відсутня в'язкопружна деформація.

6. Розглянута модель може бути використана для дослідження формоутворення полімерних труб, видувних виробів, створення математичних моделей процесів їх формування, які сприятимуть можливості подальшої комп'ютеризації цих процесів.

У подальшому на базі запропонованої фізичної моделі буде досліджено механізм тривимірної деформації товстостінних полімерних виробів.

- [3] K.E. Perepelkin, *Chemical Fibers: Development of Production, Methods of Production, Properties, Prospects*. Saint Petersburg, Russia: SPGUTD, 2008, 354 p.
- [4] I.O. Mikulionok, *Technological Bases for the Polymers, Plastics and Rubber Mixtures Processing*. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2015, 312 p.
- [5] S.V. Vlasov et al., *Basics of Plastics Processing Technology*. Moscow, Russia: Khimiya, 2004, 600 p.

Г.И. Ведь, А.Д. Петухов, И.О. Микулёнок, А.Л. Сокольский, О.М. Шнирук

МОДИФИКАЦИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК ДВУХОСНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ

Проблематика. Для описания поведения полимеров и полимерных пленок под действием сил растяжения существуют различные механические модели, которые рассматривают одноосное растяжение, и поэтому соответствующие параметры процесса также касаются только одного направления. Однако при растяжении твердого тела возникает не только продольная, но и поперечная деформация, что существенно затрудняет анализ поведения полимерных пленок при одно- или двухосном растяжении (ориентации).

Цель исследования. Уточнение физической модели механизма деформации рукавной полимерной пленки при ее изготовлении, создание математической модели процесса двухосной ориентации рукава.

Методика реализации. Поставленная цель достигается за счет рассмотрения механической модели полимерной пленки как квадрата, стороны которого являются последовательно соединенными между собой элементами Гука и Ньютона, а диагонали – элементами Гука. При этом точки соединения сторон и диагоналей квадрата – шарнирные, а элементы Гука могут иметь разные коэффициенты упругости.

Результаты исследования. Разработана механическая модель растяжения полимеров и полимерных пленок, учитывающая их деформацию в двух взаимно перпендикулярных направлениях как при одно-, так и при двухосном растяжении (ориентации). Экспериментально подтверждена корректность деформации разработанной модели при одноосном растяжении для расплава полимера. Показано, что максимальная относительная поперечная деформация при одноосном растяжении расплава полимера не превышает 2/3 его относительной продольной деформации.

Выводы. Уточнена физическая модель механизма деформации рукавной полимерной пленки при ее изготовлении, основанная на комбинации элементов Гука и Ньютона. Модель действительна для любого момента релаксационных процессов в полимерной пленке. Экспериментально доказана корректность применения модели для реальных объектов. Влияние температуры на отношение продольных и поперечных деформаций экспериментально не обнаружено.

Ключевые слова: полимерная пленка; ориентация; механическая модель; экспериментальные исследования.

H.I. Ved, A.D. Petukhov, I.O. Mikulionok, O.L. Sokolskyi, O.M. Shnyruk

MODIFICATION OF POLYMER FILMS BY BIAXIAL ORIENTATION

Background. There are various mechanical models for the description of behavior of polymers and polymeric films under the influence of stretching forces. These models consider monoaxial stretching and therefore the corresponding parameters of process also concern only one direction. However, on condition of a solid body stretching there isn't only a longitudinal, and cross deformation which significantly complicates the analysis of behavior of polymeric films in one – or two-axis stretching (orientation) process.

Objective. The aim of the paper is to refine the deformation mechanism physical model of a tubular polymer film during its fabrication, creation of a mathematical model of the tube biaxial orientation process.

Methods. The goal is achieved by considering the mechanical model of a polymer film as a square, the sides of which are successively connected with each other by Hooke and Newton elements, and the diagonals by Hooke elements. In this case, the joining points of the sides and diagonals of the square are hinged, and the Hooke elements can have various elasticity coefficients.

Results. The dependence of the relative transverse deformation of the polymer film on the relative longitudinal deformation is obtained for both single- and biaxial stretching. The correctness of the deformation of the developed model at uniaxial stretching for the polymer melt was experimentally confirmed. It is shown that the maximum relative transverse strain at uniaxial stretching of the polymer melt doesn't exceed 2/3 of its relative longitudinal deformation.

Conclusions. The physical model of a tubular polymeric film deformation mechanism during its manufacture, based on a combination of Hooke and Newton elements, has been clarified. The model is valid for any moment of relaxation processes in a polymer film. The correctness of the model for real objects is experimentally proved. The effect of temperature on the ratio of longitudinal and transverse strains wasn't experimentally detected.

Keywords: polymer film; orientation; mechanical model; experimental studies.

Рекомендована Радою
інженерно-хімічного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
21 червня 2018 року

Прийнята до публікації
6 вересня 2018 року