

УДК 678.7:620.1:66.094.3

*С.К. Павлюк ^а, В.Ю. Костенюк ^б, І.В. Суха ^а***ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВТОРИННОГО ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТУ**^а ННІ УДХТУ Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро, Україна^б Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, Україна

У роботі охарактеризовано фізико-механічні та реологічні властивості вторинного поліетилентерефталату (ПЕТ) у порівнянні з первинним полімером. Визначено вплив повторної переробки на структуру полімеру, його в'язкість, механічну міцність та пластичність. Наведені експериментальні дані свідчать про суттєве зниження пластичності та молекулярної маси вторинного ПЕТ після кількох циклів переробки, що обмежує можливості його багаторазового використання. Проаналізовано залежність в'язкості та напруження зсуву від температури і градієнта швидкості, що підтверджує деградацію матеріалу під час термомеханічної обробки. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації процесів вторинного перероблення ПЕТ та поліпшення якості переробленого полімеру.

Ключові слова: вторинний поліетилентерефталат, переробка, механічні властивості, реологічні характеристики, деградація полімеру, термомеханічна обробка, пластичність, екологія.

DOI: 10.32434/0321-4095-2025-162-5-154-159**Вступ**

В умовах зростаючого забруднення довкілля та необхідності ефективного використання ресурсів, проблема вторинного перероблення полімерних матеріалів, зокрема поліетилентерефталату (ПЕТ), особливо актуальна. Вторинний ПЕТ широко застосовується у виробництві упаковки, текстилю та технічних виробів, однак його фізико-механічні властивості суттєво змінюються під впливом багаторазового перероблення. Вивчення цих змін є важливим для оптимізації процесів перероблення та збереження якості отриманого матеріалу.

Багаторазового перероблення ПЕТ призводить до деградації його полімерної структури, що проявляється у зниженні молекулярної маси, пластичності та міцності. Це обмежує можливості використання вторинного ПЕТ у деяких сферах

застосування. Необхідно встановити закономірності зміни властивостей полімеру після кожного циклу перероблення та визначити критичний поріг його експлуатаційної придатності.

Сучасні дослідження у сфері вторинної переробки ПЕТ спрямовані на зниження екологічного навантаження та забезпечення ефективного використання полімерних відходів. У роботах [1,2] розглянуто основні функції ПЕТ-упаковки у харчовій промисловості, а також матеріалознавчі характеристики первинного полімеру. Автори підкреслюють, що, попри добрі бар'єрні властивості, стійкість до термічних і механічних впливів ПЕТ знижується після кількох циклів перероблення, що ставить під сумнів доцільність його багаторазового використання в критичних сферах, зокрема в пакуванні харчових продуктів.

Окрему увагу приділяють вивченню змін

© С.К. Павлюк, В.Ю. Костенюк, І.В. Суха, 2025



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

S.K. Pavliuk, V.Yu. Kosteniuk, I.V. Sukha

фізико-механічних і реологічних характеристик вторинного ПЕТ. Зокрема, у дослідженні [3] розглянуто композити на основі ПЕТ з гідроталькітом, які демонструють підвищену термічну стабільність і кращі механічні показники, порівняно зі звичайним вторинним полімером. Це відкриває нові можливості для застосування переробленого ПЕТ у виробництві пакування для молочної продукції. Подібні результати наведено і в статті [4], де досліджено вплив упаковки на смакові властивості рідкого молока – важливий аспект у контексті якості кінцевого продукту.

Вітчизняні науковці також приділяють значну увагу безпечності використання ПЕТ із вторинної сировини. Зокрема, у публікації [5] представлено результати оцінювання міграції потенційно небезпечних компонентів із ПЕТ-пляшок, виготовлених із переробленого матеріалу. Автори вказують на потребу жорсткого контролю за параметрами переробки та застосуванням полімеру у харчовій галузі. Це дослідження є важливим у контексті законодавчих обмежень ЄС та міжнародних рекомендацій щодо повторного використання пластику у контакті з харчовими продуктами.

У низці робіт [6,7] розглянуто сучасні технології рециклінгу ПЕТ та описано основні проблеми, пов'язані з деградацією полімеру внаслідок багаторазової переробки. Зокрема, в роботах [8–10] вказують на необхідність оптимізації температури і тривалості обробки, а також використання стабілізаторів для збереження цілісності макромолекулярного ланцюга. Актуальним залишається також пошук біоадаптивних модифікаторів, які можуть компенсувати втрату механічної міцності вторинного ПЕТ без шкоди для екології [11,12].

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить про активний розвиток досліджень у сфері переробки ПЕТ, проте потребує подальших прикладних досліджень щодо оптимізації властивостей матеріалу після повторного використання. Отримані експериментальні дані щодо змін пластичності, в'язкості та міграційної безпеки вторинного ПЕТ є фундаментальними для удосконалення технологій вторинного виробництва та розширення сфери його застосування [13,14].

Незважаючи на значну кількість досліджень щодо переробки ПЕТ, недостатньо вивчені реологічні особливості вторинного матеріалу при різних температурах і градієнтах швидкості. Також потребують подальшого аналізу механічні властивості полімеру після декількох циклів переробки та їхній вплив на можливість повторного

використання.

ПЕТ є одним із найпоширеніших термопластичних полімерів, що активно використовується для виготовлення упаковки, зокрема в харчовій промисловості. Його популярність обумовлена прозорістю, хімічною інертністю, механічною міцністю та придатністю до переробки. У контексті зростаючого екологічного навантаження все більшої актуальності набуває використання вторинної сировини, зокрема вторинного ПЕТ, у виробництві харчової тари.

Одним із ключових аспектів безпечного використання вторинного ПЕТ є дослідження його фізико-хімічних і реологічних властивостей. Зокрема, важливим показником є в'язкість розплаву ПЕТ при різних температурах і градієнтах швидкості зсуву. Дослідження показали, що з підвищенням температури в'язкість як первинного, так і вторинного ПЕТ знижується. Проте вторинний ПЕТ виявляє більшу чутливість до змін градієнта швидкості, що може бути наслідком деградації полімеру під час попередньої експлуатації та переробки.

Крім реологічних характеристик, на властивості вторинного ПЕТ значно впливає попередній цикл його використання, що може зумовити зниження молекулярної маси, зміну термостійкості та зменшення еластичності. Такі зміни обумовлюють необхідність детального аналізу параметрів переробки матеріалу, зокрема температурного режиму, тривалості термообробки та умов формування готових виробів. Відсутність контролю над цими параметрами може призвести до погіршення експлуатаційних властивостей готової тари, що є критичним у харчовій промисловості.

Особливої уваги заслуговує порівняння поведінки первинного і вторинного ПЕТ у динамічних умовах. Якщо первинний ПЕТ характеризується стабільною в'язкісною поведінкою при широкому діапазоні температур і швидкостей зсуву, то вторинний демонструє схильність до різкого зниження в'язкості при зростанні градієнта швидкості. Це свідчить про те, що вторинний матеріал вимагає більш точного технологічного підходу при проектуванні обладнання для лиття, екструзії або видування пляшок.

Метою даної роботи є дослідження змін фізико-механічних і реологічних характеристик вторинного ПЕТ залежно від кількості циклів переробки, а також аналіз впливу термомеханічної обробки на властивості матеріалу та визначення граничної кількості переробок, після яких полімер втрачає експлуатаційні властивості.

Методика експерименту, результати та обговорення

Як вихідну сировину використовувався вторинний ПЕТ у вигляді подрібнених та очищених пластівців з переробки 0,5–2 л пляшок. Характеристики вторинного ПЕТ наведено в табл. 1.

Наслідком збільшення кількості циклів переробки ПЕТ є суттєве зниження його пластичності. Після першого циклу переробки матеріал залишається достатньо пластичним: руйнування відбувається лише після значної холодної витяжки та зміцнення напругою. Проте вже після другого циклу спостерігається значне зниження пластичності, хоча матеріал все ще зберігає певні властивості. Після третього циклу відбувається критичне зниження пластичності – у 100 разів порівняно з первинним ПЕТ. Подальші цикли

лише поглиблюють деградацію полімеру, що вказує на обмеженість кількості можливих переробок. Тому були здійснені дослідження зміни властивостей ПЕТ від циклів переробки, що наведені в табл. 2.

На рис. 1 і 2 проілюстрована реологічна поведінка первинного та вторинного ПЕТ залежно від температури та градієнта швидкості зсуву. Виявлено, що із підвищенням температури в'язкість знижується, причому первинний ПЕТ демонструє більш стабільну поведінку в порівнянні з вторинним. У вторинному ПЕТ спостерігається різке зниження в'язкості при підвищенні градієнта швидкості зсуву, що може бути пов'язане з деградацією полімеру під час перероблення.

Аналогічно вивчалася залежність напруження зсуву від градієнта швидкості для первинного і вторинного ПЕТ при тих самих температурах. Виявлено, що із збільшенням температури напруження зсуву знижується, але в первинному ПЕТ зберігається більш рівномірний характер залежності. У вторинному ПЕТ спостерігається різке зниження напруження зсуву, що свідчить про можливість зниження його механічної міцності після перероблення.

Висновки

Показано, що первинний ПЕТ має стабільніші реологічні характеристики, тоді як вторинний ПЕТ демонструє значну здатність до деградації при підвищенні температури та градієнта швидкості. Це свідчить про вплив повторної переробки на структуру полімеру, що обумовлює зниження його в'язкості. Вторинний ПЕТ можна використовувати в технологіях із меншими механічними навантаженнями, але потрібна оптимізація умов його переробки для збереження властивостей.

Таблиця 1
Властивості вторинного поліетилентерефталату за
ТУУ-37.2-30492103-002-2001

Показник	Значення
густина, кг/м ³	1300–1360
насипна густина, кг/м ³	500–600
температура плавлення, °C	255–257
міцність при розтягу, МПа	150–200
відносне видовження при розтягу, %	30–50
ступінь кристалічності, %	25–30
ПТР, г/10 хв (P=2.16 кг, T=548 К)	21–25
характеристична в'язкість (в суміші фенол–тетрахлоретан, 30,00°C)	0,76–0,79

Таблиця 2

Зміни властивостей ПЕТ залежно від циклів переробки

Кількість циклів переробки	Характеристична в'язкість, дл/г	Молекулярна маса, г/моль	Пластичність, %
0 (первинний ПЕТ)	0,85	28000	–
1	0,44	11200	320±12
2	0,39	9800	200±14
3	0,36	8500	3,1±0,2
4	0,33	7400	2,7±0,3
5	0,30	6200	1,8±0,2

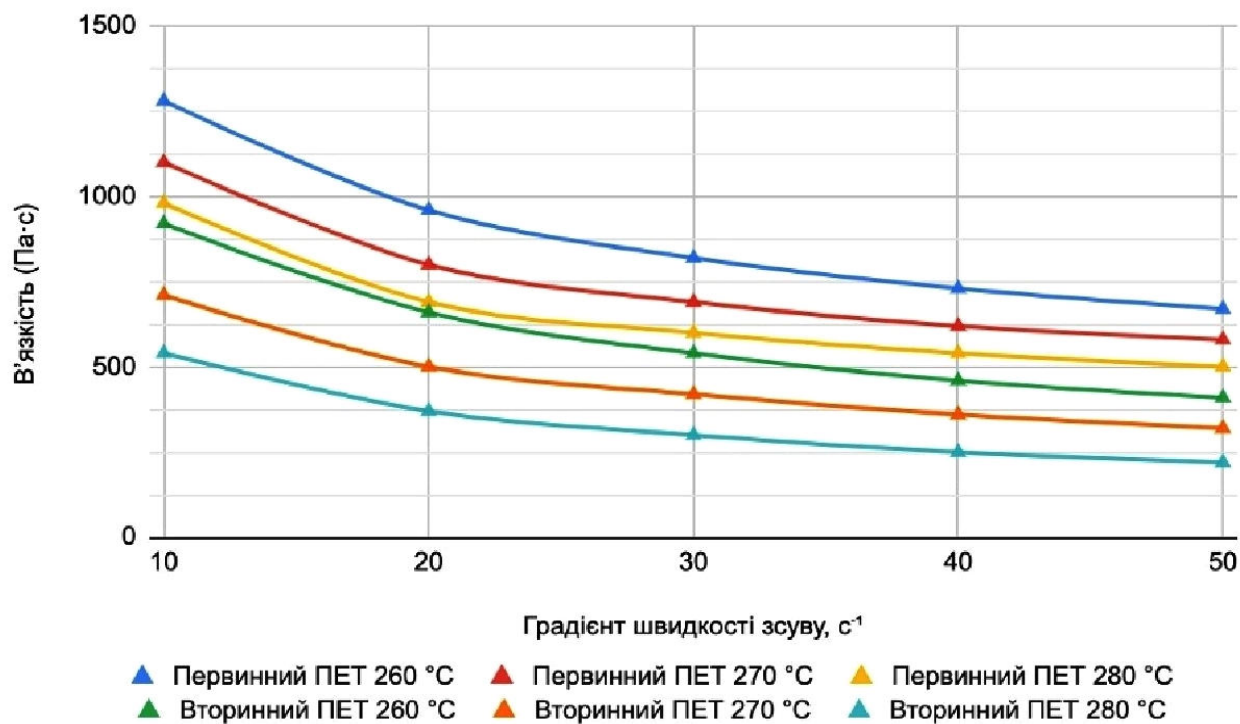


Рис. 1. Залежність в'язкості від гадієнту швидкості зсуву для первинного та вторинного ПЕТ при різних температурах: 1 – 260°C; 2 – 270°C; 3 – 280°C.

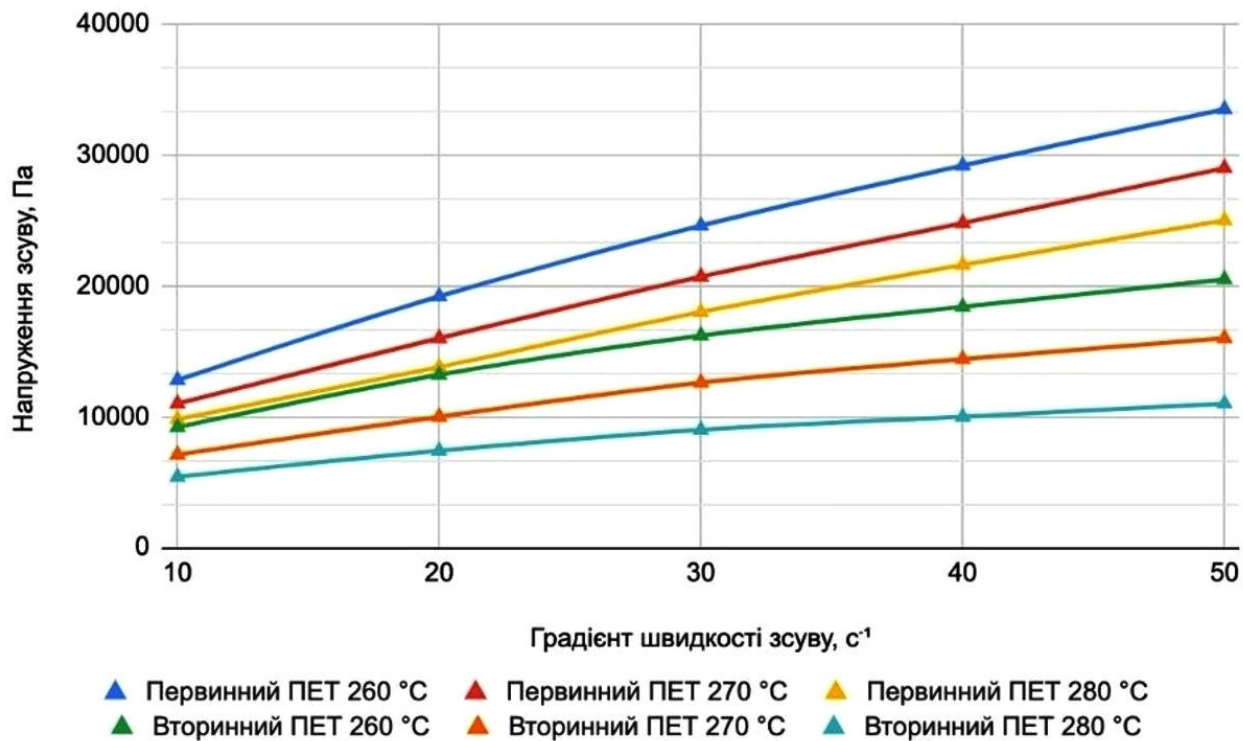


Рис. 2. Залежність напруження зсуву від гадієнту швидкості зсуву для первинного та вторинного ПЕТ при різних температурах: 1 – 260°C; 2 – 270°C; 3 – 280°C

Встановлено, що після першого циклу переробки матеріал зберігає достатню пластичність, проте вже після другого циклу спостерігається її значне зниження. Після третього циклу пластичність ПЕТ критично зменшується, що обмежує можливість подальшого використання матеріалу без додаткових модифікацій.

Таким чином, результати дослідження підтверджують необхідність ретельного контролю якісних показників вторинного ПЕТ та оптимізації процесів його перероблення. Використання вторинного полімеру можливе для одержання виробів, які не працюють при високих механічних навантаженнях, однак для збереження властивостей матеріалу доцільним є застосування при його переробці стабілізаторів, модифікаторів або змішування з первинним ПЕТ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Masamba M. Impact of food packaging materials on the shelf-life and quality of packaged food products // *J. Food Sci.* – 2024. – Vol.5. – No. 2. – P.15-28.
2. Marsh K., Bugusu B. Food packaging-roles, materials, and environmental issues // *J. Food Sci.* – 2007. – Vol.72. – No. 3. – P.R39-R55.
3. Overview of active polymer-based packaging technologies for food applications / Lopez-Rubio A., Almenar E., Hernandez-Munoz P., Lagaron J.M., Catala R., Gavara R. // *Food Rev. Int.* – 2004. – Vol.20. – No. 4. – P. 357-387.
4. Cadwallader D.C., Gerard P.D., Drake M.A. The role of packaging on the flavor of fluid milk // *J. Dairy Sci.* – 2023. – Vol.106. – No. 1. – P.151-167.
5. Дослідження безпечності використання ПЕТ пляшок із вторинної сировини для пакування харчових продуктів / Павлюк С., Філінська Т., Суха І., Філінська А. // *Техн. науки та технол.* – 2023. – № 4(34). – С.188-194.
6. A hydrotalcite-based PET composites with enhanced properties for liquid milk packaging applications / Feng X., Hu X., Yu J., Zhao M., Yang F., Wang X., Zhang C., Weng Y., Han J. // *Materials.* – 2023. – Vol.16. – No. 5. – Art. No. 1857.
7. Raheem D. Application of plastics and paper as food packaging materials – an overview // *Emir. J. Food Agric.* – 2013. – Vol.25. – P.177-188.
8. Mahalik N.P., Nambiar A.N. Trends in food packaging and manufacturing systems and technology // *Trends Food Sci. Technol.* – 2010. – Vol.21. – No. 3. – P.117-128.
9. Coles R., McDowell D., Kirwan M.J. Food packaging technology. – Boca Raton: CRC Press, 2003. – 346 p.
10. Singh P., Wani A.A. Advances in processing & packaging of fresh dairy products. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 298 p.

11. Kirwan M.J. Handbook of Paper and Paperboard Packaging Technology. 2nd ed. – Oxford: Wiley-Blackwell, 2011. – 496 p.

12. Morris C.E., Jesson A. Packaging materials: 9. Multilayer packaging for food and beverages. ILSI Europe Report Series. – Brussels: ILSI Europe, 2004. – 36 p.

13. Risch S.J. Food packaging history and innovations // *J. Agric. Food Chem.* – 2009. – Vol.57. – No. 18. – P.8089-8092.

14. Active packaging applications for food / Yildirim S., Rocker B., Pettersen M.K., Nilsen-Nygaard J., Ayhan Z., Rutkaite R., Radusin T., Suminska P., Marcos B., Coma V. // *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* – 2018. – Vol.17. – No. 1. – P.165-199.

Надійшла до редакції 04.06.2026

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF RECYCLED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE

S.K. Pavliuk ^{a,*}, V.Yu. Kosteniuk ^b, I.V. Sukha ^a

^a Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

^b Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine

* e-mail: serpik07@ukr.net

This article examines the physicochemical and rheological properties of recycled polyethylene terephthalate (PET) in comparison with the virgin polymer. The effects of repeated recycling on the polymer structure, viscosity, mechanical strength, and plasticity were determined. Experimental data indicate a significant decrease in the plasticity and molecular weight of recycled PET after several recycling cycles, which restricts its potential for further reuse. The dependence of viscosity and shear stress on temperature and shear rate was analyzed, confirming the degradation of the material during thermomechanical processing. The obtained results can be applied to optimize PET recycling processes and to improve the quality of recycled polymers.

Keywords: recycled polyethylene terephthalate; recycling; mechanical properties; rheological characteristics; polymer degradation; thermomechanical processing; plasticity; sustainability.

REFERENCES

1. Masamba M. Impact of food packaging materials on the shelf-life and quality of packaged food products. *J Food Sci.* 2024; 5(2): 15-28. doi: 10.47941/jfs.1845.
2. Marsh K, Bugusu B. Food packaging – roles, materials, and environmental issues. *J Food Sci.* 2007; 72(3): R39-R55. doi: 10.1111/j.1750-3841.2007.00301.x.
3. Lopez-Rubio A, Almenar E, Hernandez-Munoz P, Lagaron JM, Catala R, Gavara R. Overview of active polymer-based packaging technologies for food applications. *Food Rev Int.* 2004; 20(4): 357-387. doi: 10.1081/FRI-200033462.

4. Cadwallader DC, Gerard PD, Drake MA. The role of packaging on the flavor of fluid milk. *J Dairy Sci.* 2023; 106(1): 151-167. doi: 10.3168/jds.2022-22060.
5. Pavliuk S, Filinska T, Sukha I, Filinska A. Research on the safety of using PET bottles from secondary raw materials for food packaging. *Techn Sci Technol.* 2023; 4(34): 188-194. doi: 10.25140/2411-5363-2023-4(34)-188-194.
6. Feng X, Hu X, Yu J, Zhao M, Yang F, Wang X, et al. A hydrotalcite-based PET composites with enhanced properties for liquid milk packaging applications. *Materials.* 2023; 16: 1857. doi: 10.3390/ma16051857.
7. Raheem D. Application of plastics and paper as food packaging materials – an overview. *Emir J Food Agric.* 2013; 25: 177-188. doi: 10.9755/ejfa.v25i3.11509.
8. Mahalik NP, Nambiar AN. Trends in food packaging and manufacturing systems and technology. *Trends Food Sci Technol.* 2010; 21: 117-128. doi: 10.1016/j.tifs.2009.12.006.
9. Coles R, McDowell D, Kirwan MJ. *Food packaging technology*. Boca Raton: CRC Press; 2003. 346 p.
10. Singh P, Wani AA. *Advances in processing & packaging of fresh dairy products*. Boca Raton: CRC Press; 2014. 298 p.
11. Kirwan MJ. *Handbook of paper and paperboard packaging technology*. 2nd ed. Oxford: Wiley-Blackwell; 2011. 496 p.
12. Morris CE, Jesson A. *Packaging materials: 9. Multilayer packaging for food and beverages. ILSI Europe report series*. Brussels: ILSI Europe; 2004. 36 p.
13. Risch SJ. Food packaging history and innovations. *J Agric Food Chem.* 2009; 57(18): 8089-8092. doi: 10.1021/jf900040r.
14. Yildirim S, Røcker B, Pettersen MK, Nilsen-Nygaard J, Ayhan Z, Rutkaite R, et al. Active packaging applications for food. *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 2018; 17(1): 165-199. doi: 10.1111/1541-4337.12322.