

Dariusz SYKUTERA

e-mail: sykutera@utp.edu.pl

Zakład Przetwórstwa i Recyklingu Tworzyw, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

Badanie procesu cięcia wybranych termoplastycznych tworzyw porowatych

Wstęp

Rozdrabnianie jest ważnym węzłem składowym w liniach do recyklingu mechanicznego materiałów polimerowych. W przypadku tworzyw termoplastycznych proces podziału materiału następuje głównie w szczelinie pomiędzy krawędziami noży tnących ruchomych i nieruchomych lub w obszarze wirujących tarcz wielootworowych [Flizikowski i Macko, 2001; Flizikowski J., 2010]. Mimo postępów w zakresie badania procesu rozdrabniania, jednym z kluczowych problemów jest jego niewielka sprawność energetyczna [Flizikowski, 2010; Macko, 2011; Sykutera, 2013]. Energia mechaniczna przekazywana do układu roboczego rozdrabniacza tylko w małej części jest wykorzystana do redukcji objętości materiału wsadowego. Obserwuje się znaczący przyrost energii cieplnej, która powstaje wewnątrz komory roboczej podczas rozdrabniania na skutek intensywnego mieszania i tarcia powierzchni ziaren wzajemnie o siebie i inne elementy wyposażenia komory (np. ściany, powierzchnie noży tnących) [Sykutera i in., 2011; Sykutera i Czyżewski, 2012; Sykutera, 2013]. Poziom intensywności wydzielania ciepła podczas rozdrabniania wynika także z przyjętych warunków cięcia. Chodzi tutaj o geometrię noży tnących (kąt natarcia, ostrza i przyłożenia), wzajemne pochylenie ich krawędzi tnących względem osi obrotu wirnika (kąt 2λ), czy też zarys krawędzi tnącej [Koniczka, 1989; Flizikowski i Macko, 2001; Sykutera, 2013]. Na podstawie zrealizowanych badań własnych stwierdzono, że istotny wpływ na przebieg cięcia mają także: prędkość obwodowa krawędzi tnących, kształt szczeliny pomiędzy nożami i temperatura materiału wsadowego. Jest związane z właściwościami lepkosprężystymi tworzyw termoplastycznych i znaczącym udziałem fazy elastycznej w strukturze wielu materiałów z tej grupy. Z tego powodu podwyższenie efektywności energetycznej procesu cięcia przekłada się na większą sprawność procesu rozdrabniania [Sykutera, 2013]. Materiał szybciej opuszcza komorę roboczą rozdrabniacza tylko wtedy, gdy zostanie sprawniej pocięty do odpowiedniej wielkości ziarna, a to oznacza ograniczenie wzrostu temperatury realizacji procesu podziału materiału. Biorąc pod uwagę odmienne, w stosunku do litych polimerów, właściwości tworzyw porowatych oraz ich strukturę polimerowo-gazową, proces cięcia i rozdrabniania tych materiałów wymaga zastosowania specjalnych nastaw procesowych [Sykutera, 2013]. Publikowane dotychczas wyniki badań doświadczalnych w zakresie oceny wpływu stopnia porowatości struktury termoplastów na wartość maksymalnej siły tnącej i na wartość energii na pojedyncze przecięcie dotyczyły głównie tworzyw poliolefinowych [Bauer, 2001; Macko, 2011; Sykutera, 2013].

Celem pracy było zbadanie przebiegu zmian wartości siły tnącej na nożach nieruchomym i ruchomym i momentu obrotowego na wale wirnika podczas cięcia wybranych termoplastów o strukturze porowatej z grupy materiałów masowych.

Badania doświadczalne

Materiały. Do badań wytypowano wytłoczyny lite i porowate z poli(chloroku winylu) typ FFE 06 oraz FFE 07 (Anwil S.A.) i polistyrenu KRASTEN 552 9002 (Synthos S.A.), które były modyfikowane środkiem porującym Expancel 980 MBX 120 (Akzo Nobel). Wybór ten wynikał z faktu masowego wytwarzania wytworów porowatych z PS i PVC. Gęstość próbek wyniosła: dla litego PVC $1400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, natomiast dla wytłoczyn porowatych PVC A – $700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ oraz dla PVC B – $550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Zakres badań przedstawiono w tab.1.

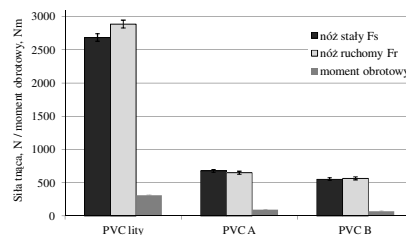
Tab. 1. Zakres zmienności czynników wejściowych

Rodzaj czynnika	Poziome wartości
Wytłoczyna lita i porowata	PVC lita o grubości $g = 4 \text{ mm}$; PVC A porowata, płyta o grubości $g = 4 \text{ mm}$ PVC B porowata, płyta o grubości $g = 4 \text{ mm}$ PS, o grubości $g = 4 \text{ mm}$ (porofory w ilości 0, 1, 2, 4% mas.)
Sposób wytworzenia próbek	wytłaczanie
Szczelina międzyżońowa, [mm]	0,06
Prędkość obwodowa noży, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	0,05; 0,3; 3; 6;
Pochylenie krawędzi noży 2λ , [$^\circ$]	6; 13,5
Kąt ostrza noża β , [$^\circ$]	nieruchomy – 60; ruchomy – 30 i 60

Stanowisko do cięcia i rozdrabniania tworzyw polimerowych, na którym przeprowadzono badania, wyczerpująco opisano w pracy [Sykutera, 2013].

Wyniki i dyskusja

Zarówno w przypadku noża ruchomego jak i nieruchomego obserwowano obniżenie wartości maksymalnej siły tnącej i momentu obrotowego wraz ze wzrostem stopnia porowatości struktury PVC (Rys. 1).



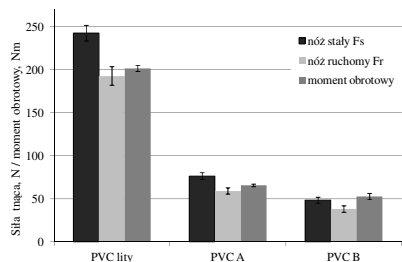
Rys. 1. Zmiany siły i momentu obrotowego w zależności od rodzaju struktury i gęstości PVC. Parametry procesu: prędkość obwodowa noży $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kąty ostrza β_r i $\beta_s = 60^\circ$, szczelina międzyżońowa $0,06 \text{ mm}$, kąt pochylenia krawędzi tnących $2\lambda = 6^\circ$

Dwukrotne obniżenie gęstości w stosunku do litego materiału spowodowało ponad 4-krotny spadek wartości maksymalnej siły tnącej. Dalsza redukcja gęstości nie powoduje już tak istotnych zmian w trakcie cięcia. Na uwagę zasługuje także fakt, że uzyskano bardzo dużą powtarzalność pojedynczych pomiarów. Współczynnik zmienności nie przekroczył w tym przypadku wartości 4%. Średni czas przecięcia próbek litych wyniósł $0,06 \text{ s}$, natomiast porowaty PVC ulegał podziałowi na mniejsze części w czasie około $0,04 \text{ s}$.

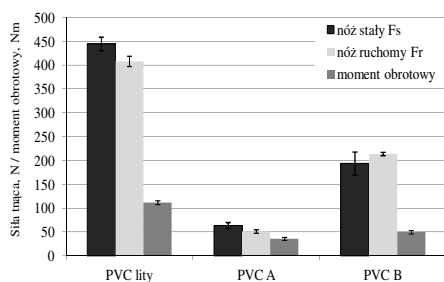
Największe zmniejszenie wartości siły i momentu obrotowego spowodowało zastosowanie noża ruchomego o kącie ostrza $\beta_r = 30^\circ$, pochyłonego względem krawędzi noża nieruchomego o kąt $2\lambda = 6^\circ$ (Rys. 2).

Dla wszystkich rodzajów PVC wartość maksymalnej siły tnącej została obniżona prawie 10-krotnie w stosunku do próby przeprowadzonej z użyciem noża ruchomego o kącie ostrza $\beta_r = 60^\circ$ (Rys. 1 i 2). We wszystkich przypadkach cięcia nożami ruchomymi o kącie ostrza $\beta_r = 30^\circ$, większe wartości siły zanotowano na nożu stałym. Zwiększenie kąta pochylenia krawędzi tnących noży do wartości $2\lambda = 13,5^\circ$ spowodowało wzrost maksymalnych wartości sił na nożach i jednoczesny spadek momentu obrotowego (Rys. 3).

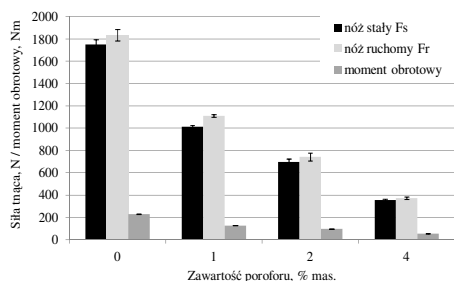
W przypadku cięcia zarówno litego jak i porowatego PVC, zastosowanie noży ruchomych o małym kącie ostrza ma istotne znaczenie. Przyjęcie podobnych nastaw dla próbek wytłaczanych z polistyrenu nie daje już tak znaczącej redukcji maksymalnej siły tnącej (Rys. 4 i 5).



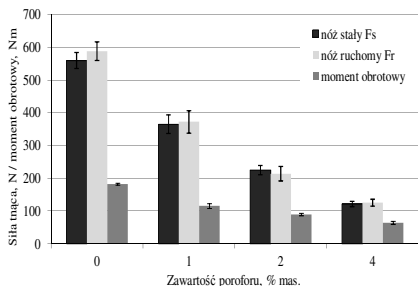
Rys. 2. Zmiany siły tnącej i momentu obrotowego w zależności od struktury i gęstości PVC. Parametry procesu: prędkość obwodowa noży $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kąty ostrzy $\beta_r = 30^\circ$ i $\beta_s = 60^\circ$, szczelina międzynożowa $0,06 \text{ mm}$, kąt pochylenia krawędzi tnących $2\lambda = 6^\circ$



Rys. 3. Zmiany siły i momentu obrotowego w zależności od rodzaju PVC. Parametry procesu: prędkość obwodowa noży $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kąty ostrza $\beta_r = 30^\circ$ i $\beta_s = 60^\circ$, szczelina międzynożowa $0,06 \text{ mm}$, kąt pochylenia krawędzi tnących $2\lambda = 13,5^\circ$

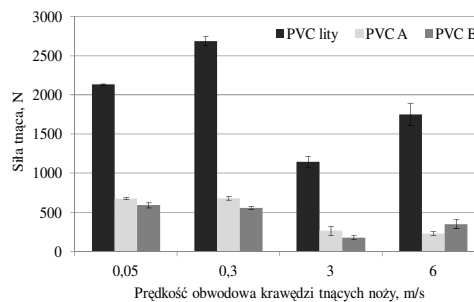


Rys. 4. Zmiany siły i momentu obrotowego w zależności od zawartości poroforów w wytłocznicy z PS. Parametry procesu: prędkość obwodowa noży $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kąty ostrza $\beta_r = 30^\circ$ i $\beta_s = 60^\circ$, szczelina międzynożowa $0,06 \text{ mm}$, kąt pochylenia krawędzi tnących $2\lambda = 6^\circ$



Rys. 5. Zmiany siły i momentu obrotowego w zależności od zawartości poroforów w wytłocznicy z PS. Parametry procesu: prędkość obwodowa noży $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kąty ostrza $\beta_r = 30^\circ$ i $\beta_s = 60^\circ$, szczelina międzynożowa $0,06 \text{ mm}$, kąt pochylenia krawędzi tnących $2\lambda = 6^\circ$

Prędkość obwodowa noży ruchomych ma istotny wpływ na przebieg procesu cięcia PVC. Wraz z jej wzrostem spada wartość siły tnącej, ponieważ podział materiału następuje głównie przez pęknięcie (Rys. 6). Świadczą o tym przebiegi zmian siły i momentu zarejestrowane w trakcie badania. Energia kinetyczna zgromadzona w obracającym się z dużą prędkością wirniku jest wystarczająca do udarowego podziału materiału. Im wyższa prędkość obwodowa, tym procesy te odgrywają coraz większe znaczenie. W kontekście omawiania tych wyników warto zwrócić uwagę na fakt, że wzrost prędkości obrotowej wirnika generuje większy udział drobnych frakcji, co z punktu widzenia wtórnego wykorzystania tych materiałów jest zjawiskiem niekorzystnym.



Rys.6. Wpływ prędkości obwodowej noży ruchomych na zmiany maksymalnej siły tnącej podczas cięcia PVC litego i porowatego. Parametry procesu: kąty ostrza $\beta_r = 60^\circ$ i $\beta_s = 60^\circ$, kąt pochylenia krawędzi tnących $2\lambda = 6^\circ$, szczelina międzynożowa $0,06 \text{ mm}$

Wnioski

Badania cięcia wskazują na bardzo istotną zależność parametrów wejściowych, przyjętych w badaniach na wartości maksymalnej siły tnącej na nożach ruchomym i nieruchomym oraz na zmiany momentu obrotowego na wale wirnika. Obserwowane zmiany dotyczą litego tworzywa o małej udarności (polistyren), a także próbek z litego poli(chloroku winylu), charakteryzujących się większą zdolnością do odkształceń plastycznych.

Zmiana geometrii noży ruchomych w kierunku zastosowania noży tnących o małej wartości kąta ostrza $\beta_r = 30^\circ$ spowodowała istotne zmniejszenie maksymalnej siły tnącej i momentu obrotowego. W przypadku cięcia PVC, znaczące pochylenie krawędzi tnących noży (kąty ostrza $\beta_r = 30^\circ$ i $\beta_s = 60^\circ$) względem osi wirnika do wartości kąta $2\lambda = 13,5^\circ$ nie spowodowało dalszego spadku wartości siły tnącej, a wręcz jej wzrost (Rys. 2 i 3).

LITERATURA

- Bauer W., (2001). *Untersuchung des Einzelzerkleinerungsvorganges in Schneidmühlen am Beispiel von Polypropylen*. Reihe 3, Verfahrenstechnik, 694. VDI Verlag, Düsseldorf
- Flizikowski J., (2010). Rozdrabnianie materiałów porowatych i hiperplastycznych. *Recykling* 1, 8-9
- Flizikowski J., Macko M., (2001). Metodyka oceny sprawności quasi-ścianania recyklatów rur optotelekomunikacyjnych. *Polimery* 46(1), 53-59
- Koniczka R., (1989). Untersuchungen des Schneidvorganges beim Zerkleinern von Kunststoffen. *Kunststoffe*, 79(7), 598-601
- Macko M., (2011). *Metoda doboru rozdrabniaczy wielokrawędziowych do przeróbki materiałów polimerowych*. Wyd. UKW, Bydgoszcz
- Sykutera D., (2013). *Badania procesów cięcia i podatności na rozdrabnianie poliolefin porowatych w aspekcie ich wtórnego przetworstwa*. Rozprawy nr 169. Wyd. UTP, Bydgoszcz
- Sykutera D., Czyżewski P., (2012). Badanie procesu rozdrabniania i cięcia odpadów wtryskowych z kopolimeru jonimerowego Surlyn®. *Przetw. Tworzyw*, 18(6), 662-665
- Sykutera D., Bieliński M., Pepliński K., (2011). *Selected aspects of grinding process research of porous polystyrene*. 22. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren, TECHNOMER, TU Chemnitz

Praca naukowa była finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy N N508 442236.