

## Dariusz SYKUTERA

e-mail: sykutera@utp.edu.pl

Instytut Techniki Wytwarzania, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

## Rozwój konstrukcji wirników młynów nożowych

## Wstęp

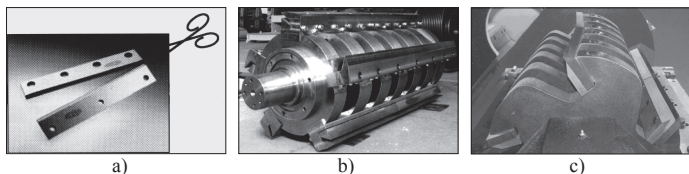
Rozdrabnianie jest procesem składowym najważniejszych technik recyklingu mechanicznego tworzyw polimerowych. Na podstawie dostępnych materiałów można wnioskować, że dominującą techniką rozdrabniania termoplastów i elastomerów usieciowanych jest wywołanie w materiale naprężeń ścinających [1–6]. Cięcie tworzyw lepkosprężystych odbywa się w szczelinie pomiędzy nożami tnącymi [1, 2, 4, 6] lub pomiędzy, obracającymi się z różnymi prędkościami obwodowymi, tarczami wielootworowymi [3].

Analiza konstrukcji rozdrabniaczy do grubościennych wytworów termoplastycznych (grubość ścianki od 2 do 10 mm) wskazuje na tendencję do unifikacji konstrukcji układów nożowych i komór roboczych. Przyjęcie takiego założenia skutkuje bardzo znaczącym wzrostem zużycia energii i spadkiem wydajności w przypadku dezintegracji termoplastów o właściwościach specjalnych (np. termoplastyczne elastomery TPE, TPU lub materiały porowate) [5, 6].

Młyny nożowe różnią się konstrukcją i wymiarami wirnika, ilością noży tnących, wielkością sit, a także kształtem i wielkością zasypu. Dodatkowe różnice w budowie młynów można dostrzec także w łożyskowaniu wału wirnika, sposobach wyciszania komory roboczej, i tłumienia drgań mechanicznych pochodzących od pracy wirnika, oraz w zastosowanych systemach chłodzenia elementów roboczych młyna lub bezpośrednio rozdrobnionego materiału. Celem pracy jest analiza konstrukcji wirników nożowych, które w największym stopniu wpływają na efektywność procesu rozdrabniania.

## Konstrukcje wirników

Konstrukcja wirnika zależy od przeznaczenia i wielkości młyna. W przypadku dezintegratorów o najmniejszych wymiarach, dominują konstrukcje ze skośnym ustawieniem krawędzi tnących noży ruchomych i nieruchomych w stosunku do osi obrotu wirnika (Rys. 1a i 1b). W pozostałych przypadkach najczęściej przyjętym rozwiązaniem jest konstrukcja wirnika zapewniająca mocowanie noży tnących ruchomych w kształcie litery „V”, co według producentów gwarantuje uzyskanie recyklatu o wysokiej jakości, pozbawionego frakcji pylistej (Rys. 1c). Skośne, w stosunku do osi wirnika, ustawienie krawędzi tnących powoduje spadek siły i energii potrzebnej na przecięcie materiału, co jest szczególnie przydatne w przypadku dezintegracji wytworów o znacznej grubości [4].

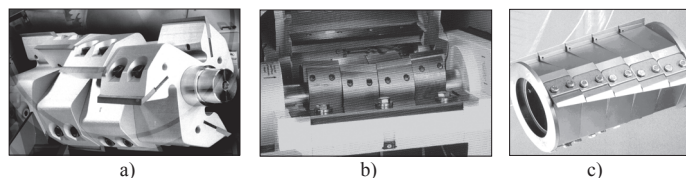


Rys. 1. Dezintegracja termoplastów: a) idea cięcia skośnego [7], b) wirnik z zamocowanymi nożami o pochylonej, w stosunku do osi wirnika, krawędzi tnącej [8], c) wirnik o podwójnie skośnych krawędziach tnących noży ruchomych w kształcie litery „V” [9]

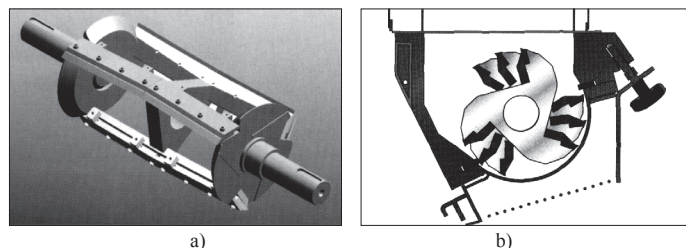
Obok jednolitych, mocowanych na całej szerokości wirnika, noży ruchomych (rys. 1b), bardzo często stosuje się rozwiązania segmentowe (rys. 2). Narzędzia tnące są zamocowane jako niezależne elementy robocze, stanowiące (z sąsiadującymi) przestrzeń roboczą. Zespoły tnące są mocowane do wirnika o specjalnej konstrukcji, zwanej segmentową (rys. 2a). W ten sposób uzyskuje się większą trwałość, zwłaszcza przy cięciu dużych wytworów o większej grubości, a ich ewentualna wy-

miana dotyczy tylko noży o stępionych albo wyszczerbionych krawędziach. Liczba segmentów nożowych wynosi zwykle, w zależności od wielkości urządzenia i przeznaczenia młyna, od 12 do 48 sztuk.

Jedną z obserwowanych współcześnie tendencji jest również wykonywanie wirników w postaci jednolitych bloków, dzięki czemu uzyskuje się większą wytrzymałość wałów i powtarzalność warunków realizacji cięcia do momentu zauważalnego stępienia krawędzi tnących (Rys. 1b). Obok najczęściej spotykanych rozwiązań wirników uniwersalnych, przeznaczonych do rozdrabniania większości wytworów polimerowych w szerokim zakresie grubości ścianki, spotyka się rozwiązania specjalizowane. Wirnik gilotynowy (tzw. otwarty) przeznaczony jest do rozdrabniania tworzyw elastomerowych, podczas którego następuje znaczny wzrost temperatury (Rys. 3a). Wirnik o konstrukcji specjalnej (Rys. 1c) jest dedykowany do rozdrabniania elementów grubościennych o przekroju typu rura. Natomiast młyn z dużą liczbą szeregowo zamontowanych noży skośnych stosuje się do rozdrabniania wytworów cienkościennych np. typu folia (Rys. 3b).

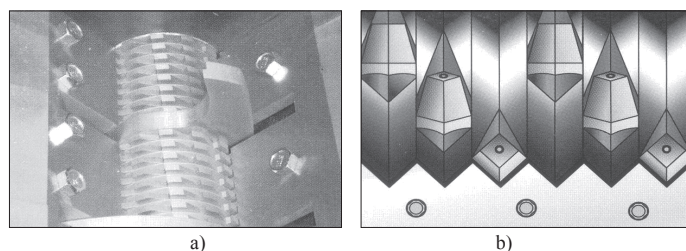


Rys. 2. Wirniki segmentowe stosowane w młynach tnących: a) wirnik dzielony [10], b) wirnik z nożami podwójnie skośnymi [11], c) wirnik z nożami dzielonymi [12]



Rys. 3. Konstrukcja wirników o zastosowaniach specjalnych: a) do cięcia elastomerów [13], b) do cięcia wytworów cienkościennych [10]

W przypadku młynów wolnoobrotowych, konstrukcja wirników ewoluuje w kierunku walcowych elementów tnących o specjalnej geometrii. Tego typu rozwiązania są również dedykowane do dezintegracji wytworów wielkogabarytowych, zwłaszcza cienkościennych (Rys. 4a). Wirniki młynów wolnoobrotowych są zwykle wyposażone w zestawy zębów frezujących o różnej geometrii oraz zabieraki gnąco-kruszące, służące do wstępnego zredukowania objętości wytworów.



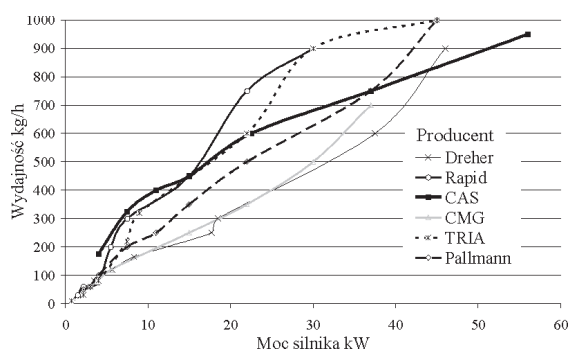
Rys. 4. Konstrukcja wirników stosowanych w młynach: a) wolnoobrotowych [14], b) do rozdrabniania zgrubnego, zwłaszcza dla wytworów o znacznej grubości [9]

Podział materiału następuje poprzez zdeformowanie i wciągnięcie fragmentów wytworu w regulowaną szczelinę pomiędzy zębami ruchomymi i nieruchomymi. Młyny wolnoobrotowe są bezsitowe, stąd służą zwykle do wstępnego przygotowania wielkogabarytowych odpadów

(Rys. 4b) lub do dezintegracji wadliwych wyprasek w miejscu ich powstawania (Rys. 4a).

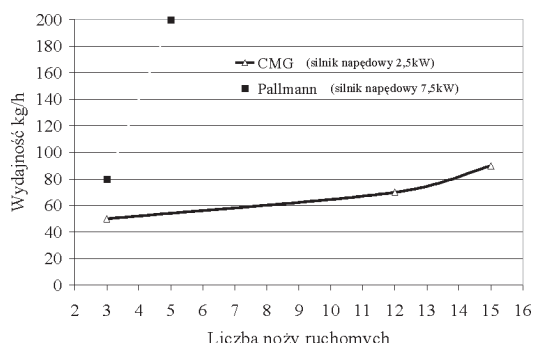
### Wydajność rozdrabniania

Różnice w budowie młynów, w tym konstrukcji wirników, znajdują swoje odzwierciedlenie w wydajności realizowanego procesu, odniesionej do zużycia energii na rozdrobnienie lub do zainstalowanej mocy silnika. Sporządzone na podstawie dostępnych materiałów firmowych zależności graficzne, wskazują na istotny związek pomiędzy wydajnością rozdrabniania a konstrukcją młyna, zwłaszcza wirnika (każdy z producentów posiada własne, oryginalne rozwiązania w tym względzie) (Rys. 5). Należy jednak nadmienić, że podane dane mają charakter poglądowy, gdyż nie uwzględniają rodzaju i postaci wejściowej materiału, a także możliwości do uzyskania stopnia rozdrobnienia.



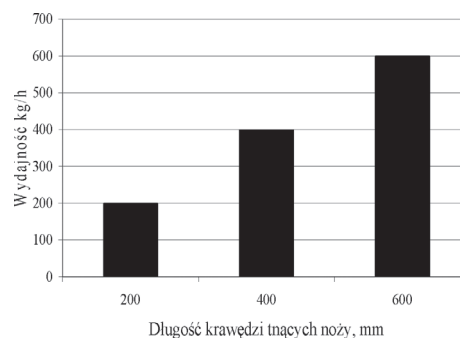
Rys. 5. Przykładowe zależności pomiędzy wydajnością rozdrabniania a zainstalowaną mocą silnika napędzającego wirnik

Przy niewystarczającym poziomie, zawartych w materiałach firmowych, informacji szczegółowych, trudno jest analizować w sposób dokładny przyjęte rozwiązania ze względu na kryterium efektywności. W przypadku dezintegratorów nozowych o wydajności do 500 kg·h<sup>-1</sup>, najczęściej spotykanym rozwiązaniem jest montowanie na wirniku od 3 do 5 noży ruchomych (rozwiązania dotyczące litej krawędzi tnącej na całej szerokości wirnika), które oddziałują na rozdrabniany materiał z 2 przeciwnożami, montowanymi w obudowie młyna. Wydaje się, że są to relacje optymalne ze względu na zastosowanie tego typu maszyn głównie w miejscu generowania odpadów technologicznych przy stanowiskach produkcyjnych. W przypadku młynów o opisanej wyżej konstrukcji, wzrost ilości noży powoduje zwiększenie wydajności rozdrabniania (rys. 6). Tego typu informacje są jednak zamieszczane bardzo rzadko, zwykle w bardzo ubogiej pod względem informatywności formie, w tym przypadku zostały zamieszczone w odniesieniu do młynów o mocy silnika 2,2 kW (CMG Granulatori) oraz 7,5 kW (Pallmann).



Rys. 6. Zależność wydajności rozdrabniania od ilości noży ruchomych

Większa ilość noży ruchomych generuje wzrost ilości przecięć materiału znajdującego się w komorze roboczej młyna, co w konsekwencji powoduje szybsze jego rozdrobnienie do wielkości uziarnienia, pozwalającej na przejście recyklatów przez sita. Z tego punktu widzenia interesujące wydaje się odniesienie wydajności procesu rozdrabniania do długości krawędzi tnących noży oddziałujących na materiał. Zakładając stałą moc napędową silnika dla wszystkich rozpatrywanych przypadków, można zaobserwować wzrost efektywności procesu roz-



Rys. 7. Zależność wydajności rozdrabniania od długości krawędzi tnących noży (sporządzono na podstawie danych firmy Müller)

drabniania wraz ze wzrostem czynnej długości krawędzi tnącej, przy czym wydajność procesu rośnie proporcjonalnie do zmian długości krawędzi noży (Rys. 7)

### Podsumowanie

Do rozdrabniania tworzyw polimerowych stosuje się noże o pochylonych, w stosunku do osi wirnika, krawędziach tnących, a przyjęte rozwiązania są ściśle skorelowane z przeznaczeniem młyna nożowego. Przyjęcie takiego rozwiązania sprzyja większej równomierności rozdrabniania materiału, zwłaszcza w przypadku odpadów o znacznej grubości ścianki.

Jedną z zaobserwowanych tendencji rozwojowych jest ograniczanie prędkości obrotowych wirnika, co generuje mniejszą liczbę frakcji pylistych i zmniejsza opory powietrza podczas obrotu wirnika. Jednak obniżenie prędkości obwodowej noży ruchomych zmniejsza wydajność rozdrabniania (mniejsza liczba przecięć materiału w określonym czasie) i jest zalecane w przypadku rozdrabniania zgrubnego, szczególnie wytworów wielkogabarytowych o małej grubości ścianki (np. dla wyprasek o znacznej objętości w stosunku do masy). Warto jednocześnie podkreślić, że w proponowanych rozwiązaniach młynów nożowych, rozdrabnianie materiału polimerowego odbywa się przy stałej prędkości obrotowej wirnika.

W dostępnych materiałach źródłowych brakuje podstawowych informacji dotyczących geometrii i trwałości noży tnących oraz rodzaju materiałów, z których wykonuje się najważniejsze elementy konstrukcyjne młyna. Informacje dotyczące wydajności w odniesieniu do zainstalowanej mocy silników podawane są wybiórczo jedynie dla określonego typoszeregu młynów, z dużym zakresem tolerancji, bez uwzględnienia właściwości rozdrabnianych materiałów i wielkości użytych do ich rozdrobnienia sit. Przeprowadzone w tym zakresie badania wskazują na istotną zależność pomiędzy wielkością otworów sitowych i powierzchnią sit na wydajność rozdrabniania [16].

### LITERATURA

- [1] W. Bauer, D. Wüstenberg: Chem. Eng. & Technol. **25**, nr 11, (2002).
- [2] W. Bauer: Untersuchung des Einzelzylinderkleinerungsvorganges in Schneidmühlen am Beispiel von Polypropylen. Verfahrenstechnik, Reihe 3, VDI Verlag, Düsseldorf 2001.
- [3] J. Flizikowski: Rozdrabnianie tworzyw sztucznych. Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1998.
- [4] R. Konieczka: Kunststoffe, **79**, nr 7, (1989).
- [5] D. Sykutera: Recykulacja w Budowie Maszyn – praca zbiorowa pod redakcją J. Flizikowskiego, rozdział IV, BTN, Bydgoszcz 2001.
- [6] D. Sykutera: Inż. i Ap. Chem. **45**, nr 3s, 76 (2006)
- [7] Materiały firmy TRIA (03.2009).
- [8] Materiały firmy FOLCIERI (03.2009).
- [9] Materiały firmy WEIMA (03.2009)
- [10] Materiały firmy RAPID (2007)
- [11] Materiały firmy WANNER (2007)
- [12] Materiały firmy MUELLER (03.2009)
- [13] Materiały firmy ZERMA (03.2009)
- [14] Materiały firmy AVIAN GRANULATOR (03.2009)
- [15] Materiały firmy CMG (03.2009)
- [16] D. Sykutera: Mechanika 50. Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz 2001.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy 4422/B/T02/2009/36.