

JÓZEF FLIZIKOWSKI^{*)}, MAREK MACKO^{**)}

Metodyka oceny sprawności *quasi-ścianania* recyklatów rur opto-telekomunikacyjnych

METHOD OF ESTIMATION OF EFFICIENCY OF *QUASI-CUTTING* OF RECYCLED OPTO-TELECOMMUNICATION PIPES

Summary — The original method of investigation of efficiency of *quasi-cutting* of thermoplastic pipes materials (especially recycled materials from opto-telecommunication pipes) is presented. Investigations of mechanical properties, simulations of powers and sections of *quasi-cutting* as well as investigations of grinding process in the machine conditions have been done. General models of the process efficiency based on application of the grinding product processability are presented. An assumption has been made that input energy of the process (including grinding) is the sum of the energies present in plastic material and delivered to it. In the case of assumptions made and factors taken, the solution of this constructional task was to obtain the value of energy-effectiveness factor of plastics grinding, going to maximum (equation [11]). The model was verified experimentally in strength machine, as a simulation of powers and sections, physical investigations of 3-disc milling sizes. Analysis of results obtained made selection of construction features of *quasi-cutting* set, with the aim to maximize the efficiency, possible. The 3-disc set let break up the pipe pieces (from recycling process) of diameter above 50 mm and to 6 mm thick; power installed is 7.5 kW. Double increase of energy efficiency of the grinding process of recycled pipes material has been reached (from 4.2% to 8.5%) as well as high — up to 120 — degree of grinding (as an average dimensions — before and after — ratio) and significant (more than 80%) part of the product has been suitable for the next processing (average dimension of particles: 4.60 mm).

Key words: energy efficiency, *quasi-cutting* of plastic materials, methods of *quasi-cutting* characteristics, grinding of recycled materials.

Istnieje wiele interesujących metod badania sprawności procesów przetwórstwa tworzyw [1—5], większość z nich obejmuje zagadnienia energetyczne i materiałowe. W niniejszej pracy zaproponowaliśmy metodykę badań sprawności *quasi-ścianania* opto-telekomunikacyjnych rur z recyklatów. Na podstawie modelu dekohezji opartego na procesie rozdrabniania wielootworowego [6—8] rozpatrzyliśmy zakres zmienności oporów w funkcji przemieszczenia elementów zespołu *quasi-ścianającego*; badania przeprowadzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej zawierającej (własnej konstrukcji) zespół listwowy z otworami. Próbkę do badań w maszynie wytrzymałościowej otrzymywano rozdrab-

nając rury opto-telekomunikacyjne w rozdrabniaczu trójtarczowym. Badania te stanowiły kontynuację pracy przedstawionej w [9].

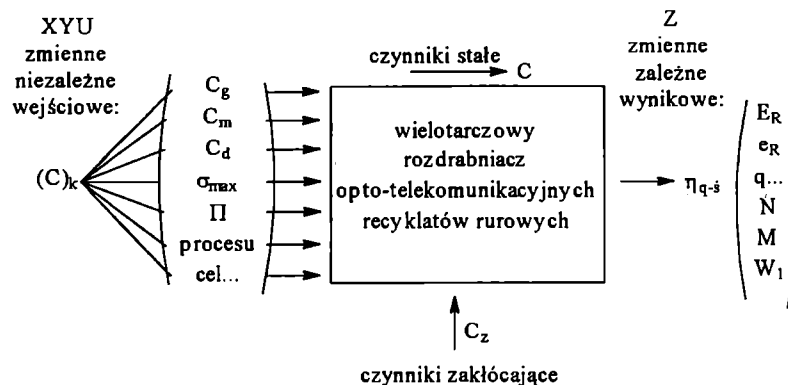
CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Metodyka badań

W badaniach *quasi-ścianających* zwrócono uwagę na zakres odkształceń i naprężeń elementów rurowych. Specyficzna postać przekroju rur opto-telekomunikacyjnych powoduje duże odkształcenia postaciowe w badanych próbkach. W badaniach sprawności występuje (w odniesieniu do konstrukcji maszyny) dodatkowe zagadnienie do rozwiązania, polegające na chwilowej zamianie wsadu — nośnika energetycznego, w element przetwarzany. Zamiana ta jest związana z podstawowymi celami rozdrabniania: przeniesieniem obciążeń rozdrabniania przez materiał rozdrabniany (tworzywo-wsad)

*) Akademia Techniczno-Rolnicza, Wydział Mechaniczny, Katedra Maszyn Spożywczych i Ochrony Środowiska, ul. Prof. Kaliskiego 7, 85-763 Bydgoszcz.

**) Akademia Bydgoska im. Kazimierza Wielkiego, Wydział Matematyki, Techniki i Nauk Przyrodniczych, Instytut Techniki, ul. Chodkiewicza 30, 85-064 Bydgoszcz.



Schemat 1. Wskaźniki zmiennych, stałych i zakłóceń rozdrabniania tworzyw (objaśnienia w tekście)

Scheme 1. Variables, constants and disturbance coefficients of plastics grinding (explanations in the text)

oraz utrzymaniem, a nawet polepszeniem jego właściwości przetwórczych i konstrukcyjnych.

W budowie i eksploatacji maszyn od niedawna zwraca się uwagę na proekologiczne cele przetwórstwa. Planując nasze doświadczenia zdefiniowaliśmy następujące zbiory (schemat 1):

— zbiór zmiennych niezależnych jako:

$$X, \{x_1, x_2, \dots, x_i\}, \{x_k: k = 1, 2, \dots, i\}, \{x_k\} \quad (1)$$

$$Y, \{y_1, y_2, \dots, y_i\}, \{y_k: k = 1, 2, \dots, i\}, \{y_k\} \quad (2)$$

$$U, \{u_1, u_2, \dots, u_i\}, \{u_k: k = 1, 2, \dots, i\}, \{u_k\} \quad (3)$$

gdzie: X — zbiór cech konstrukcyjnych zespołu rozdrabniającego MR i jego modelu wytrzymałościowego W_z ; Y — zbiór cech konstrukcyjnych zespołu napędowego N; U — zbiór relacji w złożonym układzie technicznym U;

— zbiór zmiennych zależnych (związanych z funkcją celu) jako:

$$Z, \{z_1, z_2, \dots, z_w\}, \{z_p: p = 1, 2, \dots, w\}, \{z_p\} \quad (4)$$

gdzie: Z — zbiór zmiennych zależnych związanych z wartością przetwórczą (użytecznością) recyklatów; w — liczba możliwych odpowiedzi — wskaźników stanów jakości i przemian rozdrabniacza — na kombinatoryczny układ zmiennych niezależnych;

— zbiór stałych jako:

$$C, \{c_1, c_2, \dots, c_s\} \quad (5)$$

gdzie: C — zbiór stałych opisujący wybrane właściwości rozdrabnianego tworzywa, procesu, pomiaru i otoczenia.

Wśród zmiennych niezależnych wyróżniono do sterowania:

1. Cechy procesu T_r (czyli ruchu elementów rozdrabniających), warunkujące rozdrabnianie i poziom zużycia energii

[prędkość obrotowa n , kątowa ω_R , liniowa v_R elementu rozdrabniającego (w zakresie od $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ do $4,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), zdefiniowane jako wielkości fizyczne charakteryzujące odpowiednio ruch obrotowy, kątowy i liniowy elementu rozdrabniającego w procesie rozdrabniania wielotarczowego].

2. Wytrzymałość tworzywa rozdrabnianego W_z , wywołującą opór określany za pomocą prób wytrzymałościowych w warunkach modelowych σ_{max}

(naprężenia quasi-ścinające jako wartość liczbowa ilorazu siły występującej podczas trwałego rozdzielania tworzywa i obliczonego przekroju rozdrabniania).

3. Konstrukcję C_k (C_g, C_m, C_d) jako opisany matematycznie układ stanów i struktur zespołu rozdrabniającego oraz jego modeli fizycznych C_g, C_m, C_d (schemat 1):

— szczelina s między poszczególnymi tarczami z pakietu tarcz elementu roboczego wielotarczowego rozdrabniacza, w mm,

— liczba rzędów otworów w tarczy (l. rz.),

— liczba otworów w tarczy (l. ot.),

— liczba tarcz (l. t.),

— powierzchnia zasilająca rozdrabniacz F_z , w m^2 .

Jako zmienne zależne przyjęto:

wskaźniki zmiennych materiału (wsadu, produktu i ich relacji):

— d_o — średni wymiar wsadu tworzyw przed rozdrobnieniem, w mm,

— d_k — średni wymiar granulatu (cząstek) po rozdrobnieniu, w mm,

— d_z — zredukowana średnica granulatu (odpowiada średnicy kuli, o objętości ziarna), w mm,

— $f > 5,5$ — frakcja granulatu o wymiarze większym od 5,5 mm,

— $3,5 < f < 5,5$ — frakcja granulatu o wymiarze zawartym między 3,5 i 5,5 mm,

— $f < 3,5$ — frakcja granulatu o wymiarze mniejszym od 3,5 mm

oraz wskaźniki zmiennych procesu T_r :

— ω_1 — prędkość kątowa wału wejściowego przekładni, w $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$,

— ω_2 — prędkość kątowa wału wyjściowego przekładni, w $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$,

— M_1 — moment obrotowy na wale wejściowym przekładni, w $\text{N} \cdot \text{m}$,

— M_2 — moment obrotowy na wale wyjściowym przekładni, w $\text{N} \cdot \text{m}$,

— η_s — sprawność silnika,

— η_p — sprawność przekładni.

Model

Energochłonność rozdrabniania obliczano na podstawie wzoru:

$$E_R = \frac{P_R v_R t}{\eta_s \eta_p} \quad (6)$$

gdzie: E_R — energochłonność rozdrabniania maszynowego, kJ ; P_R — obciążenie tworzywa siłą rozdrabniającą, N ; v_R — prędkość (liniowa krawędzi) rozdrabniania, $m \cdot s^{-1}$; t — czas trwania cyklu dezintegracji tworzywa, s ; η_s , η_p — odpowiednio, sprawność silnika i przekładni.

Zależność ta, podobnie jak inne spotykane dotychczas w literaturze, nie uwzględnia specyfiki rozdrabniania w przypadku recyklingu, wynikającej z dążenia do zwiększenia krotności stosowania tworzyw.

W odniesieniu do sprawności quasi-ścinań rurowych recyklatów tworzyw termoplastycznych zastosowano oryginalną analizę efektywnościowo-sprawnościową, polegającą na wykorzystaniu podatności produktu rozdrabniania na dalsze przetwórstwo [10–13]. Analizę prowadzi się na dwóch poziomach: ogólnym i przedmiotowym. Pierwszy z nich polega na wyznaczeniu efektywności rozdrabniania na drodze quasi-ścinań w stosunku do ogólnie przyjętych technik rozdrabniania, zaś drugi — na ciągłym sprawdzaniu wpływu warunków quasi-ścinań w poszukiwaniu maksimum oraz minimum siły dezintegracji lub punktów przegięcia na wykresie.

W przypadku analizy efektywności ogólnej rozdrabniania korzystano z modelu [6, 7, 13]:

$$e_r = \frac{(\eta_{q-s} - \eta_0) \cdot E_{brutto} \cdot \eta_s \cdot \eta_p}{(k_j \cdot v_r + \tau_{q-s} \cdot F_{q-s} + \varepsilon \cdot F_{q-s} \cdot v_r^2) \cdot M_k \cdot v_r \cdot t} \quad (7)$$

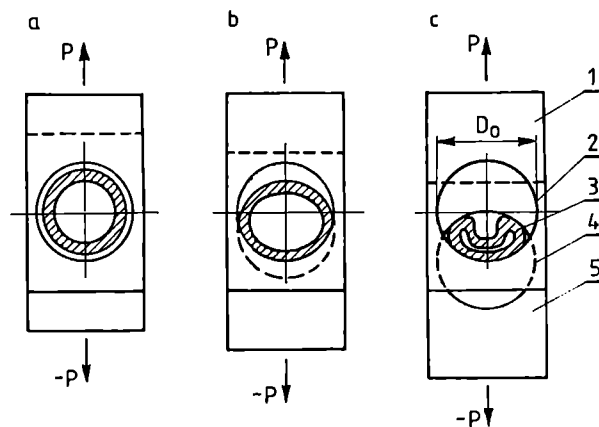
a w przypadku analizy szczególnej — mającej na celu modernizację i rozwój konstrukcyjny rozdrabniaczy wielotarczowych i wielobębnowych działających na zasadzie quasi-ścinań — korzystano z modelu przedstawiającego zależność przedmiotową [11, 12, 14]:

$$e_r = \frac{\eta_{q-s} \cdot E_{brutto} \cdot \eta_s \cdot \eta_p}{(k_j \cdot v_r + \tau_{q-s} \cdot F_{q-s} + \varepsilon \cdot F_{q-s} \cdot v_r^2) \cdot M_k \cdot v_r \cdot t} \quad (8)$$

gdzie: E_{brutto} — energia zawarta w przetwarzanym tworzywie, $MJ \cdot kg^{-1}$; k_j — współczynnik oporów ruchu jałowego, $kg \cdot s$; τ_{q-s} — naprężenia quasi-ścinań, $N \cdot m^2$; F_{q-s} — chwilowe pole przekroju quasi-ścinań (pierścieni o zmiennej postaci — rys. 1), m^2 ; ε — współczynnik proporcjonalności, $N \cdot s^2 \cdot m^{-4}$; M_k — stosunek masy rozpatrywanej próbki do jednostki masy — $1 kg$; η_{q-s} — sprawność materiałowa [6] procesu przetwórstwa termodynamicznego produktu quasi-ścinań:

$$\eta_{q-s} = \frac{T'_{wy/q-s}}{T'_{we/q-s}} \quad (9)$$

$T'_{wy/q-s}$ — masa tworzywa wyjściowego po quasi-ścianiu, kg ; $T'_{we/q-s}$ — masa tworzywa wejściowego do quasi-ścinań,



Rys. 1. Model odkształceń próbki o przekroju pierścieniowym: a — faza pierwsza, b — faza przejściowa — intensywne odkształcenie, c — trzecia, końcowa faza quasi-ścinań; $v_r = 0,01 m \cdot s^{-1}$ (poza PVC twardym) [11, 13]. 1 — płaskownik nieruchomy, 2 — zarys otworu w płaskowniku nieruchomym, 3 — badana próbka, 4 — zarys otworu w płaskowniku ruchomym, 5 — płaskownik ruchomy

Fig. 1. Deformations model of pipe's element: a — first phase, b — transient phase—intensive deformation, c — third, final phase of quasi-cutting; $v_r = 0.01 m \cdot s^{-1}$ (except for rigid PVC) [11,13]. 1 — motionless slat, 2 — draft of the hole in motionless slat, 3 — investigated sample, 4 — draft of the hole in movable slat, 5 — movable slat

kg ; η_0 — sprawność materiałowa procesu przetwórstwa bez quasi-ścinań tworzywa:

$$\eta_0 = \frac{T'_{wy}}{T'_{we}} \quad (10)$$

T'_{wy} — masa tworzywa wyjściowego bez quasi-ścinań, kg ;
 T'_{we} — masa tworzywa wejściowego bez quasi-ścinań, kg .

Efektywność energetyczną definiuje się jako:

$$E_c = \frac{L_{oi} - L_{oij}}{L_{oi} + L_{oij}} \quad (11)$$

gdzie: L_{oi} , L_{oij} — kolejne chwilowe przyrosty pracy quasi-ścinań, $N \cdot m$.

Opisy matematyczne zmiennych podanych w równaniach od (7) do (11) uzyskuje się z doświadczeń lub z danych zawartych w tabelach przetwórstwa.

Następujące charakterystyki silników i przekładni wyznacza się w badaniach eksploatacyjnych:

— przełożenie kinematyczne przekładni:

$$i_k = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (12)$$

— przełożenie dynamiczne:

$$i_d = \frac{M_2}{M_1} \quad (13)$$

— moc na wejściu przekładni równą mocy na wyjściu silnika:

$$N_1 = N_s = \omega_1 \cdot M_1 \quad (14)$$

— moc na wyjściu przekładni równą mocy na rozdrabnianie:

$$N_2 = N_R = \omega_2 \cdot M_2 \quad (15)$$

— sprawność silnika:

$$\eta_s = \frac{N_1}{N_E} = \frac{\omega_1 \cdot M_1}{N_E} \quad (16)$$

— sprawność przekładni:

$$\eta_p = \frac{N_2}{N_1} = \frac{\omega_2 \cdot M_2}{\omega_1 \cdot M_1} \quad (17)$$

— sprawność procesu rozdrabniania:

$$\eta_r = \frac{E_{m/q-s}}{E_r} \quad (18)$$

gdzie: $E_{m/q-s}$ — jednostkowe zużycie energii na quasi-ściananie w warunkach modelu fizycznego do zdefiniowanej postaci produktu rozdrabniania, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; E_r — jednostkowe zużycie energii na quasi-ściananie w warunkach maszynowych, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; N_E — moc elektryczna dostarczana do silnika, W .

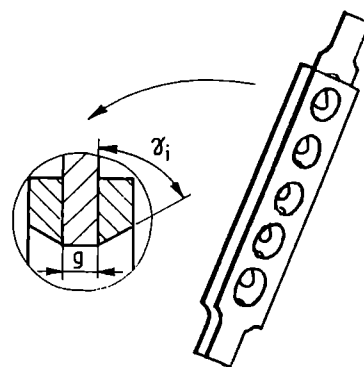
Podobnie wyznacza się sprawność energetyczną przetwórstwa. Energia wejściowa procesu przetwórstwa E_{we} jest sumą energii zawartej w tworzywie wśadowym E_{we1} i energii do niego doprowadzonej E_{we2} ($E_{we} = E_{we1} + E_{we2}$) [1, 2]. Energia na wyjściu procesu E_{wy} jest pomniejszona o straty energetyczne E_{st} :

$$\eta_{ep} = \frac{E_{wy}}{E_{we}} = \frac{E_{we} - E_{st}}{E_{we1} + E_{we2}} = \frac{E_{we1} + E_{we2} - E_{st}}{E_{we1} + E_{we2}} \quad (19)$$

W przypadku sprawności przetwórstwa ważne są wartości chwilowe oraz występujące w dłuższym czasie. Średnią wartość sprawności energetycznej (czyli sprawność energetyczną średnią) nazywa się niekiedy w literaturze [1, 2] sprawnością energetyczną, ale ma to uzasadnienie tylko wówczas, gdy obie sprawności są sobie równe, np. w przypadku wytłaczania autotermicznego.

Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze zaprojektowano i wykonano w celu wyznaczenia sił i naprężeń quasi-ścianania. Quasi-ścianające urządzenie robocze przyrządu wytrzymałościowego do badań zjawisk rozdrabniania elementów i materiałów konstrukcyjnych PRR-5QS stanowi komplet trzech płaskowników z otworami przesuwającymi się względem siebie. Otwory we wszystkich płaskownikach kompletu zostały wykonane w takiej samej odległości od siebie; mają one średnice odpowiadające postaci konstrukcyjnej badanego elementu rozdrabnianych materiałów. Wszystkie otwory w płaskowniku środkowym są cylindryczne, natomiast w płaskownikach zewnętrznych wykonano otwory wg



Rys. 2. Widok płaskowników z otworami do quasi-ścianania próbek rur tworzywowych; g — grubość płaskownika
Fig. 2. View of slats with holes for quasi-cutting of plastic materials; g — slat thickness

wymagań badawczych, np. cylindryczne lub stożkowe o kątach γ_i . Widok przyrządu quasi-ścianającego przedstawia rys. 2.

Próbki tworzywa (materiału przetwarzanego) rozdrabniano na krawędziach otworów; jednocześnie rozdrabniano większą liczbę próbek danego typu, dzięki czemu uzyskiwano efekt ujednorodnienia i dodatkowo czytelną rejestrację wartości sił. W ten sposób powstaje fizyczny model analizy obciążeń i odkształceń w rzeczywistych warunkach rozdrabniania przy użyciu urządzenia o modelowanej konstrukcji zespołu rozdrabniającego. Zaproponowane urządzenie może być stosowane w budowie i eksploatacji rozdrabniaczy różnych tworzyw.

Analizie wytrzymałościowej podlegają chwilowe opory quasi-ścianania w funkcji przemieszczenia płaskowników. Chwilowe wartości sił mierzy układ pomiarowo-kontrolny współdziałający z maszyną wytrzymałościową "Instron 8501". Dane te w postaci tekstowej podlegają obróbce statystycznej przy użyciu arkusza kalkulacyjnego Excel. Do obliczeń naprężeń quasi-ścianania wykorzystano zależności sił działających na tworzywo podczas trwałego rozdzielania tworzywa od obliczonych pól przekrojów rozdrabnianej próbki.

Plan doświadczenia

Program badań został zaplanowany na podstawie kompletnego planu statycznego, zdeterminowanego PS/DK [15]. Kompletny program składa się z trzech etapów:

- badania wytrzymałościowe (plan 1),
- symulacja sił, przekrojów i charakterystyk użytkowych quasi-ścianania (plan 2),
- badania eksploatacyjne rozdrabniacza trójtarczowego (plan 3).

Do badań wytrzymałościowych przygotowano próbki rur z tworzyw termoplastycznych scharakteryzowane w tab. 1 i na rys. 3.

Wybrane czynniki stałe i zmienne dotyczące planów

Tabela 1. Materiał do badań quasi-ścianania — rury tworzyw termoplastycznych [zbiór C z równ. (5)]

T a b l e 1. Quasi-cutting material examined: thermoplastic pipes [C from eqn. (5)]

Próbka nr:	Tworzywo ¹⁾	Średnica zewn., D_z , mm	Grubość ścianki, g , mm	Długość, l ²⁾ , m
1	PVC-n	15	1,57	2
2	PVC-n	20	1,52	2
3	PVC-n	25	1,60	6
4	PVC-n	40	2,00	6
6	PP-n	20	1,9	2
7	PP-n	20	3,4	2
8	PVC-r	50	1,8	1,1
9	PVC-r	32	1,6	1,3
10	PE-LD-n	20	2,0	1,5
11	PE-LD-n	25	2,7	1,5
12	PE-LD-n	32	3,4	1,5
13	PE-LD-n	40	4,3	1,5
14	PE-LD-n	50	5,4	1,5
15	PE-HD-r	32	2,9	0,0
16	PE-HD-r	40	4,0	0,8
17	PP-n	32	1,8	1,5

¹⁾ Recyklaty — r, rury nowe — n.

²⁾ Tabela dotyczy rozdrabniacza, w którym próbki stanowiły rury.

Plan 2

Czynniki stałe:

właściwości materiałowe tworzyw

Czynniki zmienne:

relacje geometryczne wymiarów układu badawczego (tu — rozdrabniacza z przekładnią) i badanych próbek

Plan 3

Czynniki stałe:

właściwości materiałowe i cechy geometryczne tworzyw

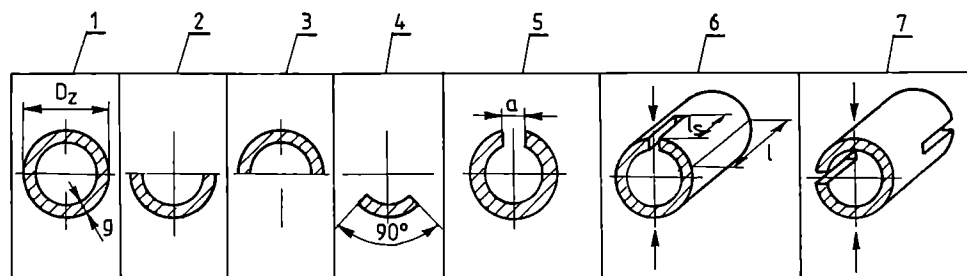
długość badanych rur: $l = (0,8—6)$ m

Czynniki zmienne:

prędkość obrotowa tarcz z otworami: $n = (15—18,86)$ s⁻¹

moment obrotowy na wale wejściowym: $M = (16—20)$ N · m

Realizacja badań przebiegała wg planu z równoległym zapisem danych (w układzie siła-przemieszczenie) oraz rejestracją warunków pomiarów w karcie badań.



Rys. 3. Postać próbki i sposób ustawienia jej w przyrządzie: 1 — próbka o przekroju rurowym, 2, 3 — próbki o przekroju półkowkowym, 4 — próbka o przekroju ćwiartkowym, 5 — próbka ze szczeliną wykonaną na całej długości, 6, 7 — próbki ze szczeliną długości l .

Fig. 3. Form of sample and the way of setting it up in a device, 1 — sample of whole pipe section, 2,3 — samples of half pipe section, 4 — sample of quarter pipe section, 5 — sample with crevice executed on all lengths, 6,7 — samples with crevice along length l .

1, 2, 3 przedstawiono poniżej (dotyczy badań w maszynie wytrzymałościowej):

Plan 1

Czynniki stałe:

właściwości materiałowe tworzyw przed i po próbie quasi-ścianania

długość badanej próbki: $l = 50$ mm

Czynniki zmienne:

średnice otworów w płaskownikach: $D_o = 50$ mm

grubość płaskowników: $g = 10$ mm

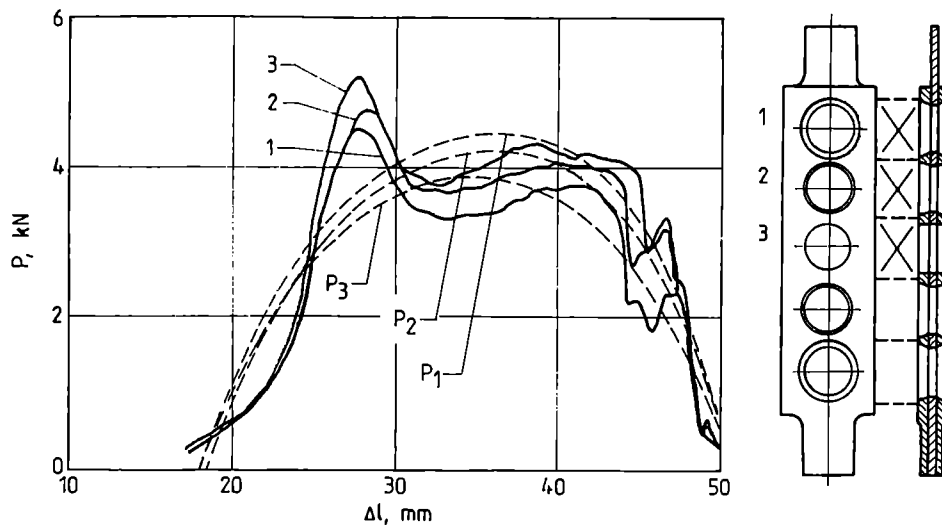
prędkość względna płaskowników: $v_r = 2, 10, 30, 50$ mm · s⁻¹

kąt krawędzi ostrza: $\gamma_i = 60, 75, 90, 105, 120^\circ$

WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

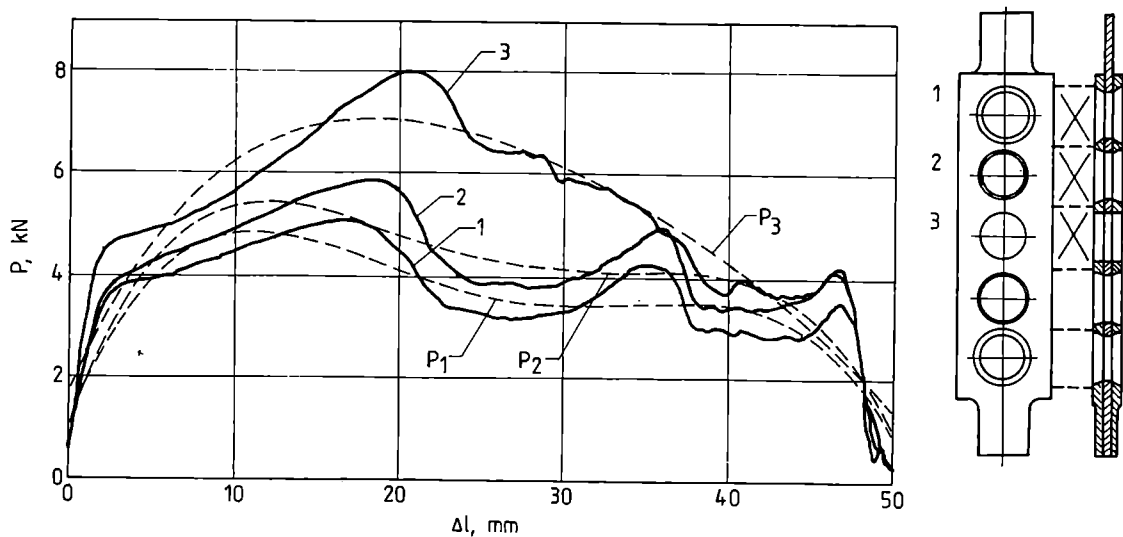
Analizę statystyczną badań przeprowadzono wykorzystując standardowe procedury statystyki matematycznej takie jak Statgraphics, Graphpad, Statistica oraz nowoczesne arkusze kalkulacyjne takie jak Excel, QuatroPro. W wyniku tej analizy zarejestrowano wartości średnie, odchylenia standardowe, postaci regresji prostoliniowej oraz współczynniki korelacji i determinacji.

Analiza wyników uwzględnia zarówno aspekt statystyczny, umożliwiający otrzymanie funkcji opisującej obiekt badań, czyli uzyskanie określonej zależności aproksymującej wyniki badań, jak i merytoryczny, mający na celu przekształcenie wspomnianej funkcji w jej model matematyczny.



Rys. 4. Przebieg sił P quasi-ścinania w funkcji przemieszczenia płaskowników Δl odpowiadający różnym wartościom kąta ostrza γ : 1 — 60° , otwór 1, 2 — 75° , otwór 2, 3 — 90° , otwór 3. Tworzywo: rura PVC, średnica zewn. $D_z = 25$ mm, grubość ścianki $g = 1,6$ mm; prędkość względna płaskowników: $v_r = 2$ mm \cdot s $^{-1}$; $P_1 = f(\Delta l)$, $P_2 = f(\Delta l)$, $P_3 = f(\Delta l)$ — równania regresji nieliniowej czwartego stopnia: $P_1 = -0,00001 \cdot l^4 + 0,0014 \cdot l^3 - 0,0847 \cdot l^2 + 2,4357 \cdot l - 23,674$, $R^2 = 0,8452$; (kąt ostrza $\gamma = 60^\circ$); $P_2 = -0,00002 \cdot l^4 + 0,0026 \cdot l^3 - 0,141 \cdot l^2 + 3,6247 \cdot l - 33,092$; $R^2 = 0,8568$; (kąt ostrza $\gamma = 75^\circ$); $P_3 = -0,00002 \cdot l^4 + 0,0033 \cdot l^3 - 0,1707 \cdot l^2 + 4,235 \cdot l - 37,465$; $R^2 = 0,8397$ (kąt ostrza $\gamma = 90^\circ$)

Fig. 4. Curves of quasi-cutting powers P as functions of slats dislocation Δl for different values of blade angle γ : 1 — 60° , hole 1, 2 — 75° , hole 2, 3 — 90° , hole 3. Material: PVC pipe, outer diameter $D_z = 25$ mm, thickness of pipe wall $g = 1.6$ mm; relative velocity of salts $v_r = 2$ mm \cdot s $^{-1}$. $P_1 = f(\Delta l)$, $P_2 = f(\Delta l)$, $P_3 = f(\Delta l)$ — equations of non-linear regression of fourth degree: $P_1 = -0.00001 \cdot l^4 + 0.0014 \cdot l^3 - 0.0847 \cdot l^2 + 2.4357 \cdot l - 23.674$; $R^2 = 0.8452$ ($\gamma = 60^\circ$); $P_2 = -0.00002 \cdot l^4 + 0.0026 \cdot l^3 - 0.141 \cdot l^2 + 3.6247 \cdot l - 33.092$; $R^2 = 0.8568$ ($\gamma = 75^\circ$); $P_3 = -0.00002 \cdot l^4 + 0.0033 \cdot l^3 - 0.1707 \cdot l^2 + 4.235 \cdot l - 37.465$; $R^2 = 0.8397$ ($\gamma = 90^\circ$)



Rys. 5. Przebiegi sił quasi-ścinania w funkcji przemieszczenia płaskowników Δl odpowiadające różnym wartościom kąta ostrza: 1 — 60° , otwór 1, 2 — 75° , otwór 2, 3 — 90° , otwór 3. Tworzywo: rura PVC, średnica zewn. $D_z = 50$ mm, grubość ścianki $g = 1,8$ mm; prędkość względna płaskowników: $v_r = 2$ mm \cdot s $^{-1}$; $P_1 = f(\Delta l)$, $P_2 = f(\Delta l)$, $P_3 = f(\Delta l)$ — równania regresji nieliniowej czwartego stopnia: $P_1 = -0,00002 \cdot l^4 + 0,0018 \cdot l^3 - 0,064 \cdot l^2 + 0,8663 \cdot l + 1,0026$, $R^2 = 0,8231$ (kąt ostrza $\gamma = 60^\circ$); $P_2 = -0,00002 \cdot l^4 + 0,0019 \cdot l^3 - 0,0687 \cdot l^2 + 0,9645 \cdot l + 0,9371$, $R^2 = 0,8189$ (kąt ostrza $\gamma = 75^\circ$); $P_3 = -0,000005 \cdot l^4 + 0,0006 \cdot l^3 - 0,034 \cdot l^2 + 0,7384 \cdot l + 1,7276$, $R^2 = 0,8836$ (kąt ostrza $\gamma = 90^\circ$)

Fig. 5. Curves of quasi-cutting powers P as functions of slats dislocation Δl for different values of blade angle γ : 1 — 60° , hole 1, 2 — 75° , hole 2, 3 — 90° , hole 3. Material: PVC pipe, outer diameter $D_z = 50$ mm, thickness of pipe wall $g = 1.8$ mm; relative velocity of salts $v_r = 2$ mm \cdot s $^{-1}$. $P_1 = f(\Delta l)$, $P_2 = f(\Delta l)$, $P_3 = f(\Delta l)$ — equations of non-linear regression of fourth degree: $P_1 = -0.00002 \cdot l^4 + 0.0018 \cdot l^3 - 0.064 \cdot l^2 + 0.8663 \cdot l + 1.0026$; $R^2 = 0.8231$ ($\gamma = 60^\circ$); $P_2 = -0.00002 \cdot l^4 + 0.0019 \cdot l^3 - 0.0687 \cdot l^2 + 0.9645 \cdot l + 0.9371$; $R^2 = 0.8189$ ($\gamma = 75^\circ$); $P_3 = -0.000005 \cdot l^4 + 0.0006 \cdot l^3 - 0.034 \cdot l^2 + 0.7384 \cdot l + 1.7276$; $R^2 = 0.8836$ ($\gamma = 90^\circ$)

W omawianym przypadku rozwiązanie postawionego zadania konstrukcyjnego polega na uzyskaniu wskaźnika energetycznej efektywności rozdrabniania tworzyw, zmierzającego do maksimum:

$$\{C_k^* \in \Phi\} : \left\{ \bigwedge_{C_k \in \Phi} \eta_{q-s}(C_k) < \eta_{q-s}(C_k^*) \right\} \quad (20)$$

gdzie: C_k^* — poszukiwany zbiór cech konstrukcyjnych rozdrabniacza z punktu widzenia jego maksymalnej sprawności; Φ — obszar dopuszczalny wektora cech konstrukcyjnych C_k .

Rysunki 4 i 5 przedstawiają przykłady przebiegów sił *quasi-ścianania* próbek rurowych z PVC.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Niezbędnym warunkiem zwiększenia sprawności procesu recyklingu tworzyw oraz dalszego jego rozwoju jest opracowanie technologii uzdatniania recyklatów oraz wytwarzania z nich wytworów o zadawalającej jakości. Algorytm postępowania w przypadku projektowania nowych technologii recyklingu powinien uwzględniać aspekt energetyczny na każdym etapie, również na etapie rozdrabniania.

Zaproponowana w niniejszym artykule metodyka badań odpowiada założeniom początkowym. Na każdym z trzech etapów poszukuje się ekstremum funkcji opisującej obiekt badań w rozpatrywanym zakresie parametrów. Zaproponowanie konstrukcji rozdrabniacza o możliwie największej sprawności sprowadza się przede wszystkim do znalezienia właściwej, dopasowanej do danego tworzywa konstrukcji zespołu rozdrabniającego i maszyny umożliwiającej uzyskanie pożądanego produktu oraz do doboru parametrów procesu gwarantujących najmniejsze nakłady energetyczne w połączeniu z racjonalną wydajnością rozdrabniania. Skonstruowany przez nas rozdrabniacz trójtarczowy (RQS-3RR) pozwala na rozdrabnianie rurowych recyklatów o średnicy < 50 mm i grubości ścianki do 6 mm; zainstalowana moc wynosi 7,5 kW.

Nasze badania doprowadziły do rozwiązania konstrukcyjnego zespołu roboczego rozdrabniacza recyklatów rurowych, w którym sprawność energetyczna procesu (8,5%) jest dwukrotnie większa od pierwotnej (4,02%). Pozostałe uzyskiwane wskaźniki są na zadowalającym poziomie: wydajność $180 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, duży stopień rozdrobnienia — do 120 (stosunek średniego wymiaru

przed i po *quasi-ściananiu*) oraz znaczny, przekraczający 80% udział produktu nadającego się do dalszego przetwórstwa (średni wymiar cząstek 4,60 mm).

Praca została wykonana w ramach projektów finansowanych przez KBN (7 T08 027 11 i Projekt Promotorski 7 T08E 008 17)

LITERATURA

1. Sikora R.: *Polimery* 1999, **44**, 95.
2. Sikora J. W.: *Polimery* 1999, **44**, 190.
3. Sikora R.: "Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych", Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
4. Lin J. S., Weng C. I.: *Intern. J. Mach. Tools Manuf.* 1991, **23**, 645.
5. Huang C. C., Fung R. F., Lin J. S.: *J. Sound Vibr.* 1997, **203**, nr 3, 363.
6. Flizikowski J.: "Badania i podstawy konstrukcyjne rozdrabniaczy wielotarczowych", Rozprawy ATR—42, WMN—ATR, Bydgoszcz 1990.
7. Flizikowski J.: *Internationale Zeitschrift für Lebensmittel — Technik ZFL* (1990), **41**, nr 6; nr 7/8 (strony EF S 31—41).
8. Flizikowski J.: *Arch. Bud. Masz.* 1996, **43**, nr 4, 365.
9. Flizikowski J.: *Polimery* 1999, **44**, 397.
10. Flizikowski J., Macko M.: "Technology of milling plastic's refuse by multiple shredder", Materiały z konferencji "Recykling tworzyw sztucznych", Wrocław 1998 (czerwiec 1998), str 59—62.
11. Flizikowski J., Kaźmierczak Z., Macko M.: "Skuteczność wielotarczowego rozdrabniania rurowych recyklatów tworzyw sztucznych", Materiały z konferencji "Stosowanie i przetwórstwo materiałów polimerowych", Częstochowa 1998 (wrzesień 1998), str 65—72.
12. Flizikowski J.: "Rozdrabnianie tworzyw sztucznych", WMN-ATR, Bydgoszcz 1998, str. 373.
13. Macko M.: *Inżynieria Maszyn* 1999, **13**, 297.
14. Flizikowski J.: "Projektowanie środowiskowe maszyn", WMN-ATR Bydgoszcz 1998, str. 339.
15. Polański Z.: "Planowanie doświadczeń w technice", PWN, Warszawa 1984.

Otrzymano 14 I 2000 r.