

EKSPERYMENTALNE BADANIA ROZDRABNIANIA JEDNOKROTNEGO

Streszczenie

Artykuł poświęcony jest zagadnieniom jednokrotnego rozdrabniania materiałów polimerowych. Dokonano w nim przeglądu metod badań procesu rozdrabniania jednokrotnego. Przedstawiono stanowisko badawcze oparte na zmodyfikowanym młocie Charpy'ego. Zrealizowano badania rozdrobnienia próbek polimerowych zwracając szczególną uwagę na przebieg zniszczenia tych próbek oraz niezbędne nakłady energetyczne. Zaprezentowano analizę wpływu kształtu ostrza na przebieg dezintegracji materiałów polimerowych.

WSTĘP

Rozdrabniacze stosowane są w przetwórstwie tworzyw polimerowych i recyklingu pod kątem przygotowania odpowiedniego uziarnienia. Układy rozdrabniające można podzielić ze względu na typ rozwiązania konstrukcyjnego. W praktyce przemysłowej spotykane są rozdrabniacze bijakowe, nożowe, tarczowe, walcowe.

Rozdrabniacze bijakowe charakteryzują się występowaniem bijaków, które uderzają w tworzywo, powodując wstępne rozbijanie. Stopień rozdrobnienia jest wymuszony przez rozmiar otworów sita, przez które materiał przedostaje się po odbiciu od płyt odbojowych. Szczególnie nadają się one do tworzyw o małej udarowości. Dodatkowo umożliwiają rozdrabnianie zabrudzonych materiałów.

Rozdrabniacze nożowe wykorzystują cięcie materiału występujące między ruchomymi nożami rozmieszczonymi na walcu oraz nieruchomymi na obudowie. Znajdują zastosowanie w przetwórstwie tworzyw wykazujących dużą elastyczność.

Układy tarczowe składają się najczęściej z dwóch tarcz, z których jedna jest nieruchoma. Materiał jest dostarczany przez otwór w tej tarczy i przemieszcza się między tarczami ulegając rozdrobnieniu na krawędziach otworów. Wielkość ziaren materiału rozdrobnionego uzyskuje się przez zmianę odległości tarcz. Rozwiązanie tego typu wymaga wstępnej redukcji rozmiaru nadawy odpowiednio do wielkości szczeliny w obszarze zasypu. Wykorzystywane są do rozdrabniania materiałów podatnych na kruszenie.

Konstrukcja urządzeń walcowych oparta jest na dwóch wałkach obracających się w przeciwnych kierunkach, na których osadzone są noże krążkowe lub walce. Wsad zostaje wciągnięty do komory rozdrabniającej.

W praktyce przemysłowej spotykanych jest wiele wariantów rozwiązań konstrukcyjnych rozdrabniaczy, w których wykorzystywane są wzajemne relacje elementów bijakowych, nożowych o specyficznych cechach geometrycznych.

Ze względu na dużą energochłonność procesu rozdrabniania oraz niską sprawność procesu, konieczne staje się lepsze poznanie procesu i modyfikacja cech konstrukcyjnych przestrzeni rozdrabniacza. Poszukiwane są różne metody badań procesu rozdrabniania. Jedną z metod są próby jednokrotnego (o charakterze udarowym) zniszczenia próbki. Do tego celu wykorzystywane są różnorodne układy badawcze z dedykowanym monitorującym torem pomiarowym. Dzięki temu możliwe jest oszacowanie zapotrzebowania energetycznego w zależności od warunków samego procesu oraz w zależności od szczegółowych cech konstrukcyjnych elementów dezintegrujących.

Do prób udarowościowych używa się młotów o stałym lub zmiennym zasobie energii potencjalnej (rys. 1). Ramię wahadła 2 zamocowane jest wahlwie na podstawie 1. Na obrotowej osi

połączonej z wahadłem znajduje się wskazówka 5. Do podstawy przymocowana jest nieruchomo podziałka 4, względem której może przesuwać się wskazówka. Odczyt poziomu energii niezbędnej do dezintegracji odbywa się bezpośrednio z podziałki. Zapadka 7 służy do utrzymywania młota w położeniu początkowym przed wykonaniem próby, a hamulec 6 z pasem blokującym zamocowanym na dźwigni służy do natychmiastowego zatrzymania młota.

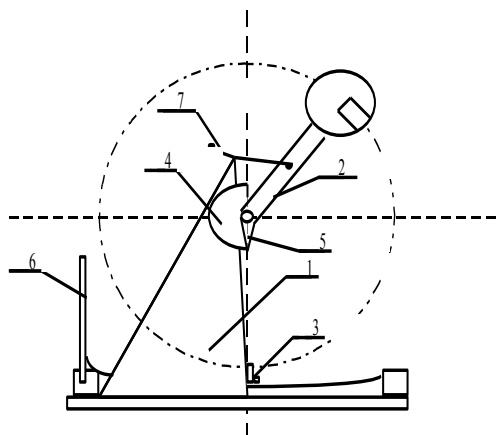
Po zwolnieniu zaczepu wahadło z bijakiem opada z najwyższego położenia określonego kątem α zamieniając swą początkową energię potencjalną K_{\max} na kinetyczną. Uderzając w próbkę w najniższym swym położeniu, młot osiąga maksymalną prędkość:

$$v = \sqrt{2gR(1 - \cos \alpha)}$$

gdzie:

- g – przyspieszenie ziemskie
- R – odległość od osi wahadła do środka próbki
- α – kąt spadania wahadła młota

Po złamaniu próbki, pozostała część energii kinetycznej młota zmienia się w energię potencjalną, której wartość jest proporcjonalna do wysokości, jaką osiągnęło wahadło po przeprowadzeniu próby. Kąt wychylenia wahadła po próbie β określa wskazówka na skali popychana przez zabierak, który obraca się wraz z wahadłem. Za pomocą hamulca zatrzymuje się wahadło po złamaniu próbki.



Rys. 1. Schemat młota Charpy'ego; 1- korpus, 2- ramię wahadła, 3- próbka, 4- skala, 5- wskazówka, 6- hamulec, 7- zapadka.

1. STANOWISKO BADAWCZE

Do eksperymentu wykorzystano stanowisko badawcze opracowane wg własnej koncepcji na bazie zmodyfikowanego młota Charpy'ego (rys. 2). Zastosowano tutaj, poza typowymi elementami młota, dodatkowe instrumentarium umożliwiające monitorowanie próby dezintegracji. Zastosowano ostrza o różnym kształcie (kąty ostrzy: 90°, 80° i 70°). Przebieg procesu niszczenia próbek był rejestrowany przy pomocy kamery posiadającą zdolność rejestracji z rozdzielczością 1200 klatek na sekundę. Ponadto, obserwowano kąt wychylenia wahadła świadczący o zapotrzebowaniu energii na rozdrobnienie.

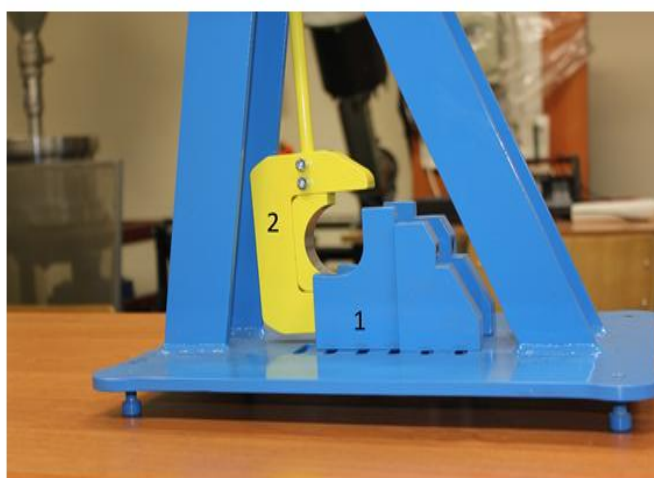
Zaproponowano do badań próbki z następujących materiałów polimerowych z napełniaczami w postaci poroforu:

- 1) polipropylen z zawartością 1% napełniacza, PP1,
- 2) polipropylen z zawartością 2% napełniacza, PP2,
- 3) polistyren z zawartością 4% napełniacza, PS 4,
- 4) polietylen z zawartością 2% napełniacza, PE2.



Rys. 2. Widok zmodernizowanego stanowiska badawczego.

W celu rejestracji momentu obrotowego, jaki występuje podczas przełamania, próbki zamontowano momentomierz podłączony do systemu pomiarowego firmy HBM - Spider 8 (rys.3). Urządzenie to jest uniwersalnym komputerowym systemem pomiarowym firmy Hottinger Baldwin Messtechnik, urządzenie przeznaczone jest do laboratoryjnych pomiarów wielkości mechanicznych, takich jak: ciśnienie, siła, przyspieszenie, odkształcenie mechaniczne, przemieszczenie.



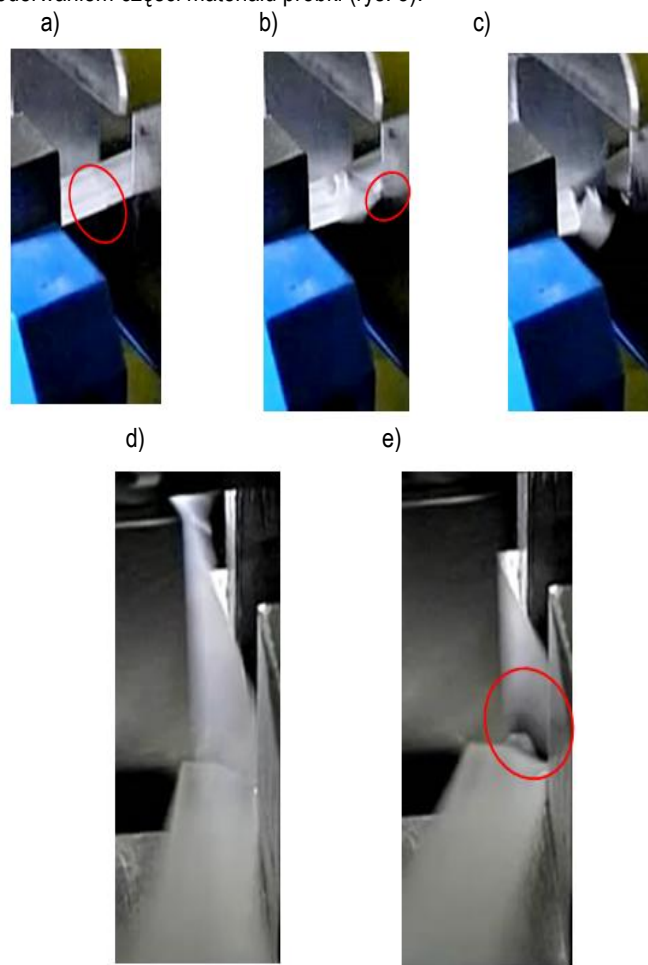
Rys.3. Widok przestrzeni roboczej modyfikowanego młota Charpy'ego; 1 - bijak 2 – gniazdo do umieszczenia próbki.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Badania przeprowadzono wg następującego planu: przygotowano po 10 próbek z każdego materiału, następnie poddano je próbie udarowościowej. Próby te odbywały się na tym samym stanowisku, z taką samą siłą uderzenia bijaka (nie zmieniano jego masy). Wykonano je również przy takich samych ustawieniach parametrów pomiarowych przez moduł Spider 8. Dodatkowo moment dezintegracji rejestrowano przy pomocy kamery rejestrującej obraz z szybkością 1200 klatek na sekundę. W artykule zamieszczono wyniki badań próbek PP1.

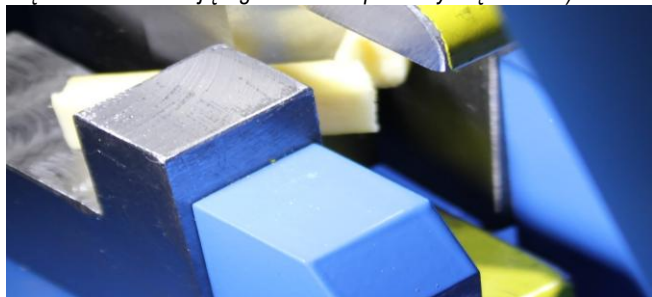
2.1. Badania próbek PP1

Badania zrealizowano dla zmiennych kątów ostrza, w pierwszej próbie dla kąta ostrza 70°. dla W tym przypadku mechanizm dezintegracji próbki polega na zainicjowaniu przełomu w momencie kontaktu z ostrzem. W miarę przesuwania się noża i zwiększania powierzchni przylegania od strony płaszczyzny natarcia, po pierwotnym odkształceniu próbki następuje oderwanie jej o szerokości styku płaszczyzny natarcia z materiałem (rys. 4). Na rysunku można zauważyć, że ugięcie próbki rozchodzi się promieniowo od ostrza. Obszar otoczony na rysunku jest miejscem wystąpienia dodatkowych naprężeń ścinających. Natomiast widok poprzeczny przedstawia obszar największych naprężeń, skutkujący oderwaniem części materiału próbki (rys. 5).



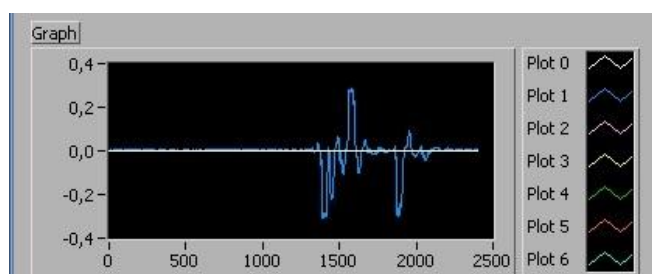
Rys. 4. Przebieg dezintegracji próbki PP1% dla kąta ostrza 70°; a) uderzenie ostrza o materiał i zainicjowanie pęknięcia; b) pęknięcie materiału połączone z wyrwaniem części próbki, na którą działa część płaszczyzny natarcia c) wyrwany fragment próbki; d, e)

widoki w płaszczyźnie poprzecznej (e – zauważalne oderwanie części materiału mającego kontakt z płaszczyzną natarcia).



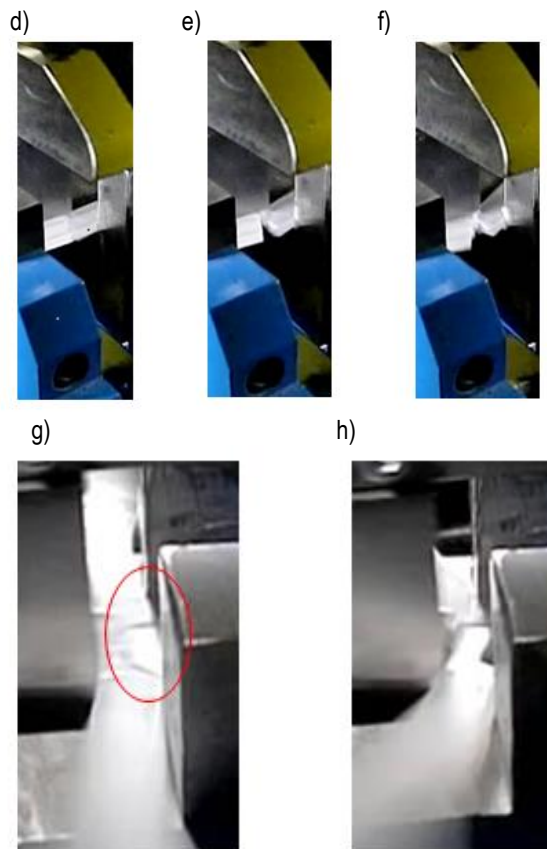
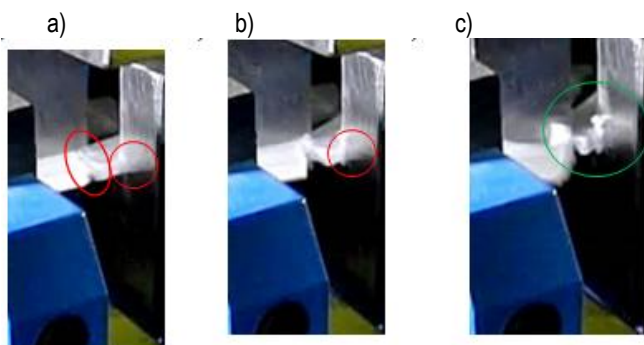
Rys. 5. Widok strefy roboczej – pęknięcie próbki.

Próbę dezintegracji rejestrowano pod kątem przebiegu obciążeń, przy wykorzystaniu zestawu pomiarowego HBM. Przebieg obciążeń przedstawiono na rys. 6. Charakterystyczny kształt wskazuje na krótkotrwały impuls – ok. 15 ms, podczas którego następuje gwałtowny wzrost obciążeń aż do momentu pojawienia się pierwszego pęknięcia.



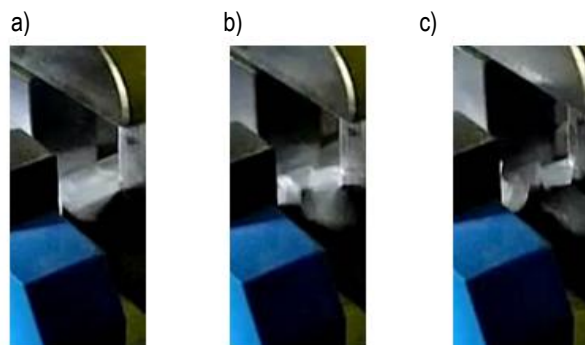
Rys. 6. Przebieg obciążeń podczas próby złamania próbki - pierwsza próba przełamania.

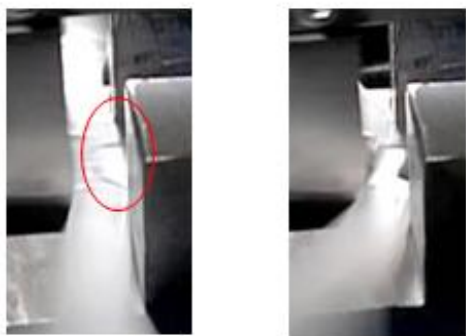
W drugiej serii poddano badaniom próbkę polipropylenową o zawartości napełniacza 1 % oraz zmieniono nóż z kątem ostrza 80°. W tym przypadku próbka w chwili uderzenia podlegała ścisnaniu miejscowo i została odkształcona w obszarze styku (na zdjęciu otoczone czerwonym okręgiem) (rys. 7). Ścisnaniu podlegał również obszar próbki opierający się o jarzmo po stronie działania ostrza. Próbka ulega zgięciu i w tym samym czasie nastąpił przelom kruchy prostopadłe do krawędzi próbki. Pęknięcie nastąpiło około 1 mm od miejsca uderzenia ostrza w płaszczyźnie natarcia. Zaobserwowano również przypadki rozchodzenia się pęknięcia od ostrza pod kątem ok. 82°. W każdym przypadku następowało ścinanie części próbki między podstawą (jarzmem) a płaszczyzną przyłożenia noża (obszar zakreślony na zielono).



Rys. 7. Przebieg dezintegracji próbki PP1% dla kąta ostrza 80°; a) uderzenie ostrza o materiał i zainicjowanie pęknięcia; b),c) pęknięcie materiału połączone z wyrwaniem części próbki, na którą działała część płaszczyzny natarcia d) e) wyrwany fragment próbki; f), g) widoki w płaszczyźnie poprzecznej (widoczny kierunek powstawania pęknięcia).

Podobny przebieg zaobserwowano podczas badań z kątem ostrza wynoszącym 90°. W tym przypadku pęknięcie propaguje się pomiędzy ostrzem a krawędzią podpory, jednak nie następuje całkowity przelom próbki. Część próbki zostaje oderwana, a jej pozostałości opierają się o płaszczyznę natarcia i są odcinane od pozostałej próbki. Na rysunku 8 można zaobserwować element w kształcie półkola, który uległ dezintegracji w momencie uderzenia. Mamy tutaj do czynienia z oddziaływaniem całej powierzchni płaszczyzny natarcia.





Rys. 8. Przebieg dezintegracji próbki PP1% dla kąta ostrza 90°; a) uderzenie ostrza o materiał i zainicjowanie pęknięcia; b) pęknięcie materiału połączone z wyrwaniem części próbki, na którą działała część płaszczyzny natarcia c) wyrwany fragment próbki; d, e) widoki w płaszczyźnie poprzecznej (e – zauważalne oderwanie części materiału mającego kontakt z płaszczyzną natarcia).

PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy wyników badań stwierdzono wysoką użyteczność przeprowadzonego eksperymentu. Dla kątów ostrza 70°, 80° i 90° daje się zauważyć zróżnicowane wartości kąta odchylenia wahadła, co związane jest z obciążeniami jakie pojawiają się przy zetknięciu noża z próbką (Tabela 1).

Tab. 1. Zestawienie kątów wychylenia młota po zniszczeniu próbki polipropylenowej 1% napelnacza (PP1)

| Lp. | Kąt ostrza [°] | Kąt wychylenia wahadła [°] | Średnia [°] | Uwagi |
|-----|-------------------|-------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 90 | 105 | 99 | Badanie przy pionowym ustawieniu próbki, brak przełomu dla ułożenia poziomego. |
| 2 | | 85 | | |
| 3 | | 110 | | |
| 4 | | 95 | | |
| 5 | | 100 | | |
| 6 | 80 | 103 | 118 | Próbka ułożona pionowo, przełom również poziomo. |
| 7 | | 125 | | |
| 8 | | 125 | | |
| 9 | | 120 | | |
| 10 | | 115 | | |
| 11 | 70 | 123 | 121 | Próbka ułożona pionowo, przełom również poziomo. |
| 12 | | 113 | | |
| 13 | | 132 | | |
| 14 | | 115 | | |
| 15 | | 120 | | |

Praktycznie we wszystkich przypadkach w początkowej fazie występuje zgięcie próbki i jej pęknięcie w środkowej części. W miarę przemieszczania ostrza następuje poszerzenie się przełomu – pęknięcia rozchodzą się promieniowo. Próbką ulega ścisnieniu między ostrzem i podporą w wyniku czego uzyskuje się przełom kruchy w płaszczyźnie przyłożenia. W pierwszej fazie uderzenia następuje ścisnienie próbki między ostrzem a jarzmem a następnie pęknięcie w płaszczyźnie natarcia, w odległości ok. 6 mm od styku z ostrzem. W drugim etapie dalsze ścisnienie prowadzi do przełomu prostopadłego do powierzchni natarcia oraz w płaszczyźnie przyłożenia. Dalsze przesuwanie wahadła prowadzi do kolejnego pęknięcia w obrębie dalszej podpory.

Dalsze prace będą prowadzone pod kątem poszerzenia zakresu badawczego, weryfikacji założeń oraz doboru cech geometrycznych w przestrzeni rozdrabniacza.

BIBLIOGRAFIA

- Broniewski T., Kapko J., Płaczek W., Thomalla J.: Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych, WNT, Warszawa 2000.
- Bauer W., Wustenberg D.: Fracture Behavior of Polypropylene under Dynamic Cutting and Shearing Actions in Granulators Chemical Engineering & Technology, 11/2002, ss. 1047 – 1051.
- Hyla I.: Tworzywa sztuczne. Właściwości – przetwórstwo – zastosowanie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000
- Flizikowski J.: Rozdrabnianie tworzyw sztucznych. WMN – ATR Bydgoszcz, 1998.
- Kalman H., Hubert M., Grant E., Petukhov Y., Haim M.: Fatigue behavior of impact comminution and attrition units, Powder Technology 146 (2004), 1–9, Elsevier, 2004.
- Macko M.: Metoda doboru rozdrabniaczy wielokrawędziowych do przeróbki materiałów polimerowych, Wydawnictwo Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz 2011.
- Macko M.: Technika rozdrabniania tworzyw polimerowych i metody akwizycji danych o procesie. Materiały polimerowe i ich przetwórstwo – praca zbiorowa pod red. J. Koszkuła i E. Bociągi. Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2004. s. 169–175.
- Przybyszewski S.: Stanowisko do badań procesu rozdrabniania jednokrotnego. Praca inżynierska, WMFIT, UKW, Bydgoszcz, 2014.
- Sikora J.: Wpływ kąta ostrza noża granulatora na efektywność konstrukcyjną procesu wyłaczania z granulowaniem polietylen, Polimery, 47, nr 3, 2002, ss. 196 – 200/
- Wegner R.: Badania procesu rozdrabniania jednokrotnego na zmodyfikowanym stanowisku młota Charpy'ego. Praca inżynierska, WMFIT, UKW, Bydgoszcz, 2014.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF SINGLE BREAKING-UP

Abstract

The article is devoted to issues onto shredding polymer materials. It gives an overview of research methods of the grinding process. Authors designed and implemented laboratory unit and a modified Charpy hammer. Some fragmentation polymer samples paying particular attention to the course of the destruction of the samples and the necessary energy expenditure. It presents an analysis of the impact of the blade shape the course of the disintegration of polymeric materials.

Autorzy:

dr hab. inż. **Marek Macko** – Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Wydział Matematyki, Fizyki i Techniki, macko-mar@ukw.edu.pl

mgr inż. **Ewa Tomaszewska** – doktorantka, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Wydział Matematyki, Fizyki i Techniki, ewatomasz@wp.pl

mgr **Zbigniew Szczepański** – doktorant, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Wydział Matematyki, Fizyki i Techniki, zszczep@ukw.edu.pl