

# Fizyczne podstawy tryboelektryzacji i rozdzielania elektrostatycznego tworzyw polimerowych

Marian Żenkiewicz<sup>1),\*)</sup>, Tomasz Żuk<sup>2)</sup>

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2014.314

**Streszczenie:** Artykuł stanowi przegląd literatury obejmujący fizyczne podstawy elektrostatycznego sortowania mieszanin polimerowych, polegającego na elektryzowaniu cząstek polimerów w wyniku ich wzajemnego tarcia lub/i tarcia o ścianki tryboelektryzatora, a następnie na rozdzielaniu ich w stałym polu elektrycznym. Metoda ta może być stosowana w przemysłowych instalacjach recyklingu odpadów tworzywowych. Przeanalizowano konstrukcję i zaprezentowano matematyczny opis działania separatora swobodnego. Omówiono także sposoby elektryzowania różnych materiałów, w szczególności tryboelektryzowania polimerów.

**Słowa kluczowe:** recykling, mieszaniny polimerowe, rozdzielanie elektrostatyczne, tryboelektryzowanie.

## Physical basis of tribocharging and electrostatic separation of plastics

**Summary:** The paper is a review of the literature concerning the physical basis of the electrostatic separation of mixed polymers, involving the electrification of polymer particles as a result of the friction between them and/or the friction on the walls of tribocharging unit, followed by separation of the particles in DC electric field. This method can be applied for industrial recycling of plastics wastes. The construction of free-fall separator was analyzed and the mathematical formulas describing its operation were presented. The means of electrification of various materials, in particular tribocharging of polymers, have been described.

**Keywords:** recycling, mixed polymers, electrostatic separation, tribocharging.

Strategia zrównoważonego rozwoju, będąca istotnym elementem polityki gospodarczej i społecznej wielu państw świata, stymuluje nowe rozwiązania prawne, naukowe i techniczne, których celem jest odzysk energii lub ponowne zagospodarowanie odpadów poużytkowych. Tradycyjne magazynowanie odpadów tworzywowych na składowiskach jest coraz bardziej ograniczane, głównie z powodu braku odpowiednich terenów, a także ze względu na wydzielanie się szkodliwych składników z odpadów składowanych długotrwale. W Unii Europejskiej wyróżnia się trzy hierarchiczne poziomy działań w zakresie zmniejszenia ilości powstających odpadów. Pierwszy z nich, popierany najbardziej, dotyczy ograniczenia zużycia surowców, stanowiących źródła późniejszych odpadów. Drugi obejmuje różne formy zagospodarowania i wykorzystania poużytkowych odpadów, trzeci natomiast, najmniej pożądanym, to składowanie lub spala-

nie odpadów bez wykorzystania energii powstającej w tym procesie [1–6].

Pełne zagospodarowanie poużytkowych odpadów tworzywowych jest zadaniem trudnym ze względów organizacyjnych i technicznych. Najczęściej stosowaną metodą jest wielokrotne wykorzystanie materiałów polimerowych, w tym także kompozytów polimerowych, odzyskiwanych w procesach recyklingu materiałowego (mechanicznego) lub surowcowego (chemicznego). Używanie nowego materiału (recyklatu) w tych procesach jest poprzedzone takimi operacjami jednostkowymi, jak zbiórka i magazynowanie odpadów, segregacja i oczyszczanie wstępne, rozdrabnianie, sortowanie, mycie i suszenie. Ze względu na niemieszalność tworzyw na poziomie cząsteczkowym, sortowanie jest jedną z podstawowych operacji recyklingu materiałowego, a odpowiednio dokładne jej wykonanie jest warunkiem koniecznym do dalszego wykorzystania odpadów tworzywowych [7–13].

Pod względem rodzajowym sortowanie poużytkowych odpadów tworzywowych można podzielić na: makrosortowanie, które w warunkach przemysłowych jest wykonywane jeszcze dość często ręcznie oraz mikrosortowanie — obejmujące wytwory wcześniej rozdrobione do postaci cząstek o rozmiarach nie większych niż

<sup>1)</sup> Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Instytut Techniki, Katedra Inżynierii Materiałowej, ul. Chodkiewicza 30, 85-064 Bydgoszcz.

<sup>2)</sup> Instytut Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników w Toruniu, ul. M. Skłodowskiej-Curie 55, 87-100 Toruń.

\*) Autor do korespondencji; e-mail: marzenk@ukw.edu.pl

kilka milimetrów — prowadzone najczęściej w sposób zautomatyzowany. W procesach mikrosortowania tworzyw pomocne są różne techniki detekcyjne, takie jak: spektroskopia masowa, rentgenowska spektroskopia fluorescencyjna, spektroskopia neutronowa, spektroskopia w bliskiej podczerwieni, a także techniki optyczne i termooptyczne stosowane już w liniach przemysłowych. Interesującą odmianą mikrosortowania jest sortowanie, zwane także separacją elektrostatyczną, wykorzystujące zróżnicowanie przenikalności elektrycznej rozdzielanych tworzyw, która jest pośrednią miarą zdolności danego tworzywa do gromadzenia ładunków elektrostatycznych. Kryteriami wyboru odpowiedniego rodzaju sortowania są najczęściej koszty i wydajność procesu oraz skuteczność rozdziału sortowanych mieszanin [14–21].

Celem niniejszego artykułu jest analiza aktualnego stanu wiedzy z zakresu podstaw fizycznych separacji elektrostatycznej mieszanin tworzyw polimerowych, w tym także tryboelektryzowania polimerów. Głównymi zaletami omawianej metody są niskie nakłady inwestycyjne i możliwość skutecznego rozdzielania mieszanin składników charakteryzujących się podobną gęstością.

#### PODSTAWY FIZYCZNE PROCESU SEPARACJI ELEKTROSTATYCZNEJ

##### Oddziaływanie ładunków elektrostatycznych

Separację elektrostatyczną (w skrócie separację) prowadzi się za pomocą separatorów elektrostatycznych, zwanych dalej separatorami. Najważniejsze fazy separacji obejmują elektryzowanie danej mieszaniny, a następnie rozdzielanie jej w polu elektrostatycznym. W opisach procesów separacji, niezależnie od sposobu ich prowadzenia, a także w separatorach, niezależnie od różnic w ich konstrukcjach, znalazło zastosowanie jedno z najważniejszych praw elektrostatyki — prawo Coulomba. Stanowi ono podstawę analizy zjawisk związanych z separacją. Dalsze rozważania przeprowadzono na podstawie literatury o charakterze podstawowym [22–25].

Prawo Coulomba wyrażone analitycznie ma postać:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r r^2} \quad (1)$$

gdzie:  $F$  — siła działająca między dwoma punktowymi ładunkami elektrycznymi  $q_1$  i  $q_2$ , znajdującymi się w danym ośrodku materialnym,  $r$  — odległość między tymi ładunkami,  $\epsilon_0$  — przenikalność elektryczna próżni, zwana też stałą dielektryczną ( $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  A·s/V·m),  $\epsilon_r$  — wielkość bezwymiarowa, zwana względną przenikalnością elektryczną danego ośrodka.

Ważnymi właściwościami siły opisanej zależnością (1) jest to, że działa ona wzdłuż prostej łączącej ładunki  $q_1$  i  $q_2$  oraz że między ładunkami różnoimiennymi ma charakter siły przyciągającej te ładunki, a między ładunkami jednoimiennymi jest siłą odpychającą.

##### Pole elektrostatyczne

Drugim z podstawowych pojęć jest pole elektrostatyczne, występujące wokół ładunków elektrycznych znajdujących się w spoczynku. Cechą charakterystyczną tego pola jest to, że na ładunek elektryczny umieszczony w tym polu działa siła. Na podstawie wartości tej siły można wyznaczyć wielkość charakteryzującą pole elektrostatyczne, zwaną natężeniem ( $E$ ) pola elektrostatycznego, zdefiniowaną w sposób następujący:

$$E = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{F_q}{q} \quad (2)$$

gdzie:  $F_q$  — siła działająca na ładunek próbny  $q$ , wprowadzony do pola elektrostatycznego, przy czym wielkości  $F_q$  i  $E$  są wektorami.

Łącząc zależności (1) i (2) można otrzymać:

$$E(Q, r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r r^2} \quad (3)$$

gdzie:  $E(Q, r)$  — natężenie pola elektrostatycznego związanego z ładunkiem  $Q$ , w punkcie odległym o  $r$  od tego ładunku.

Pole elektrostatyczne występuje zawsze między punktami o różnych potencjałach w rozpatrywanej przestrzeni. W przypadku dwóch równoległych płyt metalowych, znajdujących się w odległości  $d$ , między którymi stałe napięcie elektryczne (różnica potencjałów) wynosi  $U$ , pole elektrostatyczne jest jednorodne, a jego natężenie  $E$  wynosi:

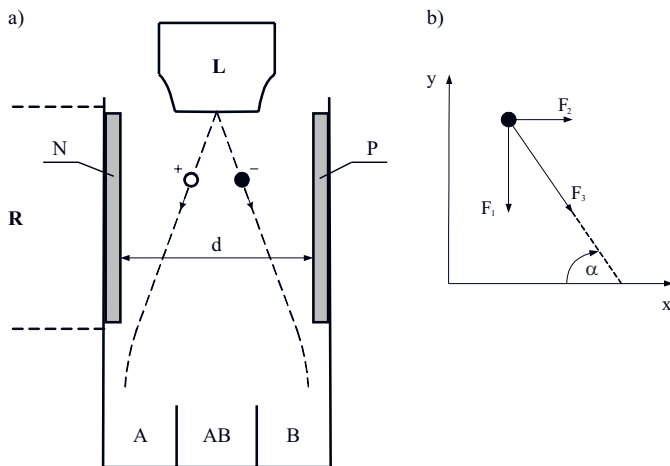
$$E = \frac{U}{d} \quad (4)$$

Z przedstawionych wyżej rozważań wynika, że cząstki obdarzone różnoimiennymi ładunkami elektrycznymi, znajdujące się w polu elektrostatycznym, pod wpływem tego pola są przyspieszane w kierunkach przeciwnych, przy czym cząstki mające ładunki jednoimienne o różnej wartości poruszają się w tym samym kierunku, ale z różnym przyspieszeniem. W opisie założono, że cząstki te mają jednakową masę i kształt oraz że nie działają na nie inne siły. W warunkach rzeczywistych założenia te nie są na ogół spełnione, co implikuje konieczność stosowania bardziej złożonych opisów.

##### Model podstawowy separatora elektrostatycznego

Przedstawione wyżej zależności stanowią podstawę budowy najprostszego separatora, zwanego separatorem swobodnym, dwuskładnikowej mieszaniny tworzyw polimerowych, w której cząstki każdego ze składników (A i B) są naelektryzowane, tzn. zawierają ładunki elektrostatyczne o znakach przeciwnych. Schemat separatora swobodnego przedstawia rys. 1.

Separator zawiera dwie podstawowe części: elektryzator (L) i rozdzielacz (R) złożony z dwóch elektrod (P i N) równoległych (w niektórych rozwiązaniach mogą to być elektrody ułożone skośnie), stanowiących płyty metalowe znajdujące się w odległości  $d$ , między którymi występuje stałe napięcie elektryczne o wartości  $U$ . Opis



Rys. 1. Schemat separatora elektrostatycznego (opis w tekście)  
Fig. 1. Schematic diagram of free-fall separator (see text)

działania tego rozdzielacza można sprowadzić do opisu ruchu cząstek naelektryzowanych w, występującym między elektrodami (P) i (N), polu elektrostatycznym o natężeniu  $E$ . Cząstki dostarczane z elektryzatora (L) są odchylane w strefie międzyelektrodowej, po czym wpadają do odpowiednich pojemników zawierających składnik A lub B, albo mieszaninę tych składników (A + B). Pomijając oddziaływania sił Coulomba między poszczególnymi cząstkami (są one wielokrotnie słabsze niż siły, których źródłem jest pole elektrostatyczne) oraz oddziaływania sił tarcia tych cząstek w powietrzu, można ograniczyć się do analizy wpływu siły ( $F_1$ ) grawitacji ziemskiej i siły ( $F_2$ ) elektrostatycznej na ruch dowolnej cząstki o masie  $m$ , zawierającej ładunek  $q$ . Ruch ten jest wymuszony przez siłę stanowiącą sumę wektorową  $F_1$  i  $F_2$ .

W zależności od znaku ładunku danej cząstki, porusza się ona w kierunku elektrody P lub N pod wpływem siły elektrostatycznej oraz opada pod wpływem grawitacji ( $g$ ) ziemskiej. Położenie cząstki w układzie prostokątnym ( $x, y$ ), przedstawionym na rys. 1 w funkcji czasu ( $t$ ), można zatem opisać w sposób następujący:

$$qE = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (5)$$

$$-mg = m \frac{d^2y}{dt^2} \quad (6)$$

Przyjmując następujące warunki brzegowe dla układu równań (5) i (6):  $x(t=0) = 0$ ,  $y(t=0) = 0$ , oraz  $dx/dt(t=0) = 0$ ,  $dy/dt(t=0) = 0$ , a także wprowadzając pojęcie gęstości ( $\gamma$ ) masowej ładunku  $q$  (gdzie  $\gamma = q/m$ ), rozwiązania równań (5) i (6) można przedstawić w postaci:

$$x(t) = 0,5 \frac{\gamma U}{d} t^2 \quad (7)$$

$$y(t) = -0,5gt^2 \quad (8)$$

Należy także zauważyć, że:

$$\frac{x(t)}{y(t)} = -\frac{\gamma U}{dg} \quad (9)$$

W ustalonych warunkach działania separatora iloraz (9) jest więc wartością stałą (nie zależy od  $t$ ), determinu-

jącą wielkość kąta  $\alpha$ , jaki tworzy prosta, po której porusza się naelektryzowana cząstka, z osią  $x$  (rys. 1b).

Bezwzględne wartości prędkości cząstki wzdłuż osi  $x$  oraz wzdłuż osi  $y$  (oznaczone symbolami, odpowiednio:  $v_x$  oraz  $v_y$ ) wynoszą:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{\gamma U}{d} t \quad (10)$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = gt \quad (11)$$

Algorytm obliczeń trajektorii cząstki naładowanej w polu elektrostatycznym, między elektrodami o różnych kształtach, przedstawiono w pracy [26].

Podane wyżej zależności stanowią podstawę do sformułowania następujących wniosków ogólnych:

- cząstka naelektryzowana porusza się w przestrzeni między elektrodami separatora wzdłuż linii prostej ruchem jednostajnie przyspieszonym;

- wartość składowej  $v_x$  zależy od właściwości separatora (tzn. od  $U$  i od  $d$ ) oraz od właściwości cząstki (tzn. od jej masy i ładunku elektrycznego);

- wartość składowej  $v_y$  nie zależy ani od właściwości separatora, ani od właściwości cząstki, a jedyną jej determinantą jest stała grawitacji;

- po opuszczeniu przez cząstkę obszaru międzyelektrodowego, wartość składowej  $v_x$  jest stała, natomiast wartość składowej  $v_y$  wzrasta nadal wprost proporcjonalnie do wartości  $t$ . Efektem tego jest zmiana kierunku ruchu tej cząstki.

Przedstawione wnioski wyznaczają kierunki prac konstrukcyjnych i technologicznych, związanych z budową separatorów i z warunkami prowadzenia procesów separacji, także wówczas, gdy elektrody separatora tworzą inne konfiguracje niż na rys. 1.

## SPOSOBY ELEKTRYZOWANIA CIAŁ STAŁYCH

### Znaczenie elektryzowania

Elektryzowanie ciał stałych (zwane dalej elektryzowaniem) jest rozumiane jako zespół działań, których efektem jest powstanie ładunku elektrostatycznego na powierzchni i w warstwie wierzchniej ciał stałych, podanych tym działaniom. Zarówno w badaniach naukowych, jak i w procesach przemysłowych, elektryzowanie tworzyw zachodzi najczęściej pod wpływem wyładowań koronowych, indukcji elektrycznej lub ogólnie rozumianego tarcia (w tym: kontaktu i rozdziału, toczenia, ślizgania oraz wzajemnych uderzeń) cząstek tych tworzyw. Zjawisko elektryzowania jest rozpowszechnione tak w przyrodzie, jak i w technice, a zwłaszcza wszędzie tam, gdzie występuje ruchomy kontakt co najmniej dwóch materiałów, przy czym w szczególnym przypadku mogą to być materiały tego samego rodzaju.

Elektryzowanie, jako jedna z operacji technologicznych, jest szeroko stosowane w różnych gałęziach przemysłu, a głównie w takich procesach, jak powlekanie proszkami, odpylanie, drukowanie i kopiowanie lasero-



we, drukowanie przy użyciu specjalnych głowic drukarskich, sortowanie różnych mieszanin (w tym także polimerowych) oraz elektroforeza [27].

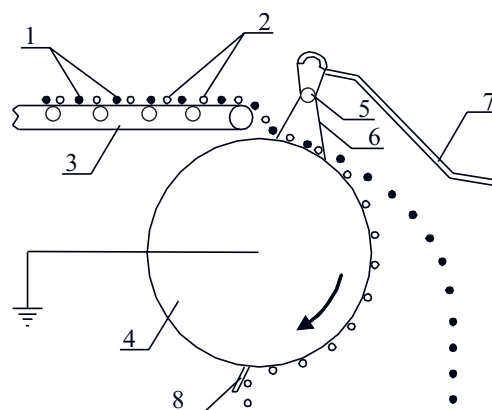
Elektryzowanie występujące samoistnie jest natomiast często źródłem różnych zagrożeń, z których szczególnie niebezpieczne są wybuchy w obiektach przemysłowych i liniach transportowych, powodowane przez iskry elektryczne generowane podczas przeskoków ładunków elektrycznych, powstających wskutek elektryzowania. Zjawiska te występują w takich obiektach, jak rurociągi tworzywowe, którymi przesyłana jest woda, rurociągi służące do transportu ropy naftowej, linie przesyłowe materiałów drobnoziarnistych [28]. Sposoby identyfikowania przyczyn niepożądanego elektryzowania oraz metody pomiarów wielkości ładunków elektrostatycznych, a także zapobiegania powstawaniu tych ładunków lub ich eliminowania, są przedmiotem wielu publikacji [22, 23, 29].

### Elektryzowanie pod wpływem wyładowań koronowych

Wyładowania koronowe jako czynnik fizyczny elektryzujący cząstki ciała stałego są na ogół generowane z niewielką mocą w atmosferze powietrza, najczęściej przy użyciu napięcia stałego. Podstawową zaletą tej metody jest bardzo duża wydajność, możliwość bezpośredniego zastosowania w warunkach przemysłowych, duża niezawodność i prostota urządzeń generujących wyładowania, a także niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne [30, 31].

Źródłem wyładowań są elektrody o małym promieniu krzywizny (cienkie druty metalowe lub, tzw. elektrody nożowe), umożliwiające wytwarzanie pola elektrostatycznego o dużym natężeniu w przestrzeni międzyelektrodowej. Jony oraz elektrony powstające w tym polu bombardują cząstki elektryzowanego materiału i powodują tworzenie ładunku elektrostatycznego na jego powierzchni oraz w warstwie wierzchniej. Wydajność procesu elektryzowania koronowego jest duża, gdyż czas elektryzowania jest stosunkowo krótki (ok. 1 s). Proces ten jest stosowany przede wszystkim podczas elektryzowania materiałów w postaci proszków. Znane są także zastosowania wyładowań koronowych do elektryzowania rozdrobnionych odpadów tworzyw polimerowych, poddawanych następnie procesom separacji [27, 32–34].

Elektryzowanie metodą wyładowań koronowych z powodzeniem wykorzystuje się w procesach separacji odpadów mieszanin tworzywowych, zawierających zanieczyszczenia cząstkami metali, przede wszystkim wówczas, gdy podstawowym celem separacji jest oddzielenie składnika metalowego. Tego typu mieszaniny to głównie rozdrobnione kable elektroenergetyczne, zużyte elementy elektroniczne, odpady w postaci obwodów drukowanych oraz zużyte opakowania zawierające elementy folii aluminiowych. Elektryzowanie może być także pomocne podczas separacji odpadów tworzywo-



Rys. 2. Schemat separatora walcowego przeznaczonego do rozdzielania cząstek metalu i tworzywa (opis w tekście)

Fig. 2. Schematic diagram of drum separator intended for the separation of metal and plastic particles (see text)

wych zawierających zanieczyszczenia w postaci drewna lub papieru. Obecnie są już dostępne przemysłowe separatory mieszanin tworzywowych zawierających cząstki metalu, o wydajność dochodzącej do 2 t/h [35, 36].

Schemat układu rozdzielania separatora walcowego, przeznaczonego do oddzielania cząstek metali od tworzywa, przedstawia rys. 2 [37]. Proces separacji przebiega tu w sposób następujący: mieszanina cząstek (1) metalu i cząstek (2) tworzywa jest dostarczana transporterem (3) na powierzchnię elektrody (4) walcowej uziemionej. Nad elektrodą (4) jest umieszczona elektroda (5) jonizacyjna, w postaci okrągłego drutu o małej średnicy, podłączona do źródła wysokiego napięcia stałego. Elektroda (5) generuje wyładowania koronowe, które jonizują warstwę (6) powietrza znajdującą się nad elektrodą (4), a elektrony i jony powstające w wyniku jonizacji tego powietrza elektryzują cząstki (1) i (2). Ładunki elektryczne cząstek (1) charakteryzujących się dużą przewodnością elek-



Rys. 3. Widok układu elektrod separatora walcowego (opis w tekście)

Fig. 3. View of the electrode unit of electrostatic drum separator (see text)

tryczną są szybko odprowadzane w wyniku uziemienia elektrody (4), natomiast ładunki elektryczne cząstek (2) wykazującej małą przewodność elektryczną pozostają dłużej na ich powierzchni. Wskutek takich zjawisk cząstki (1) są szybko odrzucane z powierzchni elektrody (4) przez siłę odśrodkową, a cząstki (2) przylegają do tej powierzchni. Dzięki zastosowaniu wysokonapięciowej elektrody (7) odchylającej, w przestrzeni między elektrodami (4) i (7) powstaje pole elektrostatyczne, które indukuje ładunki elektrostatyczne w cząstkach (1), co powoduje odchylenie trajektorii ich lotu. Cząstki (2) są zgarniane z powierzchni elektrody (4) za pomocą szczotki (8) i trafiają do odpowiedniego pojemnika.

Rysunek 3 przedstawia widok układu elektrod separatora walcowego (którego zasadę działania przedstawiono na rys. 2), służącego do rozdzielania cząstek metalu od cząstek poli(chloru winylu). Między elektrodą jonizacyjną i elektrodą walcową, pokrytą cząstkami rozdzielanej mieszaniny, jest widoczny kanał plazmowy w postaci jasnej linii, co świadczy o zbyt wysokim napięciu elektrody jonizacyjnej.

### Elektryzowanie pod wpływem indukcji elektrycznej

Metodę tę stosuje się przede wszystkim do elektryzowania mikrocząstek (także nanocząstek) przewodzących lub częściowo przewodzących prąd elektryczny, używanych głównie w procesach elektrostatycznego nanoszenia farb i lakierów, w tym również w procesach drukowania. Czas ( $\tau$ ) elektryzowania izolatorów określa się na podstawie czasu zaniku ładunku elektrostatycznego, powstającego podczas tego procesu. Można go przedstawić równaniem (12):

$$\tau = \epsilon_0 \epsilon_r \rho_s \quad (12)$$

gdzie:  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_r$  – znaczenie jak we wzorze (1),  $\rho_s$  – rezystywność skrośna elektryzowanych cząstek.

Ponieważ czas elektryzowania izolatorów jest długi, metoda indukcji elektrycznej jest stosowana na ogół w celu elektryzowania cząstek przewodników lub półprzewodników, a także rozpylonych kropeł cieczy [27].

### Tryboelektryzowanie

Tryboelektryzowanie (zwane także tryboładowaniem lub elektryzowaniem pod wpływem tarcia) polega na gromadzeniu się ładunków elektrycznych w wyniku bezpośredniego zetknięcia i następnie rozdziału powierzchni dwóch ciał stałych, co może zachodzić wskutek ich wzajemnego tarcia, występującego podczas ślizgania, toczenia, udaru lub/i wibracji, a także deformacji, podczas której ładunki elektryczne gromadzą się w obszarach koncentracji naprężeń. W uproszczeniu przyjmuje się, że na powierzchni każdego z dwóch ciał uczestniczących w procesie tryboelektryzowania gromadzą się ładunki elektryczne o znakach przeciwnych. Zjawisko to może występować podczas kontaktów przewodnika z

przewodnikiem, izolatora z przewodnikiem lub izolatora z izolatorem [22, 23, 27].

Do najczęściej stosowanych sposobów tryboelektryzowania tworzyw polimerowych zalicza się mieszanie w mieszalnikach walcowych specjalnej konstrukcji, potrząsanie przy użyciu specjalnych podajników walcowych lub sit wibracyjnych oraz mieszanie w złożu fluidyzacyjnym, tworzonym przez mieszaninę tworzywa polimerowego i strugę powietrza przez nią przepływającego. Wartość ładunku elektrostatycznego powstającego w tych procesach zależy głównie od: pola powierzchni kontaktu, ciśnienia w strefie tego kontaktu, różnicy pracy wyjścia oraz prędkości materiałów, między którymi występuje tarcie. Gęstość ładunku elektrostatycznego powstającego pod wpływem tarcia dwóch materiałów, których stałe dielektryczne wynoszą, odpowiednio,  $\epsilon_1$  i  $\epsilon_2$  ( $\epsilon_1 > \epsilon_2$ ), można określić w przybliżeniu na podstawie empirycznego wzoru [38]:

$$\sigma = 15 \cdot 10^{-6} \cdot (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (13)$$

Ze względu na wpływ wielu innych czynników na wartość  $\sigma$ , zależność (13) ma charakter bardziej pogładowy niż praktyczny. Istotna jest natomiast właściwość pary materiałów nieprzewodzących, polegająca na tym, że podczas wzajemnego ich tarcia ładunek dodatni powstaje na powierzchni tego materiału, którego stała dielektryczna ma większą wartość. Należy przy tym zawsze pamiętać, że gęstość powierzchniowa ładunku elektrostatycznego generowanego podczas tarcia zależy w dużym stopniu od warunków otoczenia, a głównie od wilgotności względnej i temperatury powietrza [27, 39–43].

### PODSTAWY FIZYCZNE PROCESU TRYBOELEKTRYZOWANIA

#### Uwarunkowania procesu tryboelektryzowania

Pomimo że intensywne badania naukowe procesów tryboelektryzowania trwają od ponad 70 lat, to nadal w pełni nie wyjaśniono wszystkich ich mechanizmów. Stosunkowo najlepiej opisano tryboelektryzowanie metali, mniej wiadomo o tryboelektryzowaniu w układach metal-izolator, a najmniej – w układach izolator-izolator [44–46].

Dość często obserwuje się brak zgodności wyników badań doświadczalnych z teoretycznymi analizami. Przyczyny rozbieżności tkwią zarówno w niedostatkach modeli teoretycznych, jak i w dużej liczbie zmiennych procesowych, które nie są (lub nie mogą być) w pełni uwzględnione podczas doświadczeń i oceny uzyskanych danych. Źródłem dysonansów mogą być także przypadki nieuprawnionego porównywania wyników badań wykonywanych w różnych warunkach.

Najważniejszymi czynnikami wpływającymi na tworzenie się rozbieżności wyników badań tryboelektryzowania są [23, 45–50]:

– różnorodność struktury geometrycznej powierzchni badanych materiałów oraz ich budowy chemicznej, co wpływa na wielkość rzeczywistego pola powierzchni tarcia i na transfer ładunków elektrostatycznych między elektryzowanymi materiałami;

– temperatura i wilgotność względna powietrza w obszarze tryboelektryzowania;

– sposób tryboelektryzowania, tzn. typ kontaktu i przebieg rozdzielania materiałów (tarcie ślizgowe, toczenie, uderzenie), a także rodzaj materiału, z którego są wykonane ścianki urządzenia do tryboelektryzowania;

– rodzaj transferowanych ładunków (elektrony, jony), a także rozmiar i kształt cząstek elektryzowanych;

– przepływ zwrotny części ładunku zgromadzonego podczas tryboelektryzowania materiałów, zachodzący w chwili ich rozdzielania. Jest on rezultatem tunelowania elektronów lub mikrowyładowań elektrycznych i decyduje o ostatecznej wartości ładunku elektrostatycznego pozostającego po tryboelektryzowaniu. Warunki graniczne tych mikrowyładowań są określone prawem Pashena.

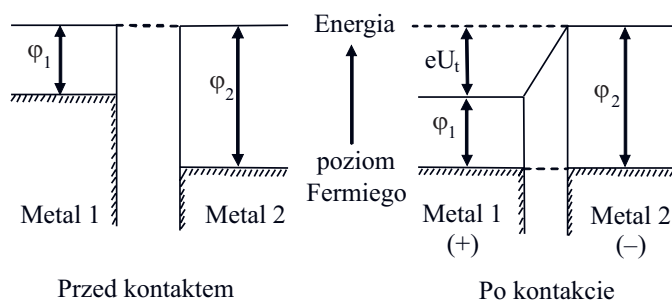
Tak wielka liczba i duże zróżnicowanie czynników wpływających na wartość ładunku elektrostatycznego, powstającego w procesie tryboelektryzowania, wskazuje na konieczność bardzo starannego określania warunków prowadzenia tego procesu zarówno wówczas, gdy służy on celom użytkowym, jak i wtedy, gdy jest on realizowany w celach poznawczych.

## Praca wyjścia

Pierwsze próby opisu mechanizmów tryboelektryzowania, uwzględniające podstawowe osiągnięcia mechaniki kwantowej, opierały się na wykorzystaniu pojęcia pracy wyjścia elektronu, dość dobrze wyjaśniającego to zjawisko w przypadku metali. Ze względu na dobrą przewodność elektryczną metali, nie można zaobserwować gromadzenia się ładunków elektrycznych na ich powierzchni. Efekty takie można zauważyć jedynie wówczas, gdy badane metale są dokładnie odizolowane od otoczenia. Przepływ elektronów podczas kontaktu dwóch metali następuje wskutek różnicy wartości prac wyjścia elektronów tych metali. Praca wyjścia, definiowana jako różnica energii elektronu znajdującego się w metalu na poziomie Fermiego i elektronu znajdującego się w próżni na zewnątrz tego metalu, wynosi na ogół od 2 do 5 eV. Zakłada się, że do transferu elektronów podczas tryboelektryzowania dochodzi wskutek, opisanego przez mechanikę kwantową, zjawiska tunelowania, tzn. przejścia elektronu przez barierę potencjału o wartości większej niż energia tego elektronu [23, 51–54]. Efektem tego przejścia jest różnica ( $U_t$ ) potencjałów na granicy faz obu metali:

$$U_t = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)}{e} \quad (14)$$

gdzie:  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  – praca wyjścia, odpowiednio, metalu 1 i metalu 2,  $e$  – ładunek elementarny elektronu ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C).



Rys. 4. Energia potencjalna elektronu przed i po kontakcie typu metal-metal [22]

Fig. 4. Electron potential energy before and after metal-metal contact [22]

Różnica potencjałów na granicy faz, będąca efektem tryboelektryzowania, jest nazywana potencjałem kontaktowym, który jest charakterystycznym parametrem układu będącego w stanie równowagi termodynamicznej [55].

Podczas transferu elektronów ustala się nowy stan równowagi termodynamicznej przedstawiony na rys. 4 [22]. Ładunek elektryczny przepływający w takich warunkach między dwoma metalami, można w przybliżeniu określić na podstawie zależności:

$$q_t = C_t U_t \quad (15)$$

gdzie:  $C_t$  – pojemność obszaru międzyfazowego dwóch metali, o grubości, której przekroczenie powoduje ustanie przepływu ładunków elektrycznych między tymi metalami.

Wartość ładunku wyznaczona na podstawie zależności (15) jest w przybliżeniu zgodna z wynikami eksperymentów. Pewne trudności występują z dokładnym określeniem wartości  $C_t$ , co jest spowodowane błędami związanymi z oceną chropowatości powierzchni metali w strefie ich kontaktu, niejednorodności chemicznej ich warstwy wierzchniej, wilgotności powietrza i powierzchni metalu, prędkości rozdziału tych metali itp.

## Pozorna praca wyjścia

W celu wyjaśnienia procesu tryboelektryzowania, zachodzącego w układzie metal-izolator (jakim może być tworzywo polimerowe), przyjęto że elektronom izolatora można przypisać, tzw. pozorną pracę wyjścia. Przy tym założeniu, w zależności (14) symbol  $\varphi_1$  zastąpiono symbolem  $\varphi_i$  ( $\varphi_i$  – pozorna praca wyjścia w izolatorze), a do określenia ładunku elektrycznego powstającego jako efekt tryboelektryzowania można zastosować, odpowiednio, zależność (15), przy czym wartość  $C_t$  określają, przede wszystkim, właściwości warstwy wierzchniej izolatora, w tym defekty struktury materiałowej i zanieczyszczenia. Z tego względu wartość pracy wyjścia danego izolatora należy wyznaczać w sposób doświadczalny, a do obliczeń gęstości ( $\sigma$ ) ładunku elektrycznego, po-



wstającego wskutek tarcia tworzywa polimerowego z metalem, można zastosować następującą zależność [56]:

$$\sigma = eD_i(\varphi_m - \varphi_i) \quad (16)$$

gdzie:  $D_i$  — liczba pałapek elektronowych przypadająca na jednostkę pola powierzchni danego tworzywa,  $\varphi_m$  — praca wyjścia metalu,  $\varphi_i$  — praca wyjścia tworzywa.

Zmodyfikowana wersja wzoru (16), w której dodatkowo uwzględnia się średnią odległość ( $z$ ), jaką pokonuje elektron podczas tryboelektryzowania, przechodząc z cząstki jednego na cząstkę drugiego składnika elektryzowanej mieszaniny ( $z \leq 0,4$  nm), i stałą ( $\epsilon_i$ ) dielektryczną materiału elektryzowanego, ma postać [57]:

$$\sigma = eD_i \frac{\varphi_m - \varphi_i}{1 + \frac{e^2}{\epsilon_i} \cdot z \cdot D_i} \quad (17)$$

Podczas tryboelektryzowania polimerów polarnego i niepolarnego, ładunek dodatni uzyskuje polimer polarny, a ładunek ujemny gromadzi się w polimerze niepolarnym. Stosując zmodyfikowane równania (14)–(17) można uzyskać dużą zgodność rezultatów rozważań teoretycznych z wynikami doświadczeń [58, 59].

Podejmuje się również próby bezpośredniego wykorzystania przedstawionych wyżej zależności do opisu transferu elektronów między dwoma izolatorami (w tym między tworzywami polimerowymi), podczas ich tryboelektryzowania. Próby takie budzą jednak kontrowersje, głównie ze względu na brak pasma przewodzenia w izolatorach, a tym samym brak swobodnych elektronów, mogących być przedmiotem transferu. Aby wyjaśnić rozbieżności wyników wielokrotnie przeprowadzonych eksperymentów, interpretowanych na podstawie opisanych wyżej zależności, opracowano różne modele teoretyczne zjawisk związanych z tryboelektryzowaniem. Zalicza się do nich, tzw. model stanu powierzchni, w którym przyjmuje się, że przedmiotem transferu są elektrony o odpowiedniej energii, znajdujące się na powierzchniach obu izolatorów. Transfer ten inicjuje różnica wartości, tzw. efektywnej pracy wyjścia z powierzchni tych izolatorów, przy czym trwa on do chwili wyrównania wartości poziomu Fermiego obu materiałów [25, 44, 45, 57, 60–63].

### Transfer jonów

Innym sposobem powstawania ładunku elektrostatycznego w wyniku tarcia między materiałami może być transfer jonów. Wpływ na taki rodzaj transferu ładunków mają cząsteczki wody, zaadsorbowane na powierzchni kontaktujących się ze sobą materiałów. Cząsteczki te, w zależności od wilgotności względnej otaczającego je powietrza, tworzą warstwę o grubości od ok. 1 do kilkudziesięciu nanometrów. Jony (np.:  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) powstające podczas dysocjacji wody stanowią elementy składowe warstwy międzyfazowej tych materiałów, mającej charakter podwójnej warstwy elektrycznej. Jednocześnie zmniejszają one rezystywność powierzchniową materia-

łów, co ułatwia transfer ładunków. Transfer jonów znajdujących się na powierzchni jednego z materiałów, czasem bywa też utożsamiany z neutralizacją jonów przez elektrony, przechodzące podczas tarcia z drugiego materiału [64].

Należy przy tym uwzględnić, że dodatkowym źródłem jonów znajdujących się na powierzchni danego izolatora jest powietrze, w którym ich zawartość wynosi średnio ok.  $5 \cdot 10^8$  jonów/ $\text{m}^3$ . Model transferu jonów zaproponowany w pracy [46], opiera się także na pojęciu pracy wyjścia, interpretowanej jako energia adsorpcji jonów znajdujących się na powierzchni danego izolatora. Transfer jonów zaobserwowano także w toku badań prowadzonych metodami spektroskopii masowej jonów wtórnych (SIMS) i mikroskopii sił atomowych (AFM) [65, 66].

### Transfer masy

Ponad 30 lat temu podjęto próbę interpretacji zjawiska tryboelektryzowania, zakładając możliwość transferu masy między dwoma izolatorami podczas wzajemnego ich tarcia i związanego z tym transferu ładunków elektrycznych [67, 68]. Jak dotąd jednak niewiele prac poświęcono szczegółowej analizie wspomnianego zjawiska.

Ostatnio, jako rezultat szczegółowych badań zjawiska tryboelektryzowania, przedstawiono wyniki analiz wykonanych metodą spektroskopii elektronowej (XPS), dotyczących transferu masy między PDMS [polidimetylosiloksan —  $(\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O})_n$ ] i PTFE [politetrafluoroetylen —  $(\text{CF}_2\text{CF}_2)_n$ ] [69]. Łatwość różnicowania cząstek tych dwóch polimerów polega na tym, że PDMS zawiera atomy krzemu, których nie zawiera PTFE, a z kolei PTFE zawiera atomy fluoru, których nie zawiera PDMS. Wyniki badań XPS jednoznacznie wykazały, że podczas tryboelektryzowania tych dwóch polimerów następuje transfer masy w obu kierunkach, tzn. znaleziono atomy krzemu w PTFE i atomy fluoru w PDMS. Z badań tych wynika również, że liczba transferowanych atomów wzrasta wraz z liczbą kontaktów, do jakich dochodziło między tymi polimerami podczas tryboelektryzowania. Badania innych par polimerowych [PDMS-u i poliwęglanu oraz PDMS-u i poli(metakrylanu metylu)] w pełni potwierdziły przebieg zjawiska transferu masy.

Dodatkowym efektem pracy [69] jest wzrost zainteresowania zjawiskiem transferu masy, zachodzącego podczas tryboelektryzowania tworzyw polimerowych, i kolejne doniesienia na ten temat [70].

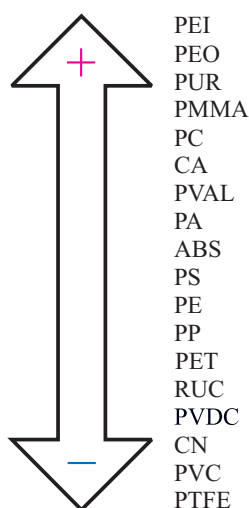
### Szereg tryboelektryczny

Efekty tryboelektryzowania dwóch różnych materiałów, w szczególności gęstość powierzchniowa oraz znak ładunków elektrostatycznych gromadzonych na powierzchniach, w istotnym stopniu zależą od pracy wyjścia każdego z tych materiałów. Jednym z prekursorów

badan efektów tryboelektryzowania różnych metali był Alessandro Volta, który uszeregowal badane metale. W szeregu tym kazdy nastepny metal elektryzuje sie ujemnie wskutek kontaktu z metalem go poprzedzajacym [29].

Dalsze prace dotyczace sklasyfikowania materialow uwzgledniajacego badane efekty, doprowadzily do utworzenia, tzw. szeregu tryboelektrycznego [71–75]. Jest to zestawienie roznych materialow w okreslonej kolejnosci, uwzgledniajacej znak ladunku elektrostatycznego wytwarzanego podczas kontaktu, i rozdzialu dowolnych dwuch materialow objetych szeregiem. Dla kazdej pary materialow wybranych z szeregu tryboelektrycznego mozna zatem okreslic znaki ladunkow elektrostatycznych gromadzonych na powierzchniach tych materialow podczas ich wzajemnego tarcia.

Przyklad szeregu tryboelektrycznego zlozonego z osiemnastu powszechnie stosowanych tworzyw polimerowych przedstawia rys. 5 [72]. Wynika z niego, ze podczas transferu ladunkow w czasie tryboelektryzowania PTFE z kazdym z pozostalych tworzyw, ladunki



Rys. 5. Szereg tryboelektryczny wybranych polimerow [77]  
Fig. 5. Triboelectric series of the selected polymers [77]

ujemne gromadza sie na powierzchni PTFE, a dodatnie na powierzchni drugiego tworzywa. W kazdej dowolnej parze tworzyw tego zbioru, podczas tryboelektryzowania ladunek dodatni gromadzi sie na tworzywie polozone wyzej w szeregu. Konsekwencja tej zaleznosci jest to, ze znak ladunku uzyskiwanego przez dane tworzywo podczas tryboelektryzowania moze byc rozny, w zaleznosci od polozenia w szeregu drugiego tworzywa, uczestniczacego w tym procesie (np. podczas tryboelektryzowania PS z PMMA, na powierzchni PS gromadzi sie ladunek ujemny, a podczas tryboelektryzowania PS z PET, na powierzchni PS gromadzi sie ladunek dodatni).

Znak ladunkow elektrostatycznych gromadzonych podczas tryboelektryzowania, zalezny takze od podstaw-

nikow i grup funkcyjnych wystepujacych w lancuchach elektryzowanych tworzyw. Niekiedy maja one decydujacy wplyw na efekty procesu. Mozna je uszeregowac w sposob podobny do przedstawionego na rys. 5 (tzn. poczynajac od majacych najwieksza zdolnosć do gromadzenia ladunkow ujemnych) i otrzymac nastepujacy szereg [71]: -F; -Cl; -H (w węgłowodorach alifatycznych i aromatycznych), -NO<sub>3</sub>; -O-H, -CN; -O-CO, -NH-CO; -NH-CO<sub>2</sub>; -O-, -O-CO<sub>2</sub>-; -NH-.

Podobne szeregi tryboelektryczne oraz podobna ocene wplywu podstawnikow i grup funkcyjnych na efekty tryboelektryzowania przedstawiono w publikacjach [73–75]. W pracy [74] podano wyniki analizy roznych materialow organicznych, z ktorych wynika, ze:

- polimery zawierajace grupy pirydynowe, aminowe lub amidowe charakteryzujaja sie najwieksza zdolnoscia do gromadzenia ladunkow dodatnich;
- polimery zawierajace fluorowce charakteryzujaja sie najwieksza zdolnoscia do gromadzenia ladunkow ujemnych;
- polimery węgłowodorowe tylko w niewielkim stopniu ulegaja tryboelektryzowaniu.

Szereg tryboelektryczny materialow jest przedmiotem licznych badan naukowych i aplikacyjnych. Ma on duze znaczenie dla prawidlowej oceny zdolnosci elektryzowania sie roznych par materialowych, zachodzacego wskutek wzajemnego tarcia. W literaturze wystepuje dosc duza zgodnosć w zakresie uszeregowania wiekszosci polimerow pod wzgledem ich wlasciwosci tryboelektrycznych. Klasyfikacje te jednak nalezy uzupelnic o polimery biodegradowalne, ktorych znaczenie w ostatnich latach szybko rosnie.

## PODSUMOWANIE

Z przedstawionego przegladu literaturowego wynika, ze separacja elektrostatyczna mieszanin polimerowych, a w tym mieszanin odpadow tworzywowych, jest przedmiotem zainteresowania srodowisk naukowego i przemyslowego. Technologia ta dotychczas byla stosowana na niewielka skale, glownie ze wzgledu na trudnosci zwiazane z etapem wstepnego przygotowania rozdzielanych mieszanin. Proces separacji elektrostatycznej obejmuje dwa podstawowe etapy: elektryzowanie czastek danej mieszaniny oraz rozdzielanie jej w polu elektrostatycznym na poszczegolne skladniki.

Elektryzowanie czastek mieszaniny mozna wykonywac roznyimi sposobami, z ktorych najwieksze znaczenie ma elektryzowanie wskutek wzajemnego tarcia tych czastek oraz wskutek tarcia ich o scianki tryboelektryzatora. Metoda zwana tryboelektryzowaniem moze byc prowadzona w wibratorach, rynnach potrzaszalnych, cyklonach, wirujacych zbiornikach a takze w zlozach fluidezacyjnych, ktorych noznikiem jest strumien spruzonego powietrza.

Zjawiska fizyczne zwiazane z tryboelektryzowaniem metali sa juz dosc dobrze poznane. Podstawa ich inter-



pretacji jest różnica pracy wyjścia metali, między którymi zachodzi tarcie. Mniej poznane są zjawiska towarzyszące tryboelektryzowaniu zachodzącemu w układach metal-izolator, a najmniej — w układach izolator-izolator (układy polimer- polimer, polimer-tworzywo lub tworzywo-tworzywo). Brak jest pełnej wiedzy na temat przebiegu i mechanizmów transferu ładunków elektrycznych, między materiałami znajdującymi się w stanie tarcia, co powoduje, że warunki tryboelektryzowania części każdej mieszaniny muszą być określane na podstawie badań eksperymentalnych. Przyjmuje się, że tryboelektryzowanie jest powodowane transferem elektronów, jonów i masy, przy czym dominującą rolę odgrywa transfer elektronów.

#### LITERATURA

- [1] „Directive 94/62/EC of European Parliament and Council Directive of 20 December 1994 on packaging and packaging waste”, O.J.L 365, 31.12.1994. [2] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. „Prawo ochrony środowiska” (Dz.U. 2008, nr 25, poz. 150). [3] Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. o opakowaniach i odpadach opakowaniowych (Dz.U. 2001, nr 63, poz. 638, z późniejszymi zmianami). [4] Ustawa z dnia 13 czerwca 2013 r. o gospodarce opakowaniami i odpadami opakowaniowymi (Dz.U. 2013, poz. 888). [5] Żakowska H.: „Systemy recyklingu odpadów opakowaniowych w aspekcie wymagań ochrony środowiska”, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań 2008. [6] Gente F., La Marca F., Lucci V., Massacci P.: *Waste Manag.* **2003**, 23, 951, DOI: dx.doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00088-6 [7] Żakowska H.: *Polimery* **2012**, 57, 613, DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2012.613 [8] Błędzki A.K., Gorący K., Urbaniak M.: *Polimery* **2012**, 57, 620, DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2012.620 [9] „Recykling tworzyw sztucznych w Europie” (red. Kozłowski M.), Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006. [10] Al-Salem S.M., Lettieri P., Baeyens J.: *Waste Manag.* **2009**, 29, 2625, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004 [11] Kijeński J., Błędzki K.A., Jeziórska R.: „Odzysk i recykling materiałów polimerowych”, PWN, Warszawa 2011. [12] Coleman M.M., Graf R.F., Painter P.C.: „Specific Interaction and the Miscibility of Polymer Blends”, Technomic Publ., Lancaster 1991. [13] „Handbook of Plastics Recycling” (red. La Mantia F.), Rapra Technology Ltd., Shawbury 2002. [14] Błędzki A.K., Nowaczek W.: *Polimery* **1993**, 38, 511. [15] Pascoe R.D., O’Connell B.: *Miner. Eng.* **2003**, 16, 1205, DOI: dx.doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00171-7 [16] Dodbiba G., Fujita T.: *Phys. Separat. Sci. Eng.* **2004**, 13, 165, DOI: dx.doi.org/10.1080/14786470412331326350 [17] Wahab D.A., Hussain A., Scavino E., Mustafa M.M., Basri H.: *Am. J. Appl. Sci.* **2006**, 3, 1924, DOI: dx.doi.org/10.3844/ajassp.2006.1924.1928 [18] Froelich D., Maris E., Haoues N., Chemineau L., Renard H., Abraham F., Lassartesses R.: *Miner. Eng.* **2007**, 20, 902, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2007.04.020 [19] Ligus G.: *Chemik* **2012**, 66, 1229. [20] Żenkiewicz M., Żuk T., Królikowski K.: *Przetwórstwo Tworzyw* **2012**, 6, 692. [21] Wolf M.I., Colledani M., Gershwin S.B., Gutowski T.G.: „IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technologies”, Washington D.C., 16–19 maja 2010. [22] Harper W.R.: „Contact and Frictional Electrification”, Laplacian Press, Morgan Hill 1998. [23] Cross J.: „Electrostatics: Principles, Problems and Applications”, Adam Hilger, Bristol 1987. [24] Sadiku M.N.O.: „Elements of Electromagnetics 3E”, Oxford University Press, Oxford 2001. [25] Lowell J., Rose-Innes A.C.: *Adv. Phys.* **1980**, 29, 947, DOI: dx.doi.org/10.1080/00018738000101466 [26] Vlad S., Urs A., Iuga A., Dascalescu L.: *J. Electrostat.* **2001**, 51–52, 259, DOI: dx.doi.org/10.1016/S0304-3886(01)00084-5 [27] Mazumder M.K., Sims R.A., Biris A.S., Srirama P.K., Saini D., Yurteri C.U., Trigwell S., De S., Sharma R.: *Chem. Eng. Sci.* **2006**, 61, 2192, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.ces.2005.05.002 [28] Ravelo B., Duval F., Kane S., Nsom B.: *J. Electrostat.* **2011**, 69, 473, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2011.06.004 [29] Gajewski A.S.: „Elektryczność statyczna — poznanie, pomiar, zapobieganie, eliminowanie”, Instytut Wydawniczy Związków Zawodowych, Warszawa 1987. [30] Żenkiewicz M., Rytlewski P., Malinowski R.: *Polimery* **2011**, 56, 185. [31] Żenkiewicz M.: „Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych”, WNT, Warszawa 2000. [32] Kelly E.G., Spottiswood D.J.: *Miner. Eng.* **1989**, 2, 193, DOI: dx.doi.org/10.1016/0892-6875(89)90040-X [33] Samuila A., Blajan M., Belega R., Huzau M., Morar M., Dascalescu L., Iuga A.: *J. Electrostat.* **2005**, 63, 955, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2005.03.068 [34] Tilmatine A., Medles K., Bendimerad S.-E., Boukholda F., Dascalescu L.: *Waste Manag.* **2009**, 29, 228, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.008 [35] Köhnlechner R., Sander S.: *BHM Berg — und Hüttenmännische Monatshefte* **2009**, 154, 136, DOI: dx.doi.org/10.1007/s00501-009-0453-2 [36] www.hamos.com [37] *Pat. US* 0194 461 (2009). [38] Lindley K.S., Rowson N.A.: *Magnetic Electr. Sep.* **1997**, 8, 101, DOI: dx.doi.org/10.1155/1997/96189 [39] Tilmatine A., Bendimerad S.: *Front. Electr. Electron. Eng. China* **2009**, 4, 446, DOI: dx.doi.org/10.1007/s11460-009-0062-6 [40] Higashiyama Y., Ujiie Y., Asano K.: *J. Electrostat.* **1997**, 42, 63, DOI: dx.doi.org/10.1016/S0304-3886(97)00131-9 [41] Lee J.K., Shin J.H., Hwang Y.J.: *KSME Inter. J.* **2002**, 16, 1336. [42] Iuga A., Calin L., Neamtu V., Mihalciou A., Dascalescu L.: *J. Electrostat.* **2005**, 63, 937, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2005.03.064 [43] Németh E., Albrecht V., Schubert G., Simon F.: *J. Electrostat.* **2003**, 58, 3, DOI: dx.doi.org/10.1016/S0304-3886(02)00137-7 [44] Bailey A.G.: *J. Electrostat.* **2001**, 51–52, 82, DOI: dx.doi.org/10.1016/S0304-3886(01)00106-1 [45] Castle G.S.P.: *J. Electrostat.* **1997**, 40–41, 13, DOI: dx.doi.org/10.1016/S0304-3886(97)00009-0 [46] Hogue M.D., Buhler C.R., Calle C.I., Matsuyama T., Luo W., Groop E.E.: *J. Electrostat.* **2004**, 61, 259, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.el-

- stat.2004.03.002 [47] Inculet I.I., Castle G.S.P., Brown J.D.: *IEEE-IAS Annual Conference Proceedings* **1994**, 1, 1397. [48] Ireland P.M.: *J. Electrostat.* **2012**, 70, 524, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2012.08.004 [49] Matsuyama T., Yamamoto H.: *Chem. Eng. Sci.* **2006**, 61, 2230, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.ces.2005.05.003 [50] Szpor S., Dzierżek H., Wiśniarski W.: „Technika wysokich napięć”, WNT, Warszawa 1967.
- [51] Lowell J.: *J. Phys.: Appl. Phys.* **1979**, 12, 1541. [52] Gupta R., Gidaspow D., Wasan D.T.: *Powder Technol.* **1993**, 75, 79, DOI: dx.doi.org/10.1016/0032-5910(93)80027-8 [53] Zizman J.M.: „Wstęp do teorii ciała stałego”, PWN, Warszawa 1977. [54] Orear J.: „Fizyka”, WNT, Warszawa 1998. [55] Lungu M.: *Miner. Eng.* **2004**, 17, 69, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2003.10.010 [56] Pearse M.J., Hickey T.J.: *Resurce Recov. Conser.* **1978**, 3, 179, DOI: dx.doi.org/10.1016/0304-3967(78)90004-5 [57] Lee L.H.: *J. Electrostat.* **1994**, 32, 1, DOI: dx.doi.org/10.1016/0304-3886(94)90026-4 [58] Davies D.K.: *Brit. J. App. Phys.: J Phys. D 2* **1969**, 1533, DOI: http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/2/11/307 [59] Murata Y., Kittaka S.: *Jap. J. App. Phys.* **1979**, 18, 421, DOI: dx.doi.org/10.1143/JJAP.18.421 [60] Gutman E.J., Hartmann G.C.: *J. Imag. Sci. Technol.* **1992**, 36, 335.
- [61] Anderson J.H.: *J. Imag. Sci. Technol.* **1994**, 38, 378. [62] Colter P., Castle G.S.P., Schein L.B.: *J. Electrostat.* **1995**, 36, 165, DOI: dx.doi.org/10.1016/0304-3886(95)00043-7 [63] Castle G.S.P.: *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics* **2008**, Paper M1. [64] Robins E.S., Lowell J., Rose-Innes A.C.: *J. Electrostat.* **1980**, 8, 153, DOI: dx.doi.org/10.1016/0304-3886(80)90002-9 [65] Mizes H.A., Conwell E.M., Salamida D.P.: *App. Phys. Lett.* **1990**, 56, 1597, DOI: dx.doi.org/10.1063/1.103139 [66] Saurenbach F., Wollmann D., Terris B.D., Diaz A.F.: *Langmuir* **1992**, 8, 1199, DOI: dx.doi.org/10.1021/la00040a030 [67] Salaneck W.R., Paton A.: *J. Appl. Phys.* **1976**, 47, 144, DOI: dx.doi.org/10.1063/1.322306 [68] Lowell J.: *J. Phys.: D Appl. Phys.* **1977**, 10, L233, DOI: dx.doi.org/10.1088/0022-3727/10/17/001 [69] Baytekin H.T., Patashinski A.Z., Branicki M., Baytekin B., Soh S., Grzybowski B.A.: *Science* **2011**, 133, 308 DOI: dx.doi.org/10.1126/science.1201512 [70] Williams M.W.: *J. Electrostat.* **2012**, 70, 233, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2012.01.001
- [71] Vieweg H.F.: *J. Phys. Chem.* **1926**, 30, 865, DOI: dx.doi.org/10.1021/j150265a001 [72] Brück R.: *Kunststoffe* **1981**, 71, 234. [73] Lee J.K., Shin J.H.: *Korean J. Chem. Eng.* **2002**, 19, 267, DOI: dx.doi.org/10.1007/BF02698412 [74] Diaz A.F., Felix-Navarro R.M.: *J. Electrostat.* **2004**, 62, 277, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2004.05.005 [75] Park C.H., Park J.K., Jeon H.S., Chun B.C.: *J. Electrostat.* **2008**, 66, 578, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2008.07.001

Otrzymano 4 IV 2013 r.

## W kolejnym zeszycie ukaza się m.in. następujące artykuły:

- J. Brzeska, P. Dacko, H. Janeczek, H. Janik, W. Sikorska, M. Rutkowska, M. Kowalczyk — Synteza, właściwości i zastosowanie nowych (bio)degradowalnych poliestrourethanów
- A.K. Błędzki, M. Urbaniak, A. Jaskiewicz, M. Feldmann — Włókna celulozowe jako alternatywa dla włókien szklanych w kompozytach polimerowych
- D. Ciechańska, J. Wietecha, M. Kucharska, K. Wrześniewska-Tosik, E. Kopania — Biomasa jako źródło funkcjonalnych materiałów polimerowych
- J. Kijeński, M. Kijeńska, A. Migdał — Współgazowanie — strategiczny kierunek zagospodarowania odpadów tworzyw polimerowych
- M. Rybko, M. El Fray — Ocena struktury i wytrzymałości zmęczeniowej elastomerów termoplastycznych modyfikowanych nanocząstkami i sieciowanych radiacyjnie
- R. Pilawka, H. Mąka — Kinetyka procesu rozkładu materiałów izocyjanianowo-epoksydowych sieciowanych w obecności 1-etyloimidazolu (*j. ang.*)
- D.M. Bieliński, U. Ostaszewska, J. Jagielski — Zastosowanie bombardowania jonowego do modyfikacji właściwości tribologicznych elastomerów (*j. ang.*)