

# Zachowanie się tworzyw sztucznych w warunkach pożarowych – cz. I

■ JACEK IWKO

## Palność oraz cechy pożarowe tworzyw sztucznych

**W artykule przedstawiono główne aspekty zagrożeń pożarowych wynikających ze stosowania tworzyw sztucznych. Omówiono zwięźle mechanizmy palności materiałów polimerowych, co ma duże znaczenie dla wyjaśnienia oraz przewidywania zachowania się tych materiałów w trakcie pożaru. Skomentowano najważniejsze cechy pożarowe tworzyw polimerowych, wskazując na ich rodzaj i stopień zagrożenia dla zdrowia i życia ludzkiego. Dokonano klasyfikacji typowych polimerów technicznych i konstrukcyjnych pod kątem wielkości omówionych cech pożarowych.**

**T**worzywa polimerowe stosowane są obecnie niemal w każdej dziedzinie życia codziennego, głównie dzięki takim ich zaletom, jak mały ciężar właściwy, duża odporność na działanie czynników chemicznych, łatwość przetwórstwa i barwienia, mała kancerogenność oraz estetyczny wygląd. Wymienione korzyści powodują, że materiały te są szeroko stosowane głównie w takich gałęziach przemysłu, jak budowa maszyn i urządzeń, budownictwo, transport, elektronika i elektrotechnika, medycyna, meblarstwo, gospodarstwo domowe itp.

Do podstawowych wad tworzyw polimerowych należą, oprócz średnich właściwości mechanicznych, głównie mała odporność cieplna oraz niewielka, w porównaniu z innymi materiałami konstrukcyjnymi temperatura rozkładu. Wady te powodują, że tworzywa sztuczne stwarzają duże zagrożenie w warunkach pożaru.

W celu oceny oraz wytyczenia kierunków dalszych prac nad poprawą właści-

wości termicznych i pożarowych tworzyw warto przedstawić pokrótce skutki wielkich pożarów dużych obiektów użyteczności publicznej. Jako miarodajny przykład [1] można tu podać pożar lotniska w Düsseldorfie, który miał miejsce pierwszego kwietnia 1996 r. Pożar wybuchł wskutek nieprawidłowo przeprowadzonego procesu spawania elementów konstrukcyjnych dachu lotniska. Łączny bilans pożaru to 17 ofiar śmiertelnych, 87 osób rannych i straty materialne wysokości kilkuset milionów euro. Głównymi powodami tak dużej ilości ofiar oraz strat materialnych podczas pożaru była przede wszystkim obecność palnych materiałów i instalacji w pustych przestrzeniach podwieszanego sufitu (głównie elementów z polistyrenu, umieszczonych tam wbrew przepisom budowlanym), duża ilość dymu (głównie z płonącego polistyrenu) oraz przyczyny techniczno-organizacyjne, takie jak brak wykrywaczy dymu oraz brak blokad i zamknięć przy schodach ruchomych. Innym przykładem może być pożar stacji londyńskiego metra Kings Cross, który miał miejsce 18 listopada 1987 r. Pożar ten, zaprószone na schodach ruchomych rozprzestrzenił się pod tymi schodami po śmieciach, po smarze smarującym cięgiła schodów, następnie po plastikowych elementach konstrukcji schodów, by po kilku minutach, obejmując całe schody i poręczce gwałtowną ścianą ognia przenieść się do znajdującego się nad schodami hallu kasowego, zabijając 31 osób.

Zarówno te przykłady, jak i wiele innych wskazują, jak duże znaczenie w powstaniu oraz rozprzestrzeleniu się pożaru miała obecność tworzyw polimerowych stanowiących materiał budowlany, szczególnie w dużych obiektach przemysłowych i uży-

teczności publicznej. Abstrahując od pozostałych czynników konstrukcyjno-technicznych oraz niestosowania się do przepisów budowlanych, można z całym przekonaniem stwierdzić, że odpowiednia modyfikacja zastosowanych materiałów polimerowych w kierunku zmniejszonej szybkości wydzielania ciepła, dymotwórczości i szybkości rozprzestrzeniania się płomienia w znacznym stopniu mogłaby zmniejszyć straty osobowe i materialne.

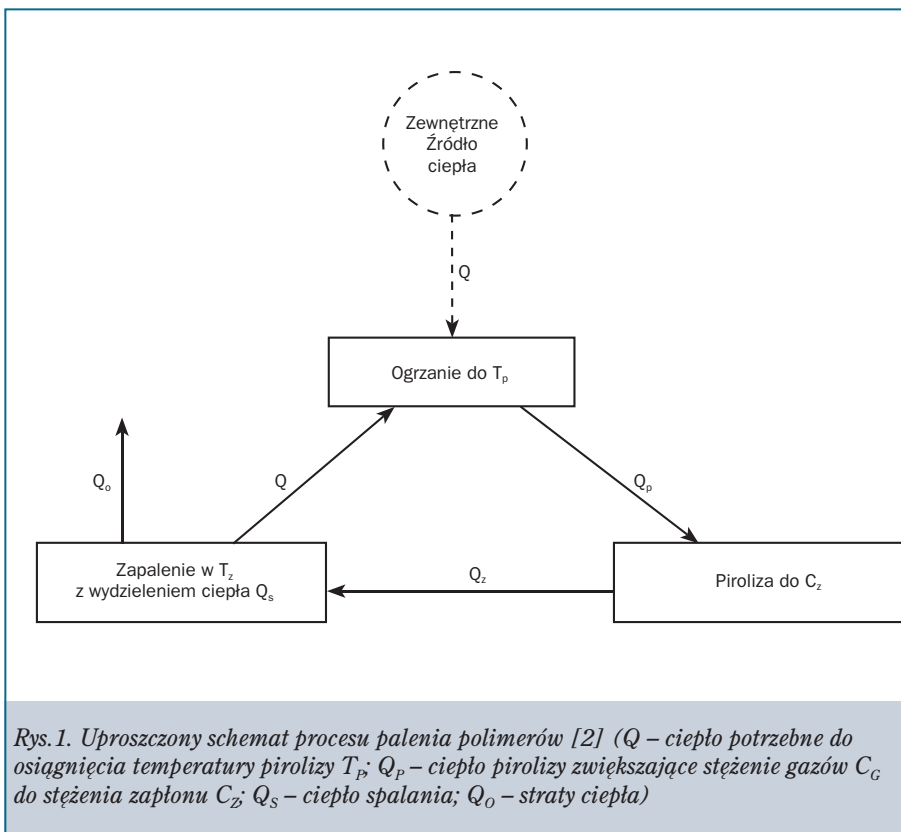
Każdego roku w pożarach w Europie ginie ok. 5 000 osób, a ponad 4 000 w samych Stanach Zjednoczonych. Wymienione wyżej przykłady i wiele innych pokazują, jak ważna jest wciąż poprawa bezpieczeństwa pożarowego w celu zminimalizowania zagrożeń i strat pożarowych. Problem zmniejszenia palności materiałów polimerowych jest zatem cały czas aktualny i stąd jest przyczyną badań nad modyfikacją tworzyw sztucznych oraz poprawą bezpieczeństwa użytkowania wyrobów z nich wykonanych.

### Palność tworzyw sztucznych

Nieomal wszystkie polimery naturalne i syntetyczne, a także powstałe z nich tworzywa sztuczne palą się po wprowadzeniu ich do źródła ognia. Spalanie można najogólniej określić jako proces fizykochemiczny, w czasie którego następuje gwałtowne utlenianie materiału palnego z jednoczesnym wydzielaniem ciepła, światła oraz produktów spalania w postaci gazów, dymów oraz pozostałości stałych.

Uproszczony schemat procesu palenia tworzywa przedstawiono na rys. 1.

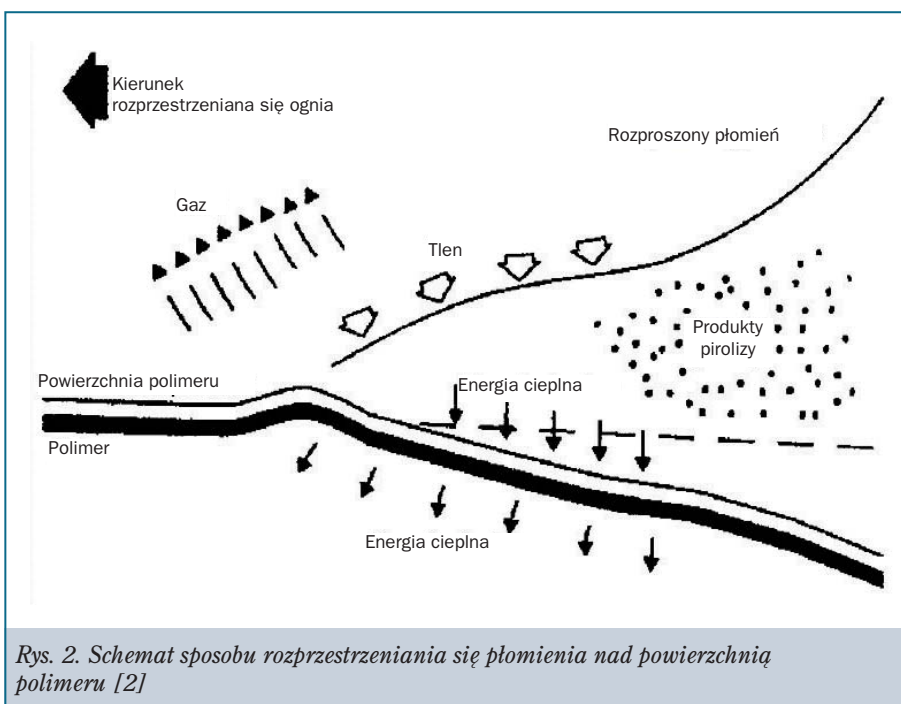
Z chemicznego punktu widzenia spalanie polimeru jest egzotermiczną reakcją



katalityczną utleniania związków organicznych, którą podtrzymuje obecność wolnych rodników oraz duża energia cieplna. Z rys. 1 widać, że do zainicjowania i podtrzymania palenia niezbędna jest energia dostarczana w postaci ciepła. Oprócz niej musi wystąpić na początku proces inicjacji oraz procesy pirolizy. Etap inicjacji może zostać wywołany poprzez zewnętrzne źródło ciepła, takie jak płomień czy iskra, a jeśli temperatura materiału jest

wystarczająco wysoka, wówczas zachodzi on w sposób spontaniczny.

Zdolność do zapalenia się tworzywa zależy od wielu czynników, m.in. od stężenia tlenu, temperatury oraz fizycznych i chemicznych właściwości materiału. Tworzywa termoplastyczne posiadające budowę nieusieciowaną podczas kontaktu ze źródłem ciepła zaczynają początkowo mięknać, a następnie płynąć. Natomiast duroplasty z racji swej budowy usieciowanej



nie topią się, co ma swoje odzwierciedlenie w ich większej termoodporności w porównaniu z termoplastami. W obu przypadkach dodatkowa porcja energii prowadzi jednak do pirolizy tych materiałów, której produktami są m.in. lotne, małowcząsteczkowe związki organiczne, które w konsekwencji stają się paliwem podtrzymującym proces palenia.

Płomień w aspekcie palności tworzyw sztucznych zdefiniować można jako gazowy obszar procesu spalania, w którym przebiegają egzotermiczne reakcje pomiędzy gorącymi produktami pirolizy polimeru i gazowym utleniaczem. Charakterystyczną jego cechą jest zdolność swobodnego przemieszczania się w ośrodku aż do wypełnienia całej dostępnej przestrzeni [3].

Przykładowy sposób rozprzestrzeniania się płomienia na powierzchni polimeru został przedstawiony na rysunku 2 [2]. Widać z niego, że rozprzestrzenianie się strefy płomienia odbywa się ponad powierzchnią polimeru. Temperatura powierzchni materiału (ok. 500°C) jest niższa od temperatury rozproszonego ognia, a reakcja z tlenem zachodzi jedynie na krawędzi płomienia (ok. 1200°C).

Pomijając analizę wpływu poszczególnych składników tworzywa na proces spalania, zaproponowano ogólny, trójstopniowy mechanizm palenia się polimerów [4,7]:

1. W przedziale temperatur 100–250°C dostarczona energia wystarcza tylko do eliminacji wody bądź chlorowcowodorów z polimeru.
2. W zakresie 250–500°C dostarczona energia powoduje rozrywanie wiązań występujących w głównych łańcuchach polimeru; prowadzi to do jego depolimeryzacji (wg mechanizmu „zamka błyskawicznego”) lub degradacji, co skutkuje wytworzeniem palnego monomeru lub eliminacją małych fragmentów łańcucha, które mogą ulegać już bezpośrednio procesowi spalania w trakcie pożaru. Możliwa jest tu również rekombinacja fragmentów łańcucha, co w efekcie prowadzi do utworzenia aromatycznych pierścieni skondensowanych, które w tym zakresie temperatur są stabilne.
3. W temperaturze powyżej 500°C utworzone w poprzednim etapie związki aromatyczne ulegają dalszej kondensacji. Powstaje wówczas warstwa zwęgliny (*carbon char*), która charakteryzuje się właściwościami izolującymi i jest trudno palna w typowych warunkach atmosferycznych. Najczęściej w pierwszej chwili warstwa ta ma konsystencję gęstej cieczy, co w połączeniu z wydzielającymi się gazowymi produktami spalania daje efekt jej spieniania. Innymi słowy, etap

ten prowadzi do powstania spienionej ochronnej powłoki ognioodpornej.

Dodatek odpowiednich związków typu antypirenów może radykalnie zmienić przebieg palenia materiałów polimerowych. Jeśli taka zmiana spowoduje ograniczenie ilości powstających na drugim etapie pirolizy gazów, wydzielenie gazów niepalnych lub zwiększenie pojemności cieplnej układu, to palność tworzyw sztucznych zmniejsza się i otrzymuje się pewien poziom odporności na płomień [5]. Zatem zrozumienie istoty i przebiegu degradacji termicznej polimerów jest bardzo ważne dla wyjaśnienia oraz przewidywania zachowania się materiałów polimerowych w trakcie pożaru.

Analizując mechanizmy palenia materiałów polimerowych, warto raz jeszcze zwrócić uwagę na przytaczany wcześniej pożar stacji metra w Londynie. Charakterystyczną jego cechą, odróżniającą go od innych, był cichy rozwój pierwszego etapu pożaru i gwałtowne rozprzestrzenienie się ciepła i ognia w kolejnej jego fazie, co było główną przyczyną tak dużej ilości ofiar. Za tak niezwykły przebieg tego pożaru odpowiedzialny był tzw. efekt okopowy. Jest on złożeniem dwóch znanych zjawisk: efektu Coandy oraz efektu rozgorzenia. Efekt okopowy polega na tym, że płomień pożaru rozprzestrzeniając się wzdłuż nachylonego względem poziomu rowu, jakim jest np. eskalator ruchomych schodów wraz z poręczami, mają skłonność do „przyklejania się” do palnego dna i poręczy zamiast unosić się do góry (e. Coandy). W związku z tym, że schody i poręcze na Kings Cross były wykonane m.in. z tworzyw sztucznych, spowodowało to niezwykle silne nagrzanie się tych materiałów do bardzo wysokiej temperatury z równoczesnym wydzieleniem palnych, gazowych produktów rozkładu, które w kontakcie z płomieniami doprowadziły do gwałtownego wybuchu (rozgorzenie). Zjawisko to przed rokiem 1987 nie było w ogóle znane. Dzięki odtworzeniu drogą symulacji komputerowej sytuacji zaistniałej w londyńskim metrze wykazano zjawisko pełzania płomieni po dnie rowu. Nie dowierając wynikom obliczeń, zbudowano model sytuacyjny w skali 1:3, który następnie podpalono i w ten sposób ostatecznie potwierdzono istnienie efektu okopowego [13, 16].

### Cechy pożarowe materiałów polimerowych

Nowoczesnym materiałom na bazie polimerów stawia się wiele wymagań, określając nie tylko ich właściwości użytkowe, ale również precyzując ich właściwości palne i cechy pożarowe. Cecha pożarowa jest

to, najkrócej mówiąc, wielkość empiryczna o wartości liczbowej, będącej funkcją parametrów układu, w którym się ją wyznacza. Do cech pożarowych zalicza się m.in. szybkość generacji ciepła ( $HRR$  – Heat Release Rate), dymotwórczość ( $SEA$  – Smoke Extinction Area), toksyczność gazowych produktów spalania, stopień zwęglenia materiału po spalaniu ( $CY$  – Char Yield) oraz zapalność materiału [6].

Badania wykonane w ostatniej dekadzie wykazały, że najważniejszą cechą pożaru jest szybkość wydzielenia się ciepła, ponieważ właśnie ten parametr ma decydujący wpływ na szybkość rozprzestrzeniania się pożaru oraz czas przeżycia ludzi. Wykazano bowiem, że zarówno dwukrotne zwiększenie zapalności materiałów, jak również ich potencjału toksycznego nie wpływa w sposób zasadniczy na czas przeżycia ofiar pożaru, podczas gdy dwukrotne zwiększenie szybkości wydzielenia ciepła skraca ten czas ponad 3-krotnie [1, 12]. Wielkość ta decyduje o wysokości temperatury pożaru i w konsekwencji wpływa na szybkość rozwoju pożaru. Szybkość wydzielenia ciepła przez materiały polimerowe bezpośrednio wiąże się z szybkością ubytku ich masy podczas ogrzewania i jest funkcją ilości ciepła dostarczonego z płomienia do niepalącej się jeszcze powierzchni materiału [6].

Wciąż niewiele jest publikacji analizujących w sposób ilościowy kształt krzywych  $HRR$ . Jedną z metod matematycznego opisu kształtu krzywych jest opisanie ich odpowiednią funkcją [9], która mimo że nie wyjaśnia fizycznych aspektów zjawiska spalania, umożliwia porównanie charakterystyk spalania różnych materiałów polimerowych [6].

W wyniku analizy porównawczej wykresów funkcji o kształcie zbliżonym do kształtu rzeczywistych krzywych  $HRR$  stwierdzono [6, 9], że zastosować można tu następującą funkcję:

$$\varphi_i(x) = n(1 - e^{-x})^{n-1} e^{-x} \quad \text{dla } x > 0 \quad (1)$$

Podstawiając za  $x$  czas spalania oraz wprowadzając do niej dodatkowe zmienne  $r$  oraz  $k$ , otrzymuje się funkcję:

$$f_i(t) = n r (1 - e^{-kt})^{n-1} e^{-kt} \quad (2)$$

W powyższej funkcji współczynnik  $r$  ma związek z maksymalną szybkością wydzielenia ciepła, co odpowiada wysokości piku danej funkcji  $f_i(t)$ . Zmienna  $k$  odpowiada za szerokość piku, natomiast parametr  $n$  wskazuje początek wykładniczego wzrostu  $f_i(t)$ , czyli w praktyce jest wskaźnikiem opóźnienia zapalenia [6].

Jako kryterium poprawności matematycznego przybliżenia krzywej doświadczalnej  $HRR$  przyjmuje się dopasowanie  $HRR_{\text{dośw}}$  do wykresu funkcji będącej sumą  $N$  ( $N = 1, \dots, 6$ ) funkcji (2) wyrażoną wzorem

$$F_N = \sum f_i(n_i, k_i, r_i, t) \quad (3)$$

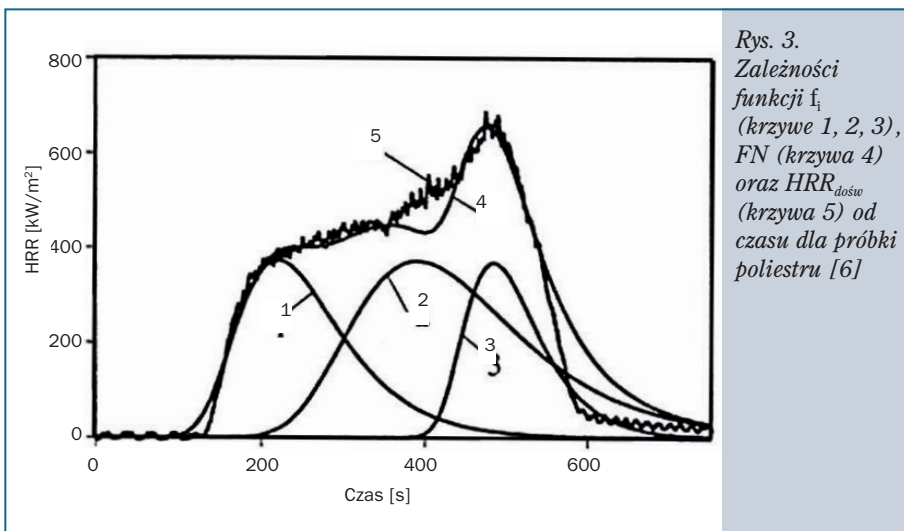
W praktyce stwierdzono, że dobre dopasowanie następuje już dla  $N = 3$ , co jest dobrze widoczne na rys. 3. Na rysunku tym przedstawiono przykładowe porównanie funkcji  $f_i(t)$ ,  $F_N$  oraz  $HRR_{\text{dośw}}$ .

Szybkość wydzielenia ciepła jest również zależna od innej wielkości pożarowej, jaką jest stopień zwęglenia polimeru po procesie spalania ( $Char Yield$ ). Zależność  $HRR$  w funkcji ilości powstałego koksu dla różnych polimerów zobrazowano na rys. 4.

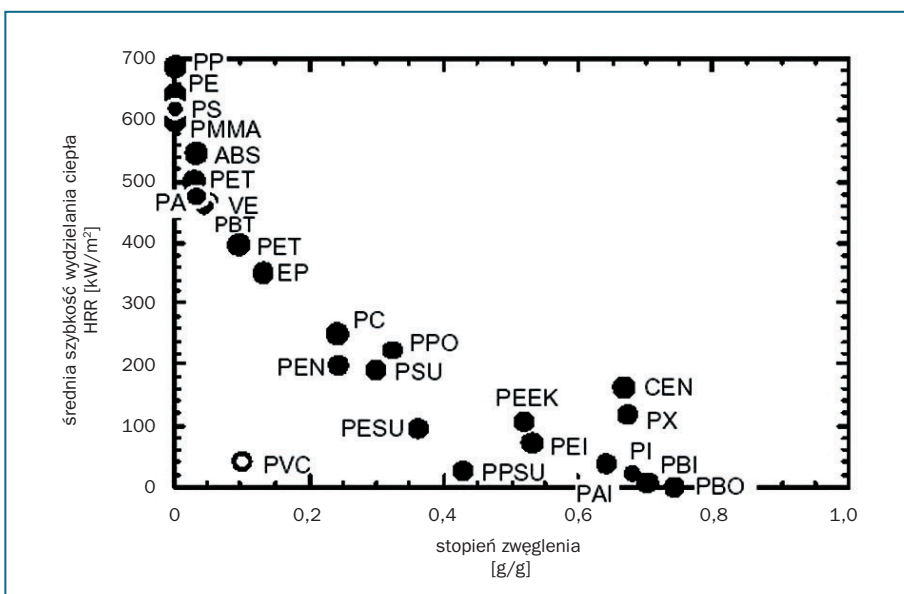
Zaobserwować można, że dla polimerów tworzących w wyniku spalania warstwę zwęgliny, takich jak PET, PA, PC czy PI, wielkość  $HRR$  jest wyraźnie mniejsza niż dla tworzyw, które spalają się bez zwęglania, takich jak PP, PE czy PS. Przyczyną tego jest omawiana już wcześniej ochronna rola spienionej warstwy koksu, która w normalnych warunkach atmosferycznych jest niepalna i uniemożliwia swobodną wymianę ciepła i transport tlenu do głębszych warstw płonącego materiału. Potwierdzają to [11] również kształty krzywych  $HRR$  dla materiałów wydzielających koks oraz nieulegających zwęglaniu w trakcie procesu spalania, które przedstawiono na rys. 5.

Należy także dodać, że kształt krzywych  $HRR$  dla danego materiału zależy również od grubości wyrobu. Zwęglanie tworzywa w trakcie spalania ma zasadniczy wpływ na szybkość wydzielenia energii jedynie dla próbek o większej grubości. Cienkie elementy spalają się krótko i bardzo intensywnie, prawie niezależnie od rodzaju tworzywa, z jakiego są wykonane, co również jest widoczne na rys. 5.

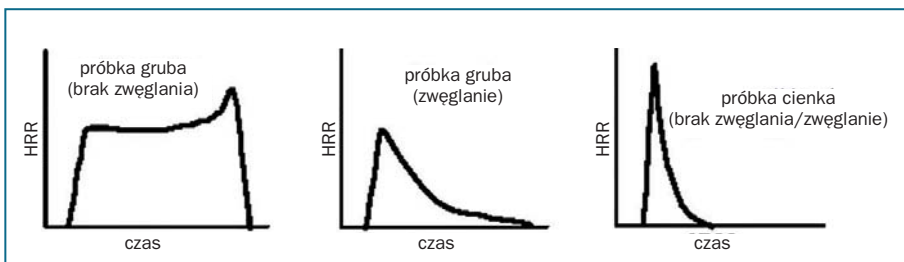
Każdy pożar, bez względu na to gdzie powstał, charakteryzuje się wydzieleniem dymu, który utrudnia prowadzenie akcji ratowniczych oraz ogranicza widoczność, a tym samym zwiększa liczbę ofiar. Osoby będące w bezpośrednim kontakcie z pożarem wpadają w panikę i tracą wówczas orientację w pomieszczeniach, co pogłębia tylko możliwości ich narażenia. Według badań statystycznych [14, 15] aż 80% ofiar śmiertelnych pożarów nie ma kontaktu z płomieniami, co potwierdza tezę o wysokim stopniu zagrożenia dymem. Zagrożenie to zwiększa się wraz z coraz szerszym stosowaniem materiałów polimerowych w budownictwie oraz transporcie. Stano-



Rys. 3. Zależności funkcji  $f_i$  (krzywe 1, 2, 3), FN (krzywa 4) oraz  $HRR_{dostaw}$  (krzywa 5) od czasu dla próbki poliestru [6]



Rys. 4. Zależność HRR od stopnia zwęglania polimerów po spalaniu [11]



Rys. 5. Zależność HRR od stopnia zwęglania tworzywa w procesie spalania oraz grubości próbki [11]

wią one bowiem ok. 10–15% ogólnej masy materiałów palnych w budownictwie mieszkaniowym i ilość ta cały czas rośnie.

Dym zdefiniować można jako aerozol, w którym gaz stanowi fazę rozpraszającą, natomiast ciało stałe lub ciecz jest fazą rozproszoną, a wymiary cząstek mieszczą się w przedziale  $10^{-3}$ – $10^{-6}$  mm. W nomenklaturze pożarnej używa się natomiast

definicji sformułowanej przez Grossa, Lottusa i Robertsona [10], wg której dym to gazowy produkt spalania materiałów organicznych, w którym rozproszone są cząstki ciekłe i stałe. Definicja ta bardzo dobrze pasuje do opisu procesu spalania materiałów polimerowych.

Obecność tworzyw sztucznych zwiększa zagrożenie pożarowe nie tylko ze wzglę-

du na ich łatwopalność oraz wydzielanie się dymu, ale przede wszystkim na toksyczność tego dymu. Masowe zatrucie gazowymi produktami termicznego rozkładu tworzyw sztucznych odnotowane zostało po raz pierwszy po pożarze szpitala w Cleveland (USA) w 1929 r., gdzie śmierć poniosło 125 osób. Jak stwierdzono później, przyczyną zgonów był tlenek węgla i tlenki azotu powstałe w wyniku spalania filmów rentgenowskich z nitrocelulozy [10].

Często już po upływie 1–2 minut od momentu powstania pożaru ludzie są narażeni na niebezpieczeństwo utraty życia, a główną tego przyczyną jest kontakt z toksycznymi gazami. Zagrożenie życia ludzkiego w czasie pożaru zależy od rodzaju substancji toksycznych (a więc od rodzaju tworzywa, które ulega spalaniu), ich stężenia oraz warunków pożaru (rozmiarów przestrzennych, obciążenia ogniowego, stanu rozdrobnienia materiałów palnych, wentylacji itp.). Substancje szkodliwe powstałe w wyniku spalania tworzyw sztucznych przedostają się do organizmu ludzkiego wszystkimi trzema możliwymi drogami, a więc przez drogi oddechowe, wskutek absorpcji przez skórę oraz przez przewód pokarmowy. Zagrożenie tymi związkami jest funkcją ich stężenia, szybkości jego narastania oraz czasu przebywania w skażonej atmosferze. Zależy ono również od stanu aktywności fizycznej (np. szybki oddech przy zmęczeniu lub dużym wysiłku fizycznym) [17].

Prowadzone badania [1, 2, 4, 11, 15, 17] stwierdzają jednoznacznie, że najbardziej niebezpiecznym i najczęściej spotykanym gazem wchodzącym w skład produktów spalania tworzyw sztucznych jest tlenek węgla (CO). Jest to związek bardzo toksyczny, głównie z powodu jego cech fizycznych – bezbarwności, bezwonności i reaktywności chemicznej wynikającej z kompleksującego działania na niektóre jony metali ciężkich. Stwarza on zagrożenie w każdym stężeniu – w niższych (ok. 0,01%) wywołuje utratę koordynacji ruchu, w wyższych – nagłą śmierć przez uduszenie z powodu wiązania hemoglobiny w trwały chemicznie związek – karboksyhemoglobinę – i na przykład 0,2% CO w powietrzu działa w krótkim czasie (2–3 minut) zabójczo. W zwiększonym stężeniu w procesie spalania tworzyw występuje także zawsze dwutlenek węgla (CO<sub>2</sub>). Jego stężenie powyżej 2% w powietrzu powoduje zaburzenia oddychania. Drażniąc ośrodek oddechowy, wzmacnia wentylację płuc, co powoduje dodatkową możliwość zatrucia innymi gazowymi produktami spalania. Ponadto w warunkach pożaru w produktach spalania tworzyw w zależności

od ich rodzaju znajdować się mogą inne gazy, jak chlorowódz (HCl), cyjanowódz (HCN), fosgen (COCl<sub>2</sub>), tlenki siarki (SO<sub>2</sub> i SO<sub>3</sub>) i inne.

Z drugiej strony należy jednak bardzo wyraźnie podkreślić, że toksyczność lotnych produktów spalania tworzyw polimerowych nie jest wcale większa niż podczas spalania np. węgla kamiennego czy drewna [1, 8]. Ciekawie prezentują się wyniki badania toksyczności procesu spalania wielu tworzyw termoplastycznych, w tym PVC, które porównywano z produktami spalania niepalnionego drewna oraz niepalnionej pianki poliuretanowej [1]. Wskazują one jednoznacznie, że nie ma zasadniczej różnicy pomiędzy toksycznością dymu z płonących termoplastów (również PVC), drewna i PUR. Wszystkie te materiały pod względem toksyczności lotnych produktów spalania plasowały się w pobliżu typowych materiałów opałowych.

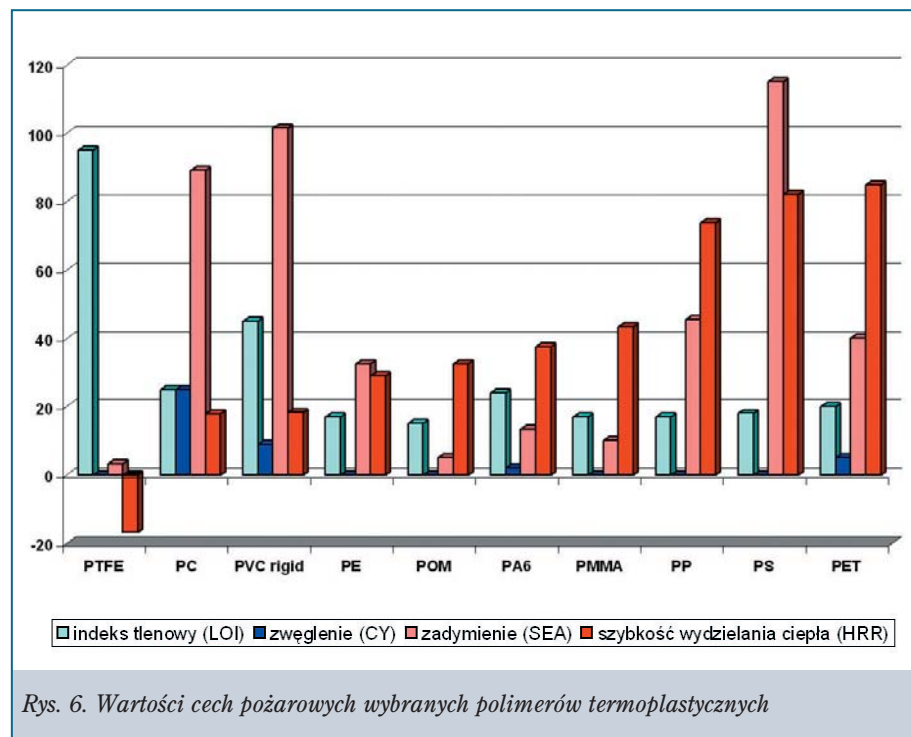
Analiza prawie 5000 wypadków pożarowych z udziałem tworzyw polimerowych [1, 8, 12] pozwala sformułować kilka ważnych wniosków dotyczących toksyczności ich gazowych produktów spalania. Po pierwsze, toksyczność atmosfery pożaru jest praktycznie wyłącznie uzależniona od ilości tlenku węgla (CO) – ponad 90% ofiar śmiertelnych w pożarach to ofiary zatrucia CO. Kolejnym problemem jest proces spalania poli(chloroku winylu), materiału najbardziej krytycznie ocenianego przez społeczeństwo pod względem toksyczności produktów spalania. Zostało dowiedzione, że jego spalanie nie powoduje wydzielania takich ilości dioksyn i innych wielopierścieniowych związków aromatycznych, które byłyby toksyczne dla organizmu ludzkiego. Niewątpliwie toksyczność spalania PVC pogłębia szkodliwy wpływ wydzielającego się, drażniącego i korodującego chlorowodoru. Z drugiej strony jednak obecność chlorowca w polimerze skutkuje znacznym obniżeniem szybkości wydzielania ciepła *HRR*, co w konsekwencji pod kątem bezpieczeństwa pożarowego plasuje PVC porównywalnie z innymi materiałami polimerowymi. Na koniec warto zauważyć, że porównanie wypadków pożarowych mających miejsce zarówno przed, jak i po nastaniu ery tworzyw polimerowych wskazuje, że ich obecność nie wpływa znacząco na toksyczność produktów spalania.

### Podsumowanie

Na koniec warto zaprezentować zbiorczo wartości ważniejszych cech pożarowych najczęściej spotykanych polimerów termopla-

stycznych. Zostały one przedstawione na rys. 6 z uszeregowaniem materiałów pod kątem wzrastającej wartości *HRR*, a więc od polimeru najbardziej do najmniej bezpiecznego. Polimer jest z pożarowego punktu widzenia tym bezpieczniejszy w użytkowaniu, im niższą posiada wartość *HRR* (szybkość wydzielania ciepła) oraz *SEA* (dymotwórczość), natomiast wyższy współczynnik *LOI* (indeks tlenowy) oraz *CY* (stopień zwęglenia po spalaniu). Widać, że trzy pierwsze polimery są najbardziej bezpieczne, choć PC oraz PVC wykazują znaczne właściwości

- [5] J. MURPHY: *Additives for Plastics*, Elsevier Sci. Ltd, 2001.  
 [6] M. PROFIT-SZCZEPAŃSKA, M. PÓŁKA: „Polimery”, 2003, 48, 545.  
 [7] E. KICKO-WALCZAK, P. JANKOWSKI: „Polimery”, 2004, 49, 747.  
 [8] P. MASTALERZ: *Ekologiczne kłamstwa ekowojowników*, Wydawnictwo Chemiczne, Wrocław 2000.  
 [9] F. NUMAJIRI, K. FURUKAWA: *Fire Mater.*, 1998, 22, 39.  
 [10] J. GARBARSKI, M. FABJAŃSKI: „Polimery”, 2004, 49, 283.



Rys. 6. Wartości cech pożarowych wybranych polimerów termoplastycznych

dymotwórcze. Trzy ostatnie polimery stanowią największe zagrożenie w warunkach pożarowych, przy czym najbardziej niebezpieczny wydaje się być PS. Testy UL 94V potwierdzają te spostrzeżenia – PTFE oraz PVC (twardy) należą do klasy V0 tworzyw niepalnych, PC jest w klasie V2, natomiast wszystkie pozostałe materiały zaliczane są do klasy palności HB, czyli materiałów najbardziej palnych [11].

### Literatura

- [1] M. OBLÓJ-MUZAJ: „Polimery”, 2000, 45, 720.  
 [2] A.R. HORROCKS, D. PRICE: *Fire Retardant Materials*, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge 2001.  
 [3] S. BORYNIEC, W. PRZYGOCKI: „Polimery”, 1999, 44, 87.  
 [4] A.F. GRAND, CH.A. WILKIE: *Fire Retardancy of Polymeric Materials*, Marc Dekker Inc., New York 2000.

- [11] „Polymer Flammability”, Final Report, US Department of Transportation, Washington 2005.  
 [12] G. BEYER: *Plast. Addit. & Comp.*, 2002, 10, 22.  
 [13] K. MOODIE: „Fire Safety Journal”, 1992, 18, 13.  
 [14] Materiały statystyczne firmy SRI Consulting, www.sriconsulting.com, 2001.  
 [15] Ceresana Research, *Market Study: Flame Retardants*, Ceresana Research, Konstanz 2006.  
 [16] S. SIMCOX, N.S. WILKES, I.P. JONES: „Fire Safety Journal”, 1992, 18, 49.  
 [17] T. SAWICKI: „Bezpieczeństwo Pracy”, 2003, 7/8, 43.

■ dr inż. J. Iwko  
 Laboratorium Tworzyw Sztucznych,  
 Politechnika Wrocławska