

# Wytwarzanie plazmy i jej zastosowania

▶ Jakub Szałatkiewicz

W artykule przedstawiono źródła plazmy, koncentrując się na metodach jej wytwarzania. Omówiono też wybrane obszary zastosowań plazmy w takich dziedzinach, jak metalurgia, inżynieria materiałowa, medycyna i ekotechnika. Artykuł stanowi przewodnik dla osób rozpoczynających działalność związaną z technologiami plazmowymi i umożliwia zapoznanie się w syntetycznej formie z szerokim spektrum jej zastosowań i potencjałem, jaki niosą.

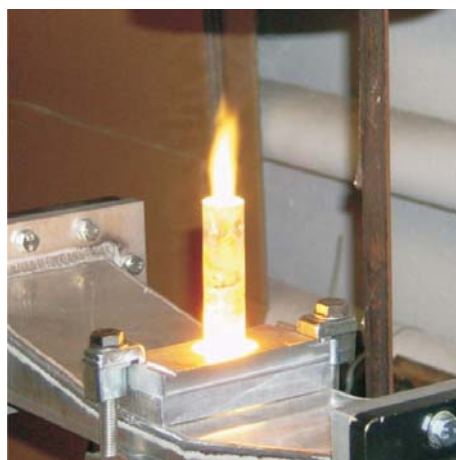
## Źródła plazmy i metody jej wytwarzania

Oprócz zjawisk jak zorza polarna czy pioruny, plazma naturalnie i przez dłuższy czas na Ziemi nie występuje. Jednak, co ciekawe, im dalej od naszej planety, tym więcej znajdujemy materii w stanie plazmy. Szacuje się, że w stanie plazmy jest 99,9 % materii wszechświata. Do celów technicznych, użytku i badań plazma wytwarzana jest „sztucznie”, za pomocą szerokiej gamy urządzeń przeznaczonych do tego celu. Najbardziej rozpowszechnione są plazmotrony, czyli urządzenia do wytwarzania (generowania) plazmy. Przyjęło się określać, że plazmotrony stosują metodę łukową. Sporadycznie spotykane jest stosowanie tej nazwy do generatorów plazmy, np. mikrofalowych, częstotliwości radiowej (RF), laserowych, indukcyjnych czy pojemnościowych.

Podział na plazmę mikrofalową i łukową to podział ze względu na metodę jej wytwarzania i podtrzymywania. Różnica polega na zastosowaniu innej aparatury i innego czynnika doprowadzającego energię do jonizowanego gazu – plazmy. W przypadku plazmy mikrofalowej są to mikrofały, które po zainicjowaniu jonizacji w gazie, podtrzymują powstałą plazmę energią dostarczaną ciągle lub impulsowo ze źródła mikrofal. Do plazmy dostarczany jest także gaz plazmotwórczy, który jest medium wykorzystywanym do prowadzenia reakcji w plazmie lub za jej pomocą. Rys. 1. przedstawia pracujący plazmotron mikrofalowy. Urządzenie to powstało na potrzeby badań własnych autora artykułu.

Kolejnym rodzajem plazmy, który można wydzielić ze względu na metodę jej wytwarzania jest plazma łukowa. Jest ona najbardziej rozpowszechnionym źródłem plazmy stosowanym obecnie w przemyśle i wielu innych aplikacjach. Rys. 2 i 3 przedstawiają pracujące plazmotrony łukowe.

Źródłem plazmy i sposobem dostarczania do niej energii jest wymuszony przepływ prądu elektrycznego w gazie. Plazma to zjonizowany gaz, który przewodzi prąd elektryczny i tę właściwość wykorzystuje się



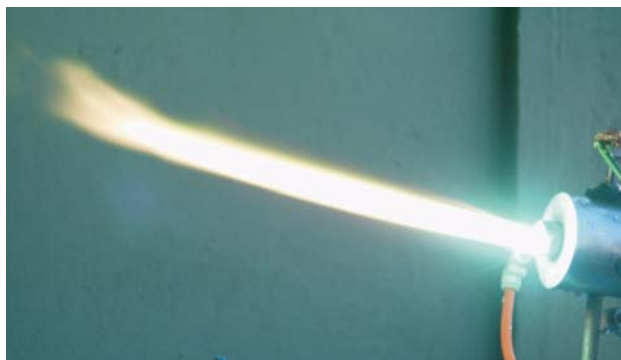
Rys. 1. Pracujący plazmotron mikrofalowy o mocy 1,5 kW w ciśnieniu atmosferycznym. Żółte zabarwienie plazmy jest wynikiem jej zanieczyszczenia przez obecność węgla (grafitu). Gazem plazmotwórczym jest powietrze. Wytwarzana w nim plazma jest plazmą nietermiczną

przy wytwarzaniu plazmy łukowej. Po zainicjowaniu łuku elektrycznego jest on podtrzymywany przez przepływający przez gaz prąd elektryczny i umożliwia wykorzystywanie go jako źródła plazmy.

Widoczne na rys. 2 i 3 plazmotrony zostały zbudowane przez autora artykułu, na potrzeby badań nad wykorzystaniem plazmy do zastosowań przemysłowych i utylizacji odpadów. Obecnie są one użytkowane w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów, gdzie są prowadzone prace badawcze mające na celu zastosowanie plazmy do utylizacji wybranych odpadów.

Innym źródłem plazmy wykorzystywanym w przemyśle jest wyładowanie wokół elektrody w próżni. Urządzenia te wykorzystują właściwości fal radiowych np. 13 MHz do wzbudzenia plazmy wokół elektrody w komorze próżniowej. Tak wytwarzana plazma jest stosowana w urządzeniach do nanoszenia cienkich warstw i przeprowadzania szeregu reakcji przy użyciu plazmy w obniżonym ciśnieniu np. PECVD. Służą one do takich zaawansowanych aplikacji jak wzrost diamentów, nanoszenie lub trawienie nanowarstw, tworzenie nowych materiałów jak przykładowe HBLLED (*High Brightness Light-Emitting Diode*) czyli wytwarzanie nowej generacji diod LED wykorzystywanych jako nowe źródła światła o dużej sprawności.

▶ mgr Jakub Szałatkiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów, Warszawa



**Rys. 2.** Plazma wytwarzana w plazmotronie łukowym o laminarnym jej wypływie. Moc plazmotronu: 5 kW. Gazem plazmotwórczym jest powietrze. Wraz z oddalaniem się od źródła plazma stygnie i rozprasza się w otoczeniu



**Rys. 3.** Plazma wytwarzana w plazmotronie łukowym. Moc plazmotronu: 15 kW. Gazem plazmotwórczym jest powietrze

Powyższe przykłady to tylko kilka z ogromnej liczby źródeł i sposobów wytwarzania plazmy. Plazmą jest iskra elektryczna w świecy zapłonowej, wyładowanie barierowe wokół elektrody, łuk elektryczny i wyładowanie koronowe np. z generatora wysokiego napięcia Tesli.

## Zastosowania plazmy

Plazma znajduje swoje zastosowania w ogromnej liczbie dziedzin życia i wytwórczości człowieka. Pierwsze jej zastosowania to chemia i metalurgia: piece łukowe do wytopu aluminium, metali trudno topliwych lub ich oczyszczania, hartowania elementów w plazmie np. proces azotowania plazmowego/jonowego. Kolejne to nanoszone plazmowo (PECVD, TS i inne) na materiałach cienkie warstwy np. redukujące tarcie, które zapewniają dłuższą żywotność łożysk i lepsze ich parametry.

Prowadzone są prace badawcze nad użyciem plazmotronów zamiast palników mazutowych i olejowych w energetyce, na potrzeby rozpalania palników pyłowych w elektrowniach węglowych.

Przemysł to nie jedyny obszar zastosowań plazmy. Metoda Thermal Spraying stosowana w przemyśle znalazła zastosowanie w medycynie. Biokompatybilność implantów jest podnoszona dzięki pokrywaniu ich metalowych części warstwami ceramicznymi nanoszonymi plazmowo. Operacje przy użyciu narzędzi wyposażonych w miniaturowe źródła plazmy służą do usuwania guzów, a w dentyście prowadzi się badania nad użyciem plazmy

np. do usuwania biofilmów chroniących kolonie bakterii w kanałach zębów.

Paradoksalnie plazma znajduje zastosowanie w sterylizacji urządzeń wrażliwych na wysoką temperaturę. Biosensory enzymatyczne wszczepiane pod skórę są bardzo wrażliwe na konwencjonalne metody sterylizacji, a dzięki technologiom plazmowym mogą być skutecznie i bezpiecznie sterylizowane przed wszczepieniem.

Na pograniczu medycyny i technologii produkcji plazma udowadnia swoją użyteczność przy tworzeniu narzędzi o zmniejszonej energii powierzchniowej. Dla przemysłu farmaceutycznego oznacza to redukcję kosztów produkcji dzięki eliminacji środków do uwalniania tabletek z form, a to przekłada się na wyższą jakość leków.

Przemysł spożywczy uzyskuje efekt dezynfekcji i nowe właściwości powierzchni dzięki procesom plazmowym, np. trwałe lśnienie, żywsze kolory, wyjątkowa twardość lub nieprzenikalność gazowa. Pokrywanie butelek PET warstwą węglową 30-krotnie zmniejsza przenikalność  $O_2$  i 7-krotnie  $CO_2$ . Warstwa węglowa grubości 100 nm i osadzanie cienkiej warstwy tlenku krzemu na zewnątrz nadaje butelce PET wygląd przezroczystości czystego szkła, a efekt wizualny przekłada się na wyższą sprzedaż [1].

*Technologia Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition* to wspomagane plazmowo osadzanie chemiczne gazów na substratach w celu uzyskania cienkich warstw o różnych właściwościach, np. diamentu, tytanu i innych. Technologia ta umożliwia tworzenie powłok np. diamentowych wielkości kilku centymetrów i grubości milimetra, co daje wyjątkową wytrzymałość termiczną tak istotną dla łopatek turbin oraz odporność na czynniki trawiące, jak i chłodzenie. Diament przewodzi ciepło sześć razy lepiej niż miedź. Technologie tego typu otwierają drogę do tworzenia radiatorów diamentowych dla wysokowydajnych układów elektronicznych, a wszystko to dzięki próżniowej technologii plazmowej PECVD.

Ponadto powłoki ceramiczne są osadzane w celu zmniejszenia zużycia i tarcia elementów. Warstwy te nie tylko są twarde, ale też odznaczają się ogromną precyzją położenia. Pokrywane są nimi na przykład ostrza żyłtek, co przedłuża ich żywotność i sprawia, że gołą delikatniej [1].

Innego typu powłoki osadzane na szkłe zmniejszają straty ciepła do 60%. Okna pokryte warstwami samoczyszczącymi z powłokami nienasiąkliwymi, z których samoczynnie spływa woda lub ogniwa fotowoltaiczne czy powierzchnie odbijające promieniowanie cieplne to także produkty zastosowania plazmy i procesów osadzania cienkich warstw.

## Plazma w utylizacji odpadów

Ekotechnika jest kolejnym obszarem gdzie technologie plazmowe udowadniają swą przydatność. Autor artykułu od lat prowadzi prace nad opracowaniem i wykorzystaniem technologii plazmowych do celów ekologicznych w Polsce. [1, 2] Głównym obszarem

zainteresowania jest utylizacja odpadów przy użyciu technologii plazmowych.

Każda cząsteczka poddana oddziaływaniu plazmy (temperatura rzędu 4000 - 20 000 K) ulega rozpadowi na tworzące ją atomy, a gdy energia jest dostatecznie duża, jej atomy również ulegają jonizacji. Właściwość ta pozwala na całkowitą dysocjację związków złożonych do prostych atomów wchodzących w jej skład. „Istotą termochemicznej neutralizacji i likwidacji aktywnych substancji chemicznych jest wykorzystanie strefy plazmy do atomizacji, oksydacji i przekształcenia produktów procesu w związki mało aktywne i proste [3].

Zagadnienie termochemicznej dekompozycji odpadów przy użyciu plazmy wyróżniają parametry nieosiągalne dla innych technologii. Są to ekstremalnie wysokie temperatury, kontrola nad atmosferą w której prowadzone są reakcje, a także wysoka gęstość energii źródeł plazmowych. Ponadto plazma wytwarza silne promieniowanie (UV) i jej składniki o wysokich energiach dodatkowo katalizują dekompozycję najbardziej złożonych i trwałych związków, jakie występują w odpadach. W przypadku stosowania technik plazmowych uzasadnione jest określanie ich mianem procesów termochemicznych, na bazie których następuje rozkład i przekształcenie związków, gdyż nie tylko temperatura, ale i inne czynniki biorą w niej udział.

Instalacje plazmowe pozwalają na prowadzenie procesu kompletnego przekształcenia odpadów bez jednoczesnego wytwarzania kolejnych odpadów procesowych, jak np. toksyczne popioły ze spalarni odpadów. Możliwe jest to dlatego, że w przypadku technologii plazmowych przeprowadzane są kompleksowo wszystkie stopnie przekształcenia odpadów, a nie tylko ich spalanie.

W procesie tym zachodzi:

- wysokotemperaturowa piroliza - dysocjacja związków chemicznych prowadząca do zgazowania substancji stałych bez udziału tlenu
- witrifikacja - zeszklenie, stopienie i wyżarzenie pozostałości popirolitycznej w temperaturach plazmy, uzyskując całkowicie stabilny, bezpieczny i niewymywalny spiek mineralny.

Produktami plazmowego przekształcania odpadów są: gaz (piroliza + dysocjacja), spiek mineralny (witrifikacja) oraz ciepło. Wszystkie produkty plazmowej utylizacji mają wartość rynkową i są produktami, a nie odpadami procesu przetwarzania odpadów.

Zastosowanie plazmy do procesów utylizacji odpadów jest głównym kierunkiem zainteresowań badawczych i aplikacyjnych autora artykułu. Obecnie prowadzone są prace nad wykorzystaniem tej technologii w Polsce.

## Zastosowania plazmy w ekotechnice

Z ciekawszych i rozwijanych w kraju zastosowań plazmy w ekotechnice należy wymienić badania w kierunku wykorzystania wyładowania typu Glide Arc do

# www.ilc150eth.pl

## Poznaj możliwości

## sterownika ILC

## i weź udział w konkursie



**Kompaktowe sterowniki w systemach sterowania to oszczędność dla Ciebie!**

Automatyka nie zawsze musi być skomplikowana i kosztowna.

Jest to możliwe dzięki rodzinie sterowników klasy ILC 100 z Phoenix Contact. ILC 150 to mały sterownik zaskakujący funkcjonalnością i możliwościami.

Można go rozbudowywać o moduły I/O. Idealnie współpracuje z weboowymi panelami operatorskimi. Komunikuje się ze „światem” przez Ethernet.

Stwórz swoje optymalne rozwiązanie. ILC 150 – po prostu fajny!

**Po dodatkowe informacje zadzwoń pod: 071 39 80 410**

**lub zobacz na:**

**www.phoenixcontact.pl**



procesów utylizacji toksycznych gazów  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  i lotnych substancji organicznych [4].

Przykładem aplikacji plazmy tego rodzaju jest oczyszczanie gazów, np. spalin, redukcja emisji tlenków, niedopalonych węglowodorów, przy użyciu wyładowań barierowych lub rozwijany w MIT reforming paliwa do wodoru w celu poprawienia procesu spalania i zmniejszenia emisji  $\text{NO}_x$  z silników spalinowych [5].

Zastosowania plazmy na potrzeby ochrony środowiska to dziś bardzo dynamicznie rozwijający się obszar badań, w którym należy spodziewać się wielu nowych i użytecznych odkryć.

## Plazma jako medium, plazma jako narzędzie

Nie tylko bezpośrednie użycie plazmy ma swoje aplikacje. Również pośrednie wykorzystanie plazmy umożliwia powstanie nowych technologii i budowę nowej aparatury.

Bardzo ciekawą właściwością źródeł plazmy jest generowanie strumienia ciepła w dowolnym gazie i środowisku, bez procesu spalania. Jest to unikalna właściwość plazmotronów wytwarzających strumień ciepły bez produktów spalania  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ , jak i zanieczyszczeń z tym związanych. Możliwe jest ogrzanie dowolnego gazu do pożądaných temperatur na potrzeby konkretnych procesów cieplno-chemicznych wymagających zarówno dużej czystości, jak i wysokich temperatur. Gazy plazmotwórcze jak argon, wodór, tlen i inne są powszechnie stosowane w źródłach plazmy i doskonale pozwalają wpływać oraz kierować procesami przemysłowymi.

Przełączanie energii 100 kV i prądów 100 kA stało się możliwe dzięki przełącznikom plazmowym. Jest ono kluczowe dla technologii wysokoenergetycznych impulsów. Pulsacyjne, iskrowe wyładowania wytwarzają silne fale akustyczne, dzięki którym powstała alternatywna metoda kruszenia betonu – umożliwia ona odzysk zbrojenia i ponowne wykorzystanie kruszywa. Wysokiej mocy impulsy również są testowane do wykorzystania ich zamiast chemicznych materiałów wybuchowych w kopalniach i usuwania osadów z rur [1].

W Unii Europejskiej powstaje największy na świecie eksperymentalny reaktor fuzyjny, projekt ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). Będzie w nim wytwarzana i utrzymywana plazma o temperaturze rzędu 100 mln K umożliwiająca przeprowadzenie syntezy jądowej i wykorzystanie jej do budowy nowego rodzaju fuzyjnych źródeł energii w przyszłości.

NASA prowadzi projekt badawczy VASIMIR (*Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket*) będący krokiem w kierunku budowy napędów jonowych, wykorzystujących zamiast spalania paliwa chemicznego właściwości elektromagnetyczne plazmy umożliwiające wykorzystanie jej jako medium w napędzie kosmicznym. Co ciekawe, użyte do tego celu zostało źródło plazmy mikrofalowej.

## Podsumowanie

Technologie plazmowe stosowane są w bardzo różnych obszarach, odnajdujemy je od metalurgii przez inżynierię materiałową i produkcję, aż po zastosowania biomedyczne i ekotechnikę. Szeroka gama aplikacji i elastyczność procesowa, otwiera drogę do poszukiwań kolejnych nowych rozwiązań, aplikacyjnych.

Przedstawiony w artykule przegląd wybranych technologii i zastosowań plazmy wskazuje aktualne trendy w ich rozwoju. Nie jest to zamknięty katalog obszarów, w których plazma może być stosowana i należy podkreślić, że w XXI wieku znaczenie plazmy stale będzie rosło. Dlatego bardzo ważny jest rozwój technologii plazmowych w Polsce, aby uniknąć powstania luki technologicznej w tym obszarze.

## Bibliografia

1. German Federal Ministry of Education and Research: *Plasma Technology Process Diversity + Sustainability*. [http://www.bmbf.de/pub/plasma\\_technology.pdf](http://www.bmbf.de/pub/plasma_technology.pdf), Bonn, 2001.
2. Szałatkiewicz J., *Zastosowania plazmy w technice – aktualne tendencje*, PAR 2/2010, Warszawa.
3. Ministerstwo Środowiska: *Innowacyjne Technologie Zagospodarowania Odpadów. Informacja dla Sejmowej Komisji Ochrony Środowiska Zasobów Naturalnych i Leśnictwa*. [http://regis2.maxus.com.pl/files/ekopak/AKT\\_8\\_Dok.innowacyjne.pdf](http://regis2.maxus.com.pl/files/ekopak/AKT_8_Dok.innowacyjne.pdf), Warszawa, 2008.
4. Diatczyk J.: *Badanie Pola Temperatury w Komorze Wyładowczej Reaktora Plazmowego*. <http://www.rsi.lubelskie.pl/doc/sty/n1/jdiatczyk.pdf>, PL, 2008.
5. Bromberg L., Cohn D. R., Rabinovich A., Heywood J.: *Emissions reductions using hydrogen from plasmatron fuel converters*. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 26, Issue 10, s. 1115–1121, 2001.
6. Szałatkiewicz J.: *Plazma na potrzeby badań w zakresie utylizacji odpadów*. [www.patria.edu.pl](http://www.patria.edu.pl), Europejskie Tow. Umiejętności, Warszawa, 2009.
7. Olszowiec P.: *Nowe zastosowania technologii plazmowych w energetyce. Rozpala kotły utylizuje odpady*. *Gigawat Energia*, nr 10, 2007.
8. Jiang C. i in.: *Nanosecond Pulsed Plasma Dental Probe*. *Plasma Processes and Polymers*, Volume 6, Issue 8, s. 479–483, 2009.
9. Świątkowska Ż.: *Powłoki Diamentowe Formowanie Metodą Chemicznego Osadzania z Fazy Gazowej*. [http://www.ifj.edu.pl/dept/no5/nz53\\_old1/sem\\_pegan\\_05122007.pdf](http://www.ifj.edu.pl/dept/no5/nz53_old1/sem_pegan_05122007.pdf). Samodzielna Pracownia Fizykochemii i Inżynierii Powierzchni IFJ PAN, Kraków, 2007.
10. Yamagata Y., Fujii Y., Kawagashira Y., Muraoka Y.: *Rozkład cząstek z gazów wylotowych silnika spalinowego Diesla (DPM) za pomocą tlenków azotu NO generowanych w wyładowaniu barierowym*. *Przegląd techniczny* 5/2009. ■