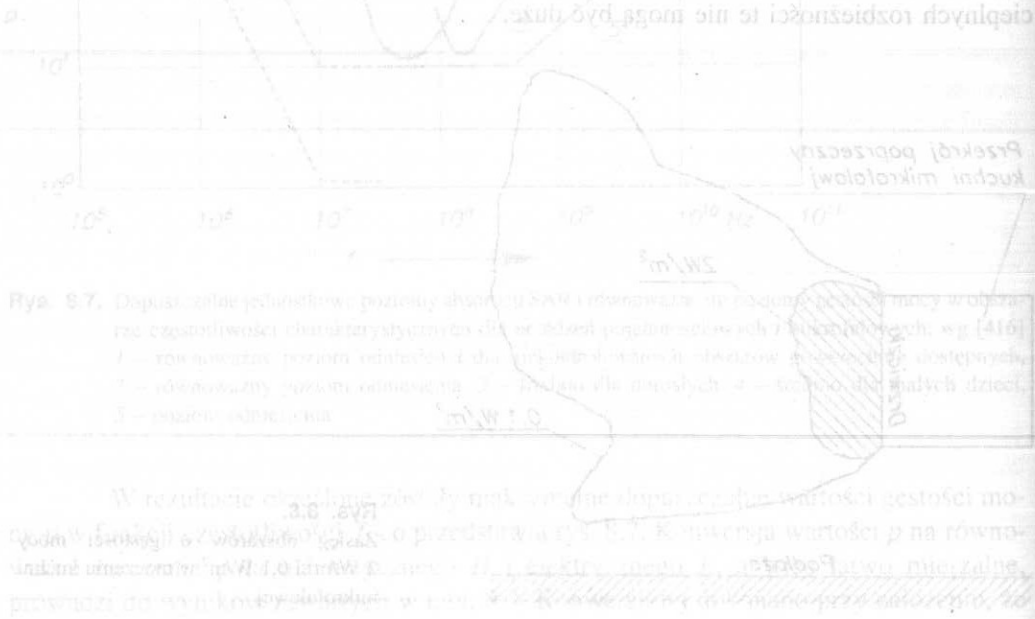


Oczywiście sygnały o powstawaniu efektów nietermicznych powinny być skrupulatnie badane, a przyjęte przepisy w razie potrzeby modyfikowane. Dla przykładu na rys. 8.8 podano wyniki pomiarów gęstości mocy w otoczeniu kuchni mikrofalowej powszechnego użytku o stosunkowo dużej emisji promieniowania. Otóż w średniej odległości od drzwiczek równej 25 cm, gęstość mocy kształtuje się na poziomie 2 W/m^2 , czyli 5 razy mniejszej od wartości, która przyjęta jest za dopuszczalną, a więc nie powodująca udokumentowanych niepożądanych efektów biologicznych.

Obowiązujące od roku 1995 międzynarodowe przepisy normalizacyjne są bardziej liberalne i dopuszczają w normalnych warunkach w odległości 5 cm od urządzenia typu przemysłowego gęstości mocy $p = 50 \text{ W/m}^2$, zaś w warunkach nietypowego użytkowania 100 W/m^2 [720].

Urządzenia powszechnego użytku i przemysłowe mają cały szereg zabezpieczeń uniemożliwiających otwarcie komory rezonatora podczas pracy oraz ograniczających emisję promieniowania przez otwory technologiczne i nieszczelności. Szczegóły na ten temat znajdzie Czytelnik w literaturze specjalistycznej, np. w [643].



Rys. 8.8. Wyniki pomiarów gęstości mocy w otoczeniu kuchni mikrofalowej. Oś pozioma to odległość od drzwiczek (cm), a oś pionowa to gęstość mocy (W/m^2). Wykres pokazuje, że gęstość mocy jest najwyższa bezpośrednio przy drzwiczkach (około 10 W/m^2) i szybko maleje z odległością. W odległości 25 cm gęstość mocy wynosi około 2 W/m^2 . W odległości 50 cm gęstość mocy jest już poniżej 1 W/m^2 .

9

NAGRZEWANIE PLAZMOWE

9.1. Zasady nagrzewania plazmowego

9.1.1. Plazma i jej właściwości

Nagrzewanie plazmowe jest to nagrzewanie elektryczne polegające na wykorzystaniu energii strumienia plazmy niskotemperaturowej¹⁾.

Wyjaśnienie zasady tej metody nagrzewania wymaga przytoczenia przynajmniej kilku podstawowych informacji o właściwościach plazmy, a zwłaszcza o jej niskotemperaturowej odmianie. Otóż plazmą nazywa się mieszaninę obojętnych elektrycznie cząstek gazowych z równolicznymi ładunkami ujemnymi i dodatnimi o pewnej minimalnej koncentracji, zajmującą obszar o wymiarze liniowym większym od tzw. promienia Debeya.

Plazma według energetycznego kryterium klasyfikacji bywa uważana za czwartą – po stałym, ciekłym i gazowym – stan materii. Każdy z tych stanów charakteryzuje energia wiązania i energia kinetyczna cząstek materii. Dany stan istnieje tylko wtedy, gdy średnia energia kinetyczna cząstek materii jest mniejsza niż energia wiązania charakterystyczna dla tego stanu. Jeśli rozważyć dostatecznie liczny zbiór cząstek, to przejście od jednego do drugiego stanu następuje zwykle stopniowo. W takiej sytuacji jest wykluczone istnienie wyraźnej granicy między kolejnymi stanami zwłaszcza, że w każdym gazie, także o bardzo niskiej temperaturze, może znajdować się nieliczna liczba cząstek naładowanych elektrycznie. Z tego względu umownie przyjęto uważać za stan plazmowy taką mieszaninę neutralnych cząstek gazowych z cząstkami naładowanymi elektrycznie, która ma dostatecznie dużą konduktywność elektryczną. Stan taki jest osiągnięty już przy niewielkiej koncentracji ładunków elektrycznych (elektronów, jonów ujemnych

¹⁾ Niekiedy mówi się o „plazmie gazowej” dla podkreślenia różnicy w stosunku do „plazmy w stanie związanym” – terminu, który bywa stosowany na określenie gazu elektronowego w metalach.

i dodatnich, uzyskiwanych w wyniku jonizacji atomów oraz tworów wieloatomowych). Wystarcza jedna para elektron-jon na 100 000 cząstek neutralnych, by mieszanina taka stała się niezłym przewodnikiem, co uzasadnia zaliczenie jej do plazmy [393].

Progowa wartość energii kinetycznej, po przekroczeniu której materia zaczyna przechodzić w stan plazmy, jest rzędu 0,2 eV. Jest ona mniejsza od minimalnej wartości energii jonizacji, która charakteryzuje pary cezu (3,88 eV). Wartość ta jest związana z istnieniem tzw. jonizacji kumulatywnej (stopniowej, schodkowej), której ulegają wzbudzone atomy pozostające w stanach metastabilnych. Przechodzenie w stan plazmy kończy się, gdy z atomów oderwane zostają ostatnie elektrony zlokalizowane na powłokach najbliższych jądra atomu. Wiąże się to z energią jonizacji o wartości 2 MeV. Oderwanie od atomu pierwszego, najslabiej z nim związanego elektronu, nazywa się jonizacją jednokrotną. Oderwanie następnych, już znacznie silniej związanych elektronów, nazywa się jonizacją wielokrotną. Po oderwaniu wszystkich elektronów uzyskuje się mieszaninę wolnych jąder i elektronów zwaną nugazem, w której wartości energii wiązania są zawarte w przedziale $2 \div 200$ MeV.

Jonizacja nie jest jedyną drogą do wytwarzania plazmy. Może jej towarzyszyć także dysocjacja molekuł, której produktami oprócz molekuł obojętnych są wzbudzone lub zjonizowane atomy oraz jony molekularne. Jony ujemne są zwykle komponentami plazmy występującymi w niewielkiej ilości. Powstawanie jonów ujemnych wiąże się z paradoksalnym efektem równoważnym zmniejszaniu się koncentracji cząstek naładowanych i w konsekwencji także ze zmniejszaniem się konduktywności elektrycznej plazmy. O wartości konduktywności decyduje bowiem koncentracja elektronów, powstanie zaś ciężkich, mało ruchliwych jonów ujemnych, kosztem liczby elektronów, zmniejsza wartość konduktywności.

Wynikająca z definicji plazmy równa ilość ładunków ujemnych i dodatnich w mieszaninie z cząstkami neutralnymi dotyczy pewnego minimalnego obszaru w dostatecznie dużym przedziale czasu. Obszar ten, określony promieniem Debeya, rozumiany jest jako kulista chmura ładunków różnoimiennych, lecz tak rozłożonych, że bliżej środka tej kuli znajdują się ładunki o znaku przeciwnym do ładunku w samym centrum. W ten sposób jest ekranowane pole, jakie ładunek ten wytwarza. Jeśli mówi się o plazmie, zwykle ma się na uwadze obszar znacznie większy od obszaru określonego promieniem Debeya, mimo że już w odległości równej dwukrotnej wartości tego promienia pole ładunku punktowego jest praktycznie całkowicie wytłumione.

Promień Debeya charakteryzuje ważną właściwość plazmy, polegającą na osłanianiu się przed wpływem pól zewnętrznych dla utrzymania neutralności wewnątrz obszaru plazmowego.

Zwykle wyróżnia się dwa rodzaje plazmy: niskotemperaturową i wysokotemperaturową. Tę pierwszą znamionuje niewielki stopień koncentracji ładunków elektrycznych i średnie energie kinetyczne jej najlżejszych cząstek, tzn. elektronów, nie przekraczające 20 eV. Ten właśnie rodzaj plazmy znajduje zastosowanie w technologiach elektrotermicznych. W plazmie wysokotemperaturowej mamy do czynienia z materia o wysokim stopniu jonizacji oraz z energiami kinetycznymi elektronów większymi niż 20 eV.

W skali energetycznej cząstce o trzech stopniach swobody ruchu (w kierunkach każdej z trzech osi układu współrzędnych), mającej energię 1 eV, można przypisać temperaturę 7736 K zgodnie z zależnością

$$T = \frac{2}{3} \frac{E}{k} \quad (9.1)$$

przy czym: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K – stała Boltzmann; E – energia cząsteczki przy założeniu, że $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ J.

Stąd też często przyjmuje się, że górną granicą temperatury plazmy niskotemperaturowej jest wartość z przedziału $(20 \div 100) \cdot 10^3$ K [202], [245], [360], [392], [410], [531].

Z kolei plazmę wysokotemperaturową utożsamia się ze środowiskiem o temperaturze rzędu milionów kelwinów, występującą np. w reakcjach termojądrowych, we wnętrzu słońca. Otóż przypisywanie plazmie jednoznacznie określonej temperatury ma sens wyłącznie przy ciśnieniach dostatecznie wysokich, w których średnie energie kinetyczne poszczególnych składników plazmy, a więc i ich temperatury są prawie równe

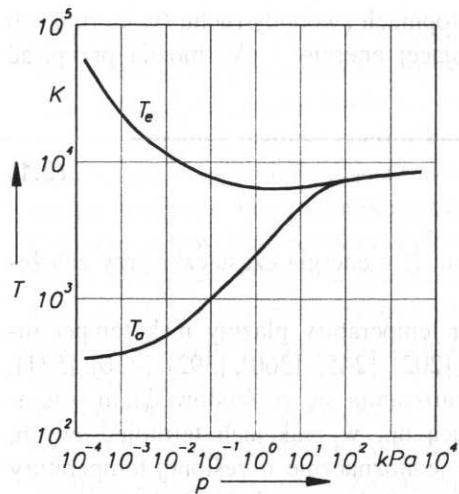
$$T_e \approx T_w \approx T_j \approx T_a \quad (9.2)$$

przy czym: T_e – temperatura elektronów, T_w – temperatura atomów i tworów wieloatomowych wzbudzonych, T_j – temperatura jonów, T_a – temperatura cząstek neutralnych (atomów, tworów wieloatomowych).

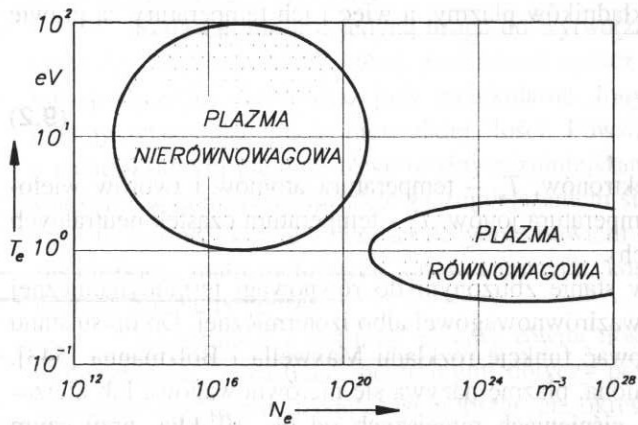
Takie środowisko znajduje się w stanie zbliżonym do równowagi termodynamicznej i jest określane mianem plazmy kwazirównowagowej albo izotermicznej. Do opisu stanu takiej plazmy można wtedy stosować funkcje rozkładu Maxwella i Boltzmann [543]. Jeśli zależność (9.2) nie jest spełniona, plazmę nazywa się nierównowagową lub nieizotermiczną¹⁾. Ma to miejsce przy ciśnieniach mniejszych od ok. 10^4 kPa, przy czym $T_e > T_w > T_j > T_a$, co w odniesieniu do temperatur elektronów i cząstek neutralnych w wyładowaniu elektrycznym w parach rtęci przedstawia rys. 9.1. Dobrym kryterium klasyfikacji plazmy jest także gęstość elektronów (rys. 9.2).

Do niedawna terminem „nagrzewanie plazmowe” obejmowano generację i wykorzystanie tych odmian plazmy, które mieszczą się w obszarze zlokalizowanym u dołu po prawej stronie tego rysunku, czyli plazmy izotermicznej (równowagowej). Obecnie obszar ten rozszerzony został na plazmę nieizotermiczną (nierównowagową) przy dolnej granicy ciśnień rzędu 0,1 Pa [601]. Tego rodzaju plazma, którą trzeba zaliczyć do niskociśnieniowej jest szczególnie interesująca z punktu widzenia metalurgii próżniowej, zwłaszcza że generatory plazmy pracujące w zakresie ciśnień obniżonych mają bardzo wysokie sprawności sięgające 90%.

¹⁾ W literaturze technicznej plazmę niskotemperaturową i wysokotemperaturową nazywa się także odpowiednio: plazmą zimną i gorącą [202], [393], [531].



Rys. 9.1. Temperatury elektronów T_e i cząstek neutralnych T_n w funkcji ciśnienia podczas wyładowania elektrycznego w parach rtęci



Rys. 9.2. Obszary plazmy równowagowej i nierównowagowej wykorzystywane w procesach technologicznych

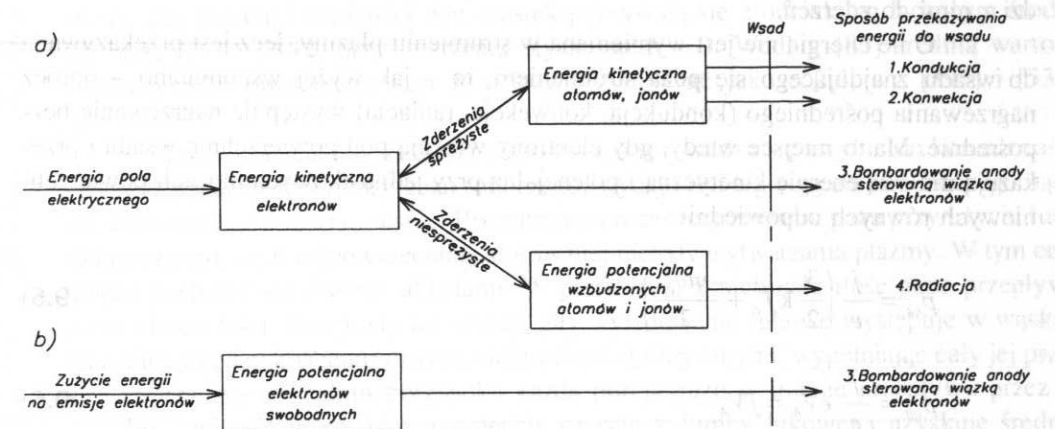
W definicji nagrzewania plazmowego precyzuje się tę metodę dodając, że polega ona na wykorzystaniu strumienia plazmy. Otóż wykorzystanie plazmy do celów technologicznych wymaga regulacji jej parametrów w szerokich zakresach. Staje się to możliwe wówczas, gdy plazmie generowanej kosztem energii elektrycznej nadaje się postać strumienia, co przy wysokiej temperaturze tego medium zapewnia także dużą koncentrację mocy sięgającą 40 kW/cm^3 [393].

9.1.2. Mechanizmy nagrzewania plazmowego

Generalnie rzecz biorąc, nagrzewanie plazmowe polega na wymianie energii w strumieniu plazmy lub na przekazywaniu jej przez strumień plazmy. W strumieniu plazmy może występować nagrzewanie bezpośrednie, pośrednie, a także złożone. Nagrzewanie bezpo-

średnie występuje wtedy, gdy ciepło wytwarza się w składnikach gazu roboczego (plazmogennego), np. gdy wchodzi one ze sobą w reakcje chemiczne bezpośrednio w strumieniu plazmy bądź tuż po jego opuszczeniu. Nagrzewanie pośrednie występuje w przypadku wprowadzenia do strumienia plazmy chociażby substratów w postaci stałej (proszki). Złożona forma nagrzewania zachodzi wówczas, gdy w trakcie przepływu przez strumień plazmy substraty nagrzewane pośrednio ulegają przemianom, powodujących jonizację ich składników. Jak z powyższego wynika, gaz plazmogeny, zwany inaczej roboczym, może być nie tylko nośnikiem energii, ale także jednym z substratów reakcji, którymi bywają także pary, ciecze i sproszkowane ciała stałe.

Energia jest przekazywana przez strumień plazmy, gdy zachodzą przemiany fazowe i reakcje na powierzchni fazy stałej oraz ciekłej. Występuje to w przypadku wykorzystywania strumienia plazmy, np. do topienia, przy czym wsad jest nagrzewany w sposób złożony (pośredni i bezpośredni), co jest wyjaśnione niżej.



Rys. 9.3. Mechanizmy nagrzewania plazmowego, wg [83]: a) przy użyciu plazmy wysokociśnieniowej; b) przy użyciu plazmy niskociśnieniowej

Mechanizmy nagrzewania plazmowego przedstawione są na rys. 9.3. W pierwszej fazie wzrasta energia kinetyczna elektronów kosztem pola elektrycznego. Elektrony z kolei oddają ją atomom i jonom w wyniku zderzeń sprężystych i niesprężystych. Zderzenia sprężyste powodują wzrost energii kinetycznej atomów i jonów, a więc i ich temperatur odpowiednio do wartości T_n i T_j . W wyniku zderzeń niesprężystych następuje wzrost energii potencjalnej wzbudzanych atomów, które spontanicznie lub w wyniku zderzeń odwzbudzają się lub ulegają rekombinacji. Skutkuje to promieniowaniem energii w postaci linii spektralnych lub widma ciągłego. W przypadku wymiany energii w strumieniu plazmy ma miejsce kondukcyjne, konwekcyjne i częściowo radiacyjne przekazywanie energii do wsadu, zaś przy przekazywaniu energii przez strumień plazmy oprócz wymienionych trzech mechanizmów wymiany ciepła występuje czwarty mechanizm – bombardowanie anody (wsadu) sterowaną wiązką elektronów, a więc przekazywanie energii kinetycznej wiązki [83].

Znajdującym się w jednostce objętości plazmy n_e elektronom pole elektryczne w stanie ustalonym przekazuje objętościową moc jednostkową

$$p_e = e n_e v_e E \quad (9.3)$$

przy czym: $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ A · s – ładunek elektronu, v_e – prędkość unoszenia elektronów w kierunku pola elektrycznego o natężeniu E .

W rezultacie w jednostce czasu wzrasta energia kinetyczna każdego elektronu do wartości

$$E_{ek} = \frac{3}{2} k T_e + \frac{m v_e^2}{2} \quad (9.4)$$

Z kolei elektrony mogą przekazywać energię cięższym składnikom plazmy, gdy dochodzi z nimi do zderzeń.

O ile energia nie jest wymieniana w strumieniu plazmy, lecz jest przekazywana do wsadu znajdującego się poza strumieniem, to – jak wyżej wspomniano – oprócz nagrzewania pośredniego (kondukcja, konwekcja, radiacja) występuje nagrzewanie bezpośrednie. Ma to miejsce wtedy, gdy elektrony wnikają pod powierzchnię wsadu i przekazują mu swą energię kinetyczną i potencjalną przy jednostkowych mocach powierzchniowych równych odpowiednio

$$p_{ek} = \frac{j}{e} \left(\frac{3}{2} k T_e + \frac{m v_e^2}{2} \right) \quad (9.5)$$

$$p_{ep} = \frac{j}{e} e V_A = j V_A \quad (9.6)$$

przy czym: m – masa elektronu, j – gęstość prądu w strumieniu plazmy, V_A – potencjał anody.

Promieniowanie plazmy wynikające ze zderzeń niesprężystych elektronów, przy wymianie energii w strumieniu plazmy, jest często bezużytecznie rozpraszane, o ile nagrzewany wsad, np. gaz, jest przezroczysty. Z tego samego powodu przy przekazywaniu energii przez strumień plazmy, a więc przykładowo w procesach topienia, udział promieniowania bezpośrednio padającego na wsad bywa także niewielki. W tym jednak przypadku proces ma miejsce w układzie termokinetycznym zamkniętym, a więc część energii promienistej mimo to jest kierowana na wsad pośrednio, po odbiciu od powierzchni ciał trzecich, takich jak wymurówka pieca.

Biorąc powyższe pod uwagę, można sformułować bilans mocy odniesiony do elektronów znajdujących się w jednostce objętości plazmy w sposób następujący:

$$e n_e v_e E = \sigma E^2 = p_r + \frac{3}{2} k (T_e - T_m) n_e v \eta \quad (9.7)$$

przy czym: σ – konduktywność elektryczna plazmy, p_r – moc wypromieniowana z jednostki objętości, v – efektywna częstość sprężystych zderzeń elektronów z ciężkimi komponentami plazmy ($m = w, j, a$), określana jako

$$v = \bar{v}_e Q_{em} n_m \quad (9.8)$$

gdzie: \bar{v}_e – średnia (cieplna) prędkość elektronów, Q_{em} – przekrój czynny na rozproszenie elektronów w zderzeniu elektronu z ciężkim obojętnym komponentem plazmy m -tego rodzaju¹⁾, n_m – koncentracja ciężkiego komponentu plazmy m -tego rodzaju.

Składnik η w zależności (9.7) oznacza stosunek energii jaką traci elektron w zderzeniu sprężystym z ciężkim komponentem do energii kinetycznej jaką posiada. Jego wartość jest w przybliżeniu proporcjonalna do ilorazu mas zderzającego się elektronu i ciężkiego komponentu plazmy, czyli $\eta \approx K m_e / m_m$. Przy zderzeniu centralnym, mającym miejsce wtedy, gdy kierunki prędkości obu cząstek pokrywają się z odcinkiem łączącym środki ich mas, $K = 4$ [202], przy zderzeniu stycznym $K = 0$. Według [83] średnią wartość współczynnika proporcjonalności K należy przyjmować jako $\leq 2,4$, wg [393] i [531] jako równą 2.

Intensyfikacja nagrzewania plazmowego sprowadza się zwykle do konieczności maksymalizacji: temperatury gazu roboczego, wydajności tego czynnika roboczego bądź obu tych wielkości równocześnie. Rozpatrzmy proces nagrzewania gazu przy użyciu łuku elektrycznego, czyli najpowszechniej stosowanej metody wytwarzania plazmy. W tym celu można posłużyć się dwoma układami. W pierwszym z nich cała ilość gazu przepływa przez obszar łuku. Dzieje się tak wtedy, gdy wyładowanie łukowe występuje w wąskiej szczelinie między koncentrycznymi elektrodami cylindrycznymi, wypełniając cały jej przekrój poprzeczny. W takim przypadku każda porcja gazu w trakcie przepływu przez tę szczelinę staje się w pewnym momencie częścią kolumny łukowej i uzyskuje średnią temperaturę równą temperaturze łuku. W ten sposób uzyskuje się najbardziej intensywne nagrzewanie gazu i dlatego układ taki nazywa się plazmotronem wysokotemperaturowym.

Znacznie częściej korzysta się z układu, w którym strumień gazu opływa łuk odbierając ciepło z jego zewnętrznego peryferyjnego obszaru o znacznie niższej temperaturze. Intensyfikacja odbioru tego ciepła prowadzi do zmniejszenia przekroju kolumny łukowej, ponieważ obniżanie temperatury gazu powoduje spadek jego konduktywności. Przy stałej wartości prądu rośnie wtedy jego gęstość i w konsekwencji temperatura łuku. Ten proces jest odzwierciedleniem zasady, w myśl której w celu podwyższenia temperatury łuku jest konieczne intensywne chłodzenie jego zewnętrznego obszaru lub zmniejszenie poprzecznego przekroju kanału wyładowczego. Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, że podwyższanie temperatury łuku nie jest równoznaczne ze wzrostem

¹⁾ Przekrój czynny na zderzenie jest współczynnikiem proporcjonalności w określeniu prawdopodobieństwa zderzeń i może być interpretowany jako powierzchnia tarczy, w którą powinien trafić środek nadbiegającej cząstki, aby zaszło między nimi zderzenie. Jest on wyrażany w jednostkach powierzchni zwanych barnami ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$).

średniej temperatury masy przepływającego gazu. Z tego względu proces wymiany ciepła między łukiem i opływającym go gazem roboczym powinien być realizowany przy minimalnym przepływie tego ostatniego. W opisanej wymianie ciepła udział największy ma konwekcja i radiacja [532]. Wymuszony opływ kolumny łukowej gazem zwiększa także efektywność i kierunkowość procesu przenoszenia ciepła do wsadu dzięki zwiększonej roli konwekcji.

Opisany mechanizm w istotny sposób stabilizuje wyładowanie łukowe i nosi nazwę stabilizacji gazowej. W przypadku gdy intensyfikuje się odprowadzanie ciepła z zewnętrznych obszarów wyładowania poprzez chłodzenie ścian kanału wyładowczego, ma miejsce stabilizacja ściankami kanału (komory). Trzeci mechanizm stabilizacji – magnetyczny – polega na wykorzystaniu zjawiska skurczu (ang. pinch) strumienia plazmy pod wpływem własnego pola magnetycznego, co występuje dopiero przy bardzo wysokich temperaturach wyładowania.

Mechanizmy nagrzewania plazmowego w istotnym stopniu zależą od ciśnienia w obszarze konwersji energii. Przy ciśnieniach 100 kPa i wyższych występuje tzw. plazma wysokociśnieniowa [531], a mechanizmy nagrzewania dla tego przypadku pokazano na rys. 9.3a. Przy ciśnieniach $10^3 \div 10^4$ Pa, a więc już w obszarze tzw. plazmy niskociśnieniowej, w procesach przekazywania ciepła do wsadu konwekcja i promieniowanie mają już udział niewielki, a zaczynają dominować procesy molekularne, tzn. przewodnictwo i dyfuzja. Skutkiem tego jest zmniejszenie efektywności nagrzewania i konsekwentnie zmniejszenie gęstości mocy generowanej w plazmie do $0,1 \div 1,0$ W/cm³ oraz pogorszenie kierunkowości przenoszenia energii do wsadu. Jedynym sposobem zapobieżenia tym niekorzystnym zjawiskom jest zwiększenie udziału składnika wyrażonego zależnością (9.4), czyli bezpośredniego bombardowania anody – wsadu elektronami (rys. 9.3b).

Do tego celu najlepiej nadaje się próżniowe wyładowanie silnoprądowe w układzie z katodą drażoną. Istota tego wyładowania polega na uformowaniu w jej wnętrzu gorącej katody plazmowej charakteryzującej się stopniem jonizacji $\alpha_i = 0,92 \div 0,95$, natężeniem pola elektrycznego $E \approx 10^4$ V/m i koncentracją elektronów $n_e \approx 10^{20}$ m⁻³. Po przekroczeniu pewnej krytycznej wartości natężenia pola elektrony w czasie między kolejnymi zderzeniami z ciężkimi komponentami plazmy pobierają energię porównywalną z energią kinetyczną ich chaotycznego ruchu cieplnego, czyli

$$\frac{mv_e^2}{2} \approx \frac{3}{2} kT_e \quad (9.9)$$

W tych warunkach elektrony przechodzą w stan stałego przyspieszania i osiągają anodę – wsad. Nagrzewanie w tym przypadku jest zbliżone do nagrzewania elektronowego, które przedstawione jest w rozdz. 10.

Opisane mechanizmy nagrzewania są realizowane przy użyciu elektrycznych generatorów plazmy, zwanych plazmotronami. Nazywane są one także palnikami plazmowymi. Pojęcia tego powinno się jednak unikać, ponieważ ciepło nie jest tu wytwarzane w wyniku spalania, lecz powstaje wskutek konwersji energii elektrycznej.

W celu scharakteryzowania plazmotronów przyjęto za podstawowe kryterium ich klasyfikacji podobieństwo do niektórych wcześniej omówionych już metod przemiany energii elektrycznej w ciepło, a mianowicie do: łukowej, indukcyjnej, pojemnościowej i mikrofalowej. Z uwagi na dominację plazmotronów łukowych, dodatkowo w tej grupie wyróżniono różne typy plazmotronów, biorąc za podstawę jako główne kryteria: rodzaj elektrod, usytuowanie łuku oraz rodzaj źródła zasilania.

Trzeba też zwrócić uwagę na pewną specyficzną – jednak nie całkowicie odosobnioną – cechę tych generatorów. Otóż plazmotrony jako podstawowe zespoły plazmowych członów grzejnych należą do kategorii obiektów kompletnych. W konsekwencji powszechnie traktuje się je raczej jako niezależne urządzenia, a nie jako części składowe pieców oraz nagrzewnic plazmowych mimo, że takie jest ich formalne przyporządkowanie w przyjętym układzie klasyfikacyjnym. W rezultacie prawie zawsze traktuje się łącznie układy, które są elementami plazmotronów, jak i te które należałyby raczej zaliczyć do wyposażenia pieców i nagrzewnic. Tego rodzaju podejście przyjęto także w tej książce.

9.2. Generacja strumienia plazmy niskotemperaturowej

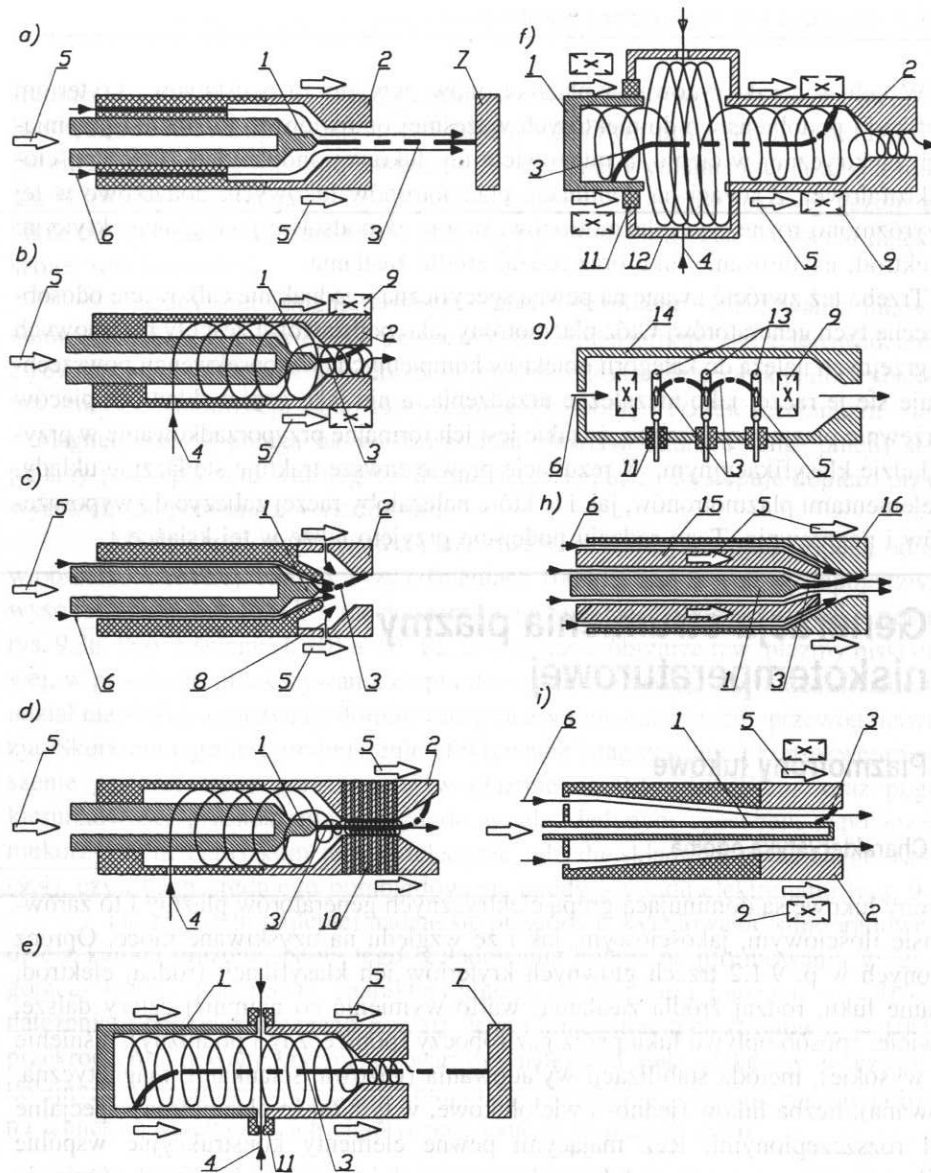
9.2.1. Plazmotrony łukowe

9.2.1.1. Charakterystyka ogólna

Plazmotrony łukowe są dominującą grupą elektrycznych generatorów plazmy i to zarówno w sensie ilościowym, jakościowym, jak i ze względu na uzyskiwane moce. Oprócz wymienionych w p. 9.1.2 trzech głównych kryteriów ich klasyfikacji (rodzaj elektrod, usytuowanie łuku, rodzaj źródła zasilania) warto wymienić co najmniej cztery dalsze, a mianowicie: sposób opływu łuku przez gaz roboczy (poprzeczny i podłużny), ciśnienie (niskie i wysokie), metoda stabilizacji wyładowania (gazowa, ściankami, magnetyczna, kombinowana), liczba łuków (jedno- i wielo-łukowe, w tym także plazmotrony specjalne z łukami rozszczepionymi, lecz mającymi pewne elementy konstrukcyjne wspólne [603]). Warto tu też zaznaczyć, że łuki w plazmotronach i w piecach łukowych różnią się istotnie. Między innymi osiągnęte w tych pierwszych gęstości prądu są o rząd wielkości większe od znamienych dla łuku swobodnego i sięgają wartości 100 A/mm² [393].

9.2.1.2. Plazmotrony z katodą prętową, z elektrodami cylindrycznymi, pierścieniowymi i specjalnymi

Schematy wyróżnionych ze względu na geometrię elektrod czterech grup plazmotronów są przedstawione na rys. 9.4. To kryterium klasyfikacyjne wydaje się być najbardziej uniwersalne, ponieważ kształt elektrod ma podstawowy wpływ na rozwiązania



Rys. 9.4. Plazmotrony łukowe: a) z katodą prętową, osiowym dopływem gazu i łukiem bezpośrednim (nazywany także w pewnych przypadkach plazmotronem laminarnym); b) z katodą prętową, wirowym dopływem gazu i łukiem pośrednim; c) z osłoniętą katodą prętową; d) z katodą prętową i zwężką segmentową (konstryktorem) wydłużającą łuk; e) z katodą cylindryczną, wirowym dopływem gazu i łukiem zewnętrznym; f) z elektrodami cylindrycznymi, dopływem gazu do komory mieszania i łukiem wewnętrznym; g) z elektrodami pierścieniowymi i osiowym dopływem gazu; h) z trzema elektrodami koncentrycznymi (plazmotron prądu przemiennego z pomocniczym łukiem prądu stałego); i) z osiowym dopływem gazu i dużą prędkością wirowania łuku
 1 – katoda (elektroda), 2 – anoda (elektroda), 3 – łuk, 4 – wirowy dopływ gazu, 5 – chłodziwo (woda), 6 – osiowy dopływ gazu, 7 – wsad, 8 – powietrze lub inny gaz zawierający tlen, 9 – cewka, 10 – zwężka segmentowa (konstryktor), 11 – izolator, 12 – komora mieszania, 13 – elektrody pierścieniowe, 14 – komora wyładowcza, 15 – elektroda środkowa, 16 – elektroda zewnętrzna

konstrukcyjne generatorów plazmy i ich funkcjonalność. Z tego też względu w punkcie tym przedstawiono większość istotnych cech wszystkich plazmotronów łukowych, zaś w kolejnych punktach omówione zostały jedynie zagadnienia specyficzne dla plazmotronów sklasyfikowanych wg pozostałych kryteriów oraz odnoszące się do wszystkich ich rodzajów.

Grupa pierwsza to plazmotrony z katodą prętową, zasilane z nielicznymi wyjątkami prądem stałym. Łuk występuje w cylindrycznej komorze wyładowczej między centralnie umieszczoną katodą oraz anodą w kształcie rury lub dyszy. Elektrody i komora wyładowcza są zwykle chłodzone wodą, lecz są znane już rozwiązania z innymi mediami chłodniczymi (ciekły azot). Gaz roboczy jest wprowadzany do komory osiowo (rys. 9.4a) lub wirowo przez otwory zlokalizowane w płaszczyźnie prostopadłej do osi komory i praktycznie styczne do jej powierzchni wewnętrznej (rys. 9.4b). W tym drugim rozwiązaniu przepływ gazu połączony z silnym jego wirowaniem stabilizuje łuk w obszarze przyosiowym oraz powoduje przemieszczanie się plamy anodowej, co zabezpiecza anodę przed lokalnymi przegrzaniem (stabilizacja gazowa). Rotacja łuku może być przy tym intensyfikowana zewnętrznym polem magnetycznym (stabilizacja magnetyczna). Plazmotron jest stosunkowo krótki, rezystancja łuku mała i wobec tego napięcia zasilające są niskie. Innym czynnikiem umożliwiającym stosowanie niskich napięć jest rodzaj emisji elektronów. Otóż w plazmotronach tego typu plamka katodowa praktycznie nie przemieszcza się (często dodatkowo jest ona stabilizowana), co sprawia, że katoda jest gorąca i występuje emisja cieplna, która jak wiadomo nie wymaga wysokich napięć.

Jako gazu roboczego – nazywanego także plazmotwórczym lub plazmogennym – używa się najczęściej argonu, lecz bywa także stosowany hel, wodór i azot oraz ich mieszaniny¹⁾. Unika się gazów o działaniu korozyjnym, a zwłaszcza zawierających tlen, ponieważ gwałtownie skraca to trwałość elementów konstrukcyjnych plazmotronu, a szczególnie tych, które pracują w wysokiej temperaturze. Przy konieczności pracy z takimi gazami stosuje się katody z płaszczem ochronnym (rys. 9.4c). W rozwiązaniu tym gaz roboczy jest wprowadzany do komory plazmotronu, a katodę zabezpiecza gaz ochronny przepływający przez szczelinę między jej stożkową końcówką i płaszczem.

Plazmotrony dużej mocy z katodą prętową są wykonywane tak, jak to przedstawia rys. 9.4d. Istota tego rozwiązania polega na zastosowaniu zwężki segmentowej (ang. constrictor) wydłużającej dyszę. Dzięki temu uzyskuje się większy spadek napięcia na łuku, a tym samym większą moc doprowadzaną do plazmotronu przy takiej samej wartości prądu łuku jak bez użycia zwężki.

Grupa druga to plazmotrony z elektrodami cylindrycznymi, zasilane częściej prądem stałym niż przemiennym (rys. 9.4e, f). Przy przenoszeniu przez katodę prętową prądów roboczych o dużych natężeniach i przy mocach większych niż 100 kW, przemieszczająca się nieznacznie na jej powierzchni plamka katodowa powoduje przekraczanie

¹⁾ Warto też wspomnieć, że znane są konstrukcje plazmotronów z ciekłymi czynnikami roboczymi, a mianowicie ciekłym azotem i powietrzem (plazmotrony kriogeniczne) oraz z wodą [532].

dopuszczalnych dla katody temperatur. Unika się tego w katodzie cylindrycznej, ponieważ wprowadzany przez otwory w komorze gaz (są one zlokalizowane w płaszczyźnie prostopadłej do osi komory i stycznie do jej powierzchni wewnętrznej), zapewnia przemieszczanie się plamki katodowej i znacznie lepsze chłodzenie katody. Efekt rotacji tej plamy jest często intensyfikowany za pomocą pola magnetycznego, zaś łuk jest odsuwany od szczeliny pierścieniowej przez wpływający przez nią gaz roboczy (rys. 9.4e).

Inne rozwiązanie przedstawione jest na rys. 9.4f. Tu gaz jest wtłaczany także stycznie do powierzchni wewnętrznej komory, której średnica w miejscu lokalizacji otworów na gaz jest większa od średnic przylegających do niej elektrod.

Plazmotrony z elektrodami cylindrycznymi są eksploatowane często przy dużym wydatku gazu i/lub przy wysokim ciśnieniu w komorze wyładowczej, dochodzącej nawet do 10 MPa. Prędkości wypływającego gazu osiągają 1250 m/s, a więc wartości większe od szybkości dźwięku [532]. Umożliwia to pracę przy łukach o długości rzędu kilku metrów, a tym samym przy wysokich napięciach. Do plazmotronów tej grupy można także zaliczyć plazmotrony niskociśnieniowe, np. polskie konstrukcje opracowane w Politechnice Poznańskiej [541], [601]. W rozwiązaniach tych elektroda (katoda) ma kształt rurki i termin „katoda wydrążona” także dobrze oddaje istotę tej konstrukcji, jednak pod względem geometrycznym elektroda cylindryczna i wydrążona są elementami podobnymi¹⁾.

Grupa trzecia to plazmotrony z elektrodami pierścieniowymi. Są to typowe plazmotrony prądu przemiennego (rys. 9.4g). Łuk występuje w nich między dwoma, trzema lub czterema elektrodami rurowymi chłodzonymi wodą i umieszczonymi w komorze wyładowczej. Także i w tej grupie rotację łuku uzyskuje się poprzez właściwe doprowadzenie gazu lub przy użyciu zewnętrznego pola magnetycznego. Ponadto kształt elektrod przyczynia się do tego, że prądy łuków indukują pola magnetyczne intensyfikujące tę rotację. Plazmotron przedstawiony na rys. 9.4g charakteryzuje się wysokimi napięciami pracy i dużymi natężeniami prądów. Jego wadą jest asymetryczne obciążenie sieci [720]. Znane są oczywiście rozwiązania plazmotronów trójfazowych z obciążeniem symetrycznym [532].

Grupa czwarta obejmuje plazmotrony o konstrukcji specjalnej. Przykłady takich rozwiązań są przedstawione na rys. 9.4h, i. Dla pierwszego z nich (rys. 9.4h) są charakterystyczne trzy koncentryczne opływane przez gaz elektrody, przy czym łuk główny prądu przemiennego występuje między elektrodą środkową i zewnętrzną. Równocześnie między elektrodą środkową i wewnętrzną jest wytwarzany łuk pilotujący prądu stałego. Jego rola polega na stabilizacji łuku głównego w momencie przechodzenia wartości chwilowej prądu przez zero, względnie na umożliwieniu ponownej jego inicjacji [544].

¹⁾ W literaturze angielsko języcznej terminy elektroda (katoda) wydrążona „hollow electrode, (cathode)” odnoszone są zarówno do konstrukcji nazywanych w niniejszej książce cylindrycznymi (w j.niem. określane są one terminem „topfförmige”, w ros. „cylindriczeskie”), jak i do katod nazywanych wydrążonymi i używanych w plazmotronach łukowych niskociśnieniowych. W polskiej literaturze przedmiotu określenie elektroda (katoda) cylindryczna używane jest od dość dawna [538].

Drugie rozwiązanie, pokazane na rys. 9.4i, charakteryzuje się koncentrycznym układem elektrod, co sprzyja uzyskiwaniu bardzo dużych prędkości ruchu wirowego łuku i w konsekwencji nagrzaniu dużych ilości gazu do jednorodnej temperatury. Plazmotrony z takim rozwiązaniem elektrod są zasilane prądem przemiennym [666].

O jakości elektrod w rozstrzygającym stopniu decydują kwestie materiałowe. Stawiane materiałom elektrodowym wymagania zależą od biegunowości elektrod, rodzaju plazmotronu oraz jego przeznaczenia. Zwykle wymaga się, by znamionowała je mała praca wyjścia elektronów, dobra przewodność cieplna właściwa i konduktywność, wysoka temperatura topnienia względnie wrzenia oraz odporność na korozję. W tablicy 9.1 zestawiono właściwości kilku podstawowych materiałów elektrodowych [720].

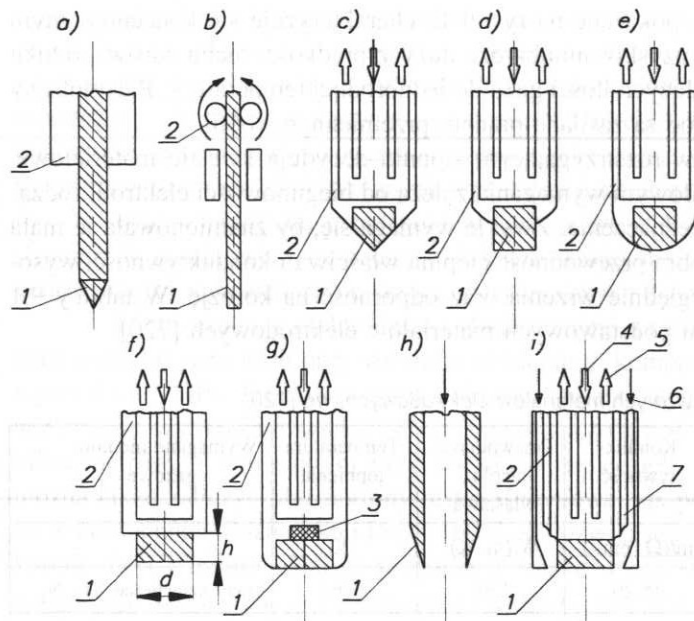
Tablica 9.1. Właściwości podstawowych materiałów elektrodowych, wg [720]

Materiał	Praca wyjścia	Konduktywność	Przewodność cieplna właściwa	Temperatura topnienia	Wymagane medium gazowe
–	eV	m/(Ω · mm ²)	W/(m · K)	K	–
W	4,53	18,20	130	3663	gazy szlachetne, H ₂ , N ₂
W/Th	2,84 ÷ 3,20	18,20	130	3663	gazy szlachetne, H ₂ , N ₂
Cu (CuO)	4,48 (5,30)	56,20	394	1356	dowolne
Ag	4,70	60,50	408	1234	dowolne
Cu/Ag	w zależności od składu stopu				dowolne
Grafit	4,36	0,20 ÷ 0,05	100 ÷ 200	4100 ¹⁾	dowolne
ZrO ₂	4,20	w zależności od obróbki wstępnej			CO, CO ₂

¹⁾ Temperatura sublimacji.

Elektrody pracują w bardzo trudnych warunkach cieplnych przy ekstremalnie dużych gęstościach strumieni cieplnych przenikających przez ich chłodzone ścianki. Maksymalne występujące w nich różnice temperatur określa z jednej strony dopuszczalna temperatura czynnika chłodzącego (w przypadku wody jest to 20 ÷ 40°C), z drugiej zaś temperatura topnienia materiału elektrody. Stąd też konieczność optymalizacji grubości ścianek elektrod. Nie mogą one być zbyt duże, z uwagi na zbyt dużą wartość oporu cieplnego, ani zbyt małe ze względu na zmniejszanie się grubości w wyniku zjawiska erozji. Przy korzystaniu z miedzi i wody jako czynnika chłodzącego, za optymalne uważa się grubości ścianek zawarte w przedziale 3 ÷ 5 mm.

Części aktywne katod w plazmotronach prętowych z łukami o praktycznie nie przemieszczających się plamkach katodowych, wykonuje się z wolframu torowanego. W plazmotronach małej mocy katody mogą być wykonywane w postaci litych niechłodzonych prętów z zastrzonymi końcami, co istotnie zwiększa natężenie pola elektrycznego w ich pobliżu i przyczynia się do zwiększenia emisji elektronowej (rys. 9.5a).



Rys. 9.5. Końcówki katod prętowych, wg [720]

1 – część aktywna katody, 2 – uchwyt, 3 – nakładka, 4 – dopływ wody chłodzącej, 5 – odpływ wody chłodzącej, 6 – gaz plazmogeny, 7 – żebra

Katodę niechłodzoną w wykonaniu specjalnym przedstawia rys. 9.5b. Jest to katoda topliwna, stosowana przy spawaniu w osłonie gazów obojętnych.

Przy dużych mocach lub dużych prądach przenoszonych przez katody, muszą być one chłodzone. Najczęściej chłodziwem jest woda przepływająca przez miedziany uchwyt, w którym jest umocowana wolframowa część aktywna katody. Istotne jest, by połączenie obu tych elementów charakteryzowało się dobrą konduktancją oraz jak najmniejszym oporem cieplnym. Dobre rezultaty uzyskuje się stosując połączenia śrubowe, prasowane lub lutowane srebrem. Mimo to zdarza się, że w wyniku naprężeń cieplnych, różnych współczynników rozszerzalności miedzi i wolframu, styk ten z czasem ulega degradacji. Pozytywne wyniki daje też spawanie obu tych elementów wiązką elektronów lub wprowadzenie między nie folii tytanowej, która w wyniku procesów cieplno-dyfuzyjnych wytwarza trójskładnikową warstwę pośrednią. Istotne jest, by układ chłodzenia był rozwiązany w sposób eliminujący zarówno niebezpieczeństwo stopienia części aktywnej katody, jak i jej nadmierne schłodzenie. Ten drugi przypadek prowadzi do silnego zmniejszenia plamki katodowej, jej destabilizacji, wzrostu gęstości prądu i w konsekwencji do znacznego zwiększenia zjawiska erozji katodowej.

Powierzchnia czołowa części aktywnej katody (powierzchnia emisyjna) może mieć kształt stożkowy, płaski lub półkulisty (rys. 9.5c, d, e). W przypadku katod wielkoprądowych część aktywna ma zwykle postać płaskiego krążka o średnicy d i grubości h (rys. 9.5f). Optymalna wartość $d/h = 2$. Przy zbyt małych wartościach h istnieje niebez-

pieczeństwo przechłodzenia katody, a przy zbyt dużych – prawdopodobieństwo jej stopienia. W celu stabilizacji płamy katodowej w pobliżu centrum powierzchni emisyjnej, na części aktywnej od strony miedzianego uchwytu umieszcza się nakładkę z materiału o gorszej przewodności cieplnej właściwej od znamionującej wolfram (rys. 9.5g). Powoduje to lokalne podwyższenie temperatury części centralnej powierzchni emisyjnej, wzrost emisji cieplnej z tej strefy, a tym samym utrzymywanie w jej obszarze plamki katodowej.

W rozwiązaniach pokazanych na rys. 9.5h, i stabilizacja płamy katodowej, jak również lepsze chłodzenie katody są zapewnione przez odpowiedni sposób doprowadzenia gazu. Jest on wprowadzany przez otwór wydrążony w katodzie (rys. 9.5h) lub opływa jej uźebrowaną powierzchnię zewnętrzną (rys. 9.5i) [720].

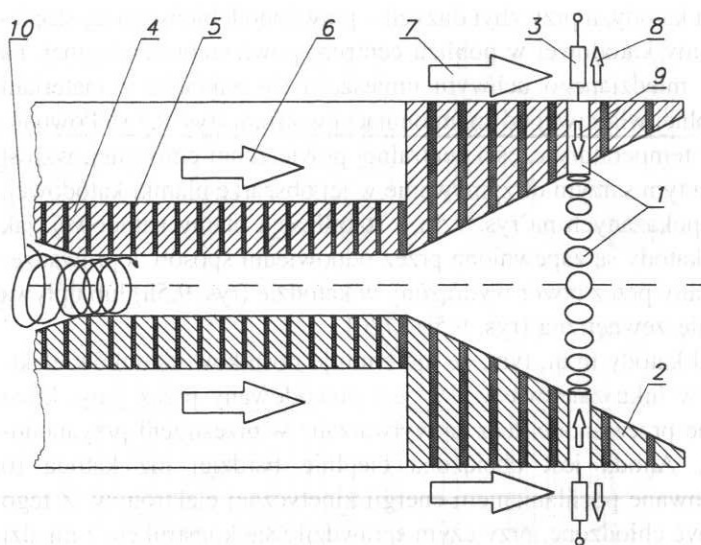
Anoda różni się od katody m.in. tym, że nie emituje nośników ładunków elektrycznych. Przepływ prądu w łuku zaledwie w 1% jest powodowany przez jony, które w dodatku nie są emitowane przez anodę, lecz są wytwarzane w przestrzeni przyanodowej w procesie jonizacji. Anoda jest obciążona cieplnie bardziej niż katoda (o $10 \div 30\%$), co jest spowodowane pochłanianiem energii kinetycznej elektronów. Z tego też względu anody muszą być chłodzone, przy czym sprawdzily się konstrukcje z miedzi oraz stopów miedzi ze srebrem chłodzone wodą.

W plazmotronach bardzo dużej mocy bywają stosowane anody wieloelementowe. Są one wykonywane w postaci zespołu prętów umieszczonych u wylotu dyszy i chłodzonych wodą, tworzących rodzaj płaskiego pierścienia. Jedne końce tych prętów zwrócone ku osi plazmotronu, a do drugich końców są przyłączone rezystory obciążeniowe połączone równolegle. Zapewnia to równomierne obciążenie wszystkich prętów i istotne polepszenie termicznych warunków pracy anody. Rozwiązanie takie zastosowano w plazmotronie o mocy 20 MW pokazanym na rys. 9.6 [720]. W plazmotronie tym, konstruktor, a także dysza, są wykonane w postaci zespołu równoległych pierścieni miedzianych chłodzonych wodą, przedzielonych pierścieniami ceramicznymi. W ten sposób łuk zostaje wydłużony oraz zapobiega się jego przerzuceniu na wewnętrzne powierzchnie kanału konstruktoru oraz dyszy.

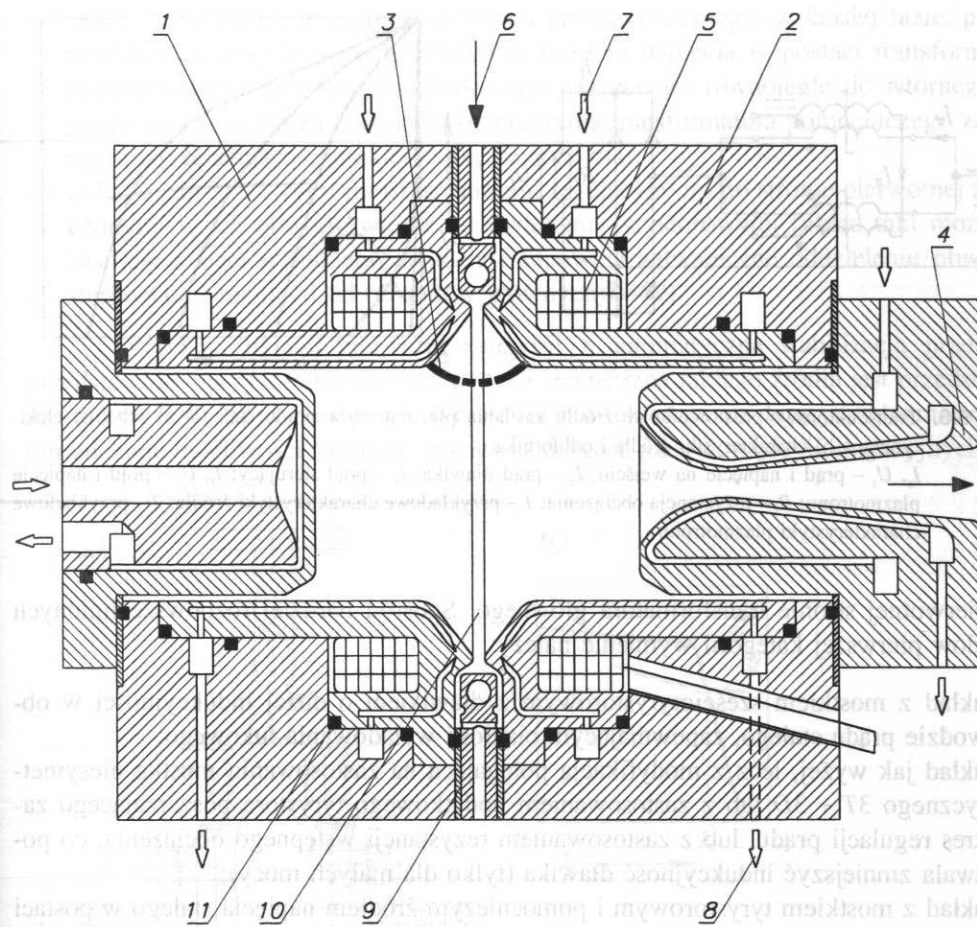
9.2.1.3. Plazmotrony z łukiem zewnętrznym i z łukiem wewnętrznym

Plazmotrony obu tych rodzajów przedstawia rys. 9.4. Plazmotrony z łukiem zewnętrznym są pokazane na rys. 9.4a, e, zaś z łukiem wewnętrznym na rys. 9.4b, c, d, f, g, h, i¹⁾. W tych pierwszych obwód prądowy zamyka się przez wsad stanowiący dodatkową elektrodę (najczęściej anodę zwaną obcą lub zewnętrzną). Wsad musi być w takim przypadku materiałem przewodzącym prąd elektryczny. W plazmotronach z łukiem wewnętrznym wyładowanie występuje wyłącznie między elektrodami stanowiącymi integralną część plazmotronu i dlatego plazmotrony tego rodzaju zasilane prądem stałym określa się niekiedy mianem plazmotronów z anodą własną.

¹⁾ Nazywa się je także plazmotronami z łukiem przenoszonym, bezpośrednim, przerzuconym i odpowiednio – z łukiem pośrednim, nieprzenoszonym, nieprzerzuconym [389], [531].



Rys. 9.6. Schemat anody wieloelementowej i fragmentu konstruktora plazmotronu o mocy 20 MW, wg [720]
 1 – pręty anodowe, 2 – dysza segmentowa, 3 – rezystor obciążeniowy, 4 – segmenty miedziane konstruktora, 5 – segmenty elektroizolacyjne konstruktora, 6 – chłodzenie wodne konstruktora, 7 – chłodzenie wodne dyszy, 8 – chłodzenie wodne rezystora, 9 – chłodzenie wodne pręta anodowego, 10 – wir gazu roboczego



Rys. 9.7. Plazmotron ze współosiowymi elektrodami cylindrycznymi, wg [720]
 1 – miedziana katoda, 2 – miedziana anoda, 3 – łuk, 4 – dysza, 5 – cewka magnetyczna, 6 – doprowadzenie gazu roboczego, 7 – dopływ wody chłodzącej, 8 – odpływ wody chłodzącej, 9 – izolator, 10 – szczelina pierścieniowa oddzielająca katodę i anodę, 11 – uszczelka

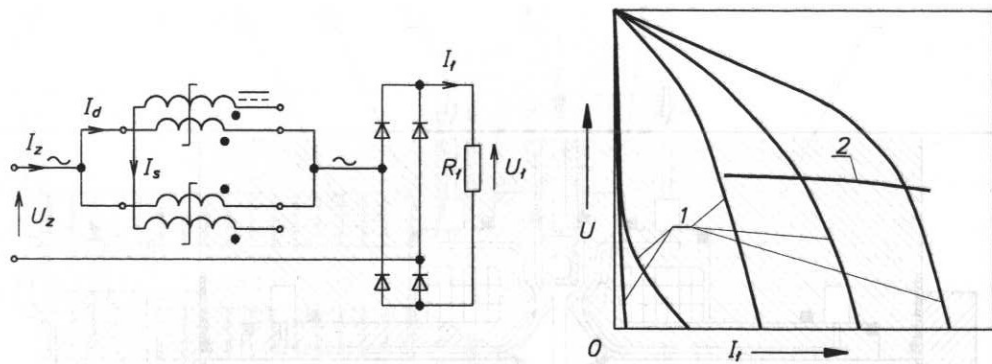
9.2.1.4. Plazmotrony prądu stałego

Do tej kategorii zalicza się przede wszystkim plazmotrony z katodą prętową, ponieważ nie jest w nich możliwa zamiana biegunowości. Ograniczenia tego nie ma w przypadku plazmotronów z elektrodami cylindrycznymi, lecz z uwagi na kwestie związane ze stabilnością wyładowania i oddziaływaniem na sieć, również i w tej kategorii prąd stały dominuje. Przykład plazmotronu prądu stałego z elektrodami cylindrycznymi jest pokazany na rys. 9.7.

Plazmotrony prądu stałego eksploatowane w przemyśle pracują często w warunkach stabilnego obciążenia, a więc w jednym punkcie charakterystyki napięciowo-prądowej. Pozwala to na ich zasilanie z nieregulowanych źródeł energii, przy korzystaniu z rozwiązań układowych stosunkowo prostych i niezawodnych. Jeśli jakaś z wielkości charakteryzujących proces z udziałem plazmotronu podlega sterowaniu, to istnieje konieczność użycia źródła regulowanego. Przy mocach nie przekraczających kilku megawatów, nadają się do tego celu układy transduktorowo-prostownikowe (rys. 9.8). Zaletą transduktorów jest prosta konstrukcja, odporność na przeciążenia, bezproblemowość w uruchamianiu i niewielkie oddziaływanie na sieć elektroenergetyczną. W transduktorach, zwanych także dławikami nasycanymi, złożonych z jednego lub kilku rdzeni ferromagnetycznych, zaopatrzonych w uzwojenia główne oraz sterujące, wykorzystuje

się zjawisko nasycenia przy zasilaniu uzwojenia sterującego prądem stałym o niewielkiej wartości. Z uwagi na duże wartości indukcyjności własnej, obwody transduktorowe w warunkach utrzymywania niezmienniej średniej wartości prądu plazmotronu są w stanie eliminować stochastyczne zmiany parametrów łuku. Transduktory są jedno- lub trójfazowymi regulowanymi źródłami prądu i dlatego współdziałają ze zlokalizowanymi na wyjściu prostownikami mostkowymi [720].

Znacznie bardziej uniwersalne są sterowane tyrystorowe źródła zasilania. Można wyróżnić dwie kategorie tych układów [469]. Pierwsza sprowadza się do wykorzystania mostka tyrystorowego po wtórnej stronie transformatora głównego. Druga polega na zastosowaniu tyrystorowych sterowników napięcia przemiennego włączonych



Rys. 9.8. Transduktorowo-prostownikowe źródło zasilania plazmotronów prądu stałego: a) schemat elektryczny; a b) charakterystyki źródła i odbiornika
 I_z , U_z – prąd i napięcie na wejściu; I_d – prąd dławika; I_s – prąd sterujący; I_l , U_l – prąd i napięcie plazmotronu; R_l – rezystancja obciążenia; 1 – przykładowe charakterystyki źródła; 2 – przykładowe charakterystyki plazmotronu

po pierwotnej stronie transformatora głównego. Spośród bardziej rozpowszechnionych układów pierwszej kategorii wymienić należy:

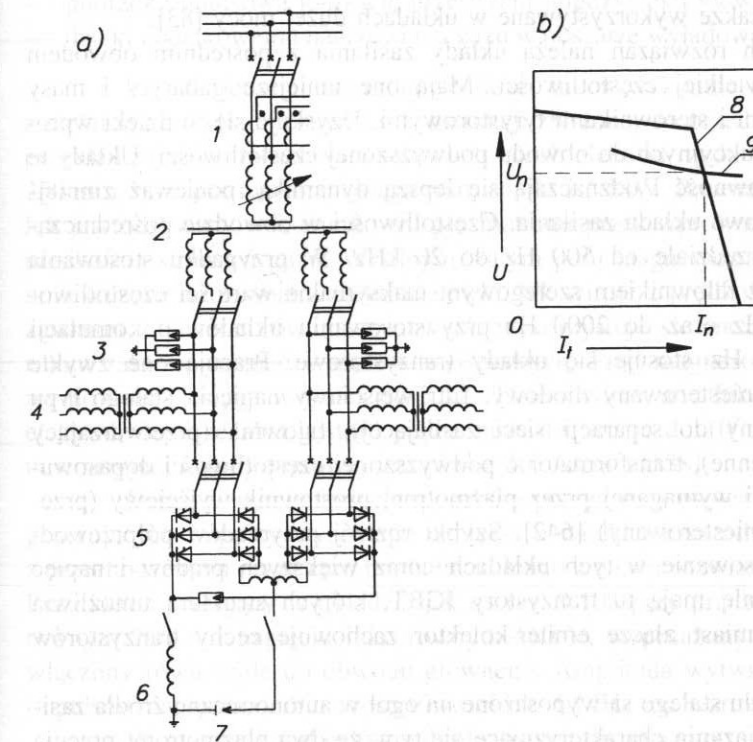
- układ z mostkiem sześciotyristorowym z dławikiem o dużej indukcyjności w obwodzie prądu stałego, zapewniającym ciągłość wyładowania łukowego;
- układ jak wyżej, lecz z modyfikacją polegającą na zastosowaniu mostka niesymetrycznego $3T + 3D$ lub z zastosowaniem dodatkowego tyrystora poszerzającego zakres regulacji prądu, lub z zastosowaniem rezystancji wstępnego obciążenia, co pozwala zmniejszyć indukcyjność dławika (tylko dla małych mocy);
- układ z mostkiem tyristorowym i pomocniczym źródłem napięcia stałego w postaci mostka prostowniczego niesterowanego (w zależności od potrzeb w obwodzie stosuje się dławik z regulowaną szczeliną w celu odpowiedniego ukształtowania charakterystyki zewnętrznej przy niewysterowanych tyristorach lub dławik wygładzający prąd łuku);
- układ z dwoma transformatorami (głównym trójzwojowym z trzema pracującymi równolegle mostkami tyristorowymi oraz z transformatorem pomocniczym o mocy dobranej ze względu na minimalny prąd łuku).

Spośród układów drugiej kategorii należy wymienić:

- układ z dwoma tyristorami włączonymi przeciwnolegle w każdej fazie po stronie pierwotnej transformatora i z prostownikiem diodowym i dławikiem po stronie wtórnej (bez prostownika układ wykorzystywany może być do zasilania plazmotronów prądu przemiennego);
- układ jak wyżej, lecz z dławikami po stronie pierwotnej transformatora, włączonymi równolegle do tyristorów;

- układ z dwoma tyristorami włączonymi przeciwnolegle w każdej fazie, prostownikiem diodowym oraz dodatkowym źródłem napięcia w postaci transformatora pomocniczego i prostownika diodowego włączonego równolegle do wtórnego obwodu głównego (duża reaktancja rozproszenia transformatora pomocniczego zapewnia silnie opadającą charakterystykę zewnętrzną);
- układ z jednofazowymi transformatorami regulacyjnymi po stronie pierwotnej z włączonymi w ich obwody wtórne sterownikami tyristorowymi (układ taki może być zasilany z sieci wysokiego napięcia i zapewnia galwaniczne oddzielenie obwodów sterowania i regulacji od obwodów głównych) [469].

Przykład układu pierwszej kategorii z automatyczną stabilizacją prądu jest przedstawiony na rys. 9.9a. Charakterystyka zewnętrzna takiego źródła jest przedstawiona na rys. 9.9b. Sam prostownik tyristorowy w układzie zasilającym plazmotron ma ograniczone możliwości sterujące, ponieważ długość przerw międzykomutacyjnych tyry-



Rys. 9.9. Tyrystorowe źródło zasilania plazmotronów: a) schemat elektryczny; b) charakterystyki źródła i odbiornika
 1 – przekładniki prądowe przekazujące sygnał do bloku stabilizacji prądu; 2 – transformator; 3 – zabezpieczenia przeciwprzepięciowe; 4 – przekładniki napięciowe; 5 – prostownik sterowany; 6 – dławik; 7 – plazmotron; 8 – charakterystyka źródła sterowanego; 9 – charakterystyka plazmotronu; U_n , I_n – napięcie i prąd znamionowy plazmotronu

storów jest współmierna do czasu zaniku łuku oraz do stałej czasowej kolumny łukowej, której wartość jest rzędu $10^{-4} \div 10^{-5}$ s. Do stabilizacji wyładowania łukowego, a w szczególności minimalizacji stochastycznych wahań napięcia łuku niezbędna jest więc w obwodzie głównym dostatecznie duża indukcyjność, którą uzyskuje się przez włączenie dławika [627]. Obecność takiego dławika jest jednak źródłem przepięć podczas inicjacji i zaniku łuku. Do ochrony układów elektrycznych i samego plazmotronu przed tymi przepięciami stosuje się diody lawinowe. Wymaga się jednak, by uzwojenia wtórne transformatorów, uzwojenie dławika i tyrystory wytrzymały napięcia równe trzykrotnej wartości maksymalnego napięcia wyjściowego [720]. Korzystne jest oczywiście stosowanie prostowników dwunastopulsowych, ponieważ eliminują one piątą i siódmą harmoniczne, które występują w układach sześciopulsowych. Tym samym łagodzi się niekorzystne oddziaływanie odbiornika na sieć elektroenergetyczną.

Do zasilania plazmotronów stałoprądowych mniejszej mocy używa się też transformatorów spawalniczych z prostownikami. Rzadziej stosuje się tzw. parametryczne źródła prądu, w których wykorzystuje się zasadę rezonansowej stabilizacji prądu łuku, mimo że mogą być one także wykorzystywane w układach dużej mocy [83].

Do najnowszych rozwiązań należą układy zasilania z pośrednim obwodem zwiększonej, a nawet wielkiej częstotliwości. Mają one mniejsze gabaryty i masy aniżeli układy z mostkami i sterownikami tyrystorowymi. Uzyskuje się to dzięki wprowadzeniu elementów indukcyjnych do obwodu podwyższonej częstotliwości. Układy te mają także większą sprawność i odznaczają się lepszą dynamiką, ponieważ zmniejszeniu ulegają stałe czasowe układu zasilania. Częstotliwości w obwodzie pośredniczącym zawierają się w przedziale od 500 Hz do 20 kHz. W przypadku stosowania układów tyrystorowych z falownikiem szeregowym maksymalne wartości częstotliwości dochodzą do 4000 Hz oraz do 2000 Hz przy stosowaniu układów o komutacji fazowej. Powyżej 4000 Hz stosuje się układy tranzystorowe. Pracują one zwykle w układzie: prostownik niesterowany diodowy, filtr wejściowy napięcia stałego typu LC lub RC (przeznaczony do separacji sieci zasilającej), falownik (przetwarzający napięcie stałe na przemienne), transformator o podwyższonej częstotliwości dopasowujący napięcie do wartości wymaganej przez plazmotron, prostownik wyjściowy (przeważnie dwupołkowy niesterowany) [642]. Szybki rozwój przyrządów półprzewodnikowych umożliwia stosowanie w tych układach coraz większych prądów i napięć roboczych. Duże znaczenie mają tu tranzystory IGBT, których struktura umożliwia sterowanie polowe, natomiast złącze emiter-kolektor zachowuje cechy tranzystorów bipolarnych.

Plazmotrony prądu stałego są wyposażone na ogół w autonomiczne źródła zasilania, lecz są znane rozwiązania charakteryzujące się tym, że dwa plazmotrony pracują w układzie przeciwsobnym z dwoma zintegrowanymi źródłami i wówczas jeden z plazmotronów pełni rolę katody, drugi zaś anody. W zastosowaniach metalurgicznych przy pracy z łukami zewnętrznymi eliminuje to potrzebę stosowania dodatkowej elektrody stykającej się z metalem [540].

9.2.1.5. Plazmotrony jednofazowe prądu przemiennego

Stosowanie prądu przemiennego jest korzystne głównie z uwagi na stosunkowo proste układy zasilające oraz ze względu na pewne zalety technologiczne w niektórych zastosowaniach przemysłowych [538].

Ogólnie rzecz biorąc, plazmotrony prądu przemiennego pracują w układach dławikowych, transduktorowych oraz tyrystorowych, które mogą być zasilane z sieci, a także ze specjalizowanych generatorów maszynowych. Współdziałają one z jednym lub z dwoma plazmotronami, co przy zasilaniu sieciowym stwarza problemy powodowane asymetrycznym obciążeniem sieci elektroenergetycznej.

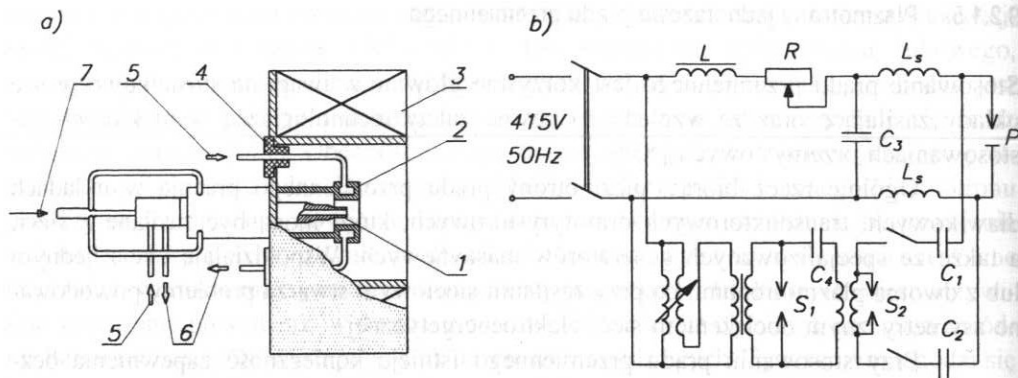
Przy stosowaniu prądu przemiennego istnieje konieczność zapewnienia bezprzerwowego i stabilnego wyładowania łukowego. Problem ten daje się opanować w trojaki sposób:

- stosując plazmotrony dostatecznie dużej mocy (rzędu megawatów),
- poprzez impulsową jonizację przestrzeni międzyelektrodowej,
- dzięki dodatkowemu nagrzewaniu gazu w obszarze wyładowania prądu przemiennego.

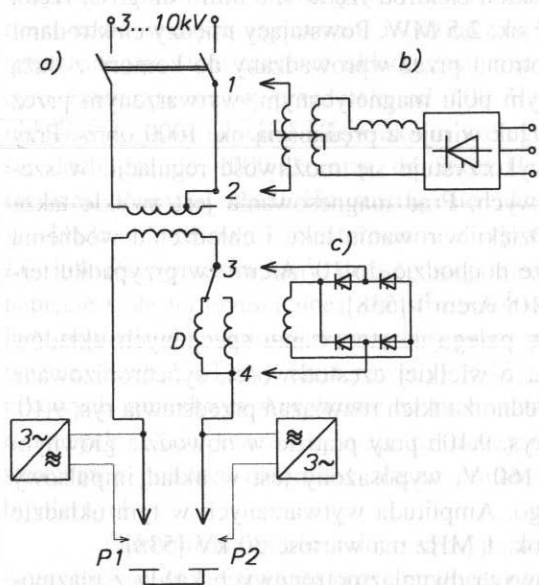
Układy jednoplazmotronowe dużej mocy wykonuje się najczęściej w wersji z elektrodami cylindrycznymi o konstrukcji zbliżonej do przedstawionej na rys. 9.7. Na przykład przy średnicach wewnętrznych takich elektrod rzędu 130 mm i długości rzędu 250 mm, moc plazmotronu osiąga wartość ok. 2,5 MW. Powstający między elektrodami łuk jest odsuwany w kierunku osi plazmotronu przez wprowadzany do komory z dużą prędkością strumień gazu. W silnym stałym polu magnetycznym, wytwarzanym przez umieszczone na zewnątrz elektrod cewki, łuk wiruje z prędkością ok. 1000 obr/s. Przy zasilaniu z generatorów maszynowych wykorzystuje się możliwość regulacji, w szerokim zakresie, napięć i prądów wyjściowych. Prąd magnesowania jest zwykle także regulowany i osiąga wartości do 5 kA. Dzięki wirowaniu łuku i chłodzeniu wodnemu elektrod, dopuszczalna gęstość prądu może dochodzić do 10^7 A/cm² (w przypadku termoemisyjnej katody prętowej jest równa 10^3 A/cm²) [538].

Drugi z wymienionych sposobów polega na stosowaniu specjalnych układów generujących impulsy wysokiego napięcia o wielkiej częstotliwości, synchronizowane z przechodzeniem przez zero prądu łuku. Jedno z takich rozwiązań przedstawia rys. 9.10. Plazmotron pracujący w układzie jak na rys. 9.10b przy prądzie w obwodzie głównym równym 200 A i napięciu łuku równym 160 V, wyposażony jest w układ impulsowy włączony równolegle do obwodu głównego. Amplituda wytwarzanych w tym układzie impulsów napięciowych o częstotliwości ok. 1 MHz ma wartość 30 kV [538].

W przypadku układów jednofazowych dwuplazmotronowych każdy z plazmotronów jest wyposażony we własny układ impulsowy, tak jak to przedstawia rys. 9.11. Każdy z plazmotronów może pracować bez przeciwelektrody i to zarówno z łukiem zewnętrznym, jak i wewnętrznym. W tym drugim przypadku łuki wytwarzane przez oba plazmotrony „pracują na sobie” łącząc się bez pośrednictwa przewodzącego wsadu [379].

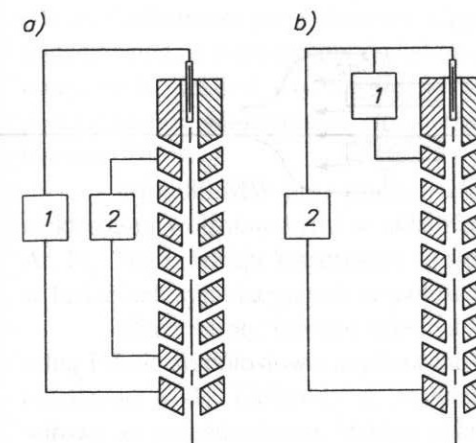


Rys. 9.10. Plazmotron jednofazowy prądu przemiennego z dodatkową jonizacją gazu wielką częstotliwością, wg [538]: a) schemat plazmotronu; b) układ zasilania z obwodem wielkiej częstotliwości (w.cz.)
 1, 2 – elektrody; 3 – cewka; 4 – przepust izolacyjny; 5 – dopływ wody; 6 – odpływ wody; 7 – gaz; L, R – elementy do stabilizacji i regulacji parametrów wyładowania łukowego; L_s , C_3 – elementy filtru dolnoprzepustowego, chroniące główne źródło zasilania przed wysokim napięciem w.cz.; S_1 , S_2 – iskierniki obwodu w.cz.; C_1 , C_2 , C_3 – elementy dwustopniowego obwodu w.cz.; P – plazmotron

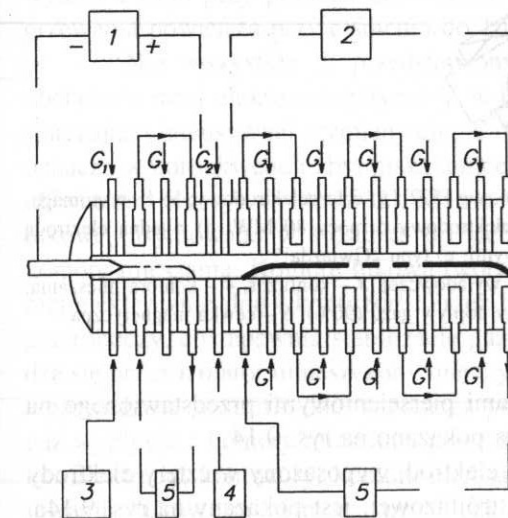


Rys. 9.11. Układy jednofazowe dwuplazmotronowe: a) dławikowy, b) transduktorowy (po włączeniu zespołu b) między p. 1, 2 i odłączeniu dławika D); c) tyrystorowy (po włączeniu zespołu c) między p. 3, 4 i odłączeniu dławika D)
 P1, P2 – plazmotrony, D – dławik wykorzystywany wyłącznie przy pracy w układzie a)

Trzeci sposób zabezpieczenia bezprzerwowego i stabilnego wyładowania łukowego polega na wstępnym podgrzewaniu gazu roboczego [538]. Gaz ten jest cieplnie jonizowany w pomocniczym wyładowaniu łukowym prądu stałego niewielkiej mocy. Schemat takiego plazmotronu przedstawia rys. 9.4h. Pożądaný charakter wyładowania jest tu uzys-



Rys. 9.12. Sposoby zasilania jednofazowych plazmotronów prądu przemiennego, wg [538]: a) przy nałożeniu łuku prądu przemiennego na prawie całą długość łuku prądu przemiennego; b) przy nałożeniu łuku prądu przemiennego na niewielką część łuku prądu przemiennego
 1 – źródło prądu stałego, 2 – źródło prądu przemiennego

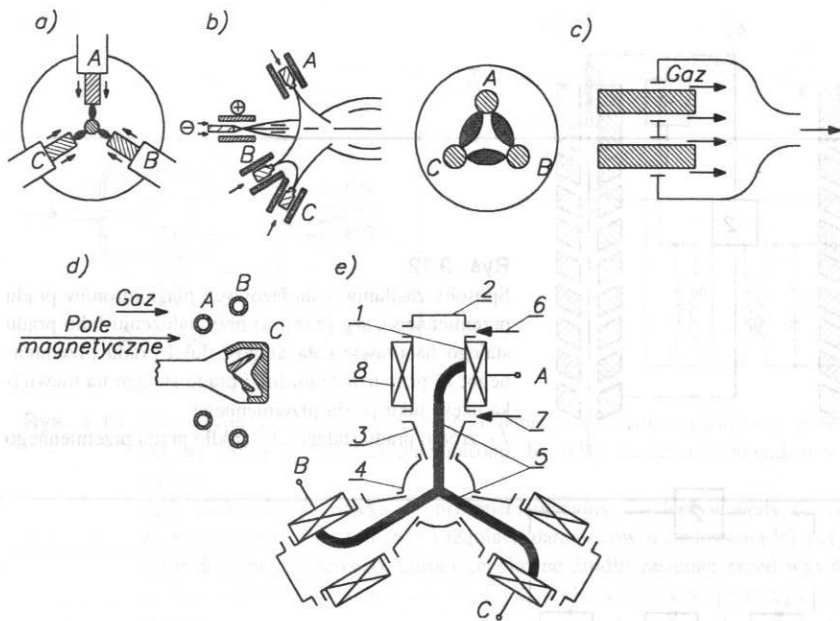


Rys. 9.13. Schemat plazmotronu jednofazowego prądu przemiennego ze wstępnym podgrzewaniem gazu, wg [538]
 1 – źródło prądu stałego, 2 – źródło prądu przemiennego, 3 – gaz o wydatku G_1 stabilizujący łuk pomocniczy, 4 – gaz o wydatku G_2 stabilizujący łuk główny, G – gaz do ochrony poszczególnych sekcji kanału wyładowczego o wydatku G, 5 – woda chłodząca

kiwany dzięki zwiększeniu konduktancji kolumny łukowej w obszarze przejścia prądu przez zero. Łuk prądu stałego może być przy tym nałożony na całą długość kolumny łukowej prądu przemiennego (rys. 9.12a) lub tylko na jej część (rys. 9.12b) [538]. Obwód pomocniczy stałoprądowy może być także elektrycznie odseparowany od głównego obwodu prądu przemiennego. Schemat takiego plazmotronu jest przedstawiony na rys. 9.13.

9.2.1.6. Plazmotrony trójfazowe prądu przemiennego

Plazmotrony trójfazowe mają w porównaniu z jednofazowymi znacznie większe znaczenie praktyczne [532]. Układy zasilania są podobne do stosowanych w urządzeniach jednofazowych prądu przemiennego. Plazmotrony tej kategorii mają różne specjalistyczne



Rys. 9.14. Trójfazowe plazmotrony prądu przemiennego, wg [532]: a) czteroelektrodowy; b) ze wspomagającym plazmotronem prądu stałego; c) trójelektrodowy o mocy 80 MW; d) z jedną elektrodą centralną i dwiema elektrodami pierścieniowymi; e) typu „Gwiazda”
 1 – elektroda cylindryczna, 2 – dno komory wyładowczej, 3 – konfuzor, 4 – komora mieszania, 5 – łuki, 6 – dopływ gazu (10%), 7 – główny dopływ gazu (90%), 8 – cewka magnetyczna

konstrukcje, a oprócz plazmotronu z elektrodami pierścieniowymi przedstawionego na rys. 9.4g, istnieje wiele innych, z których kilka pokazano na rys. 9.14.

Plazmotron o symetrycznym układzie elektrod, wyposażony w cztery elektrody grafitowe, zasilane z czteroprzewodowej sieci trójfazowej, jest pokazany na rys. 9.14a. Gazem roboczym jest powietrze, opływające poosiowo elektrody i wpływające do komory przez dysze. Łuki mogą występować zarówno między elektrodami fazowymi A, B, C i elektrodą centralną (jeśli odstęp między elektrodami fazowymi jest dostatecznie mały), jak i wyłącznie między elektrodami fazowymi, jeśli odstęp ten jest duży. Odbiornik może więc pracować zarówno w układzie gwiazdowym, jak i trójkątowym. Wyładowanie w układzie gwiazdowym obserwuje się przy elektrodzie centralnej połączonej z siecią elektroenergetyczną, jak i odłączonej od niej. Maksymalne parametry takiego plazmotronu: $t_{\max} = 3400 \text{ K}$ przy $p_{\max} = 0,75 \text{ MPa}$, $G = 80 \text{ g/s}$ (zużycie powietrza), $I_l = 1100 \text{ A}$, $\eta_c = 0,25$ (sprawność cieplna). Wadą plazmotronu, oprócz stosunkowo niskiej sprawności cieplnej, jest szybkie zużywanie się elektrod [532].

Rozwinięciem przedstawionej wyżej koncepcji jest plazmotron Bone, pokazany na rys. 9.14b. Wyposażony jest on w trzy elektrody A, B, C, których części czołowe, umieszczone w rurach kwarcowych, omywane są azotem. Trzy zbiegające się łuki two-

rzą zero odbiornika gwiazdowego. W celu zabezpieczenia bezprzerwowości i stabilności wyładowania, jest stosowany dodatkowy, wspomagający plazmotron prądu stałego małej mocy. Osie elektrod usytuowane są w stosunku do osi plazmotronu wspomagającego pod kątem 60° . Maksymalna moc plazmotronu – 200 kW przy prądach fazowych o wartościach 200 A.

Moc 80 MW przy prądach 26 kA jest osiągnięta w plazmotronach z prętowymi elektrodami wolframowymi w układzie jak na rys. 9.14c. Gazem roboczym jest H_2 , He, Ar, N_2 . Tego rodzaju konstrukcje są stosowane do pracy krótkotrwałej (poniżej 5 s), np. w badaniach symulacyjnych zespołów raketowych.

Plazmotron, którego schemat przedstawia rys. 9.14d, ma jedną elektrodę centralną i dwie współosiowo usytuowane elektrody pierścieniowe. Wszystkie elektrody są chłodzone wodą. Elektrody są zasilane z sieci trójfazowej, a łuki wprawiane w ruch wirowy za pośrednictwem stałego pola magnetycznego. Maksymalna moc plazmotronu wynosi 1 MW przy prądach fazowych o wartościach 600 A. Jest on używany do nagrzewania powietrza przy ciśnieniu do 10 MPa i jego zużyciu $G < 50 \text{ g/s}$.

Nie wszystkie z przedstawionych plazmotronów zapewniają symetryczne obciążenie sieci elektroenergetycznej, w innych (wg rys. 9.14b, c) nie uzyskuje się wystarczająco intensywnej wymiany ciepła między kolumną łukową i gazem roboczym, co oznacza w konsekwencji zbyt niską temperaturę gazu. Wad tych nie ma plazmotron typu „Gwiazda” wg rys. 9.14e [532]. Ma on w najprostszej wersji trzy identyczne komory łukowe, usytuowane do siebie symetrycznie pod kątem 120° oraz jedną komorę mieszania. Komorę łukową tworzy elektroda cylindryczna oraz odizolowane od niej elektrycznie dno i konfuzor¹⁾. Przez izolatory styknie jest wprowadzany do komór gaz roboczy, co zapewnia stabilizację gazową łuku. Główną część gazu (90%) wprowadza się przez izolator umieszczony między elektrodą i konfuzorem. Pozostała część gazu, wprowadzana w strefie dna, zapobiega przerzuceniu się łuku na ten element. Nagrzany gaz wypływa z komory mieszania przez dyszę o osi prostopadłej do powierzchni rysunku. Elektrody, konfuzory, komora mieszania oraz dysza chłodzone są wodą. Po zainicjowaniu łuków za pomocą trzech układów rozruchowych wielkiej częstotliwości (p. 9.2.1.8), początkowo zamykają się one na wewnętrznych powierzchniach metalowych konfuzorów, które są ze sobą połączone elektrycznie. Następnie końce łuków przemieszczają się do środka komory mieszania, a tym samym punkt zerowy takiego odbiornika gwiazdowego usytuowany zostaje w plazmie.

Plazmotrony typu „Gwiazda” pracują w układach dławikowych zasilanych z sieci trójfazowej o napięciu $6 \div 10 \text{ kV}$. Dławiki są wyposażone w odczepy. Odłączenie od sieci, w przypadku przekroczenia dopuszczalnej wartości prądu nawet w jednej fazie, przy zakłóceniach w obwodach chłodzenia wodnego oraz technologicznych, realizuje się przy użyciu łączników olejowych.

¹⁾ Konfuzor jest to przewód o przekroju zmniejszającym się równomiernie w kierunku przepływu czynnika (w tym przypadku plazmy).

Prądy łuków nie są sinusoidalne, a więc zawierają wyższe harmoniczne, pożądane jest więc stosowanie dławików bez rdzeni magnetycznych. Maksymalna impedancja dławika $X_{d, \max}$ jest określana z zależności

$$X_{d, \max} = U_f / I_N \quad (9.10)$$

przy czym: U_f – napięcie fazowe, I_N – prąd znamionowy. Minimalną wartość impedancji dławika przyjmuje się jako równą $0,5X_{d, \max}$ przy liczbie odczepów $5 \div 10$.

Plazmotrony te mogą pracować z różnymi gazami, a m.in. z powietrzem, azotem, helem, mieszkanką $N_2 + He + CO_2$, przy ciśnieniach dochodzących do 10 MPa oraz sprawności cieplnej sięgającej 90%. Maksymalne moce znamionowe zrealizowanych już jednostek osiągnęły wartości $6 \text{ MV} \cdot \text{A}$ przy trzech komorach łukowych i maksymalnym napięciu roboczym 2,9 kV oraz wartość $70 \text{ MV} \cdot \text{A}$ (50 MW mocy cieplnej) przy 12 komorach łukowych i temperaturze plazmy 4500 K. Zwiększenie liczby elektrod, a tym samym zmniejszenie obciążenia prądowego do 1 kA ma na celu zwiększenie trwałości elektrod [532].

9.2.1.7. Wyposażenie plazmotronów łukowych

Poniżej omówiono pokrótce układy chłodzenia, gazowe, izolacyjne, inicjujące wyładowanie łukowe oraz magnetyczne.

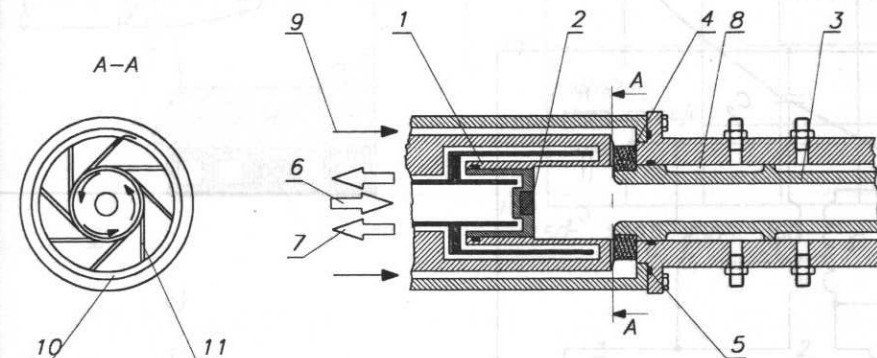
Obciążone cieplnie elementy plazmotronów chłodzi się najczęściej wodą. Konstrukcja elektrod od strony chłodzonej musi zapewniać rozkład przepływu zapobiegający tworzeniu się stref martwych, czyli niedostatecznie schładzanych oraz stref wrzenia. W tych drugich drastycznie maleją współczynniki przejmowania ciepła i przylegające do nich obszary elektrod mogą ulec stopieniu. Z tego też powodu w obwodach chłodzenia wodnego są stosowane ciśnienia rzędu 1 MPa, dzięki czemu istotnie podwyższa się temperaturę wrzenia. Przy projektowaniu układów chłodzenia wodnego przyjmuje się, że 50% doprowadzonej mocy elektrycznej odprowadza się z wodą, przy czym przyrost jej temperatury nie powinien przekroczyć $10 \div 20 \text{ K}$. Warunki te spełnia się – w większości przypadków – przez uźebrowanie powierzchni odprowadzającej ciepło i zapewnienie prędkości przepływu wody na poziomie 30 m/s.

Elektrody są często wykonywane jako dzielone na niewymienną część uchwytową i wymienną część roboczą. Przy mniejszych mocach wystarczy chłodzić część uchwytową. Część robocza powinna mieć jednak takie wymiary, by opory cieplne na drodze odprowadzanych strumieni cieplnych były małe. Przy dużych mocach chłodzi się także część roboczą, łącząc obie części uszczelnionym kanałem [720].

Chłodziwem może być ciekły azot. Korzysta się także ze specjalnych mechanizmów chłodzenia, a mianowicie transpiracyjnego, regeneracyjnego oraz radiacyjnego [720].

Gaz roboczy w większości eksploatowanych plazmotronów doprowadzany jest wirowo. Dzięki temu formuje się przy chłodzonej powierzchni cienka warstwa prze-

plywającego z dużą szybkością gazu, która ogranicza konwekcyjne przejmowanie ciepła ze strumienia plazmy. Równocześnie tak doprowadzany gaz pozwala stabilizować wyładowanie i regulować przekrój kolumny łuku. Na rysunku 9.15 jest przedstawiony fragment plazmotronu z typowym rozwiązaniem wirowego doprowadzenia gazu. W celu uzyskania w miarę równomiernego przepływu wirowego przy ścianach elektrod, gaz wprowadzany jest najpierw do kanału pierścieniowego, a dopiero z niego – przez proste kanały nawiercone w szczelinie między elektrodami – wpływa do przestrzeni wyładowczej w kierunku stycznym do jej powierzchni wewnętrznej.



Rys. 9.15. Wirowe doprowadzanie gazu do plazmotronu, wg [720]

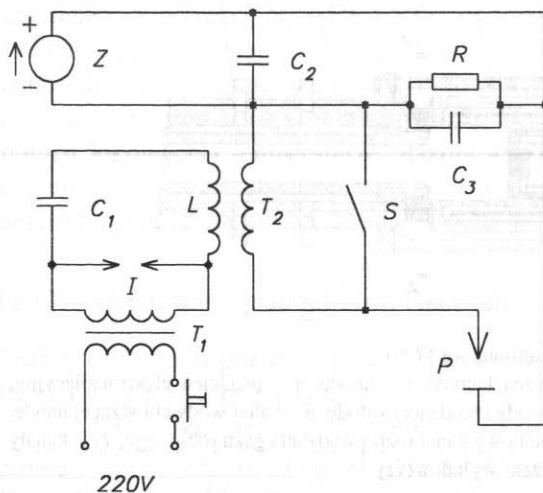
1 – katoda, 2 – torowana część aktywna katody, 3 – anoda, 4 – pierścień elektroizolacyjny, 5 – uszczelka, 6 i 7 – dopływ i odpływ wody chłodzącej katodę, 8 – kanał wody chłodzącej anodę, 9 – dopływ gazu roboczego, 10 – pierścieniowy kanał rozprowadzania gazu roboczego, 11 – kanały stycznne doprowadzające gaz do przestrzeni wyładowczej

W plazmotronach charakteryzujących się małymi odstępami międzyelektrodowymi, a także wysokimi napięciami roboczymi, jak np. w konstrukcji przedstawionej na rys. 9.7, gaz na ogół jest doprowadzany przez cienki pierścień oddzielający elektrody, co ma na celu zapobieganie wyładowaniom łukowym w stanie jałowym. Wartością krytyczną jest w tym przypadku ciśnienie gazu w szczelinie międzyelektrodowej, ponieważ napięcie przebicia rośnie w miarę wzrostu ciśnienia w tym obszarze.

Elementy elektroizolacyjne plazmotronów nie tylko muszą mieć odpowiednią wytrzymałość elektryczną, lecz także cieplną, zwłaszcza że nie zawsze można dostatecznie zminimalizować występujące obciążenia cieplne. W takich przypadkach są stosowane materiały ceramiczne, np. tlenek glinu, azotek boru, kordieryt, a także surowce mineralne (ława, steatyt). Materiały te nie zawsze jednak mają niezbędne właściwości mechaniczne, a szczególnie wytrzymałość na rozciąganie i są trudno obrabialne. Nadanie wymaganej dokładności elementom ceramicznym przed ich wypalaniem nie zawsze kończy się sukcesem z uwagi na zmiany wymiarów zachodzące podczas wypalania. Stosowanie tworzyw sztucznych typu teflon, delrin, ograniczone jest temperaturą ok. 150°C , ponieważ materiały te w wyższych temperaturach zaczynają odkształcać się pod wpływem ciśnienia. Powinno się więc stosować rozwiązania ograniczające ich obciążenia

cieplne. Przykład takiego rozwiązania widoczny jest na rys. 9.7. Przekładki izolacyjne są w tym przypadku zabezpieczone przed promieniowaniem ciepłym przez odpowiednie ukształtowanie szczeliny pierścieniowej oddzielającej elektrody, a ponadto są intensywnie chłodzone strumieniami wprowadzanego gazu roboczego [720].

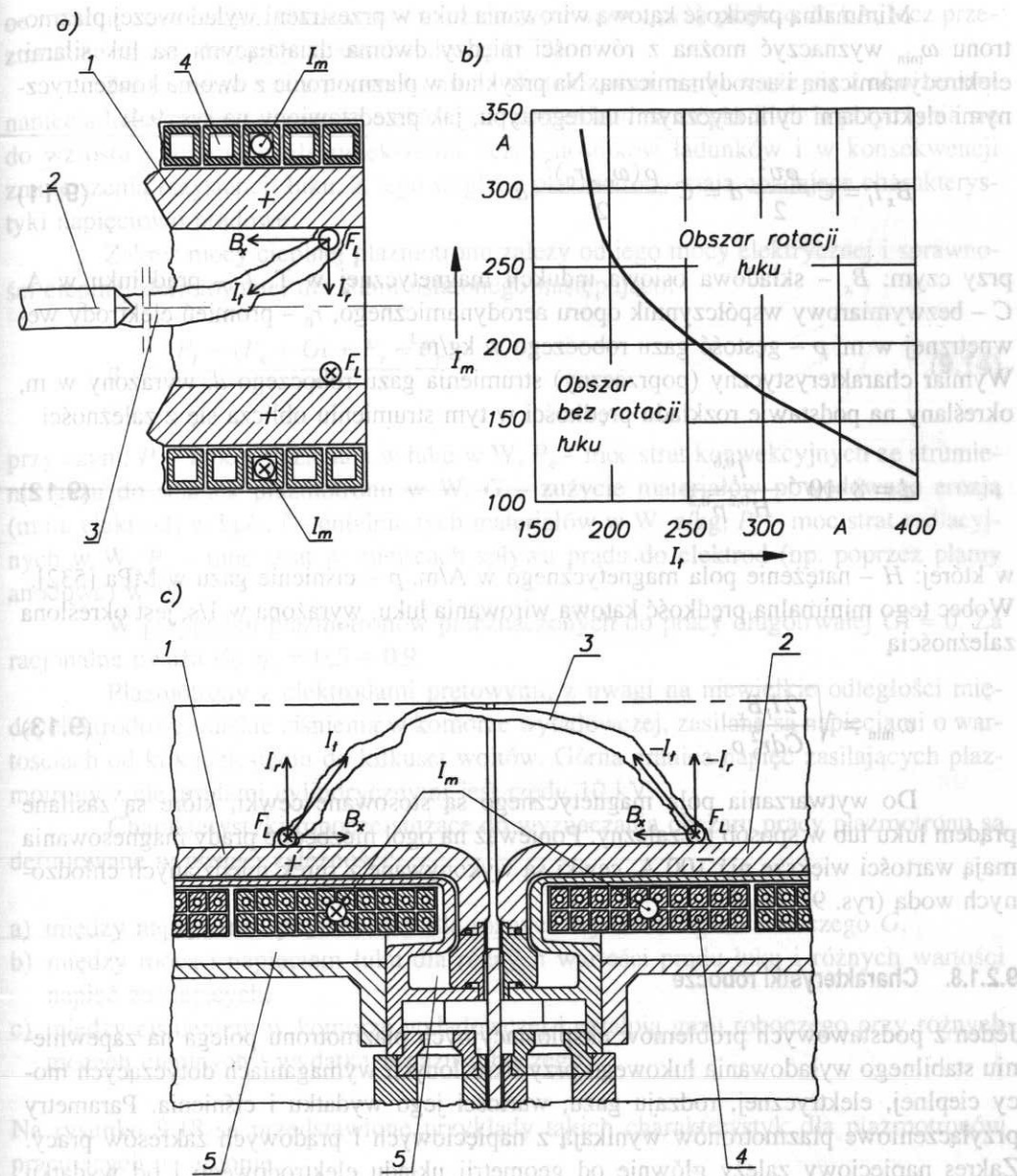
Wyładowanie łukowe w plazmotronach inicjowane jest najczęściej przez zwarcie elektrod, eksplozję drutu, działanie promienia laserowego dużej mocy, wywołanie ciągu impulsów wielkiej częstotliwości. Sposób zapłonu zależy w pierwszym rzędzie od rodzaju plazmotronu. Przykładowe rozwiązania układów zapłonowych widać na rys. 9.10b, oraz 9.16.



Rys. 9.16. Układ wielkiej częstotliwości do zapoczątkowania wyładowania w plazmotronie łukowym
 P – plazmotron; Z – źródło zasilania plazmotronu; I – iskiernik; T_1 – transformator podwyższający napięcie; T_2 – transformator wielkiej częstotliwości; S – łącznik załączany po zainicjowaniu wyładowania; C_1, L – obwód oscylacyjny wielkiej częstotliwości; C_2, C_3, R – elementy zabezpieczające źródło zasilania

W układach magnetycznych, które służą do wirowego przemieszczania się punktów splotu prądu łuku po powierzchni elektrod, wykorzystuje się siłę Lorentza, powstającą w wyniku wzajemnego oddziaływania pola magnetycznego z prądem łuku. By uzyskać pożądany efekt, prąd łuku musi mieć składową promieniową, tylko wtedy bowiem dochodzi do przecinania pod kątem prostym składowej osiowej indukcji magnetycznej (rys. 9.17a, c). Wirowanie łuku występuje dopiero po przekroczeniu pewnej minimalnej wartości siły Lorentza, ponieważ łuk poddawany jest także działaniom sił aerodynamicznych. Przy malejącym prądzie łuku wymagane jest większe natężenie pola magnetycznego, co zwykle sprowadza się do konieczności zwiększenia prądu magnesującego (rys. 9.17b)¹⁾.

¹⁾ Są to wyniki badań empirycznych przy przepływie 20 Nl/min argonu przez dyszę o średnicy 4 mm, długości 4 mm, przy odległości katody od ujścia dyszy równej 27,5 mm i osiowym wrowadzaniu gazu.



Rys. 9.17. Oddziaływanie pola magnetycznego na łuk: a) wirowy ruch łuku w plazmotronie z katodą prętową i anodą cylindryczną; b) wartości graniczne prądu łuku I_r i magnesującego I_m określające stan łuku w plazmotronie jak na rys. 9.17a, wg [429]; c) wirowy ruch łuku w plazmotronie z elektrodami cylindrycznymi, wg [720]

I_r – prąd łuku, I_r – składowa promieniowa prądu łuku, I_m – prąd magnesujący, B_r – składowa osiowa indukcji magnetycznej, F_L – siła Lorentza, I – anoda, 2 – katoda, 3 – łuk, 4 – cewka magnetyczna, 5 – woda chłodząca

Minimalną prędkość kątową wirowania łuku w przestrzeni wyładowczej plazmotronu ω_{\min} wyznaczyć można z równości między dwoma działającymi na łuk siłami: elektrodynamiczną i aerodynamiczną. Na przykład w plazmotronie z dwoma koncentrycznymi elektrodami cylindrycznymi takiego typu, jak przedstawiony na rys. 9.4i

$$B_x I_l = C \frac{\rho v^2}{2} d = C \frac{\rho (\omega_{\min} r_0)^2}{2} d \quad (9.11)$$

przy czym: B_x – składowa osiowa indukcji magnetycznej w T, I_l – prąd łuku w A, C – bezwymiarowy współczynnik oporu aerodynamicznego, r_0 – promień elektrody wewnętrznej w m, ρ – gęstość gazu roboczego w kg/m^3 .

Wymiar charakterystyczny (poprzeczny) strumienia gazu roboczego d , wyrażony w m, określany na podstawie rozkładu prędkości w tym strumieniu oblicza się z zależności

$$d = 8 \cdot 10^{-4} \frac{I_l^{0,6}}{H^{0,2} p^{0,2}} \quad (9.12)$$

w której: H – natężenie pola magnetycznego w A/m, p – ciśnienie gazu w MPa [532]. Wobec tego minimalna prędkość kątową wirowania łuku, wyrażona w 1/s, jest określona zależnością

$$\omega_{\min} = \sqrt{\frac{2I_l B_x}{C d r_0^2 \rho}} \quad (9.13)$$

Do wytwarzania pola magnetycznego są stosowane cewki, które są zasilane prądem łuku lub w sposób niezależny. Ponieważ na ogół niezbędne prądy magnesowania mają wartości większe niż 100 A, cewki są wykonywane z rurek miedzianych chłodzonych wodą (rys. 9.17a, c).

9.2.1.8. Charakterystyki robocze

Jeden z podstawowych problemów eksploatacyjnych plazmotronu polega na zapewnieniu stabilnego wyładowania łukowego przy określonych wymaganiach dotyczących mocy cieplnej, elektrycznej, rodzaju gazu, wartości jego wydatku i ciśnienia. Parametry przyłączeniowe plazmotronów wynikają z napięciowych i prądowych zakresów pracy. Zakres napięciowy zależy głównie od geometrii układu elektrodowego i od wydatku gazu, względnie ciśnienia, w komorze wyładowczej. Największa wartość prądu i związana z nią maksymalna moc są limitowane trwałością elektrod. W chwili obecnej zadowalającą trwałość elektrod uzyskuje się przy prądach o wartościach $10 \div 12 \text{ kA}^{1)}$. Znane są

¹⁾ Pojęcie „trwałości zadowalającej” jest oczywiście względne, przy czym na ogół wymaga się, by w plazmotronach przeznaczonych do pracy długotrwałej, aktywne części elektrod wytrzymały od kilkudziesięciu do 1000 h.

oczywiście rozwiązania plazmotronów pracujących nawet przy prądzie 26 kA, lecz przeznaczone są one do pracy kilkusekundowej [532].

Zwiększenie mocy plazmotronu na skutek zmian prądu wiąże się z obniżeniem napięcia łuku, ponieważ energia elektryczna zamieniana na ciepło Joule'a przyczynia się do wzrostu jonizacji, czyli zwiększenia liczby nośników ładunków i w konsekwencji zmniejszenia rezystancji łuku. Z tego względu plazmotrony mają opadające charakterystyki napięciowo-prądowe.

Zakres mocy cieplnej plazmotronu zależy od jego mocy elektrycznej i sprawności cieplnej definiowanej dla stanu ustalonego następująco:

$$\eta_c = \frac{P_l - (P_k + G i + P_r + P_p)}{P} \quad (9.14)$$

przy czym: P_l – moc wydzielana w łuku w W, P_k – moc strat konwekcyjnych ze strumienia gazu do ścianek plazmotronu w W, G – zużycie materiałów powodowane erozją (m.in. elektrod) w kg/s , i – entalpia tych materiałów w $\text{W} \cdot \text{s/kg}$, P_r – moc strat radiacyjnych w W, P_p – moc strat w miejscach spływu prądu do elektrod (np. poprzez plamy anodowe) w W.

W przypadku plazmotronów przeznaczonych do pracy długotrwałej $G i \approx 0$. Za racjonalne uważa się $\eta_c = 0,5 \div 0,9$.

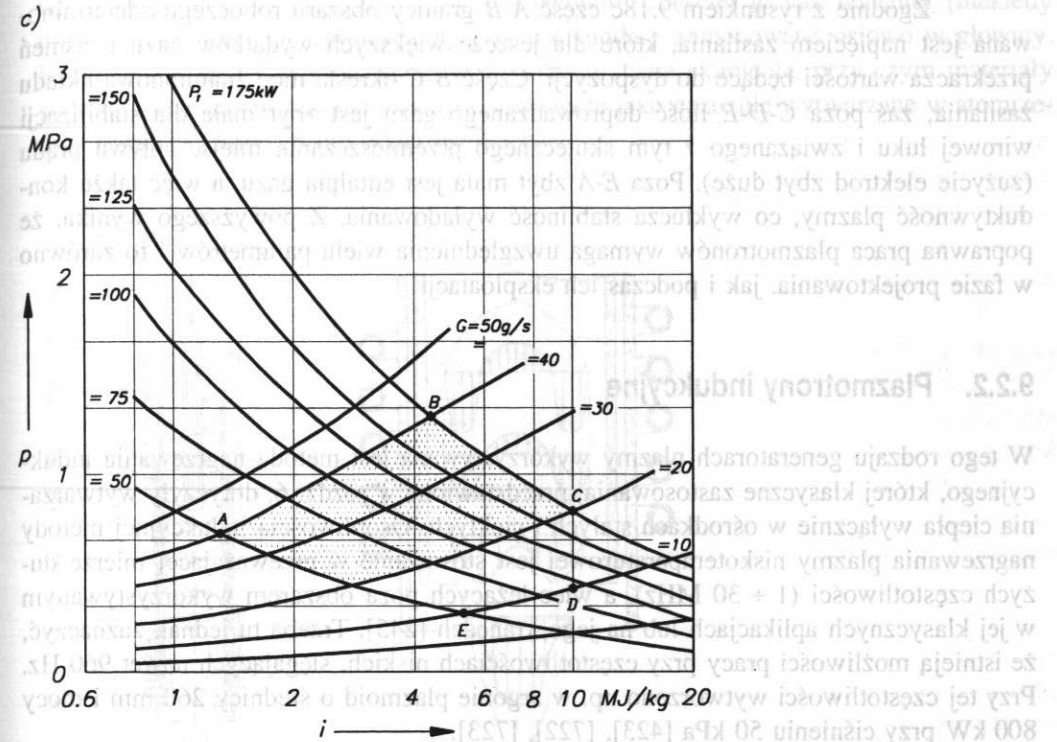
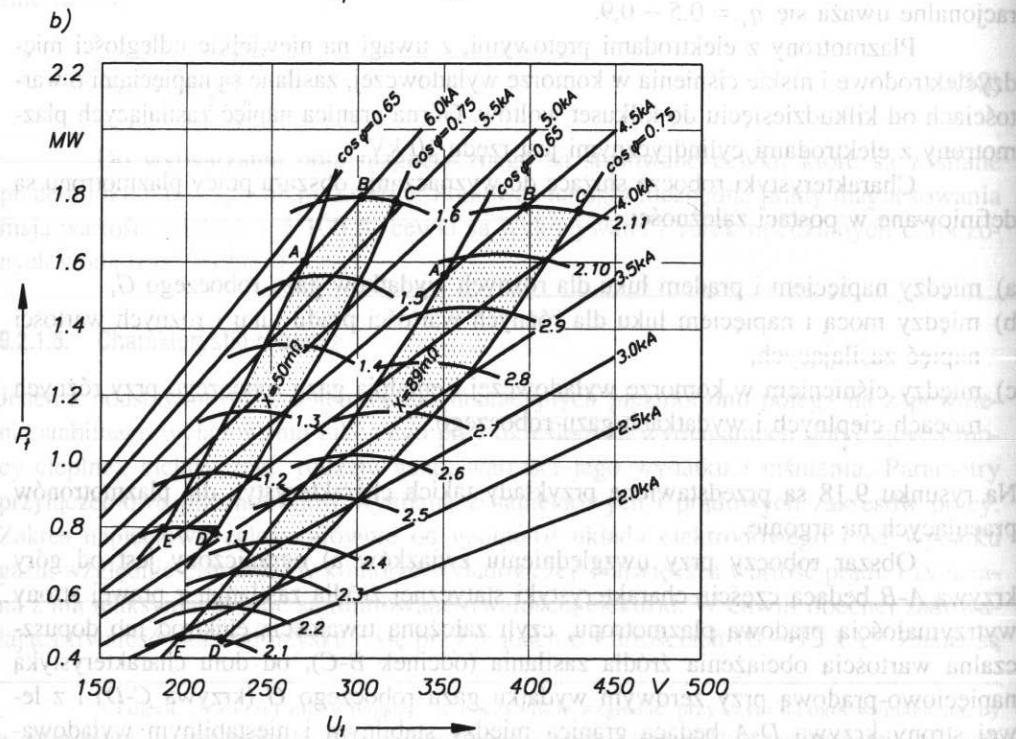
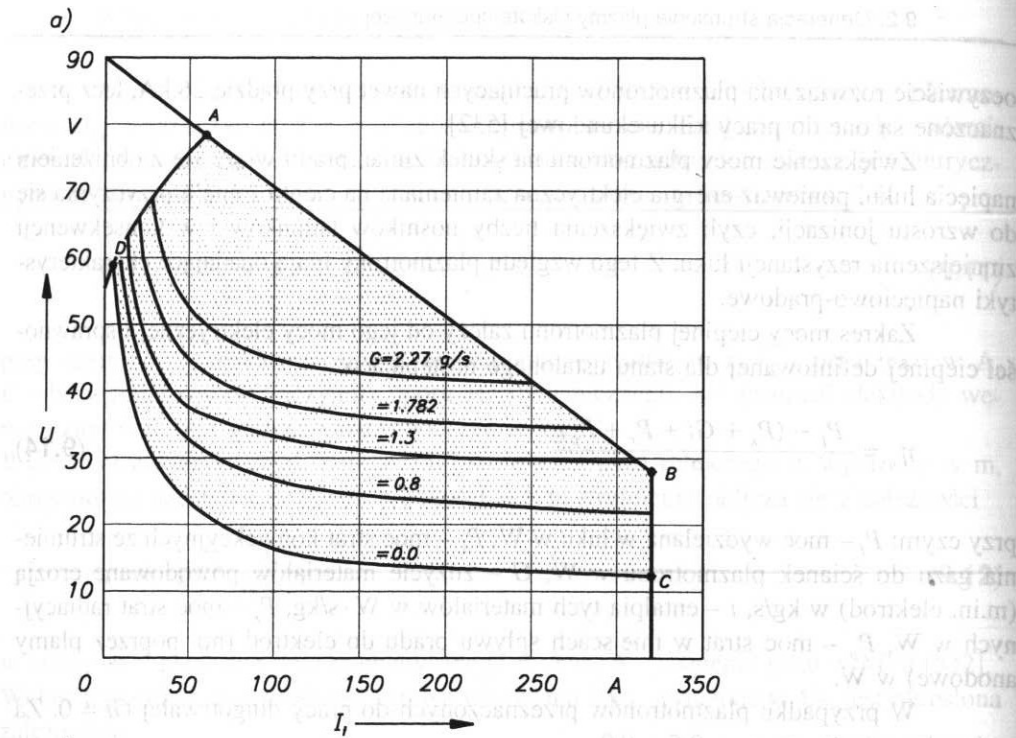
Plazmotrony z elektrodami prętowymi, z uwagi na niewielkie odległości międzyelektrodowe i niskie ciśnienia w komorze wyładowczej, zasilane są napięciami o wartościach od kilkudziesięciu do kilkuset woltów. Górna granica napięć zasilających plazmotrony z elektrodami cylindrycznymi jest rzędu 10 kV.

Charakterystyki robocze służące do wyznaczania obszaru pracy plazmotronu są definiowane w postaci zależności:

- między napięciem i prądem łuku dla różnych wydatków gazu roboczego G ,
- między mocą i napięciem łuku dla różnych wartości prądu łuku i różnych wartości napięć zasilających,
- między ciśnieniem w komorze wyładowczej i entalpią gazu roboczego przy różnych mocach cieplnych i wydatkach gazu roboczego.

Na rysunku 9.18 są przedstawione przykłady takich charakterystyk dla plazmotronów pracujących na argonie.

Obszar roboczy przy uwzględnieniu związków a) ograniczony jest od góry krzywą A-B będącą częścią charakterystyki statycznej źródła zasilania, z prawej strony wytrzymałością prądową plazmotronu, czyli założoną trwałością elektrod lub dopuszczalną wartością obciążenia źródła zasilania (odcinek B-C), od dołu charakterystyką napięciowo-prądową przy zerowym wydatku gazu roboczego G (krzywa C-D) i z lewej strony krzywą D-A będącą granicą między stabilnym i niestabilnym wyładowaniem łukowym.



Rys. 9.18. Charakterystyki robocze plazmotronów: c) prądu stałego z elektrodami cylindrycznymi zasilanego z układu transduktorowo-prostownikowego, wg [720]

Obszar roboczy plazmotronów prądu przemiennego wg b) wyznaczany jest przy pracy z dławikiem dla określonej reaktancji X układu zasilającego. W skład tej reaktancji wchodzi reaktancja transformatora, przewodów zasilających oraz dławika, stanowiąca główny jej składnik. Od góry obszar ograniczony jest odcinkiem A-B, który odpowiada prądowi łuku, oraz krzywą B-C związaną z określonym stopniem napięciowym transformatora zasilającego. Z prawej i lewej strony ograniczenie stanowi współczynnik mocy $\cos \phi$, zaś od dołu najniższy, będący do dyspozycji, stopień napięciowy (na rysunku podane są numery stopni napięciowych). Oczywiście praca przy mniejszych wartościach $\cos \phi$ jest możliwa, lecz trudno uznać ją za racjonalną. Nie jest natomiast możliwa praca przy jego większych wartościach z uwagi na konieczność zapewnienia ciągłości wyładowania łukowego.

Obszar roboczy plazmotronów prądu przemiennego przy zasilaniu z układu transduktorowego lub tyrystorowego wyznacza się podobnie, przy czym zamiast stałej reaktancji dławika występuje reaktancja sterowana. Dzięki temu jest on istotnie większy niż przy pracy z dławikiem, łatwo jest regulować prąd łuku i można go bez trudu dopasować do wymagań procesu technologicznego. Możliwości regulacyjne plazmotronów prądu stałego zasilanych z układu tyrystorowego są analogiczne do znamienych dla plazmotronów prądu przemiennego, zasilanych z układu transduktorowego lub tyrystorowego [379].

Rys. 9.18. Charakterystyki robocze plazmotronów: a) prądu stałego z katodą prętową zasilanego z prądnicy spawarkowej, wg [537]; b) prądu przemiennego z katodami prętowymi pracujących w układzie jak na rys. 9.11a, wg [379]

Zgodnie z rysunkiem 9.18c część *A-B* granicy obszaru roboczego zdeterminowana jest napięciem zasilania, które dla jeszcze większych wydatków gazu i ciśnień przekracza wartości będące do dyspozycji. Część *B-C* określa moc znamionowa układu zasilania, zaś poza *C-D-E* ilość doprowadzanego gazu jest zbyt mała dla stabilizacji wirowej łuku i związanego z tym skutecznego przemieszczania miejsc spływu prądu (zużycie elektrod zbyt duże). Poza *E-A* zbyt mała jest entalpia gazu, a więc także konduktywność plazmy, co wyklucza stabilność wyładowania. Z powyższego wynika, że poprawna praca plazmotronów wymaga uwzględnienia wielu parametrów i to zarówno w fazie projektowania, jak i podczas ich eksploatacji.

9.2.2. Plazmotrony indukcyjne

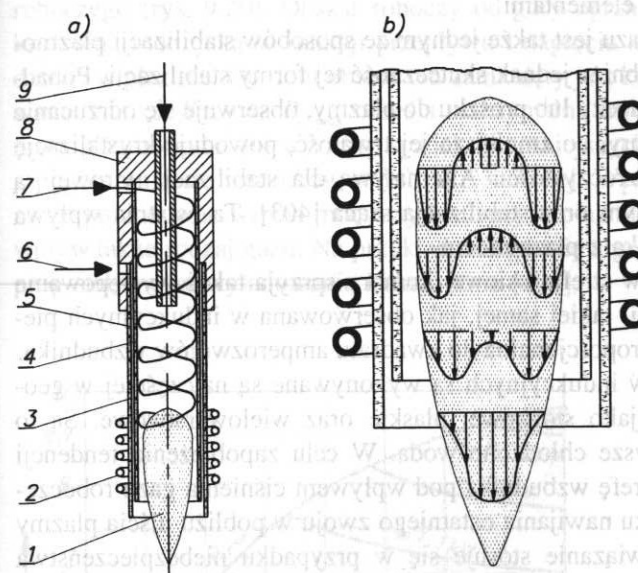
W tego rodzaju generatorach plazmy wykorzystywana jest metoda nagrzewania indukcyjnego, której klasyczne zastosowania, przedstawione w rozdz. 6, dotyczyły wytwarzania ciepła wyłącznie w ośrodkach stałych i ciekłych. Osobliwością indukcyjnej metody nagrzewania plazmy niskotemperaturowej jest stosowanie w przeważającej mierze dużych częstotliwości ($1 \div 30$ MHz), a więc leżących poza obszarem wykorzystywanym w jej klasycznych aplikacjach lub na jego krańcach [245]. Trzeba tu jednak zaznaczyć, że istnieją możliwości pracy przy częstotliwościach niskich, sięgających nawet 960 Hz. Przy tej częstotliwości wytworzono np. w argonie plazmoid o średnicy 260 mm i mocy 800 kW przy ciśnieniu 50 kPa [423], [722], [723].

Plazmotrony indukcyjne zaliczają się do kategorii bezelektrodowych, co ma kapitalne znaczenie przy realizacji procesów, którym stawia się wysokie wymagania, jeśli chodzi o czystość składników reakcji. Brak produktów erozji elektrod nie jest jedyną zaletą plazmy generowanej indukcyjnie. Strumień takiej plazmy ma niedużą prędkość liniową, co wydłuża czas oddziaływania strefy wysokotemperaturowej na wprowadzane do niego substraty. Na przykład przy średnicy plazmoidu równej 30 cm można zmniejszyć prędkość gazu nawet do 0,3 m/s [403]. Czas przebywania substratów w plazmie wydłuża się ponadto wskutek ich recyrkulacji powodowanej działaniami elektrodynamicznymi. Jeśli dodać do tego stosunkowo wysokie temperatury plazmy ($8000 \div 13\ 000$ K w argonie), to bezelektrodowe plazmotrony indukcyjne trzeba uznać za źródła ciepła o interesujących walorach technologicznych. Schemat plazmotronu indukcyjnego oraz rozkład prędkości w plazmie przy wirowym wprowadzaniu gazu do komory przedstawia rys. 9.19.

Gaz roboczy jest wprowadzany do komory plazmotronu przez głowicę wirowo lub osiowo. Zrealizowano plazmotrony pracujące w zakresie ciśnień $10^2 \div 5 \cdot 10^7$ Pa. W zasadzie nie ma ograniczeń, jeśli chodzi o rodzaj gazu roboczego. Znane są plazmotrony pracujące zarówno z gazami szlachetnymi, jak i z powietrzem, chlorem, wodorem, metanem, tlenem, tlenkiem węgla oraz różnymi mieszaninami gazów.

Po rozruchu plazmotronu, polegającym na zapoczątkowaniu w strefie wzbudnika jonizacji tego gazu, indukują się w nim prądy wirowe, doprowadzając do utworzenia stabilnego plazmoidu. W jego obszarze nagrzewany jest gaz roboczy, który może być

także reagentem lub bywa mieszany z reagentem. Częściej jednak reagenty (niekiedy także gaz roboczy) są wprowadzane poprzez kapilary zamocowane osiowo w głowicy. Reagenty mogą być wprowadzane w dowolnym stanie skupienia, przy czym materiały stałe są podawane w postaci proszków, zaś ciekłe jako gazozole wytwarzane w atomizerach ultradźwiękowych lub odparownikach.



Rys. 9.19. Plazmotron indukcyjny: a) schemat plazmotronu z wirowym doprowadzeniem gazu; b) rozkład prędkości gazu w plazmoidzie
1 – plazmoid, 2 – wzbudnik, 3 – zewnętrzna rura komory plazmotronu, 4 – przestrzeń między rurami, 5 – wewnętrzna rura komory plazmotronu, 6 – wlot gazu chłodzącego, 7 – wlot gazu roboczego, 8 – głowica, 9 – wlot wsadu

Część energii przekazywanej plazmie przez wzbudnik przejmują cylindryczne ścianki komory oraz głowica i dlatego elementy te muszą być chłodzone, zwłaszcza że gradienty temperatury na granicy plazma-ścianka mogą osiągać wartości do 5000 K/mm [357]. Jeśli moc plazmotronu i rodzaj gazu roboczego na to pozwala (argon i pewne mieszaniny gazów), stosuje się chłodzenie gazowe ścianek (rys. 9.19). Przy korzystaniu z gazów dwuatomowych oraz przy dużych mocach plazmotronów stosowane jest chłodzenie wodne. Znane są także inne rozwiązania ograniczające obciążenie cieplne ścianek, a m.in. ruch posuwisto-zwrotny komory, przy stałej lokalizacji plazmoidu i wzbudnika. Ścianki komory są wykonywane najczęściej z kwarcu, lecz znane są rozwiązania komór ze spiekanych materiałów porowatych (najczęściej z tlenku glinu).

Najskuteczniej chroni się ścianki przed destrukcją cieplną nie dopuszczając do ich styku z plazmoidem. Sprzyja temu częściej stosowany wirowy sposób doprowadzania gazu do komory. W chłodniejszej, nie zjonizowanej warstwie przyściennej gazu nie

indukują się ponadto prądy wirowe, co tym bardziej odsuwa obszar wysokotemperaturowy plazmoidu od ścianek. Ponadto zwiększenie grubości tej warstwy zwiększa prawdopodobieństwo rekombinacji zjonizowanych cząstek w zewnętrznej strefie wyładowania, co dodatkowo sprzyja zmniejszeniu konduktywności gazu i ograniczeniu generowanej tam mocy. Negatywnym rezultatem tego zjawiska jest jednak obniżenie sprawności przekazywania energii ze wzbudnika do plazmoidu, ponieważ pogarsza się sprzężenie elektromagnetyczne między tymi elementami.

Wirowe wprowadzanie gazu jest także jednym ze sposobów stabilizacji plazmoidu. Turbulentny przepływ gazu obniża jednak skuteczność tej formy stabilizacji. Ponadto przy wprowadzaniu gazozolu, cieczy lub proszku do plazmy, obserwuje się odrzucanie cząstek na wewnętrzną ściankę rury, co zmniejsza jej trwałość, powoduje krystalizację kwarcu i zmniejszenie jego przezroczystości. Alternatywą dla stabilizacji wirowej są stabilizacja strumieniem laminarnym oraz stabilizacja ssąca [403]. Ta ostatnia wpływa korzystnie na sprzężenie wzbudnika z plazmoidem.

Zacieśnianiu plazmoidu w strefie osiowej komory sprzyja także występowanie doosiowej siły elektrodynamicznej, takiej samej, jak obserwowana w indukcyjnych piecach tyglowych. Jej wartość jest proporcjonalna do kwadratu amperozwojów wzbudnika.

Wzbudniki plazmotronów indukcyjnych są wykonywane najczęściej w geometrii cylindrycznej, lecz także jako stożkowe, płaskie oraz wielowarstwowe. Są to cewki kilkuzwojowe, prawie zawsze chłodzone wodą. W celu zapobieżenia tendencji plazmy do wysuwania się poza strefę wzbudnika pod wpływem ciśnienia gazu roboczego, stosuje się odwrócenie kierunku nawijania ostatniego zwoju w pobliżu ujścia plazmy z komory [403]. Identyczne rozwiązanie stosuje się w przypadku niebezpieczeństwa nadmiernego rozprzestrzenienia się plazmy w stronę głowicy.

Zasilanie wzbudników przy pracy w górnym zakresie częstotliwości (kila- do kiloherców do 30 MHz) realizowano dotąd z użyciem generatorów lampowych. Przy częstotliwościach mniejszych niż 10 kHz stosowano nawet generatory maszynowe. Obecnie nie ma przeszkód w użyciu – przynajmniej w zakresie do 200 kHz – zasilaczy tranzystorowych, a przy częstotliwościach niższych także – tyrystorowych, podobnie jak w klasycznych zastosowaniach metody indukcyjnej. Największe zrealizowane dotychczas urządzenia miały moce rzędu kilku megawatów [423], [722], [723]. Przy pracach w zakresie częstotliwości stosowanych w technikach nadawczych, źródła energii muszą spełniać wymagania dotyczące jej stabilizacji, co w warunkach odbiornika plazmowego nie jest zadaniem łatwym.

Jednym z często przyjmowanych kryteriów optymalnej częstotliwości jest maksymalna temperatura plazmy. Według [645] zakres f_{opt} (w Hz) zawiera się w przedziale

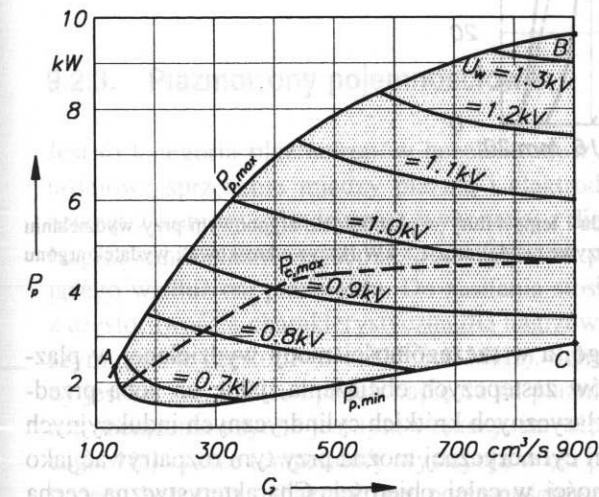
$$\frac{0,5 \cdot 10^{11}}{\sigma d_w^2} < f_{opt} < \frac{1,5 \cdot 10^{11}}{\sigma d_w^2} \quad (9.15)$$

gdzie: σ – konduktywność plazmy w S/m, d_w – średnica wewnętrzna komory plazmotronu w cm.

Ponieważ σ w niewielkim stopniu zależy od rodzaju gazu [92], często przyjmuje się

$$f_{opt} \approx \frac{35 \cdot 10^6}{d_w^2} \quad (9.16)$$

Moc wydzielana w plazmoidzie zależy w znacznym stopniu od wydatku gazu roboczego (rys. 9.20). Obszar roboczy od góry ogranicza krzywa A-B określająca maksymalną moc, jaką w funkcji przepływu i napięcia zasilającego wzbudnik można wydzielić w plazmie. Od dołu obszar ten zamknięty jest krzywą A-C, poniżej której wyładowanie zanika. Krzywa $P_{c,max}$ określa maksymalną mocą cieplną, jaką może przejść komora plazmotronu. Jej wyraźny spadek dla mniejszych natężeń przepływu gazu wynika z pogorszenia się warunków stabilizacji wirowej. Wprowadzenie substratów do plazmy może powodować wzrost mocy wydzielanej w plazmie. Na generowaną w niej moc ma wpływ także rodzaj gazu. Na przykład zastąpienie argonu powietrzem przesuną mocowy próg stabilności wyładowania kilkakrotnie [403].

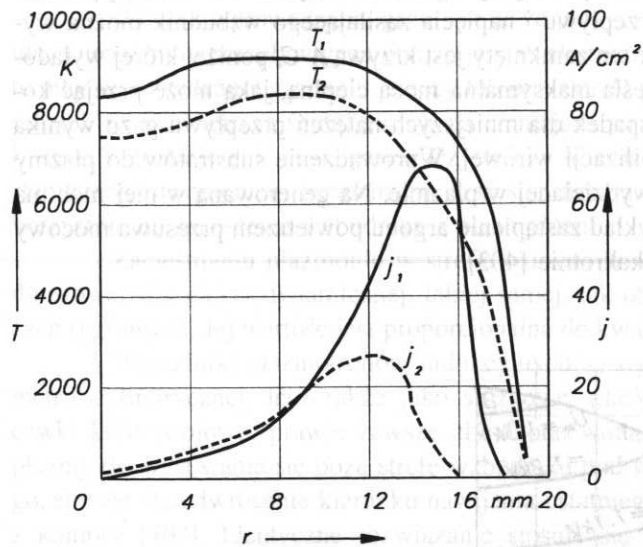


Rys. 9.20. Charakterystyka plazmotronu indukcyjnego, wg [554]

P_p – moc wydzielana w plazmoidzie, G – wydatek gazu roboczego (argonu), $P_{p,max}$ – maksymalna moc wydzielana w plazmoidzie, $P_{p,min}$ – minimalna moc wydzielana w plazmoidzie, $P_{c,max}$ – największa moc, jaką może przejść komora plazmotronu, U_w – napięcie wzbudnika

Efektywność energetyczna indukcyjnego nagrzewania plazmy zależy od sprawności źródła zasilania, strat we wzbudniku oraz strat w plazmotronie. Jeśli chodzi o źródła zasilania, to ich sprawności nie odbiegają od wartości znamionujących układy stosowane przy indukcyjnym nagrzewaniu wsadów stałych i ciekłych. Najbardziej rozpowszechnione urządzenia z plazmotronami indukcyjnymi zasilanymi z generatorów

lampowych osiągają sprawności całkowite rzędu 50%¹⁾ [444]. Największe straty występują w obwodzie drgającym (30 ÷ 35%), we wzбудniku traci się 5 ÷ 10%. Reszta to straty cieplne, przy czym sprawność samego plazmotronu w zależności od rodzaju gazu roboczego oceniana jest na 76 ÷ 95%. Powyższe dane dotyczą plazmotronów z komorami kwarcowymi. Nieco większe sprawności są przypisywane plazmotronom z komorami z ceramicznych materiałów porowatych.



Rys. 9.21. Promieniowy rozkład gęstości prądu i temperatury w plazmoidzie argonowym przy wydzielaniu w nim mocy o wartości 7,1 kW (krzywe ciągłe) oraz 1,8 kW (krzywe kreskowe); wydatek argonu w obu przypadkach $G = 639 \text{ cm}^3/\text{s}$

Obliczenia układu plazmowego, a w szczególności mocy wydzielanej w plazmoidzie oraz elektrycznych parametrów zastępczych obciążenia, jakie on sobą przedstawia, prowadzi się tak samo jak dla klasycznych krótkich cylindrycznych indukcyjnych układów grzejnych. Plazmę o geometrii cylindrycznej można przy tym rozpatrywać jako obciążenie o jednorodnej konduktywności w całej objętości. Charakterystyczną cechą plazmoidu jest tylko nieznaczna zależność jego średnicy d od ciśnienia oraz wydatku gazu. Zależy ona natomiast od częstotliwości i jest określana jako 3,5 razy większa od głębokości wnikania pola δ [392], [444]. Stąd łatwo już określić średnicę wewnętrzną komory plazmotronu d_w , która musi być większa niż $3,5\delta$ i to w stopniu zapewniającym z jednej strony dobrą sprawność elektryczną układu wzбудnik-plazmoid, z drugiej zaś właściwe warunki cieplne pracy komory. Według pracy [444] dla plazmy argonowej

¹⁾ Według niektórych autorów sprawności te są mniejsze i w skrajnym przypadku oceniane nawet na 8%. Wartości takie mogą oczywiście być uzyskiwane, lecz tylko w warunkach niewłaściwego doboru parametrów układu i procesu.

generowanej w niechłodzonej komorze kwarcowej o średnicy $d_w = 3,8 \text{ cm}$, przy mocy wydzielanej w plazmoidzie równej 7,1 kW, wydatku argonu $G = 639 \text{ cm}^3/\text{s}$ i częstotliwości 20 MHz, średnica plazmoidu w strefie wzбудnika zawierała się w przedziale 2,99 ÷ 3,36 cm. Maksymalne temperatury w tym obszarze wynosiły 8064 ÷ 9360 K. Na rysunku 9.21 przedstawiono rozkłady gęstości prądu oraz temperatur w centralnej – najgorętszej części takiego plazmoidu.

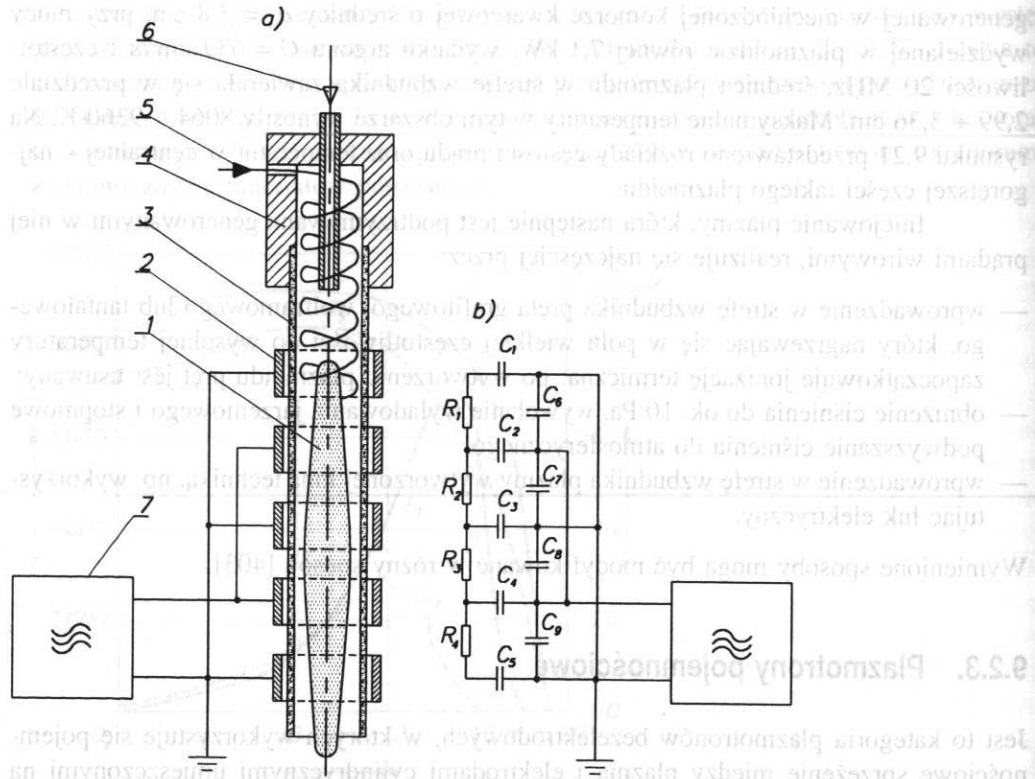
Inicjowanie plazmy, która następnie jest podtrzymywana generowanymi w niej prądami wirowymi, realizuje się najczęściej przez:

- wprowadzenie w strefę wzбудnika pręta grafitowego, wolframowego lub tantalowego, który nagrzewając się w polu wielkiej częstotliwości do wysokiej temperatury zapoczątkowuje jonizację termiczną; po wytworzeniu plazmoidu pręt jest usuwany;
- obniżenie ciśnienia do ok. 10 Pa, wywołanie wyładowania jarzeniowego i stopniowe podwyższanie ciśnienia do atmosferycznego;
- wprowadzenie w strefę wzбудnika plazmy wytworzonej inną techniką, np. wykorzystując łuk elektryczny.

Wymienione sposoby mogą być modyfikowane w różny sposób [403].

9.2.3. Plazmotrony pojemnościowe

Jest to kategoria plazmotronów bezelektrodowych, w których wykorzystuje się pojemnościowe sprzężenie między plazmą i elektrodami cylindrycznymi umieszczonymi na zewnątrz komory cylindrycznej wykonanej z dielektryka – zwykle z kwarcu (rys. 9.22a). Nagrzewanie plazmy następuje pod wpływem prądu wielkiej częstotliwości, przepływającego wzdłuż osi plazmoidu. Do zasilania stosowane są generatory lampowe pracujące z częstotliwością charakterystyczną dla nagrzewania pojemnościowego, zwykle w pierwszym pasmie częstotliwości (13,560 MHz). Schemat zastępczy układu grzejnego pokazany jest na rys. 9.22b. Spadek napięcia na plazmoidzie, który przedstawia sobą praktycznie obciążenie czynne jest tym większy, im większa jest częstotliwość napięcia zasilającego. Najwyższe temperatury występują w osi plazmoidu i osiągają wartości rzędu kilku tysięcy kelwinów. Plazmotrony pojemnościowe eksploatowane są na ogół przy ciśnieniu atmosferycznym. Podobnie jak w innych rodzajach generatorów plazmy, tu także stosowana jest stabilizacja wirowa. Plazmotrony mogą być dwuelektrodowe, lecz częściej – w celu zwiększenia efektywności nagrzewania plazmy – stosowane są układy kaskadowe elektrod (rys. 9.22). W celu zwiększenia natężenia pola elektrycznego w zewnętrznych warstwach plazmoidu, między elektrody i dielektryczną komorę można wprowadzić dodatkowy dielektryk o dużej wartości przenikalności elektrycznej. Najczęściej bywa nim przepływający olej elektroizolacyjny, który jest wykorzystywany równocześnie jako chłodziwo. Ciepło z oleju jest odprowadzane w dużej części poprzez chłodzone wodą elektrody. Ponieważ część z nich, a także chłodząca je woda, mają wysoki potencjał elektryczny, niezbędne jest zastosowanie rozwiązań eliminujących



Rys. 9.22. Plazmotron pojemnościowy z kaskadowym układem elektrod i jego schemat zastępczy: a) schemat plazmotronu, b) zastępczy schemat elektryczny
1 – plazmoid, 2 – elektroda, 3 – komora kwarcowa, 4 – głowica, 5 – wlot gazu roboczego, 6 – wlot substratu, 7 – generator wielkiej częstotliwości, $R_1 + R_4$ – rezystancje zastępcze fragmentów plazmoidu, $C_1 + C_5$ – pojemności między elektrodami i plazmoidem, $C_6 + C_9$ – pojemności rozproszenia

niebezpieczeństwo porażenia elektrycznych. Także ze względów bezpieczeństwa krańcowe elektrody układu kaskadowego mają potencjały ziemi. Według Gallikera urządzenia z plazmotronami pojemnościowymi mogą być realizowane w przedziale mocy $4 \div 1000$ kW [452].

9.2.4. Plazmotrony mikrofalowe

Plazmotrony mikrofalowe, nazywane także generatorami plazmy skrajnie wielkiej częstotliwości, są budowane i eksploatowane w zakresie obejmującym trzy pierwsze pasma częstotliwości wydzielone dla mikrofalowych urządzeń grzejnych ($1 \div 9$ GHz) [452]. Preferowane jest jednak pasmo II (patrz tabl. 8.1), czyli 2,45 GHz [412]. Plazma jest w tym przypadku podtrzymywana promieniowaniem elektromagnetycznym, wytwarza-

nym w identycznych generatorach, jakie są wykorzystywane do mikrofalowego bezpośredniego nagrzewania ośrodków stałych i ciekłych (rozd. 8).

Analizując oddziaływania fal elektromagnetycznych o długościach dochodzących niekiedy do wymiarów charakterystycznych dla plazmoidów, wychodzi się z równań Maxwella, traktując plazmę jako środowisko quasi-neutralne i anizotropowe. Ponieważ jony są znacznie cięższe od elektronów, pomija się ich wpływ na właściwości polaryzacyjne i konduktywność plazmy. Między plazmą mikrofalową i podtrzymującym ją promieniowaniem elektromagnetycznym występuje silnie nieliniowe wzajemne oddziaływanie, powodujące intensywne tłumienie fal i efektywną wymianę energii z otoczeniem, którą w sposób uproszczony można opisać równaniem Ellenbasa-Hellera [612].

W zależności od długości fali, energia do obszaru wyładowania doprowadzana jest falowodem lub rzadziej w postaci wiązki promieniowania formowanego przy użyciu układów quasi-optycznych. W tym pierwszym przypadku używa się falowodów zamkniętych o przekrojach prostokątnym lub kołowym oraz typu współosiowego. Do transmisji energii wykorzystuje się fale różnych typów. Samo wyładowanie może być zlokalizowane zarówno w falowodzie, i wówczas ograniczają go jego ścianki, we wnętrzu kwarcowej lub szklanej rurki, umieszczonej u wylotu falowodu i stanowiącej jego przedłużenie (plazmotrony falowodowe), jak i u wylotu falowodu współosiowego, przy czym strumień plazmy stanowi przedłużenie zamkniętego na końcu środkowego przewodu falowodu (plazmotrony współosiowe). Przekrój poprzeczny rurki stosowanej w plazmotronach falowodowych i stanowiącej komorę wyładowczą powinien być przy tym znacznie mniejszy niż przekrój poprzeczny falowodu. Istnieją także możliwości generowania plazmy wewnątrz rezonatorów, co upodabnia tę technikę do klasycznego nagrzewania mikrofalowego omówionego w rozdziale poprzednim.

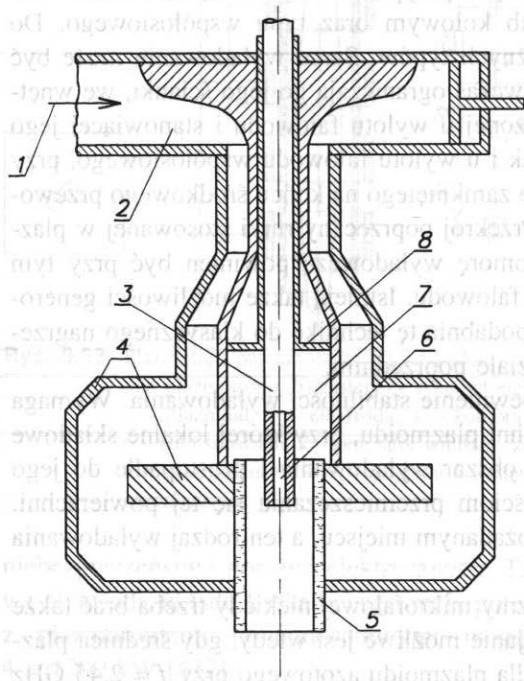
Sprawą istotną jest oczywiście zapewnienie stabilności wyładowania. Wymaga to ukształtowania takiej geometrii powierzchni plazmoidu, przy której lokalne składowe prędkości gazu roboczego wnikałego w obszar wyładowania i prostopadłe do jego powierzchni będą równe lokalnym prędkościom przemieszczania się tej powierzchni. W rezultacie plazma jest utrzymywana w pożądanym miejscu, a ten rodzaj wyładowania nosi miano stacjonarnego.

Analizując warunki stabilności plazmy mikrofalowej niekiedy trzeba brać także pod uwagę efekt naskórkowości. Jego pomijanie możliwe jest wtedy, gdy średnica plazmoidu jest dostatecznie mała. Na przykład dla plazmoidu azotowego przy $f = 2,45$ GHz i $T < 7000$ K, ma to miejsce przy $d \leq 22$ mm [612].

Warto tu zaznaczyć, że potencjalna niestabilność granic wyładowania jest charakterystyczna dla wyładowań generowanych przy użyciu wszystkich rodzajów plazmotronów, jednak szczególnie uwidacznia się ona w warunkach wytwarzania plazmy w układach mikrofalowych oraz plazmy pobudzonej optycznie (ta ostatnia nie jest omawiana w niniejszej książce). Jak wiadomo, podatność na przemieszczanie się granic plazmoidu wynika z przekazywania przylegającej do niego warstwie gazu zarówno wzbudzonych cząstek, jak i energii w wyniku promieniowania i przewodnictwa gazów. W rezultacie gaz w warstwach przygranicznych ulega w mniejszym lub w większym

stopniu jonizacji. Jeśli ponadto gaz ten znajduje się w dostatecznie silnych polach elektrycznych lub elektromagnetycznych, to kosztem dyssypacji energii tych pól następuje dalszy wzrost jonizacji i w rezultacie intensyfikacja tego procesu. Stąd też przy analizie problemów wyładowań podtrzymywanych przy użyciu bardzo wielkich częstotliwości, a do takich należy plazma mikrofalowa, zwykle wyróżnia się oprócz wyładowania stacjonarnego także wyładowania poruszające się [452]. Największe znaczenie w technice mają wyładowania stabilizowane w określonym miejscu przestrzeni, czyli stacjonarne i tych dotyczyć będą dalsze informacje.

Plazmoid mikrofalowy jest dla generatora mikrofalowego obciążeniem czynnym, włączonym zwykle na końcu linii przesyłowej, jaką jest zwykle falowód. Przykład plazmotronu z grupy najczęściej stosowanych plazmotronów falowodowych przedstawia rys. 9.23.



Rys. 9.23.

Plazmotron mikrofalowy typu falowodowego, zaczerpnięto z [452]

1 – wprowadzanie energii mikrofalowej, 2 – falowód o przekroju prostokątnym, 3 – sonda stabilizująca, 4 – ściany linii promieniowej, 5 – dielektryczna rurka wyładowcza, 6 – kanał doprowadzający substrat, 7 – linia współosiowa, 8 – element dopasowujący

Większość prezentowanych w literaturze plazmotronów mikrofalowych to układy o mocy mniejszej niż 10 kW [447], [452]. Podobnie jednak, jak w przypadku klasycznych mikrofalowych urządzeń grzejnych, nie ma przeszkód, by realizować urządzenia o znacznie większej mocy. Propozycja plazmotronu o mocy 100 kW ze stabilizacją wirową przedstawiona jest m.in. w [452]. Plazmotrony mikrofalowe, podobnie jak inne bezelektrodowe generatory plazmy, mogą pracować z różnymi gazami roboczymi, a uzyskiwane temperatury plazmy sięgają 8000 K przy ciśnieniach roboczych od 10^2 Pa do przekraczających wartości ciśnienia atmosferycznego.

Wyładowania są inicjowane podobnie jak w innych rodzajach plazmotronów. Niekiedy tylko może być ono zapoczątkowane samoistnie, o ile istnieje możliwość uzyskania natężenia pola o wartości wywołującej przebicie w przestrzeni wyładowczej.

9.3. Urządzenia plazmowe i ich zastosowania

9.3.1. Metalurgia plazmowa

Początkowo urządzenia z piecami plazmowymi stosowano do wytapiania i przetapiania metali [410]. Z czasem zakres aplikacji metalurgicznych uległ rozszerzeniu na procesy prowadzone w piecach kadziowych, na podgrzewanie ciekłego metalu w kadziach pośrednich, a także na procesy paliwowe, w których plazmotrony zaczęły pełnić funkcje dodatkowych źródeł ciepła. Urządzenia plazmowe znalazły także zastosowanie w odlewnictwie.

Atrakcyjność plazmowego wytapiania i przetapiania wynika z:

- wysokiej temperatury plazmy i łatwości jej regulacji;
- wysokiej czystości plazmy;
- dużej koncentracji mocy w plazmie;
- dużej prędkości strumienia plazmy i wynikającego stąd intensywnego przekazywania energii do wsadu;
- możliwości stosowania w piecu dowolnej atmosfery (neutralnej, redukującej, utleniającej, próżni technicznej);
- możliwości stosowania atmosfery azotowej lub mieszaniny azotu z innymi gazami, a tym samym uzyskiwania stali azotowanej;
- eliminacji nawęglania metalu.

Jedną z istotnych zalet metalurgicznych pieców plazmowych polega na możliwości odzysku ze złomu wielu dodatków stopowych, w szczególności takich jak Ti, Mn, Ta, Nb, W, Mo, Ni, Cr [254]. Innym charakterystycznym elementem znamionującym piec plazmowy jest praca przy znacznie mniejszym natężeniu hałasu w porównaniu z urządzeniami wykorzystującymi swobodne wyładowanie łukowe. Jest to szczególnie wyraźne przy stosowaniu plazmotronów prądu stałego. Praca 4 plazmotronów o łącznej mocy po stronie zasilania $30 \text{ MV} \cdot \text{A}$ w fazie roztopiania stali w piecu z kadzią ceramiczną jest źródłem hałasu o natężeniu 86 dB, a więc istotnie niższym niż w piecach łukowych. Koszty eksploatacyjne tych urządzeń oraz łukowych, przy realizacji porównywalnych procesów, są praktycznie takie same. Przelotność urządzeń w procesach wytapiania stali ze złomu zawiera się w przedziale $20 + 30 \text{ Mg/h}$, zaś przeciętne zużycie właściwe energii jest równe $500 \text{ kW} \cdot \text{h/Mg}$.

Urządzenia z piecami plazmowymi są stosowane do:

- wytapiania i przetapiania stali specjalnych, zwłaszcza żaroodpornych, specjalnych i konstrukcyjnych;

- wytwarzania żelazostopów, a w szczególności: żelazochromu i żelazomagnezu z rud niskogatunkowych;
- wytopiania żeliwa i staliwa w układach nagrzewania skojarzonego (indukcyjno-plazmowych) [562], [577];
- wytwarzania metali nieżelaznych z czwartej i piątej grupy pierwiastków układu okresowego;
- odzysku cennych surowców z odpadów poprodukcyjnych (platyna, złoto, srebro, metale ziem rzadkich, stale specjalne);
- wytopiania wysokotopliwych stopów na bazie niklu i kobaltu;
- wytwarzania tlenków, borków i azotków [360], [539].

Piece plazmowe (rys. 9.24) jako człony główne plazmowych agregatów metalurgicznych do ww. procesów metalurgicznych są budowane w trzech wersjach: z kadzią ceramiczną, z krystalizatorem oraz z tygłem metalowym chłodzonym wodą [360], [628].

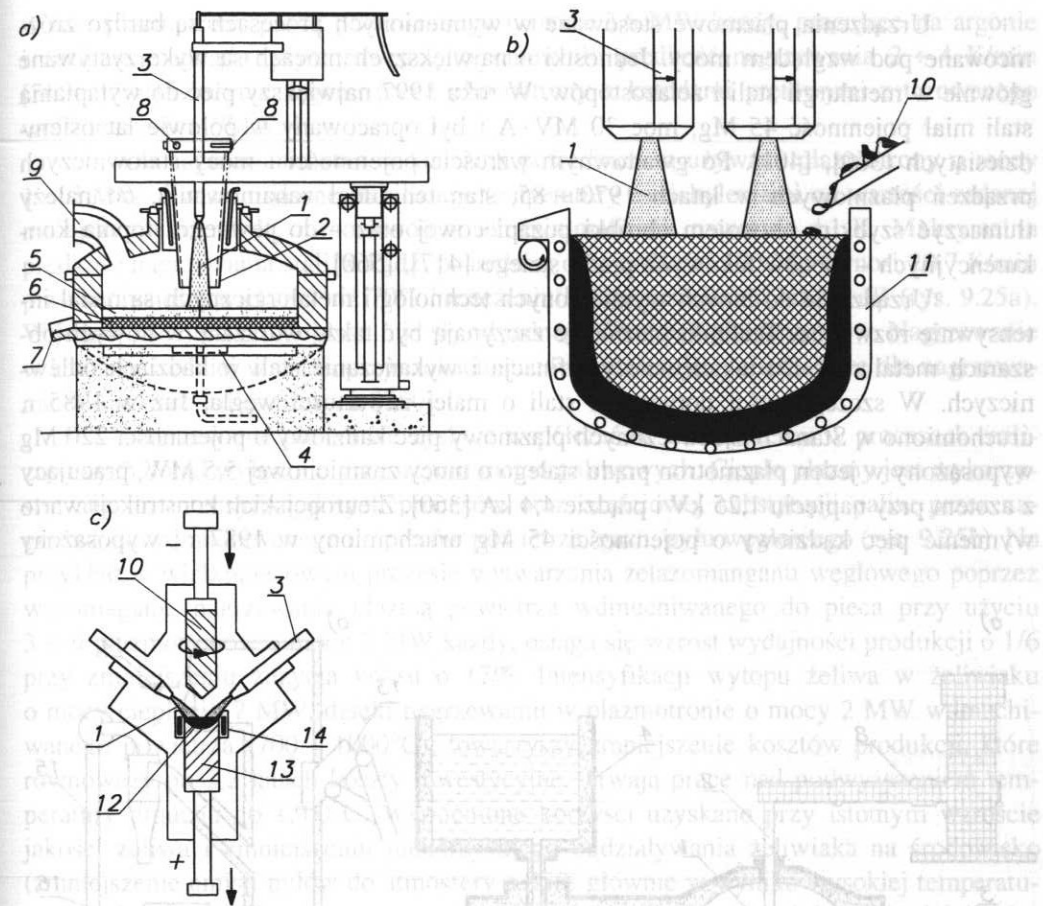
Rysunek 9.24a przedstawia piec plazmowy z plazmotronem prądu stałego umieszczonym koncentrycznie w tulei, która chłodzona wodą ogranicza promieniowanie strumienia plazmy o długości 0,6 m na ściany ceramiczne, a jednocześnie ogranicza obszar, w którym przebiegają reakcje metalurgiczne. W urządzeniu tym (zbudowanym przez Davy'ego McKee i pierwotnie przeznaczonym do wytwarzania żelazomanganu, po wstępnej obróbce cieplnej wsadu w innym urządzeniu i także przy udziale plazmy, połączonej z jego kalcynacją i preredukcją, wytwarzać można żelazostopy różnego rodzaju. Na przykład przy mocy urządzenia 11 MV·A, po wstępnym przygotowaniu wsadu, roczna jego wydajność sięga 10^5 Mg żelazochromu. Piece z kadzią ceramiczną mogą pracować zarówno ze wsadem stałym, jak i ciekłym. Jeden z takich pieców, przeznaczony do produkcji żelazochromu, o mocy znamionowej 40 MV·A (32 MW) jest jak dotąd w ogóle największym piecem plazmowym jaki kiedykolwiek został oddany do użytku¹⁾.

Piec z tygłem chłodzonym wodą wg rys. 9.24b jest stosowany w metalurgii tytanu. Jego plazmotrony w trakcie eksploatacji wprawiane są w ruch, dzięki czemu uzyskuje się korzystniejszy rozkład mocy grzejnej.

Piece z krystalizatorami wykonywane są zarówno w wersjach jedno-, jak i multiplazmotronowych. Eksploatowane są m.in. w procesach wymagających atmosfer specjalnych oraz próżni. Stosuje się je do rafinacyjnego przetapiania metali na wlewki, których masy osiągają 5 Mg przy prędkościach wyciągania 15 mm/min [550].

Oczywiście w użyciu są jeszcze inne konstrukcje z uwagi na kojarzenie nagrzewania plazmowego z indukcyjnym oraz elektronowym. Piece plazmowe wyposaża się w plazmotrony prądu stałego lub przemiennego, przy czym ich liczba może być różna, od jednego do 12 [539]. Wykorzystywane są zarówno plazmotrony z łukiem bezpośrednim, jak i pośrednim, przy czym te pierwsze są rozwiązaniami dominującymi.

¹⁾ Kadź tego pieca ma średnicę 9 m i wysokość 3,2 m. Piec jest wyposażony tylko w jeden plazmotron prądu stałego z łukiem bezpośrednim (dno przewodzące) o prądzie znamionowym 60 kA [513].



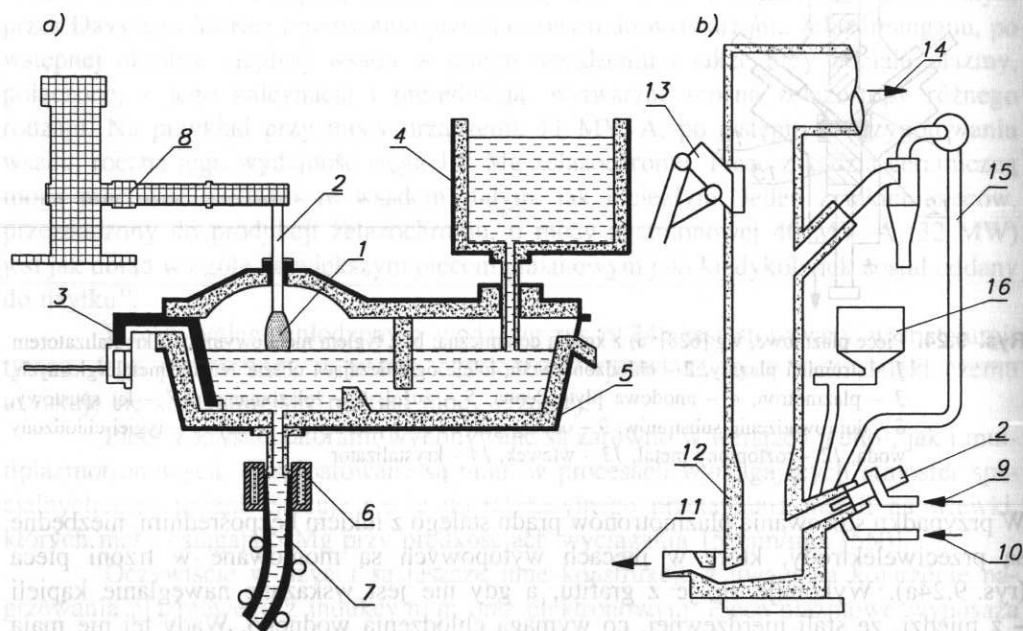
Rys. 9.24. Piece plazmowe, wg [628]: a) z kadzią ceramiczną; b) z tygłem metalowym; c) z krystalizatorem
 1 – strumień plazmy, 2 – chłodzona wodą tuleja ograniczająca obszar reakcji metalurgicznych, 3 – plazmotron, 4 – anodowa płyta denna, 5 – żużel, 6 – żelazomangan, 7 – lej spustowy, 8 – doprowadzenie substratów, 9 – odciąg gazów, 10 – przetapiany wsad, 11 – tygiel chłodzony wodą, 12 – roztopiony metal, 13 – wlewek, 14 – krystalizator

W przypadku stosowania plazmotronów prądu stałego z łukiem bezpośrednim, niezbędne są przeciwelektrody, które w piecach wytopowych są montowane w trzoni pieca (rys. 9.24a). Wykonuje się je z grafitu, a gdy nie jest wskazane nawęglanie kąpieli – z miedzi, ze stali nierdzewnej, co wymaga chłodzenia wodnego. Wady tej nie mają piece prądu przemiennego, które podobnie jak piece łukowe typu Heroult'e'a nie wymagają elektrod dennych. Z uwagi na gorszą stabilność łuku prądu przemiennego istnieje jednak konieczność użycia dodatkowych środków, zwykle z użyciem plazmy stałoprądowej [539].

Plazmotrony w piecach umieszczane są pionowo, pod pewnym kątem w stosunku do osi pionowej (rys. 9.24c), a nawet poziomo (piec typu bębnowego).

Urządzenia plazmowe stosowane w wymienionych procesach są bardzo zróżnicowane pod względem mocy. Jednostki o największych mocach są wykorzystywane głównie w metalurgii stali i żelazostopów. W roku 1997 największy piec do wytapiania stali miał pojemność 45 Mg, moc 30 MV·A i był opracowany w połowie lat osiemdziesiątych [360], [401]. Po gwałtownym wzroście pojemności i mocy stalowniczych urządzeń plazmowych w latach 1970 ÷ 85, stan ten uległ zahamowaniu, co należy tłumaczyć szybkim rozwojem obróbki pozapiecowej oraz – do pewnego stopnia konkurencyjnych – pieców łukowych prądu stałego [417], [560].

Urządzenia do innych wymienionych technologii metalurgicznych są nadal intensywnie rozwijane. Techniki plazmowe zaczynają być także wdrażane w nowych obszarach metalurgii. Do takich należy rafinacja i wykańczanie stali w kadziach odlewniczych. W szczególności dotyczy to stali o małej zawartości węgla. Już w 1985 r. uruchomiono w Stanach Zjednoczonych plazmowy piec kadziowy o pojemności 220 Mg wyposażony w jeden plazmotron prądu stałego o mocy znamionowej 5,5 MW, pracujący z azotem przy napięciu 1,25 kV i prądzie 4,4 kA [360]. Z europejskich konstrukcji warto wymienić piec kadziowy o pojemności 45 Mg uruchomiony w 1987 r., wyposażony



Rys. 9.25. Nagrzewanie plazmowe: a) stali w kadzi pośredniej w procesie ciągłego odlewania stali, wg [504]; b) powietrza wdmuchiwanego do żeliwiaka, wg [360]
 1 – strumień plazmy, 2 – plazmotron prądu stałego z łukiem bezpośrednim, 3 – anoda, 4 – kadź, 5 – kadź pośrednia, 6 – krystalizator, 7 – odlewane pasmo stali, 8 – manipulator plazmotronu, 9 – dmuch powietrza, 10 – gaz plazmogenny (powietrze), 11 – rynna spustu żeliwa, 12 – wykładzina ogniotrwała, 13 – ładowarka wsadu, 14 – odprowadzanie gazów do płuczki wodnej, 15 – pętla recykacji gazów, 16 – dozownik wiórów

w trzy plazmotrony prądu przemiennego o mocy 3,6 MW każdy, pracujące na argonie i zasilane z układu tyrystorowego, co zapewniło prędkość nagrzewania $2 \div 4$ K/min [360], [504]. Zużycie argonu przez plazmotrony z katodami prętowymi z torowanego wolframu – $6 \text{ m}^3/\text{MW} \cdot \text{h}$.

Do nagrzewania stali w kadziach pośrednich są używane plazmotrony o mocy $1 \div 3$ MW. Gwarantują one stabilizację temperatury z odchyleniami od wartości zadanej mniejszymi niż ± 5 K, z możliwością ich minimalizacji nawet do ± 1 K. Maksymalna prędkość nagrzewania stali w kadzi pośredniej o pojemności 100 Mg wynosi 20,7 K/min przy sprawności większej niż 70% i natężeniu hałasu mniejszym niż 80 dB (rys. 9.25a). W jednej kadzi pośredniej instaluje się od jednego do trzech plazmotronów. Nagrzewanie w kadzi pośredniej w wielu przypadkach stanowi interesującą alternatywę dla nagrzewania w kadziach odlewniczych [360].

Nagrzewanie plazmowe zyskuje współcześnie na znaczeniu w procesach realizowanych dotąd wyłącznie przy użyciu metod paliwowych. Ciepło plazmy jest wykorzystywane do intensyfikacji tych procesów oraz częściowej substytucji paliw przez nagrzewanie wdmuchiwanego do pieców powietrza, gazu, pyłu węglowego (rys. 9.25b). Na przykład w wielopieczowym procesie wytwarzania żelazomanganu węglowego poprzez wspomaganie nagrzewania plazmą powietrza wdmuchiwanego do pieca przy użyciu $3 \div 9$ plazmotronów o mocy 2 MW każdy, osiąga się wzrost wydajności produkcji o 1/6 przy zmniejszeniu zużycia koksu o 17%. Intensyfikacji wytopu żeliwa w żeliwiaku o mocy cieplnej 17 MW, dzięki nagrzewaniu w plazmotronie o mocy 2 MW wdmuchiwanego powietrza ($700 \div 1000^\circ\text{C}$), towarzyszy zmniejszenie kosztów produkcji, które równoważy po 2,2 latach koszty inwestycyjne. Trwają prace nad podwyższeniem temperatury dmuchu do 1300°C . Wymienione korzyści uzyskano przy istotnym wzroście jakości żeliwa i zmniejszeniu niekorzystnego oddziaływania żeliwiaka na środowisko (zmniejszenie emisji pyłów do atmosfery o 35% głównie w wyniku wysokiej temperatury dmuchu) [360]. Plazmotrony są też wykorzystywane w procesach bezpośredniej redukcji rud żelaza [520].

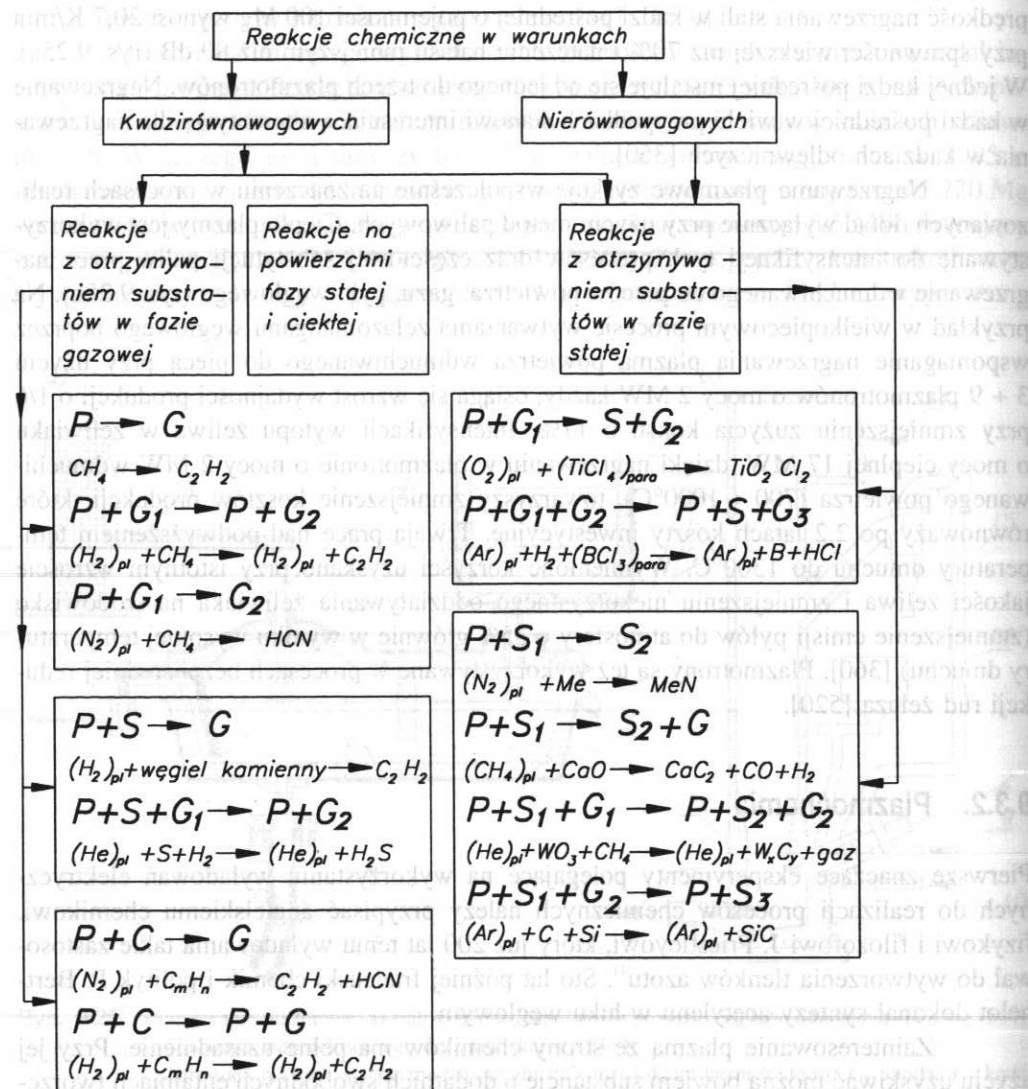
9.3.2. Plazmochemia

Pierwsze znaczące eksperymenty polegające na wykorzystaniu wyładowań elektrycznych do realizacji procesów chemicznych należy przypisać angielskiemu chemikowi, fizykowi i filozofowi J. Priestleyowi, który już 200 lat temu wyładowania takie zastosował do wytworzenia tlenków azotu¹⁾. Sto lat później francuski chemik i polityk P. Berthelot dokonał syntezy acetyleny w łuku węglowym.

Zainteresowanie plazmą ze strony chemików ma pełne uzasadnienie. Przy jej użyciu uzyskiwać można bowiem substancje o dodatnich swobodnych entalpiach tworzenia, prowadzić przemiany fazowe bardzo trudno topliwych związków przy nadzwyczaj

¹⁾ Przy syntezie tlenku azotu korzystał też z wyładowań elektrycznych H. Cavendish (rok 1785) [389].

szybkim przebiegu tych procesów. Ostatnie 35-lecie to nieprzerwany rozwój tego działu wiedzy i techniki, który przekształcił się w wyodrębnioną dziedzinę zwaną plazmochemią. Mimo, że od wielu lat działają już rozmaite instalacje plazmochemiczne w skali wielkoprzemysłowej, jak np. zespół 16 generatorów plazmy o łącznej mocy 160 MW w jednym zakładzie z roczną produkcją 160 000 Mg C_2H_2 (acetylen) i C_2H_4 (etylen) oraz $400 \cdot 10^6$ m³ wodoru, to nadal należy traktować technologie plazmochemiczne jako roz-



Rys. 9.26. Klasyfikacja reakcji plazmochemicznych, wg [389]

P – gaz roboczy, G – substrat lub produkt w fazie gazowej, C – substrat w fazie ciekłej, S – substrat lub produkt w fazie stałej, pl – indeks oznaczający stan plazmowy

wojowe o istotnie wyższych potencjalnych możliwościach produkcyjnych w porównaniu ze stanem obecnym [585].

Charakteryzując reakcje chemiczne zachodzące w strumieniu plazmy, w pierwszym rzędzie trzeba zwrócić uwagę na bardzo szybki rozpad cząstek. Czasy przebywania mieszaniny w strefie reakcji mogą być skrócone nawet do 10^{-5} s, co przy znanych właściwościach temperaturowych tego środowiska oraz możliwości uzyskiwania ciśnień $10^{-1} + 10^9$ Pa pozwala na realizację różnych reakcji, zarówno w warunkach kwazirównowagowych, jak i nierównowagowych.

Z punktu widzenia procesowego plazma stanowi: źródło wysokich temperatur i bardzo wielkich gęstości mocy, jonów dodatnich i ujemnych jako potencjalnych prekursorów reakcji jonowych i jonowo-cząsteczkowych, promieniowania luminescencyjnego dla prowadzenia reakcji fotochemicznych. Plazma stwarza możliwość efektywnego prowadzenia reakcji, w których: stężenia równowagowe są przesunięte w kierunku wysokich temperatur, szybkość reakcji rośnie z temperaturą, duże wydajności są osiągane w warunkach nierównowagowego prowadzenia procesów, surowce są tanie i łatwo dostępne oraz trudne do przetworzenia innymi metodami. Urządzenia plazmochemiczne charakteryzują się bardzo zwartą budową, dużymi wydajnościami i łatwością automatyzacji [389].

Klasyfikacja reakcji chemicznych prowadzonych w plazmie oraz przykłady konkretnych procesów są przedstawione na rys. 9.26. Reakcje te są realizowane w trzech układach charakteryzujących się tym, że:

- w obszarze wyładowania elektrycznego wytwarzane są rodniki, które wchodzą w reakcje z substratem po opuszczeniu tego obszaru;
- reakcje przebiegają w obszarze wyładowania;
- reakcje przebiegają poza obszarem wyładowania w strumieniu plazmy, do którego wprowadza się substrat.

Ostatni z wymienionych układów ma największe znaczenie w procesach realizowanych w skali przemysłowej.

Reakcje chemiczne prowadzone w warunkach kwazirównowagowych¹⁾ są prowadzone najczęściej przy zastosowaniu plazmotronów łukowych i przy ciśnieniach bliskich atmosferycznemu. Rezultatem reakcji może być produkt przejściowy lub też końcowy w całym łańcuchu zachodzących przemian chemicznych. W obu przypadkach uzyskanie wysokiej wydajności procesu wymaga gwałtownego schłodzenia (zamrożenia) mieszaniny reakcyjnej z szybkością rzędu $10^4 + 10^8$ K/s (przynajmniej w początkowej

¹⁾ To znaczy w warunkach tzw. lokalnej równowagi termodynamicznej wyróżniającej się tym, że w poszczególnych elementach plazmy zmiana temperatury, prężności cząstekowych, molowych potencjałów chemicznych jest na odległości średniej drogi swobodnej cząsteczki mała w porównaniu z wartościami bezwzględnie tych wielkości w czasie dłuższym od najdłuższego czasu relaksacji dla każdego z jej składników. Inaczej mówiąc jest to stan, w którym szybkość reakcji chemicznej jest mała w porównaniu z szybkością wymiany energii pomiędzy poszczególnymi elementami plazmy i bieg reakcji nie narusza stanu lokalnej równowagi termodynamicznej [389].

fazie procesu). W pierwszym przypadku reakcja chemiczna powinna zostać zahamowana nie tylko z dostateczną dla zachowania produktu przejściowego szybkością, lecz także w chwili gdy osiągnięte jest największe jego stężenie. W przypadku wytwarzania produktu końcowego szybkość zamrażania musi eliminować niebezpieczeństwo rozpadu produktu w przedziale temperatur ograniczonym początkową temperaturą zamrażania i temperaturą końcową, w której produkt reakcji zachowuje już trwałość. Na przykład w procesie wytwarzania acetyleny opóźnienie chwili rozpoczęcia zamrażania o 0,002 s powoduje spadek stężenia tego gazu z 15,5 do 10% objętości. [389].

Reakcje chemiczne w warunkach nierównowagowych¹⁾ realizowane są w plazmie niskociśnieniowej wytwarzanej przy użyciu plazmotronów łukowych, indukcyjnych, pojemnościowych i mikrofalowych oraz przy ciśnieniu atmosferycznym w plazmotronach mikrofalowych. W tym pierwszym przypadku stopień jonizacji zawiera się w przedziale $10^{-4} + 10^{-1}$, przy którym energia elektronów przewyższa energię kinetyczną ciężkich cząstek co najmniej o rząd wielkości. Dlatego też przede wszystkim swobodne elektrony są odpowiedzialne za inicjowanie reakcji chemicznych. Podstawowe znaczenie mają w tym przypadku zderzenia niesprężyste z elektronami. W ich wyniku następuje wzbudzenie cząsteczki, powstają jony lub ma miejsce ich dysocjacja na fragmenty zjonizowane i obojętne (atomy, rodniki). Powstające aktywne chemicznie cząsteczki mogą reagować między sobą (procesy rekombinacji) lub z cząsteczkami substratu. Reakcje te zachodzą zarówno w strefie wyładowania, jak również w jego otoczeniu, a nawet na ściankach naczyń reakcyjnego [389].

W reakcjach z udziałem substratów w postaci stałej (proszków) istotnego znaczenia nabiera wymiana ciepła między plazmą a drobinami substratu. O ile efektywność procesu ma być duża, to substrat powinien zostać odparowany, a więc ziarna powinny mieć jak najmniejsze wymiary. O znaczeniu wymiarów ziaren może świadczyć następujące porównanie: w plazmie argonowej o temperaturze 5000 K czas odparowania ziaren wolframowych o średnicy 5 μm równy jest 0,05 ms, ziarna o średnicy 20 razy większej odparowują w czasie 100 000 razy dłuższym [389]. Reakcje z substratami proszkowymi są realizowane przy wykorzystaniu plazmotronów łukowych, indukcyjnych, pojemnościowych i mikrofalowych. Jak już wspomniano, w plazmotronach bezelektrodowych czas przebywania cząstek w plazmie jest stosunkowo długi, co sprawia, że są one szczególnie przydatne do pracy z proszkami.

Przedstawione procesy prowadzone są w urządzeniach zwanych chemicznymi reaktorami plazmowymi. Najbardziej rozpowszechniony reaktor, zwany strumieniowym, składa się z trzech części: z jednego lub kilku plazmotronów, komory reakcyjnej i układu zamrażania. Gaz roboczy bywa wyłącznie nośnikiem energii, bywa także jednym z substratów reakcji, które mogą także występować w postaci pary, cieczy i proszków. W komorze reakcyjnej ma miejsce szybkie wymieszanie strumienia gazu roboczego ze strumieniem substratu i następuje reakcja. Szybkie i dobre wymieszanie gazu roboczego

i surowca zapobiega lokalnym jego przegrzaniom. Mają na to wpływ kierunek podawania substratu, liczba i przekrój otworów, przez które jest on wprowadzany. Jeśli substrat wprowadza się do komory reakcyjnej, to odbywa się to najczęściej z zawirowaniem, ale także zgodnie lub przeciwnie do kierunku przepływu strumienia gazu roboczego. Wymiary komory reakcyjnej są dobierane w taki sposób, by w warunkach dobrego wymieszania zapewnić optymalny czas przebywania mieszaniny w komorze, co jest warunkiem osiągnięcia maksymalnego stężenia produktu. Komory reakcyjne są wykonywane w kształcie cylindrycznym lub stożkowym. Czas przebywania mieszaniny reakcyjnej w reaktorze jest regulowany odległością między dyszą plazmotronu a miejscem wprowadzania substratu.

Do reaktorów, w których substrat wprowadza się bezpośrednio do obszaru wyładowania elektrycznego, należą m.in. reaktory służące do otrzymywania acetyleny z metanu oraz z węgla, a także zasilane plazmotronami bezelektrodowymi.

Po wlocie mieszaniny do komory zamrażania następuje jej zamrożenie. Proces ten prowadzi się metodami przeponowymi lub bezprzeponowymi. Do pierwszych należy chłodzenie w wymiennikach ciepła, do drugich – chłodzenie przez natrysk zimną cieczą lub mieszanie z zimnym gazem, chłodzenie w złożu fluidalnym oraz w wyniku rozprężania adiabatycznego [389].

Procesy plazmochemiczne dzieli się często na homofazowe i heterofazowe. W pierwszych zarówno substraty, jak i produkty są w stanie gazowym. W procesach heterofazowych reagenty są wprowadzane w fazie stałej. Podział na te dwie kategorie procesów ma jednak charakter formalny, ponieważ większość reakcji w plazmie zachodzi w warunkach postępującej zmiany faz.

Do mających istotne znaczenie przemysłowe procesów homofazowych zalicza się:

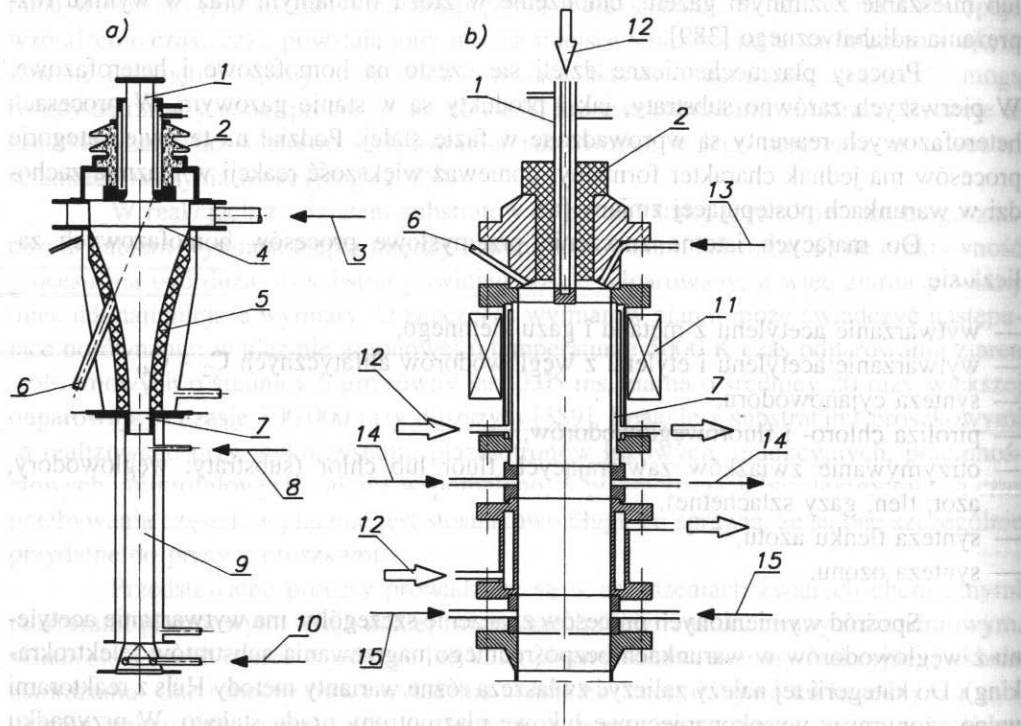
- wytwarzanie acetyleny z metanu i gazu ziemnego,
- wytwarzanie acetyleny i etylenu z węglowodorów alifatycznych $C_2 - C_4$,
- synteza cyjanowodoru,
- piroliza chloro- i fluorowęglowodorów,
- otrzymywanie związków zawierających fluor lub chlor (substraty: węglowodory, azot, tlen, gazy szlachetne),
- synteza tlenku azotu,
- synteza ozonu.

Spośród wymienionych procesów znaczenie szczególne ma wytwarzanie acetyleny z węglowodorów w warunkach bezpośredniego nagrzewania substratów (elektrokra-king). Do kategorii tej należy zaliczyć zwłaszcza różne warianty metody Hüls z reaktorami wyposażonymi w wysokonapięciowe łukowe plazmotrony prądu stałego. W przypadku rozkładu metanu głównym produktem reakcji jest acetylen, a w przypadku pozostałych węglowodorów acetylen i etylen. Istotne zwiększenie wydajności metody uzyskano poprzez zamrażanie dwustopniowe, polegające na wprowadzeniu do mieszaniny poreakcyjnej wyższych węglowodorów, które umożliwiają wytworzenie dodatkowych ilości acetyleny i wodoru oraz znacznych ilości etylenu, jak to podano na początku niniejszego punktu.

¹⁾ To znaczy, gdy ich bieg zakłóca stan lokalnej równowagi termodynamicznej lub, gdy są prowadzone w plazmie nierównowagowej [389].

W reaktorach tych są stosowane plazmotrony z elektrodami cylindrycznymi o średnicy wewnętrznej 10 ± 15 cm i łącznej długości około 3 m. Katoda ma ujemny potencjał 6 ± 9 kV i jest odseparowana izolatorem wysokonapięciowym od anody, mającej – jak inne elementy reaktora – potencjał ziemi. Prąd łuku ma wartość ok. 1,2 kA, co zapewnia moc 8 ± 10 MW. Długość łuku w zależności od rodzaju gazu, ciśnienia oraz prądu zmienia się w granicach $0,5 \pm 2$ m. Plamka katodowa ma średnicę ok. 6 mm, co odpowiada gęstości prądu ok. 120 A/mm. W czystej atmosferze węglowodorowej trwałość katody zawiera się w przedziale 800 ± 1000 h, anody zaś 100 ± 200 h. Straty mocy na katodzie wynoszą 3%, na anodzie 10%, co oznacza, że 87% mocy zużywane jest na nagrzewanie gazu ($2,5 \text{ kW} \cdot \text{h/kg C}_2\text{H}_2$) i proces chemiczny ($4,0 \text{ kW} \cdot \text{h}$). Acetylen powstaje w obszarze o temperaturze $3000 \pm 2000^\circ\text{C}$, zaś w strefie o $2000 \pm 1000^\circ\text{C}$ tworzy się etylen [585].

Jedną z ostatnich modernizacji metody Hüls polega na zmianie gazu roboczego z metanu na wodór. W konsekwencji doprowadzając moc plazmotronu do 8,5 MW,



Rys. 9.27. Reaktory plazmochemiczne do wytwarzania acetyleny: a) z substratów płynnych i stałych; b) z węgla
 1 – katoda, 2 – izolator wysokonapięciowy, 3 – doprowadzenie wodoru, 4 – komora wirowa, 5 – grafit, 6 – układ inicjacji wyładowania, 7 – anoda, 8 – doprowadzenie węglowodorów, 9 – komora reakcyjna, 10 – olejowy układ zamrażania, 11 – cewka, 12 – woda chłodząca, 13 – doprowadzenie wodoru i węgla, 14 – wstępne zamrażanie, 15 – zamrażanie

w wytwarzanym w nim strumieniu plazmy realizuje się reakcje chemiczne na bazie substratów ciekłych i stałych, jak: odpady podestylacyjne ropy, węgiel (rys. 9.27a). Inny eksperymentalny reaktor plazmowy przeznaczony do wytwarzania acetyleny z węgla jest przedstawiony na rys. 9.27b. Wytworzenie 1 Mg acetyleny w tym reaktorze wymaga 5 Mg węgla i $11,5 \text{ MW} \cdot \text{h}$ energii elektrycznej. Zużycie wodoru, który jest gazem roboczym $100 \pm 200 \text{ N} \cdot \text{m}^3/\text{h}$ przy przeróbce $60 \pm 200 \text{ kg/h}$ węgla. Dodatkowymi produktami procesu przebiegającego w przedziale ciśnień $2 \pm 120 \text{ kPa}$ są sadza i smoła ($3,2 \text{ Mg}$) oraz 550 kg CO . Moc plazmotronu $250 \pm 500 \text{ kW}$.

Do grupy wdrożonych do przemysłu procesów homofazowych należy także zaliczyć: syntezę tlenków azotu, ozonu oraz wytwarzanie cyjanowodoru. W zakresie syntez tlenków azotu wielkie zasługi ma Ignacy Mościcki. Interesujące badania w tym zakresie są prowadzone od dawna przez wielu innych badaczy polskich. Polegają one m.in. na wykorzystaniu do tego celu plazmy nierównowagowej [627], [659].

Do kategorii heterofazowych procesów plazmochemicznych prowadzonych w plazmie równowagowej, a głównie przy ciśnieniu atmosferycznym, zalicza się:

- procesy rozkładu związków nieorganicznych (np. Al_2O_3 , CuO , NiO , TiO_2 , ZrSiO_4) i organicznych (np. węgla, ropy naftowej, benzyny niskooktanowej);
- procesy syntezy, zwłaszcza węglików i azotków;
- procesy utleniania prowadzące do wytworzenia tlenków metali oraz niemetali;
- procesy redukcji tlenków, siarczków, chlorków, fluorków, rud i minerałów.

Wśród procesów heterofazowych prowadzonych w plazmie nierównowagowej pod obniżonym ciśnieniem warto także wymienić reakcje węgla i węglowodorów oraz rozkład chlorków i otrzymywanie cienkich warstw dla potrzeb elektroniki z zastosowaniem plazmy wielkiej częstotliwości [389].

Warto też wspomnieć, że wiele materiałów niezbędnych w przemyśle atomowym także przetwarza się przy użyciu plazmy, np. konwersja UF_6 do UF_4 oraz UO_2F_2 , a następnie do UO_2 [628].

9.3.3. Plazmowe natryskiwanie powłok

Wytwarzanie warstw powierzchniowych o właściwościach istotnie przewyższających materiał podstawowy należy do grupy tzw. technologii zaawansowanych. Wśród wielu metod uszlachetniania powierzchni techniki plazmowe odgrywają rolę szczególną, ponieważ umożliwiają kształtowanie właściwości warstw powierzchniowych o parametrach często nieosiągalnych innymi metodami. Chodzi tu m.in. o modyfikacje powierzchni elementów stosowanych w technice kosmicznej, lotniczej oraz wszędzie tam gdzie stawiane są najwyższe wymagania jeśli chodzi o wytrzymałość cieplną, odporność na ścieranie, na korozję – w tym także gazową, na utlenianie, wytrzymałość mechaniczną, właściwości elektroizolacyjne, termoizolacyjne, a nawet pewne właściwości optyczne.

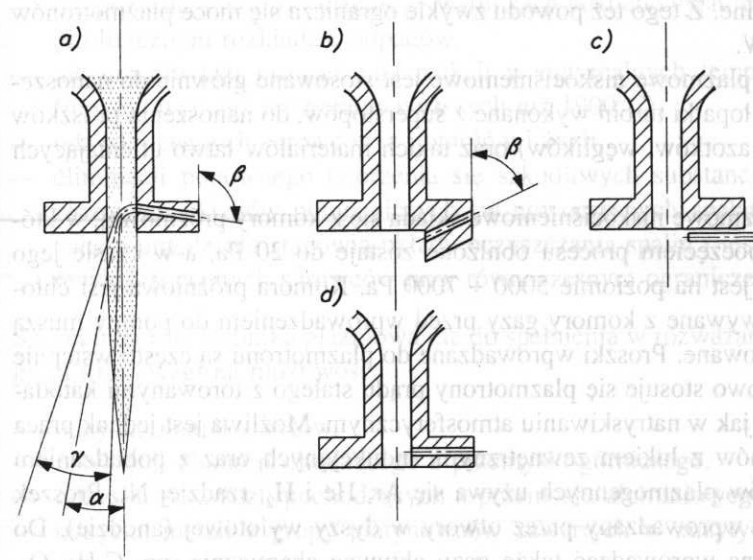
Plazmowo powłoki wytwarza się drogą natryskiwania bądź napawania [425]. W pierwszym przypadku wytwarzana warstwa związana zostaje z podłożem siłami kohezji, czyli Van der Waalsa, zaś materiał podłoża nie zostaje przetopiony. W drugim przypadku następuje ściślejsze zespolenie materiału nakładanego z podłożem, ponieważ wytwarzają się wiązki międzymetaliczne wskutek dokładnego stopienia napoiny z materiałem podłoża. Napawanie plazmowe zalicza się do technologii spawalniczych i dlatego dalsze informacje dotyczyć będą wyłącznie natryskiwania plazmowego.

Najczęściej wyodrębnia się natryskiwanie atmosferyczne i niskociśnieniowe. Technologia najbardziej rozpowszechnioną jest natryskiwanie atmosferyczne przy użyciu plazmotronów prądu stałego z łukiem wewnętrznym, inaczej nieprzenoszonym. W technologii tej jako gazu plazmogenego używa się czystego argonu, helu, wodoru, azotu oraz mieszanin tych gazów z doprowadzaniem zarówno osiowym, jak i wirowym. Z gazów dwuatomowych, a więc charakteryzujących się dużą entalpią, korzysta się przy natryskiwaniu materiałów o wysokiej temperaturze topnienia. Jeśli istnieje potrzeba obniżenia entalpii gazu plazmogenego, do gazu obojętnego dodaje się wodoru, lecz w ilości mniejszej od 10% obj., ponieważ duża przewodność cieplna właściwa tego gazu może spowodować nadmierne zużycie anody. Stosowanie gazów szlachetnych zapobiega także reakcjom chemicznym między natrykiwanym materiałem i otaczającą atmosferą. Z uwagi na wysoką temperaturę strumienia plazmy ($6000 \pm 15\,000\text{ K}$), jest ona wykorzystywana także do natryskiwania takich materiałów wysokotopliwych, których nie można nanosić żadną inną metodą cieplną.

Materiały do natrysku (powłokowe) są produkowane najczęściej w postaci proszku, ale także drutu, sznura proszkowego. Są to materiały jednorodne bądź kompozytowe. Coraz częściej używa się proszków termoreakcyjnych (tworzących stopy z materiałem podłoża) i bimetalicznych. Mogą to być różnego rodzaju proszki ceramiczne, metaliczne i międzymetaliczne, cermetale [580]. Nierzadko mają one złożony skład chemiczny i zróżnicowaną budowę ziaren. Na przykład tzw. proszki okludowane mogą mieć na rdzeniu jedną lub kilka warstw innych substancji osadzanych chemicznie lub próżniowo [581]. Istotne jest jednak, by natrykiwany materiał w trakcie procesu nanoszenia pozostawał w stanie ciekłym i dlatego nie mogą być natrykiwane substancje, które w temperaturze plazmy ulegają degradacji termicznej lub sublimacji, jak chociażby SiC , Si_3N_4 . Z tego też względu za jeden z podstawowych parametrów decydujących o przydatności materiałów proszkowych do natryskiwania uznaje się wartość różnicy ich temperatur wrzenia i topnienia [581].

Proszki wprowadza się do strumienia plazmy w trojaki sposób: osiowo przez wydrążoną katodę, przez otwory wydrążone w dyszy wylotowej (rys. 9.28), bezpośrednio do strumienia plazmy u wylotu dyszy. Pierwszy sposób pozwala na natryskiwanie przy małych mocach generowanych w plazmie, z uwagi na długi czas kontaktu proszku z plazmą (długość drogi jaką przebywa wprowadzany materiał we wnętrzu plazmotronu jest tego samego rzędu jak między wylotem z dyszy i natrykiwanym materiałem). Jego wadą jest natomiast zatykanie się plazmotronu. Podobne problemy mogą występować przy korzystaniu z drugiego sposobu. Sposób trzeci wymaga z kolei plazmotronów

o większej mocy, a często także proszku o bardzo małej granulacji (wg aktualnych poglądów wymiary ziaren powinny być mniejsze niż $40\ \mu\text{m}$). W sposobie drugim i trzecim kąt β , pod jakim proszki są wprowadzane do strumienia plazmy, zależy od temperatury topnienia proszku. W przypadku materiałów wysokotopliwych $\beta > 90^\circ$, dla materiałów niskotopliwych $\beta < 90^\circ$ (rys. 9.28). Proszek wprowadzany do strumienia plazmy znajduje się w obszarze stożka o kącie wierzchołkowym γ oraz o osi przesuniętej względem osi strugi plazmowej o kąt α . Kąt α powinien być jak najmniejszy.



Rys. 9.28. Doprowadzanie proszku do strumienia plazmy przez otwory w dyszy a), b), d) oraz przez przewód zlokalizowany u wylotu dyszy c)

Przyczepność oraz jednorodność natrykiwanych warstw wymaga nadawania cząsteczkom nanoszonego materiału dużych szybkości oraz właściwego ukształtowania przepływu magneto hydrodynamicznego strumienia plazmy [574]. Duże szybkości przepływu skracają oczywiście czas przebywania wsadu proszkowego w strumieniu, co wymaga zwiększenia mocy plazmotronów nawet do 80 kW, dzięki czemu uzyskuje się całkowite stopienie materiału natrykiwanego. Prędkości wsadu proszkowego w strumieniu plazmy osiągają obecnie wartości $100 \pm 500\text{ m/s}$ (przy istotnie wyższych prędkościach gazu plazmogenego) [581], [679].

Urządzenia o większej mocy są oczywiście w użyciu. Do takich należą w pierwszym rzędzie stosowane do natrykiwania elementów wielkopowierzchniowych tzw. plazmotrony ze stabilizacją wodną o mocach dochodzących do 200 kW, co pozwala na natrykiwanie np. do $50\text{ kg/h Al}_2\text{O}_3$ [679].

Plazmotron jest oczywiście członem głównym plazmowego urządzenia natryskowego, które jest zespołem technicznie złożonym. Trzeba tu w pierwszym rzędzie

wskazać na konsekwencje jednokierunkowości strumienia natryskiwanego materiału, który tylko w wyjątkowych przypadkach nakładany jest na powierzchnie płaskie. W celu zapewnienia jednorodności parametrów warstw nanoszonych na powierzchnie o innej geometrii, trzeba stosować specjalne układy sterujące nie tylko strumieniem plazmy, lecz także ustawiające wsad w stosunku do tego strumienia. W tym celu są stosowane układy sterowania komputerowego z robotami jako elementami wykonawczymi ustawiającymi wsad według zoptymalizowanych trajektorii. Z uwagi na natężenie hałasu przy atmosferycznym natryskiwaniu plazmowym (częściowo dochodzi ono do 120 dB), stosowane są kabiny dźwiękoszczelne. Z tego też powodu zwykle ogranicza się moce plazmotronów natryskowych do 40 kW.

Natryskiwanie plazmowe niskociśnieniowe jest stosowane głównie do nanoszenia stopów MCrAlY na łopatki turbin wykonane z superstopów, do nanoszenia proszków podatnych na zgar (np. azotków, węglików) oraz takich materiałów łatwo utleniających się jak tytan i tantal.

Urządzenie plazmowe niskociśnieniowe składa się z komory próżniowej, w której ciśnienie przed rozpoczęciem procesu obniżone zostaje do 20 Pa, a w czasie jego realizacji utrzymywane jest na poziomie 5000 + 7000 Pa. Komora próżniowa jest chłodzona wodą. Odpompowywane z komory gazy przed wprowadzeniem do pompy muszą być schłodzone i odfiltrowane. Proszki wprowadzane do plazmotronu są często wstępnie podgrzewane. Standardowo stosuje się plazmotrony prądu stałego z torowanymi katodami prętowymi, czyli tak jak w natryskiwaniu atmosferycznym. Możliwa jest jednak praca przy użyciu plazmotronów z łukiem zewnętrznym, indukcyjnych oraz z pobudzaniem impulsowym. Jako gazów plazmogennych używa się Ar, He i H₂, rzadziej N₂. Proszek praktycznie zawsze jest wprowadzany przez otwory w dyszy wylotowej (anodzie). Do strumienia plazmy można wprowadzać także gazy aktywne chemicznie, np. C₂H₄, O₂, a w samej komorze utrzymywać atmosferę o składzie kontrolowanym [574].

Ze względu na wartości ciśnień w komorze, istotnemu wydłużeniu ulega strumień wypływającej plazmy, który osiąga 40 + 50 cm, czyli jest o rząd wielkości większy od charakterystycznego dla natryskiwania atmosferycznego, lecz przy takich samych szybkościach nadawanych proszkom. Prowadzi to do istotnego powiększenia jednocześnie natryskiwanej powierzchni, jak również do zmniejszenia wpływu niewielkich zmian odległości powierzchni natryskiwanej od plazmotronu na jakość wytwarzanej warstwy. Wadami tej metody są duże straty proszku i mniejsza gęstość mocy na powierzchni natryskiwanej. Z tego też względu buduje się te urządzenia na moce do 120 kW [679].

9.3.4. Techniki plazmowe w ochronie środowiska

Mimo, że prace związane z wykorzystaniem plazmy w zakresie ochrony środowiska są prowadzone od niedawna, to uzyskano już wiele rozwiązań mających cechy dojrzałych technologii przemysłowych. Można tu mówić o dwóch kategoriach technik plazmowych służących aktywnej ochronie środowiska, a mianowicie dotyczących destrukcji oraz uty-

lizacji najtrudniej obrabialnych odpadów przemysłowych i komunalnych, a także recyk-lacji. Do najtrudniej obrabialnych należą pozostałości z obróbki odpadów technikami klasycznymi, niektóre bojowe środki chemiczne, odpady radioaktywne, chemiczne, medyczne, azbest, odpady zawierające metale ciężkie, szlasy techniczne, popioły pofilt-racyjne, żużle, złom elektroniczny i lampowy, ogniwa i wiele innych.

Klasyczne technologie polegające na spalaniu odpadów z trudem, a często w ogóle nie spełniają pewnych wymagań, a zwłaszcza:

- nie pozwalają na prowadzenie w warunkach beztlenowych reakcji chemicznych przy pirolitycznym rozkładzie odpadów,
- nie umożliwiają prowadzenia reakcji w optymalnych temperaturach (np. obróbka freonów wymaga temperatur wyższych niż 1900°C),
- odzysku cennych surowców z popiołów i żużli,
- eliminacji ponownego tworzenia się szkodliwych substancji bez uciekania się do złożonych układów pomocniczych (w nowoczesnych spalarniach aż 55% kosztów całego urządzenia stanowią układy oczyszczania spalin i instalacje wodne),
- recykacji cennych surowców przy równoczesnym ograniczeniu emisji CO₂.

Szczególną rolę technika plazmowa ma do spełnienia w rozważanym zakresie w metalur-gii, a to z uwagi na możliwość:

- odzysku metali z pyłów,
- recykacji złomu pochodzącego z przemysłu górniczego,
- odzysku Al z żużli pochodzących z przemysłu aluminiowego,
- odzysku metali z grupy platynowców zawartych w zużytych katalizatorach samo-chodowych.

Technologie plazmowe są uważane obecnie za konkurencyjne w stosunku do klasycznych. Zwraca się także uwagę na konieczność uwzględniania przy analizie ich opłacalności ekonomicznej szeregu cech szczególnych [622]. Wskazuje się na to, że stosowanie technik plazmowych pozwala na wyjątkowo wysokie ograniczenie objętości odpadów oraz ich całkowitą lub daleko posuniętą neutralizację. Skuteczność tych technik pozostaje taka sama bez względu na stopień zróżnicowania składu odpadów, a wiadomo, że masowe odpady mają zwykle skład trudny nawet do określenia. Przeróbka odpadów metodami klasycznymi w najlepszym przypadku prowadzi do odzysku części ciepła powstającego w wyniku spalania. Wysokotemperaturowa piroliza plazmowa umożliwia natomiast efektywny odzysk substancji powstających w procesie obróbki odpadów i dla-tego zmierza się do rozszerzenia jej stosowania w:

- krakingu termicznym łańcuchów molekuł szkodliwych substancji organicznych, np. olejów izolacyjnych zawierających chlor, środków chłodniczych;
- witrifikacji (zeszklenia) substancji toksycznych (pyłów pofiltracyjnych, komponentów chemicznych środków bojowych, odpadów z przemysłu chemicznego) po ich stopieniu w wysokiej temperaturze.

W tablicy 9.2 zestawiono kilka grup bardzo kłopotliwych odpadów, których efektywną recykłację umożliwia piroliza plazmowa.

Tablica 9.2. Niektóre trudno obrabialne odpady recyklowane plazmowo, wg [534]

Kategoria odpadów	Konsystencja odpadów	Typ reaktora plazmowego	Odzyskiwane surowce
Chlorowęglowodory	ciekła – rozpylenie w reaktorze	reaktor rurowy plazma – para wodna	gaz pirolityczny H ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O skład regulowany
Odpady powstające podczas rozdrabniania złomu samochodowego ¹⁾ . Złom elektroniczny	mieszanina metali i tworzyw sztucznych z wysokim udziałem poliuretanu, plastycznie formowalnych	reaktor tyglowy gaz roboczy: mieszanka argonowo-wodorowa	gaz pirolityczny: H ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O właściwe prowadzenie procesu eliminuje niebezpieczeństwo powstania cyjanowodoru
Skażone materiały drewniane	drewno w kawałkach nasyczone środkami ochronnymi oraz klejami	reaktor typu tyglowego o konstrukcji specjalnej dostosowanej do pirolizy wsadu w postaci dużych kawałków	gaz syntezowy: CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O, aktywne sadze o regulowanym składzie i jakości
Ceramika konstrukcyjna, materiały wiążące	w postaci drobnych odłamków ceramicznych lub wzmocnionych włóknami węglowymi	reaktor tyglowy warunki procesu nie zostały dotychczas określone	

¹⁾ Z jednego samochodu powstaje średnio 300 kg tych trudnych do recykłacji odpadów.

Dostępne rozwiązania układowe w zakresie urządzeń plazmowych do obróbki odpadów przemysłowych i komunalnych zawiera tabl. 9.3. Zakres mocy tych urządzeń zawiera się w przedziale od 150 kW do 25 MW [387], [470], [487], [522], [523], [534], [622]. Warto przy tym zwrócić uwagę, że przy użyciu plazmy można dokonać całkowitej destrukcji tak toksycznych substancji, jak furany i dioksyny, ponieważ te niebezpieczne substancje ulegają rozkładowi w wysokiej temperaturze strumienia plazmy, a łatwość schłodzenia do 200°C zapobiega ponownej ich rekombinacji.

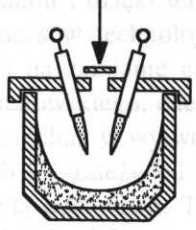
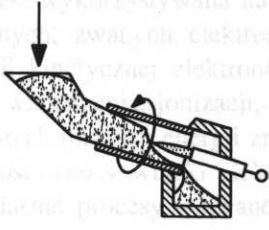
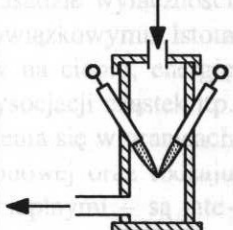
9.3.5. Inne zastosowania plazmy

Przedstawione w poprzednich punktach zastosowania plazmy niskotemperaturowej obejmują zaledwie część znanych aplikacji [653]. W celu wypuklenia innych możliwości tej dynamicznie rozwijającej się techniki elektrotermicznej, wymienionych zostanie kilka dalszych technologii o standardach przemysłowych:

— cięcie plazmowe metali i ceramiki (jedno z pierwszych zastosowań plazmotronów wprowadzone do praktyki przemysłowej już w końcu lat pięćdziesiątych);




- obróbka cieplna (do lokalnego utwardzania powierzchni roboczych wyrobów ze stali i żeliwa przy użyciu plazmotronów łukowych [545];
- sferoidyzacja proszków (nieregularne drobiny po przejściu przez strumień plazmy ulegają stopieniu, a w wyniku sił napięcia powierzchniowego przyjmują kształt kul, który zachowują po ich zamrożeniu na wyjściu z obszaru wysokiej temperatury); do tego celu szczególnie nadają się plazmotrony bezelektrodowe;
- produkcja monokryształów metodą Verneula (zwłaszcza szafiry, rubiny, kryształy tlenku cyrkonu, niobu i in.);
- produkcja dwutlenku tytanu (pigment, którego cząsteczki mają średnice 0,25 μm);
- produkcja materiałów ceramicznych (ceramiki szlachetne wytwarzane przy użyciu plazmotronów indukcyjnych i łukowych – zwłaszcza w postaci proszku o średnicy drobin mniejszych niż 1 μm);
- regeneracja czarnego ługu jako produktu ubocznego w procesie produkcji masy celulozowej (opracowany proces SKF PLASMAPULP [360] stanowi atrakcyjną alternatywę dla klasycznej technologii realizowanej w kotle regeneracyjnym, ponieważ jest prowadzony przy niskim potencjale tlenowym i przyczynia się do redukcji siarki oraz wychwytywania sodu);
- wytwarzanie cementu (wprowadzenie dogrzewania plazmowego przyczynia się do zmniejszenia zużycia właściwego energii, ułatwia realizację procesu przy utrzymaniu wymaganej jakości produktu) [360].

Tablica 9.3. Stosowane rozwiązania układowe urządzeń plazmowych do obróbki odpadów przemysłowych i komunalnych, wg [534]

	Reaktor tyglowy	Reaktor obrotowy	Reaktor rurowy
Schemat urządzenia			
Konsystencja wsadu	bez ograniczeń	bez ograniczeń	ciekła, gazowa lub proszkowa
Zalety	– prosta konstrukcja, – bez ograniczeń temperaturowych, – łatwość uszczelnienia	– przydatny do pracy ciągłej	– prosta konstrukcja, – bez ograniczeń temperaturowych, – przydatny do pracy ciągłej
Wady	– konieczność dodatkowych nakładów przy dostosowywaniu do pracy ciągłej	– skomplikowane uszczelnienia gazowe, – utrudniona wymiana ciepła	– zakres zastosowań limitowany konsystencją wsadu

Istotne znaczenie plazmotrony znalazły w badaniach silników samolotowych i raketowych. Do symulacji pracy takich silników używa się plazmotronów o największych mocach jednostkowych. Na przykład w laboratoriach NASA wykorzystuje się do symulacji plazmotrony o mocy 60 MW i trwałości elektrod rzędu 100 h. Planowana jest także budowa układów multiplazmotronowych o mocy 400 MW do badań silników hipersonicznych [366], [499].

Tablica 9.3. Sposoby tworzenia układów nagrzewania plazmowego

Wzrost temperatury	Wzrost temperatury	Wzrost temperatury
 <p>ciepła gazowa lub plazmowa</p>	 <p>bez ograniczeń</p>	 <p>bez ograniczeń</p>
<p>– prosa konstrukcja</p> <p>– bez ograniczeń</p>	<p>– przystąpienie do pracy</p> <p>– ograniczenia</p>	<p>– prosa konstrukcja</p> <p>– bez ograniczeń</p>
<p>– ograniczenia</p> <p>– ograniczenia</p>	<p>– ograniczenia</p> <p>– ograniczenia</p>	<p>– ograniczenia</p> <p>– ograniczenia</p>
<p>– ograniczenia</p> <p>– ograniczenia</p>	<p>– ograniczenia</p> <p>– ograniczenia</p>	<p>– ograniczenia</p> <p>– ograniczenia</p>

10

NAGRZEWANIE ELEKTRONOWE

10.1. Zasady nagrzewania elektronowego

10.1.1. Wiązka elektronowa i jej właściwości

Nagrzewanie elektronowe jest to nagrzewanie elektryczne polegające na powstawaniu ciepła w wyniku pochłaniania przez wsad energii kinetycznej wiązki elektronowej przyspieszanej w polu elektrycznym [489].

Wiązka elektronowa jest nośnikiem energii o niektórych parametrach nie osiągalnych innymi metodami i dzięki temu jest wykorzystywana na zasadzie wyłączności w pewnej liczbie procesów technologicznych, zwanych elektronowiązkowymi. Istota tych procesów polega na zamianie energii kinetycznej elektronów na ciepło, energię promieniowania rentgenowskiego, energię wzbudzenia, jonizacji, dysocjacji cząstek itp. [686]. Udział energii cieplnej w wytworzonych formach energii zmienia się w granicach od kilku do ponad 90% i zależy od gęstości mocy wiązki elektronowej oraz rodzaju materiału, na który ona oddziałuje. Te właśnie procesy – zwane cieplnymi – są interesujące z punktu widzenia elektrotermii.

Energję kinetyczną elektronu określa wzór

$$E = \frac{mv^2}{2} = eU_a \quad (10.1)$$

w którym: m – masa elektronu, $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ – ładunek elektronu, U_a – stałe napięcie przyspieszające elektron, zwane też anodowym, v – prędkość elektronu.

Ponieważ elektrony w wiązce mogą uzyskiwać prędkości v porównywalne z prędkością światła c , niezbędne jest uwzględnienie zmiany ich masy, zgodnie z teorią względności. Wobec tego

molibdenowe. Przeprowadzone próby dowiodły nie tylko technicznych możliwości realizacji takiego procesu, lecz także jego konkurencyjności wobec technologii mikrofalowej i laserowej oraz niektórych technologii konwencjonalnych. Sprawność takiego procesu z uwzględnieniem mocy zużywanej przez urządzenia pomocnicze oceniana jest na 75%. Eksperymenty prowadzone były z użyciem wyrzutni o mocy 36 kW, pracującej z napięciem przyspieszającym 150 kV i dającej się ogniskować z gęstością mocy 10^6 W/cm². Absorbowana energia wiązki powoduje topienie i odparowanie skały. Czoło stopionego frontu przemieszcza się na głębokość 5 ± 15 cm w czasie 10 ± 60 s. Gazem stosowanym do ograniczenia rozpraszania wiązki jest hel, w którym elektrony poruszają się po przejściu przez okno molibdenowe. Zespoły zasilające są umieszczone w komorach wypełnionych SF₆ [369].



11

NAGRZEWANIE LASEROWE

11.1. Zasady nagrzewania laserowego

11.1.1. Laser jako źródło energii

Nagrzewanie laserowe jest to nagrzewanie elektryczne polegające na pochłanianiu promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez lasery, których ośrodki aktywne wzbudzone są kosztem energii elektrycznej. W obszarze aplikacji technologicznych i medycznych prawie wyłącznie jest stosowany ten sposób wzbudzania ośrodków aktywnych.

Laser¹⁾ jest generatorem i wzmacniaczem kwantowym spójnej, monochromatycznej i mało rozbieżnej wiązki promieniowania elektromagnetycznego z zakresu od fal γ do dalekiej podczerwieni. Początkowo nazywano tak urządzenia emitujące promieniowanie zakresu widzialnego, później także urządzenia pracujące w zakresie nadfioletu (UF-lasery), podczerwieni (IR-lasery) oraz w zakresie promieniowania X (lasery rentgenowskie) i γ (grasery). Spośród urządzeń tego rodzaju w zakresie mikrofalowym są używane ponadto masery, które zachowały pierwotnie nadaną im nazwę. Są one wykorzystywane głównie w telekomunikacji.

Historia praktycznych zastosowań laserów do celów termicznych liczy około 25 lat. Stało się to możliwe po skonstruowaniu w 1960 r. przez T.H. Maimana pierwszego generatora i wzmacniacza promieniowania widzialnego nazywanego początkowo maserem optycznym, a następnie laserem rubinowym, generującym promieniowanie widzialne o długości $\lambda = 0,694 \mu\text{m}$. W laserze tym rubin jest tzw. ośrodkiem aktywnym, w którym rozwijana jest akcja laserowa. Od tego czasu zbudowano tysiące różnych laserów z różnymi innymi ośrodkami aktywnymi stałymi, ciekłymi i gazowymi pracującymi zarówno impulsowo, jak i w sposób ciągły, lecz tylko część z nich jest stosowana

¹⁾ Z angielskiego *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

do celów, w których wykorzystuje się ciepło powstające w wyniku pochłaniania promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez lasery. Większość laserów jest wykorzystywana w łączności, w metrologii, geodezji i kartografii, w optycznym przetwarzaniu informacji, w badaniach środowiska naturalnego i w wielu innych dziedzinach.

Współczesne technologiczne urządzenia laserowe coraz bardziej zaczynają upodabniać się do innych urządzeń elektrotermicznych przede wszystkim pod względem parametrów energetycznych. W komercyjnych urządzeniach laserowych do celów technologicznych generuje się już moce ciągłe o wartościach rzędu kilkudziesięciu kilowatów, przy typowych sprawnościach wynoszących kilkanaście procent, a w najnowszych rozwiązaniach dochodzących do 60%. Moc najpotężniejszych badawczych gazodynamicznych laserów o pracy ciągłej osiągnęła 1 MW [391], [422], przy czym jednostkowe ich wersje przemysłowe (m.in. spawanie blach okrętowych) już w 1977 r. osiągnęły moc 100 kW [524]. Oczywiście znacznie większe moce uzyskuje się przy pracy impulsowej. Sięgają one 1000 TW (czas impulsu 1 ps, energia 1 kJ – laser z CPA uruchomiony w 1996 r. w Lawrence Livermore Laboratory – USA [363])¹⁾. Sprawia to, że przy możliwości koncentrowania tej mocy na niewielkiej powierzchni urządzenie laserowe zajmuje wyjątkową pozycję w grupie urządzeń do konwersji energii elektrycznej w ciepło. Istnieją ponadto możliwości korzystania z systemów multilaserowych, co jest szczególnie atrakcyjne zwłaszcza w badaniach nad syntezą termojądrową. Wprowadza się także pierwsze wysoko sprawne multilaserowe konstrukcje typu matrycowego przeznaczone do obróbki cieplnej.

Zasada działania lasera polega na wykorzystaniu przewidzianego teoretycznie przez A. Einsteina zjawiska emisji wymuszonej, czyli uporządkowanego oddziaływania fotonów ze wzbudzonymi atomami, jonami lub molekułami. Warunkiem powstania takiego oddziaływania jest przede wszystkim równość energii fotonu wzbudzającego z nadwyżką energii wymienionych cząstek w odniesieniu do stanu energetycznego jaki możliwy jest do osiągnięcia po oddaniu tej nadwyżki. W pewnych przypadkach oznacza to bezpośredni, a w innych pośredni powrót tych cząstek do podstawowego stanu energetycznego. Oddziaływanie takie jest więc możliwe po uprzednim podwyższeniu energii tych cząstek, a więc doprowadzenia ich do tzw. stanu wzbudzenia, czyli do inwersji obsadzeń elektronów na orbitach atomów.

Uporządkowanemu oddziaływaniu fotonów z atomami, jonami i molekułami, czyli emisji wymuszonej, przeciwstawić trzeba emisję spontaniczną, która zawsze towarzyszy emisji wymuszonej lub występuje samodzielnie, np. pod postacią promieniowania cieplnego. Ten rodzaj promieniowania polega na emisji impulsów, nazywanych ciągami falowymi, które są generowane przez pojedyncze mikroukłady kwantowe (atomy, jony, molekuly), lecz w sposób nieuporządkowany. Każdy taki mikroukład emituje foton w sposób przypadkowy i od siebie niezależny. Ponadto zbiór takich mikroukładów, jaki tworzy ośrodek emitujący promieniowanie ciepłe jest źródłem fal o różnej długości, tak

¹⁾ Dla porównania: całkowita moc zainstalowana w krajowym systemie elektroenergetycznym wynosi 0,032 TW, we wszystkich systemach elektroenergetycznych całego świata – 3 TW, zaś moc docierająca na powierzchnię kuli ziemskiej ze Słońca jest tylko 121 razy większa [478].

jak to określa prawo Plancka w odniesieniu do ciał doskonale czarnych oraz szarych. Oczywiście w warunkach emisji wymuszonej też mamy do czynienia z falami o różnej długości, lecz możliwy do uzyskania stopień monochromatyczności μ jest tu bardzo duży. Miarą stopnia monochromatyczności jest szerokość linii spektralnej $\Delta\nu$, czyli pasmo fal, które przenoszą moce większe niż 0,5 mocy przenoszonej przez falę podstawową o częstotliwości ν_0 , przenoszącą moc największą

$$\mu = \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \quad (11.1)$$

Czas τ' , w jakim mikroukład ośrodka emitującego promieniowanie świetlne pozostaje w stanie wzbudzonym jest rzędu $10^{-7} + 10^{-8}$ s i jeśli w tym czasie żaden foton nie zdoła tego układu zmusić do powrotu do stanu niewzbudzonego, to uczyni on to sam emitując foton w akcie emisji spontanicznej.

Zupełna przypadkowość i niezależność procesów emisji w warunkach promieniowania cieplnego sprawia, że promieniowanie to charakteryzuje się małym stopniem monochromatyczności oraz brakiem spójności czasowej i przestrzennej, czyli nie wykazującym w normalnych warunkach zdolności do interferencji. Ponadto promieniowanie takie jest nieukierunkowane, emitowane w szerokim kącie i niespolaryzowane, tzn. takie, w którym wektor elektryczny drga w sposób nieuporządkowany w różnych kierunkach [646].

Ażby uzyskać uporządkowane oddziaływanie fotonów muszą być spełnione określone warunki. W tym celu należy wytworzyć nietypowy stan materii charakteryzujący się tym, że np. na dwóch poziomach energetycznych E_1 i E_2 nastąpią zmiany w obsadzeniu elektronami w stosunku do stanu równowagi termicznej określonej zależnością

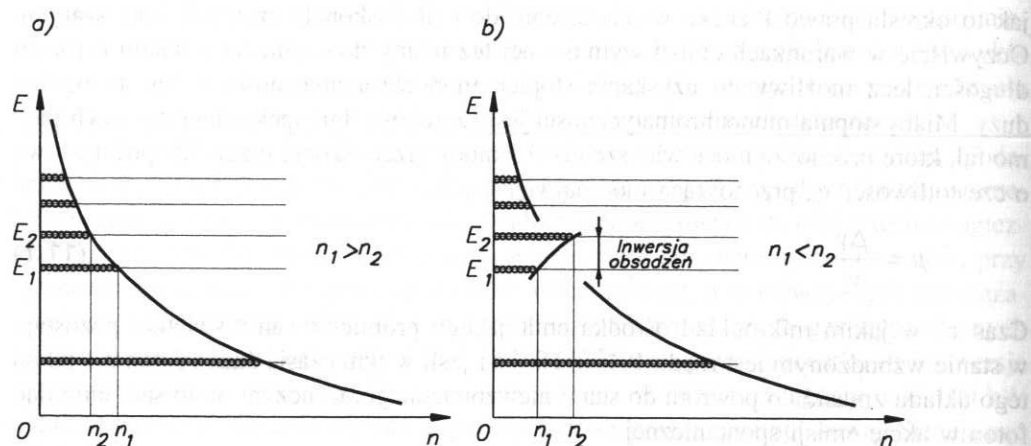
$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) = \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) \quad (11.2)$$

gdzie: n – liczba elektronów, E – energia odpowiadająca danemu poziomowi energetycznemu, k – stała Boltzmanna, h – stała Plancka, T – temperatura równowagi termicznej układu, ν – częstotliwość promieniowania.

Jeśli pierwotnie na poziomie E_1 liczba elektronów n była większa aniżeli na poziomie E_2 , to po inwersji na poziomie E_1 liczba elektronów będzie mniejsza (rys. 11.1). Każda zmiana stanu atomu może się oczywiście odbywać jedynie w postaci nieciągłego, skokowego przejścia elektronu z poziomu dla niego podstawowego do poziomu wzbudzonego (absorpcja kwantu energii) lub odwrotnie (emisja kwantu energii), czyli

$$E_2 - E_1 = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (11.3)$$

przy czym: h – stała Plancka, $h\nu$ – energia kwantu promieniowania, c – prędkość światła, λ – długość fali promieniowania.



Rys. 11.1. Obsadzenie poziomów energetycznych: a) rozkład normalny; b) rozkład z inwersją obsadzeń między poziomami energetycznymi E_1 i E_2

W laserach wykorzystuje się przejścia elektronów między poziomami energetycznymi cząstek – atomów, jonów lub cząsteczek ośrodków stałych, ciekłych, gazowych, plazmy zimnej.

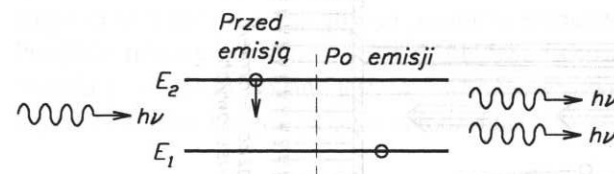
Pożądaný nietypowy stan materii (inwersję obsadzeń) uzyskuje się dzięki temu, że:

- w niektórych ośrodkach materialnych istnieją układy atomów, których stan wzbudzenia może trwać np. 10^{-3} s, a więc ok. 10^5 razy dłużej aniżeli stan wzbudzenia mikroukładu ośrodka wzbudzonego wskutek nagrzania;
- układy takie są intensywnie wzbudzane w tzw. procesie pompowania, czyli dostarczania do elementów aktywnych układu kwantowego energii, przy czym musi być przekroczony pewien minimalny poziom tego wzbudzenia (tzw. próg wzbudzenia) w warunkach dopasowania zakresu widmowego energii wzbudzającej do zakresu widmowego absorpcji ośrodka czynnego lasera.

Emisja wymuszona powstaje wówczas, gdy wzbudzona cząstka powraca pod wpływem bodźca zewnętrznego (pochłonięcia fotonu) do swego stanu podstawowego. Elektron przechodzi wtedy na podstawowy poziom energetyczny, co wiąże się z emisją fotonu o tej samej energii, jaką miał foton pochłonięty. Jest to tzw. wymuszenie rezonansowe wyróżniające się tym, że oba fotony, wymuszający i wymuszony, rozprzestrzeniają się w tym samym kierunku, znamionuje je ta sama częstotliwość, są spolaryzowane w tej samej płaszczyźnie i są zgodne w fazie. Fotony te są więc nierozróżnialne, promieniowanie jest spójne i następuje dwukrotne wzmocnienie jego natężenia kosztem energii wzbudzonego układu (rys. 11.2).

Aby wytworzyć inwersję obsadzeń i uzyskać emisję wymuszoną, ośrodek aktywny powinien mieć co najmniej trzy poziomy energetyczne. Przykładem takiego ośrodka jest wspomniany już kryształ syntetycznego rubinu, czyli Al_2O_3 domieszkowany

trójtlenkiem chromu w ilości $0,05 \pm 0,07$ w stosunku wagowym. Odpowiada to średniej gęstości jonów chromu Cr^{3+} w kryształach o wartości równej ok. $1,6 \cdot 10^{19}/cm^3$. Rozproszone w Al_2O_3 jony chromu stanowią właściwe elementy aktywne układu kwantowego. Nazywa się je jonami aktywnymi lub aktywatorami [524].

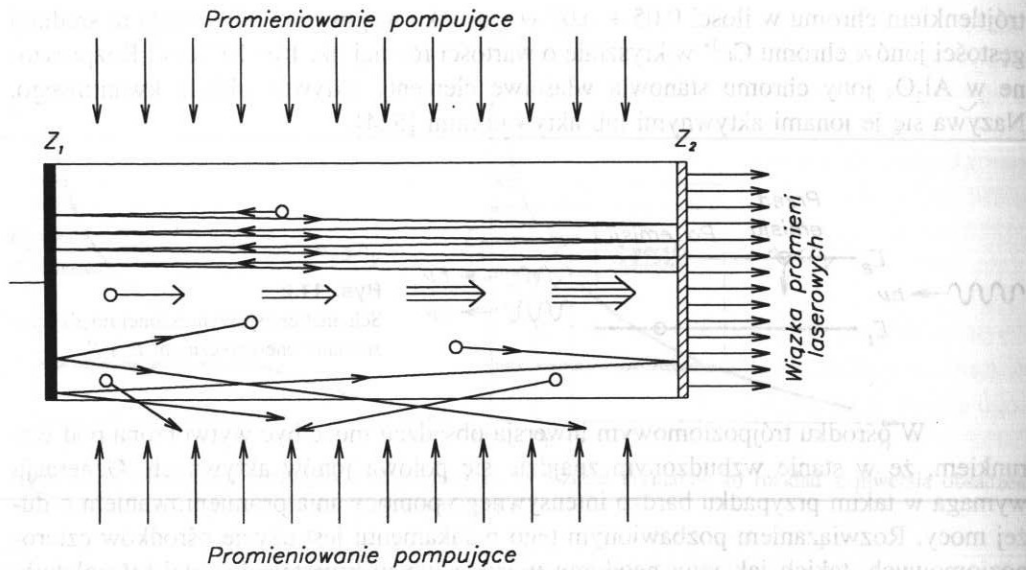


Rys. 11.2. Schemat emisji wymuszonej między poziomami energetycznymi E_2 i E_1

W ośrodku trójpoziomowym inwersja obsadzeń może być wytworzona pod warunkiem, że w stanie wzbudzonym znajdzie się połowa jonów aktywnych. Generacja wymaga w takim przypadku bardzo intensywnego pompowania promieniowaniem o dużej mocy. Rozwiązaniem pozbawionym tego mankamentu jest użycie ośrodków cztero-poziomowych, takich jak jony neodymu w szkłe lub w kryształach, a także molekuly CO_2 i CO [422].

Dysponowanie ośrodkiem aktywnym, w którym możliwe jest wytworzenie inwersji obsadzeń, stwarza dopiero potencjalną możliwość emisji wymuszonej. Jest ona inicjowana w wyniku doprowadzenia do ośrodka wzbudzonego fotonów wymuszających. W laserach rolę tę pełnią fotony emitowane spontanicznie, czyli powstające bez oddziaływania z zewnątrz. Fotony te, jak i część innych, których emisję one powodują, zwracane są ponownie do ośrodka aktywnego za pomocą (w najprostszym przypadku) dwóch zwierciadeł zwróconych ku sobie. Zwierciadła te stanowią tzw. rezonator laserowy, który wprowadza dodatnie sprzężenie zwrotne i uprzywilejowuje powielanie kwantów rozchodzących się wzdłuż jego drogi optycznej. Tym samym zwiększa się czas przebywania uprzywilejowanych fotonów w rezonatorze i prawdopodobieństwo przejść wymuszonych. Rezonator pozwala także na wytworzenie w nim fal stojących i selekcjonuje je w procesie generacji [422].

Wytworzona przez taki układ generacyjny wiązka fotonów jest niemal równoległa i rozchodzi się wzdłuż osi rezonatora, ponieważ niezbędną do powstania akcji laserowej lawinę aktów emisji fotonów wywołują jedynie te fotony, które wykonują wiele przejść między zwierciadłami, a więc promienie równoległe do osi rezonatora lub minimalnie odchyłone od kierunku osiowego. Promienie skierowane w innych kierunkach opuszczają ośrodek aktywny już po niewielkiej liczbie odbić, a nawet bez odbicia, nie mając możliwości wzmocnienia (rys. 11.3). Atomy ośrodka aktywnego powracają w tym czasie do stanu podstawowego i w ten sposób energia tego ośrodka zostaje zamieniona na promieniowanie laserowe, które wydostaje się na zewnątrz z rezonatora, np. przez jedno ze zwierciadeł, które może być półprzezroczyste bądź całkowicie przezroczyste na części swojej powierzchni. Dostarczenie energii do ośrodka aktywnego poprzez pompowanie powoduje ponowne jego wzbudzenie.



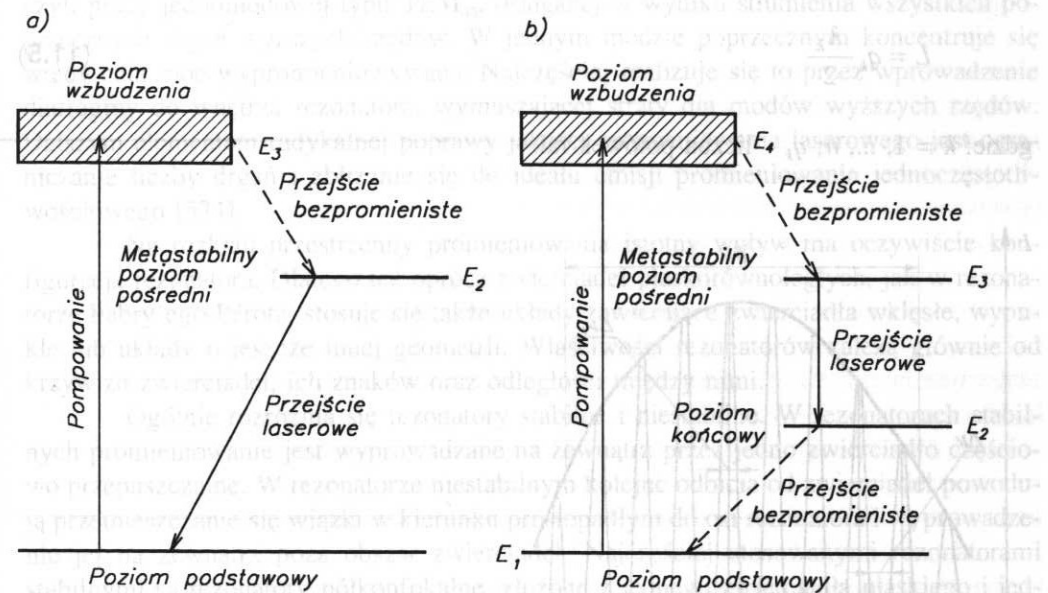
Rys. 11.3. Schemat generacji wiązki promieniowania laserowego w rezonatorze Fabryego-Pérot
 Z_1 – zwierciadło całkowicie odbijające, Z_2 – zwierciadło częściowo przepuszczalne

Przy wykorzystaniu do pompowania zakresu promieniowania widzialnego proces nosi nazwę **pompowania optycznego**. Inwersję obsadzeń poziomów energetycznych w ośrodku aktywnym uzyskuje się również w wyniku: wyładowań elektrycznych w gazach (jarzeniowe, iskrowe, łukowe), bombardowania strumieniem elektronów, wykorzystania prądu przewodzenia w ośrodkach półprzewodnikowych, reakcji chemicznych i innych. Sprawność pompowania optycznego z użyciem lamp pompujących jest niewielka, ponieważ trudno jest dopasować zakres widmowy pracy lamp pompujących do zakresu widmowego absorpcji ośrodka czynnego. Z tego względu coraz częściej wprowadza się pompowanie diodami laserowymi, co przy znacznie lepszym dopasowaniu ich promieniowania do pasm absorpcji ośrodka aktywnego zwiększa znacznie sprawność procesu.

Występujące w trakcie pompowania straty energii powodują szkodliwe nagrzewanie ośrodka czynnego. Pompowanie optyczne najczęściej jest stosowane w laserach stałych i ciekłych. Zadowalająca jest także sprawność pompowania poprzez wyładowania gazowe. Zależy ona od ciśnienia gazu i natężenia pola elektrycznego i jest stosowana w laserach gazowych. W tego rodzaju laserach stosuje się także pompowanie gazodynamiczne, podczas którego wykorzystuje się różnicę czasów relaksacji dolnego i górnego poziomu energetycznego ośrodka czynnego występującą podczas gwałtownego rozprężania podgrzanego gazu. Ten sposób wzbudzenia pozwala na bezpośrednią zamianę energii cieplnej na energię promieniowania laserowego i jest stosowany w laserach gazowych dużej mocy.

Rysunek 11.4 przedstawia schematy pompowania ośrodka trój- i czteropoziomowego. W układzie trójpoziomowym oprócz poziomów o energiach E_1 i E_2 , między

którymi zachodzi akcja laserowa, jest jeszcze szeroki, „krótkożyjący”, usytuowany wyżej poziom o energii E_3 . Pompowanie polega w tym układzie na przeniesieniu elektronów w atomie z poziomu podstawowego na poziom, a właściwie pasmo wzbudzenia, z którego szybko „spadają” one na wąski poziom pośredni, zwany metastabilnym. Na tym poziomie mogą się one utrzymywać stosunkowo długo. W przypadku lasera rubinowego są to 3 ms, podczas gdy na poziomie wzbudzenia elektrony te przebywają 10^{-7} s. Przejście między poziomami E_3 i E_2 nie jest związane z emisją promieniowania, a cała energia przejścia zużywana jest na drgania sieci krystalicznej, co powoduje nagrzewanie kryształu rubinu i wymaga jego chłodzenia.



Rys. 11.4. Schematy energetyczne układów pompowania: a) trójpoziomowego; b) czteropoziomowego

W układzie czteropoziomowym w czasie pompowania elektrony są przenoszone z poziomu podstawowego na poziom E_4 , akcja laserowa zaś odbywa się przy ich przejściu z poziomu E_3 na E_2 . Gdy poziom E_2 znajduje się daleko od poziomu podstawowego, to obsadzanie tego poziomu będzie bardzo małe. W tym przypadku inwersja obsadzeń względem poziomu końcowego (rys. 11.4b) wymaga mniejszej energii pompowania niż inwersja obsadzeń w układzie trójpoziomowym.

Na skuteczność akcji laserowej i parametry wiązki duży wpływ ma rezonator laserowy. Jednym z rodzajów rezonatora jest wspomniany układ dwóch zwierciadeł płaskorównoległych (rezonator Fabryego-Pérot). Zwierciadła te są usytuowane w odległości niewspółmiernie dużej w porównaniu z długością generowanych fal. W rezultacie, w rezonatorze wzbudzają się jednocześnie bardzo liczne podłużne rodzaje drgań rezonansowych (tzw. mody podłużne), odpowiadające zawsze całkowitej liczbie połówek fal

stojących, mieszczących się między zwierciadłami. Warunkiem właściwego działania rezonatora jest dokładne utrzymanie takiej odległości L między zwierciadłami, by była ona równa całkowitej liczbie n połówek długości fal λ , czyli

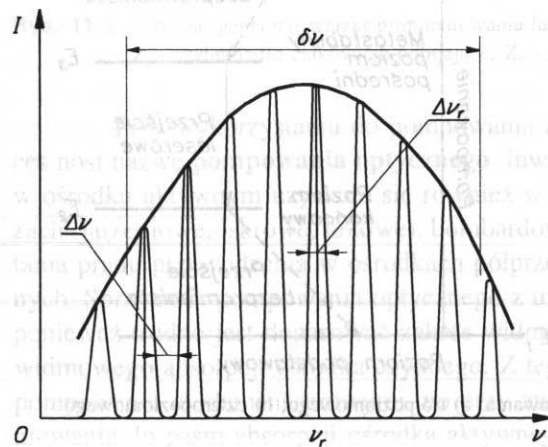
$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (11.4)$$

Przy spełnieniu tego warunku powstają węzły fal na powierzchniach zwierciadeł rezonatora.

Powstające drgania rezonansowe, czyli mody podłużne, spełniają związek

$$L = q_k \frac{\lambda_k}{2} \quad (11.5)$$

gdzie: $k = 1, \dots, n$; q_k – liczba połówek fal.



Rys. 11.5. Widmo drgań rezonatora optycznego oraz zarys (grubsza obwiednia) linii widmowej fluorescencji ośrodka czynnego

$\Delta\nu$ – odstęp częstotliwościowy między sąsiednimi modami ($\Delta\nu = c/2Ln$, przy czym n jest współczynnikiem załamania promieniowania w ośrodku czynnym, c – prędkością rozchodzenia się światła w próżni, L – długością rezonatora), $\Delta\nu_r$ – szerokość połowkowa linii rezonatora optycznego ($\Delta\nu_r = \nu_r/Q$, przy czym ν_r – częstotliwość rezonansowa, Q – dobroć rezonatora optycznego będąca odpowiednikiem dobroci innych obwodów rezonansowych), $\delta\nu$ – szerokość połowkowa linii fluorescencyjnej, I – natężenie promieniowania

Zakres długości fal lub odpowiadających im częstotliwości tworzy widmo fal (widmo częstotliwości) rezonansowych ośrodka czynnego, czyli widmo promieniowania laserowego (rys. 11.5). Skład widmowy promieniowania laserowego zależy więc od modów podłużnych.

Na krawędziach zwierciadeł ma miejsce dyfrakcja, co sprawia, że na powierzchniach zwierciadeł występują zmiany amplitudy i fazy fal. Wynikiem tego są mody poprzeczne, co objawia się zmianami rozkładu natężenia promieniowania na powierzchniach zwierciadeł i w przekrojach poprzecznych wiązki laserowej po jej wyjściu z rezonatora, tj. w płaszczyźnie równoległej do zwierciadeł. Mody poprzeczne oznacza się symbolami TEM_{mn} , podobnie jak rodzaje drgań w falowodzie¹⁾. Ogólnie rzecz biorąc, jest to więc duży zbiór drgań wzbudzanych jednocześnie w zakresie ograniczonym szerokością linii widmowej ośrodka aktywnego. Jest to stan często niepożądany, ponieważ obniża on stopień spójności i monochromatyczności promieniowania oraz zwiększa rozbieżność wiązki. W szczególności ważne jest uzyskanie podstawowego rodzaju drgań, czyli pracy jednomodowej typu TEM_{00} , osiąganej w wyniku stłumienia wszystkich poprzecznych drgań wyższych rzędów. W jednym modzie poprzecznym koncentruje się wtedy cała moc wypromieniowywana. Najczęściej realizuje się to przez wprowadzenie diafragmy do wnętrza rezonatora, wymuszającej straty dla modów wyższych rzędów. Dalszym elementem radykalnej poprawy jakości promieniowania laserowego jest ograniczanie liczby drgań i zbliżanie się do ideału emisji promieniowania jednoczęstotliwościowego [524].

Na rozkład przestrzenny promieniowania istotny wpływ ma oczywiście konfiguracja rezonatora. Dlatego też oprócz zwierciadeł płaskorównoległych, jak w rezonatorze Fabry'ego-Pérot, stosuje się także układy zawierające zwierciadła wklęsłe, wypukłe lub układy o jeszcze innej geometrii. Właściwości rezonatorów zależą głównie od krzywizn zwierciadeł, ich znaków oraz odległości między nimi.

Ogólnie rozróżnia się rezonatory stabilne i niestabilne. W rezonatorach stabilnych promieniowanie jest wyprowadzane na zewnątrz przez jedno zwierciadło częściowo przepuszczalne. W rezonatorze niestabilnym kolejne odbicia od zwierciadeł powodują przemieszczanie się wiązki w kierunku prostopadłym do osi rezonatora i wyprowadzenie jej na zewnątrz poza obszar zwierciadeł. Najczęściej stosowanymi rezonatorami stabilnymi są rezonatory półkonfokalne, złożone z jednego zwierciadła płaskiego i jednego sferycznego (płaskosferycznego). Ten rodzaj rezonatorów, jak również rezonatory konfokalne złożone z dwóch zwierciadeł sferycznych, mają istotną wadę – efektywność wykorzystania ośrodka czynnego znajdującego się między zwierciadłami nie jest najwyższa i dlatego wykorzystuje się je do generacji promieniowania o niezbyt dużych gęstościach mocy. Wady tej nie mają rezonatory niestabilne i dlatego najczęściej stosuje się konfokalne rezonatory niestabilne. Początek generacji w laserze z takim rezonatorem ma miejsce w obszarze przysiosowym, z którego wiązka po wielokrotnych odbiciach i przemieszczeniu się w kierunku poprzecznym opuszcza rezonator omijając krawędź jednego ze zwierciadeł (tzw. wyjściowego). Wykorzystanie ośrodka aktywnego jest w tym przypadku wysoce efektywne [422].

¹⁾ Indeksy m i n oznaczają bądź m węzłów wzdłuż osi x i n węzłów wzdłuż osi y prostokątnego zwierciadła rezonatora, bądź m węzłów wzdłuż współrzędnej azymutalnej (zmieniającej się od 0 do π) oraz n węzłów wzdłuż promienia zwierciadła okrągłego. Liczby m i n określają rząd drgań poprzecznych.

Lasery są bardzo różnicowane konstrukcyjnie i zawierają oczywiście jeszcze różne podzespoły wspomagające, takie jak układy zasilania, chłodzenia, sterowania. Wszystkie one – łącznie z tzw. głowicą laserową, czyli podstawowym zespołem zawierającym rezonator, układ pompowania oraz odbijacz kierujący promieniowanie pompujące do ośrodka czynnego – tworzą ten szczególny rodzaj generatora i wzmacniacza promieniowania.

11.1.2. Charakterystyka laserów technologicznych

W termicznej obróbce materiałów oraz w termicznych aplikacjach medycznych aktualnie są stosowane tylko niektóre rodzaje laserów gazowych i stałych (na ciele stałym). Lasery gazowe są generatorami i wzmacniaczami promieniowania, w których ośrodkiem aktywnym jest gaz, mieszanina gazów lub mieszanina gazów i par metalu. Wyróżnia się wśród nich lasery atomowe, jonowe, na parach metali, molekularne i ekscymerowe. W laserach na ciele stałym (stałych) ośrodkiem aktywnym jest kryształ dielektryczny lub szkło aktywowane, np. jonami pierwiastków ziem rzadkich, grupy aktywności, metali przejściowych. Znanych jest ponad sto różnych jonów nadających się na centra aktywne pompowane optycznie. W laserach technologicznych najczęściej używa się kryształów granatu itrowo-glinowego (YAG) z dodatkiem neodymu i szkła domieszkowanego neodymem. Oddzielną grupę laserów na ciele stałym stanowią lasery półprzewodnikowe z ośrodkami aktywnymi w postaci np. kryształów arsenku galu, antymonku indu, arsenku indu, arsenku aluminium i galu i in.

Spośród najczęściej stosowanych laserów należy wymienić: pracujące zarówno w trybie ciągłym, jak i impulsowym subatmosferyczne lasery molekularne CO₂ oraz neodymowe Nd:YAG, zaś w trybie impulsowym – rubinowe, neodymowe szklane Nd:szkło, i lasery ekscymerowe. Spośród innych, rzadziej stosowanych lub dopiero wprowadzanych, trzeba wymienić gazowe lasery CO₂ TEA pracujące przy ciśnieniach zbliżonych do atmosferycznego, a także gazodynamiczne ksenonowe, kryptonowe, argonowe, miedziowe (także w wersji CuBr [576]). Z uwagi na różnicowane parametry energetyczne laserów ich aplikacje mają charakter zindywidualizowany. Wyjątek stanowią lasery Nd:YAG i CO₂, w zastosowaniach których obserwuje się dość silną konkurencję, zwłaszcza w trójwymiarowej obróbce cienkich blach [506]. Charakterystyczne dane wybranych laserów technologicznych zawiera tabl. 11.1.

Subatmosferyczne lasery molekularne CO₂ pracują z ośrodkami aktywnymi w postaci mieszaniny 5 ÷ 10% CO₂, 15 ÷ 35% N i 60 ÷ 80% He przy ciśnieniu 3000 ÷ 20 000 Pa. Wzbudzone są cząsteczki CO₂ w wyniku zderzeń z powstającymi podczas wyładowań elektrycznych rozprędzonymi elektronami oraz ze wzbudzonymi (również przez zderzenia z rozprędzonymi elektronami) cząstkami N₂. Hel zwiększa przewodność cieplną właściwą mieszanki gazowej i ułatwia tym samym jej wewnętrzne chłodzenie dyfuzyjne. Wzbudzone cząsteczki CO₂ w czasie emisji wymuszonej emitują promieniowanie podczerwone o długości fali 10,63 μm. Ośrodek aktywny znajduje się w rurze wyłado-

wczej, wykonanej bądź ze szkła kwarcowego, typu razotherm lub pyrex, bądź z ceramiki korundowej lub berylowej. Jest on pobudzany przez stałoprądowe wyładowanie jarzeniowe lub coraz częściej stosowane wyładowanie wielkiej częstotliwości. Temperatura ośrodka aktywnego nie powinna przy tym przekraczać 600 ÷ 700 K, ponieważ maleje wtedy uzyskiwane wzmocnienie. Dlatego też ośrodek ten musi być intensywnie chłodzony.

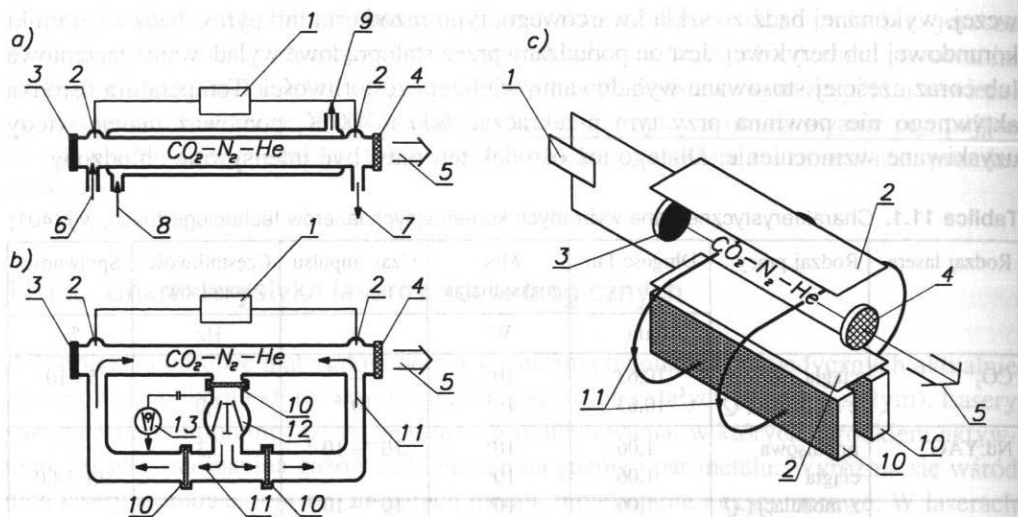
Tablica 11.1. Charakterystyczne dane wybranych komercyjnych laserów technologicznych, wg [401]

Rodzaj lasera	Rodzaj pracy	Długość fali	Moc maksymalna	Czas impulsu	Częstotliwość impulsów	Sprawność
		μm	W	s	Hz	%
CO ₂	ciągła z modulacją Q	10,63	10 ⁴	–	–	5 ÷ 10
		10,63	10 ⁵	10 ⁻⁶	1,0	–
Nd:YAG	impulsowa ciągła z modulacją Q	1,06	10 ⁶	10 ⁻⁴ ÷ 10 ⁻²	0,3	–
		1,06	10 ³	–	–	0,1 ÷ 4,0
		1,06	10 ⁹	10 ⁻⁸ ÷ 10 ⁻⁷	–	–
Ekscymerowy	impulsowa	0,19 ÷ 0,35	10 ⁷	10 ⁻⁸ ÷ 10 ⁻⁷	0,5	1 ÷ 5

Ze względu na sposób chłodzenia laserów molekularnych wyróżnia się: lasery chłodzone dyfuzyjnie – głównie w wyniku przewodzenia ciepła przez gazowy ośrodek aktywny do wewnętrznych ścianek komory wyładowczej oraz lasery chłodzone konwekcyjnie – przez wymuszony przepływ gazowego ośrodka czynnego (tzw. chłodzenie przepływowe). W laserach chłodzonych dyfuzyjnie stosuje się powolny przepływ gazu wzdłuż rury wyładowczej. W laserach chłodzonych konwekcyjnie stosuje się także przepływ gazu wzdłuż rury, lecz szybki, bądź przepływ poprzeczny, czyli prostopadły do osi strefy wyładowania. Innym wyróżnikiem tych laserów jest rozwiązanie sposobu pobudzenia (podłużne lub poprzeczne). Chodzi tu o kierunek, w jakim przebiega pobudzenie ośrodka aktywnego w odniesieniu do kierunku wiązki laserowej, co w istocie rzeczy wiąże się z usytuowaniem elementów (elektrod) pobudzających. Lasery te są głównie eksploatowane w warunkach pracy ciągłej przy mocy 0,5 ÷ 25 kW, najczęściej ok. 1,5 kW. Ich sprawność wynosi 10 ÷ 20% [506], [602]. Bywają one jednak eksploatowane jako impulsowe oraz w warunkach modulacji dobroci rezonatora¹⁾.

Lasery chłodzone dyfuzyjnie o powolnym podłużnym przepływie gazu (ok. 1 m/s) zaliczają się do najstarszych laserów molekularnych (rys. 11.6a). Stosowane w nich rury mają średnice 5 ÷ 25 mm i są chłodzone wodą lub specjalnym olejem. Kąt rozbieżności wiązki zawiera się w przedziale 1,5 ÷ 10 mrad, szerokość linii spektralnej zaś wynosi ok. 100 MHz. Są one pobudzone podłużnie przez doprowadzanie do wewnętrznych

¹⁾ Jest to tzw. „Q-switching” polegający na chwilowym zwiększeniu strat w rezonatorze, co wywołuje zanik emisji promieniowania laserowego i umożliwia zwiększenie pobudzenia ośrodka czynnego. Po przywróceniu układowi pełnej sprawności następuje gwałtowne wyzwolenie całej zgromadzonej w nim energii w postaci bardzo wąskiego impulsu o wielkiej mocy [602], [524].



Rys. 11.6. Schematy subatmosferycznych laserów gazowych CO₂: a) z wolnym osiowym przepływem gazu w układzie otwartym (chłodzenie dyfuzyjne) i pobudzeniem podłużnym; b) z szybkim osiowym przepływem gazu w układzie zamkniętym i pobudzeniem podłużnym; c) z poprzecznym przepływem gazu w układzie zamkniętym i z pobudzeniem poprzecznym

1 – zasilacz elektryczny, 2 – elektroda, 3 – odbijające zwierciadło rezonatora, 4 – przepuszczalne zwierciadło rezonatora, 5 – wiązka laserowa, 6 i 7 – wlot i wylot gazu, 8 i 9 – wlot i wylot wody chłodzącej rurę wyładowczą, 10 – wymiennik ciepła, 11 – kierunek przepływu schładzanego gazu, 12 – pompa Roots'a, 13 – pompa próżniowa

elektrod napięcia stałego lub impulsowego o wartości $5 + 8$ kV/m długości rury wyładowczej. Prąd wyładowania w rurze – ok. 100 mA. Czas trwania impulsów laserowych przy pobudzeniu impulsowym: $0,05 \text{ ms} + 20 \text{ s}$ (najczęściej ok. 1 ms), a przy modulacji dobroci 0,1 ms, a nawet 0,1 μs w zależności od metody jej realizacji. Częstotliwość powtarzania impulsów najczęściej równa jest 1 kHz dla pobudzenia impulsowego i ok. 10 kHz w warunkach modulacji dobroci. Lasery pracują zazwyczaj w modzie TEM₀₀. Moc wyjściowa tych laserów przy pracy ciągłej nie przekracza 2000 W, przy pracy impulsowej zaś uzyskuje się moce impulsów $50 + 10\,000$ W przy pobudzeniu impulsowym i $1 + 30$ kW przy modulacji dobroci. Ponieważ moc wyjściowa lasera jest proporcjonalna do długości słupa pobudzonej mieszaniny gazowej (co najwyżej ok. 100 W/m), rurę laserową wykonuje się jako łamaną w postaci wielu, zwykle kilkumetrowych odcinków i za pomocą pomocniczych zwierciadeł usytuowanych na krańcach każdego odcinka zmienia się bieg promieniowania laserowego [391], [602]. Rezonator lasera ma dwa zwierciadła: odbijające o współczynniku odbicia $R = 0,98 + 0,99$ dla fali $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ oraz przepuszczające o transmisyjności $0,1 + 0,4$.

Konieczna jest wymiana mieszaniny gazowej w rurze wyładowczej z uwagi na rozkład cząstek CO₂. Jej przepompowywanie odbywa się w obiegu otwartym bądź zamkniętym [602].

Lasery te znamionuje duża stabilność rozkładu gęstości mocy w wiązce, prosta konstrukcja, duża niezawodność i łatwość użytkowania. Są one używane w procesach termicznych, w których wymagane są umiarkowana gęstość mocy i wydajność [698].

Lasery chłodzone konwekcyjnie o szybkim podłużnym przepływie gazu (do ok. 500 m/s) są podobne do laserów CO₂ z chłodzeniem dyfuzyjnym (rys. 11.6b). Różnice konstrukcyjne wynikają ze sposobu oddawania ciepła przez ośrodek aktywny (konwekcja wymuszona). Mieszanina gazowa jest chłodzona w zespole wymienników ciepła, z których centralny schładza nagrzaną w wyniku akcji laserowej mieszaninę gazów, dwa pozostałe schładzają ją ponownie po nagraniu wskutek sprężenia w dmuchawie. Moc jednostkowa osiąga wartość 1 kW na 1 m długości rury. Promieniowanie może być emitowane zarówno jako ciągłe, jak i impulsowe. Moc tych laserów nie przekracza 5 kW. Stanowią one pod względem liczbowym podstawową grupę laserów molekularnych.

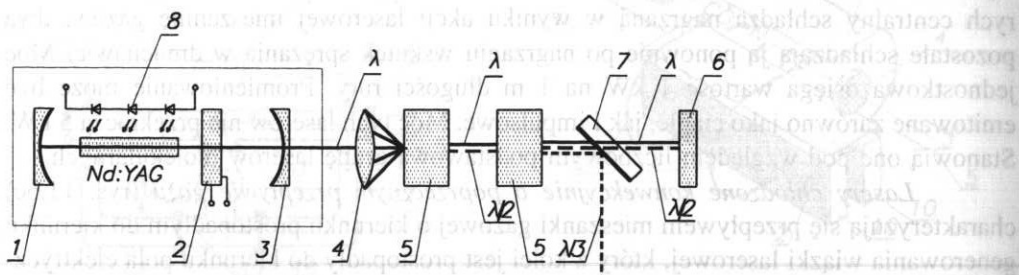
Lasery chłodzone konwekcyjnie o poprzecznym przepływie gazu (rys. 11.6c) charakteryzują się przepływem mieszaniny gazowej o kierunku prostym do kierunku generowania wiązki laserowej, który z kolei jest prostym do kierunku pola elektrycznego pobudzającego wyładowanie w ośrodku (laser TEA)¹⁾. Średnica wiązki TEM₀₀ na wyjściu lasera wynosi zwykle kilkanaście milimetrów przy kącie rozbieżności ok. $1 + 2$ mrad. Dzięki odmiennym rozwiązaniom konstrukcyjnym, a w szczególności bardziej efektywnemu pobudzeniu i chłodzeniu ośrodka aktywnego, modele komercyjne tych laserów osiągają przy pracy ciągłej moc ok. 50 kW, przy pracy impulsowej zaś kilkaset megawatów, energię impulsów do kilkuset dżuli przy częstotliwości od kilku herców do 2 kHz [422].

Istota pobudzenia poprzecznego polega na wytworzeniu pola elektrycznego w kierunku prostym do osi kanału wyładowczego (i osi rezonatora optycznego). Napięcie doprowadza się do kanału wyładowczego za pośrednictwem wielu elektrod, co ułatwia zasilanie, ponieważ pozwala na wzbudzenie ośrodka czynnego przy niezbyt wysokim napięciu. Z kolei przepływ poprzeczny mieszaniny gazowej odbywa się przy większym przekroju strumienia i wyższym ciśnieniu, a więc odprowadzanie ciepła ze strefy konwersji energii jest bardziej skuteczne. Gaz przepływa w obiegu zamkniętym. Jedną z zalet tego lasera jest zwarta budowa, co ma istotne znaczenie w aplikacjach przemysłowych.

Lasery neodymowe Nd:YAG mają ośrodki czynne w postaci prętów z granatu itrowo-aluminiowego Y₃Al₅O₁₂, aktywowanego trójwartościowymi wbudowanymi w sieć krystaliczną jonami neodymu Nd³⁺ o zawartości $0,8 + 1,5\%$ wag. Nd₂O₃ i tworzącymi układ czteropoziomowy. Lasery te emitują promieniowanie podczerwone o długości fali $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$, a także promieniowanie o długości $\lambda/2 = 0,532 \mu\text{m}$ oraz $\lambda/3 = 0,3546 \mu\text{m}$, jeśli zastosuje się kryształy nieliniowe, przetwarzające promieniowanie pierwotne na drugą, a przy pracy wyłącznie impulsowej także na trzecią harmoniczną (rys. 11.7). Do pompowania ośrodka aktywnego używa się ksenonowych lamp błyskowych (stosowanych przy pracy impulsowej), kryptonowych lamp łukowych (przy

¹⁾ TEA – Transversally Exited Atmospheric – laser o pobudzeniu poprzecznym [524], [602].

pracy ciągłej), a ostatnio coraz częściej – diod laserowych. Lasery stałe pompowane diodami (LPD) mają liczne zalety. Znamionuje je duża sprawność, długi czas życia, duża niezawodność, małe gabaryty oraz duża stabilność parametrów energetycznych, czasowych, przestrzennych i widmowych generowanego promieniowania [626]. Część z wymienionych zalet wynika przede wszystkim z dobrego dopasowania widmowego promieniowania emitowanego przez diody laserowe do pasm absorpcji ośrodka aktywnego.



Rys. 11.7. Schemat lasera Nd:YAG z modulacją dobroci, pompowanego diodami laserowymi i wyposażonego w układy przetwarzania częstotliwości, zaczerpnięto z [362]

1 – zwierciadło odbijające, 2 – modulator dobroci, 3 – zwierciadło przepuszczające, 4 – soczewka skupiająca, 5 – kryształ nieliniowy, 6 – absorber, 7 – zwierciadło, 8 – diodowy układ pompujący

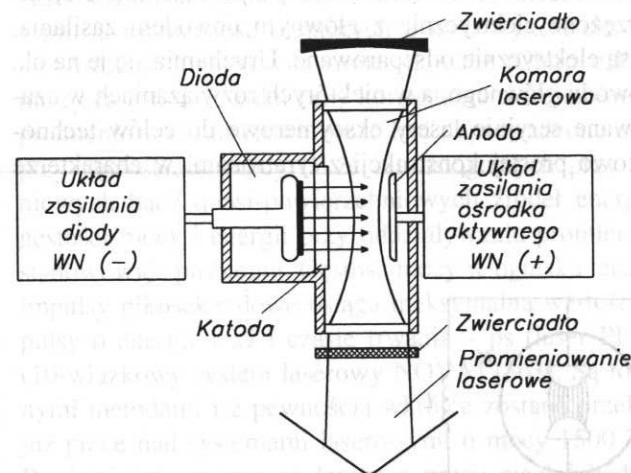
Przy pracy ciągłej jest wytwarzana wiązka wielomodowa o mocy wyjściowej do 2000 W lub wiązka TEM₀₀ o mocy 40 W. Dla pracy impulsowej wielomodowa moc średnia wynosi zwykle 500 ÷ 2000 W, a nawet 5000 W, natomiast dla modu TEM₀₀ – przeciętnie 40 W przy energii impulsów 0,1 ÷ 60 J. Czas impulsów może być regulowany w zakresie 0,1 ÷ 10 ms przy częstotliwości ich powtarzania 0,1 Hz ÷ 25 kHz. Rozbieżność wiązki zwiększa się z jej mocą i zawiera się w przedziale od kilku do kilkunastu miliradianów. Laser Nd:YAG może pracować impulsowo w warunkach komutacji dobroci. Jest on także używany do generacji ultrakrótkich impulsów dużej mocy (terawatowych) [363]. Jego maksymalna sprawność dochodzi do 5%, przeciętna zaś dla wiązki TEM₀₀ wynosi ok. 2%.

Dla przedstawionych wyżej dwóch rodzajów laserów, a mianowicie CO₂ i Nd:YAG konkurencją zaczynają być impulsowe lasery gazowe pracujące na parach Cu, a zwłaszcza lasery CuBr. Wynika to z lepszej absorpcji emitowanego przez nie promieniowania widzialnego ($\lambda = 0,5106 \mu\text{m}$ i $0,5782 \mu\text{m}$), możliwości jego zogniskowania na powierzchni o średnicy kilku mikrometrów, dużej średniej mocy wyjściowej (do 200 W przy mocy szczytowej do 200 kW i czasie impulsu 20 ÷ 40 ns) oraz dobrej sprawności (2,7%) [576].

Lasery ekscymerowe należą do kategorii laserów gazowych. Wprawdzie pierwsza demonstracja pracy lasera ekscymerowego przeprowadzona w roku 1970 przez N.G. Basowa ze współpracownikami dotyczyła emisji wymuszonej z dimera Xe w fazie ciekłej przy pobudzeniu wiązką elektronów, jednak później uzyskano emisję z tegoż dimera w fazie gazowej, a w 1975 r. uruchomiono, najbardziej interesujące dla aplikacji

technologicznych, lasery na halogenkach gazów szlachetnych (rys. 11.8), które już dwa lata później znalazły swoje pierwsze zastosowanie komercyjne.

Są to impulsowe lasery gazowe pracujące głównie w zakresie $0,126 \div 0,540 \mu\text{m}$, czyli w nadfiolecie i w zakresie widzialnym. Generacja spójnego promieniowania następuje w nich w wyniku przejść kwantowych molekuł nazywanych ekscymerowymi, które związane są praktycznie tylko w stanie wzbudzonym. Mogą one powstać w wyniku procesów zderzeniowych (zderzeń wzbudzonych atomów, rekombinacji jonów itp.) zachodzących w ośrodku aktywnym pod wpływem jego pobudzenia elektronami lub strumieniem fotonów [362].



Rys. 11.8.

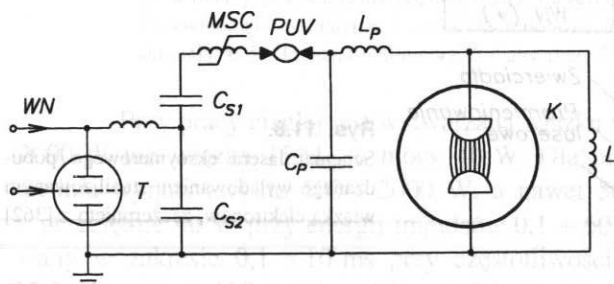
Schemat lasera ekscymerowego pobudzanego wyładowaniem stabilizowanym wiązką elektronów, zaczerpnięto z [362]

W skład mieszanki gazowej wchodzi 1 ÷ 10% gazu szlachetnego, ok. 0,2% halogenku (ArF, KrCl, KrF, XeBr, XeCl, XeF, Kr₂F, XeF(C—A), Xe₂Cl) oraz He jako gaz buforowy [362]. Znane są przy tym rozwiązania z jednym rodzajem gazu szlachetnego, a także z ich dwuskładnikowymi mieszankami [626]. Lasery ekscymerowe, w których stosuje się halogenki gazów szlachetnych, obejmują najszerszy zakres widma, mają największą sprawność, umożliwiają otrzymywanie dużych energii w impulsie i dużych mocy średnich. Ze względu na szerokie widmo emisji umożliwiają też przestrajanie częstotliwości i generację zarówno długich, jak i krótkich impulsów. W laserach ekscymerowych oprócz halogenków gazów szlachetnych wykorzystuje się gazy szlachetne, halogeny, tlenki gazów szlachetnych oraz halogenki rtęci [362].

Molekuły ekscymerowe mają krótki czas trwania i z tego względu – w celu uzyskania niezbędnej ich koncentracji dla osiągnięcia progu generacji – konieczne jest stosowanie intensywnego pobudzenia, zapewniającego gęstość mocy deponowanej w ośrodku rzędu $10^4 \div 10^6 \text{ W/cm}^3$. Najczęściej stosuje się pobudzenie wiązką elektronów oraz pobudzenie wyładowaniem elektronów, rzadziej pobudzenie optyczne, mikrofalami, a incydentalnie wiązką protonów. W przypadku pobudzenia wyładowaniem elektrycznym stosuje się wyładowanie stabilizowane wiązką elektronów lub wyładowanie lawinowe

(samoistne) z prejonizacją nadfioletem lub promieniami X. Jest to zwykle pobudzenie poprzeczne przy ciśnieniu atmosferycznym lub wyższym i przy szybkiej cyrkulacji gazu.

Rysunek 11.8 przedstawia schemat lasera ekscymerowego pobudzanego wyładowaniem elektrycznym stabilizowanym wiązką elektronów, rys. 11.9 zaś schemat elektryczny komercyjnego lasera pobudzanego wyładowaniem elektrycznym, w którym stosuje się wstępną jonizację ośrodka ultrafioletem w celu wytworzenia w miarę jednorodnej koncentracji elektronów, umożliwiającej zapoczątkowanie wyładowania jarzeniowego. Prejonizacja UV pozwala na wytworzenie początkowej koncentracji rzędu $10^6 \div 10^9$ elektronów w 1 cm^3 ośrodka aktywnego. W tym celu najczęściej źródłem promieniowania ultrafioletowego jest wyładowanie iskrowe w ośrodku lub po powierzchni dielektryka. Obwody prejonizacji są sprzężone elektrycznie z głównym obwodem zasilania, stanowią jego integralną część lub są elektrycznie odseparowane. Uruchamia się je na ok. $0,1 \div 10 \text{ } \mu\text{s}$ przed zadziałaniem obwodu głównego, a w niektórych rozwiązaniach w czasie jego działania [362]. Produkowane seryjnie lasery ekscymerowe do celów technologicznych są układami o stosunkowo prostej konstrukcji z tyratronami w charakterze komutatorów [559].



Rys. 11.9. Schemat obwodów głównych lasera ekscymerowego pobudzanego wyładowaniem z prejonizacją ultrafioletem, wg [559]

WN – wysokie napięcie, PUV – układ prejonizacji ultrafioletem, K – komora lasera, T – tyratron, MSC (Magnetic Switch Control) – indukcyjność zabezpieczająca tyratron przed uszkodzeniem, L_p – indukcyjność dopasowująca, L – indukcyjność determinująca stałą czasową, C_{S1} , C_{S2} – pojemności magazynujące, C_p – pojemność wyostrzająca impuls napięciowy

Lasery ekscymerowe z pobudzeniem UV i z szybkim przepływem gazu mają średnią moc nawet do 1000 W, moc w impulsach zaś – kilka ÷ kilkadziesiąt megawatów. Pracują one najczęściej przy częstotliwości powtarzania impulsów $0,5 \div 2000 \text{ Hz}$ oraz czasie ich trwania równym kilka ÷ kilkadziesiąt nanosekund. Ze względu na technologię najbardziej istotną cechą znamionującą ten typ lasera jest możliwość ogniskowania tego promieniowania na powierzchni o promieniu $1 \div 10 \text{ } \mu\text{m}$, podczas gdy w przypadku lasera Nd:YAG jest to $10 \div 100 \text{ } \mu\text{m}$, a CO_2 – $50 \div 500 \text{ } \mu\text{m}$ [535]. Stworzyło to zupełnie nowe możliwości superprecyzyjnej obróbki, co ma szczególne znaczenie w technologii elektronowej. Dodać do tego należy, że trwają prace nad zwiększeniem mocy tych laserów, a także ich sprawności, która w laserach komercyjnych osiąga $1 \div 5\%$, a w ba-

dawczych 15% [401], [422]. Istnieją nawet projekty zbudowania w roku 2000 laserów ekscymerowych zdolnych do generowania impulsów nanosekundowych o energii ok. 10 MJ [362], [422].

11.1.3. Oddziaływanie promieniowania laserowego na materię

W zastosowaniach technologicznych i medycznych korzysta się z promieniowania laserowego podczerwonego, widzialnego i nadfioletowego. Wiązki laserowe wytwarzane przez urządzenia komercyjne (rok 1997) można koncentrować na powierzchni nawet $1 \text{ } \mu\text{m}$, a rozbieżność niektórych z nich wynosi ok. 0,1 mrad. W warunkach generacji ultrakrótkich impulsów tzw. metodą CPA (Chirped Pulse Amplification) jest ona jeszcze mniejsza [364]. Z kolei przy korzystaniu z technologicznych układów multilaserowych, promieniowanie laserowe może być doprowadzone do stosunkowo dużych powierzchni, przy gęstościach mocy także nieosiągalnych przy użyciu innego rodzaju powierzchniowych bądź quasi-powierzchniowych źródeł energii. Uzyskiwanie skrajnie wielkich gęstości mocy i energii przy oddziaływaniu promieniowania laserowego na materię nie stanowi więc problemu. Gęstość mocy w ognisku terawatowych laserów wytwarzających impulsy pikosekundowe osiąga maksymalną wartość do 10^{20} W/cm^2 . Wytwarza się impulsy o energii 1 kJ i czasie trwania 1 ps (laser PETAWAT) oraz $50 \div 100 \text{ kJ}$ i 3 ns (10-wiązkowy system laserowy NOVA) [363]. Są to wartości nieosiągalne żadnymi innymi metodami i z pewnością wkrótce zostaną przekroczone, ponieważ prowadzone są już prace nad systemami laserowymi o mocy 1500 TW i energii impulsów $5 \div 10 \text{ MJ}$. Bardziej interesujące są lasery o pracy ciągłej bądź o określonej i nie zawsze dużej częstotliwości powtarzania impulsów wyjściowych. Ważna jest także ich sprawność energetyczna, struktura modowa emitowanej wiązki, długość fali, szerokość linii widmowej (stopień monochromatyczności), a także stabilność i stałość emitowanej energii (mocy).

Z powyższego wynika, że w rzeczywistości jest to promieniowanie bardzo zróżnicowane zarówno w sensie jakościowym, jak i ilościowym. Dlatego też trzeba się liczyć z tym, że jego oddziaływanie na materię też musi być bardzo zróżnicowane, zwłaszcza jeśli się weźmie pod uwagę fakt, że właściwości materiałów absorbujących wykazują ogromne różnice. Najbardziej interesujące są oczywiście zjawiska przy bardzo dużych gęstościach mocy, ponieważ na ogół odbiegają one od efektów mających miejsce przy stosowaniu klasycznych metod elektrotermicznych, a w tym także metody nagrzewania elektronowego, która pod pewnymi względami jest najbliższa metodzie laserowej [707], [654].

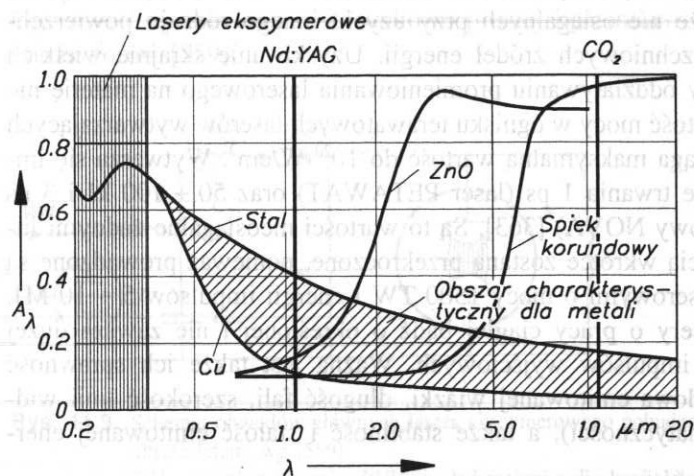
Analizę oddziaływania promieniowania laserowego na materię dodatkowo komplikują bardzo złożone i na ogół nieregularne rozkłady przestrzenne mocy w wiązce i to zarówno w przypadku wiązki jednomodowej, jak i wiązek wielomodowych, zmiany profilu w czasie wiązki oraz nietermiczne efekty towarzyszące. Te ostatnie prowadzą często do zniszczenia wiązań chemicznych materiału warstwy wierzchniej oraz zmian w strukturze atomów i molekuł środowiska, przez które promieniowanie przenika w kie-

runku obrabianego materiału. Istotne różnice występują także przy obróbce materiałów nieprzezroczystych i przezroczystych, ponieważ przy uzyskiwanych gęstościach mocy nie istnieją istotne ograniczenia w stosowaniu promieniowania laserowego.

W procesie nagrzewania laserowego część padającego promieniowania zostaje pochłonięta w materiale i przez przewodzenie ciepłe odprowadzona w głąb, część zaś odbita. Na zjawiska te w znacznym stopniu wpływają właściwości promienne powierzchni, a w szczególności absorpcyjność monochromatyczna A_λ , która dla materiałów nieprzezroczystych jest związana z refleksyjnością monochromatyczną R_λ związkiem

$$A_\lambda = 1 - R_\lambda \quad (11.6)$$

Rysunek 11.10 przedstawia $A_\lambda = f(\lambda)$ dla niektórych materiałów w obszarach pracy trzech podstawowych kategorii laserów technologicznych.



Rys. 11.10. Absorpcyjność monochromatyczna różnych materiałów podczas promieniowania emitowanego przez trzy rodzaje laserów używanych w procesach termicznych

Oprócz absorpcyjności, która zwykle jest jeszcze funkcją temperatury, stanu skupienia, stopnia utlenienia powierzchni oraz jej chropowatości, przy analizie problemów termokinetycznych bierze się pod uwagę jeszcze następujące parametry materiałowe: przewodność cieplną właściwą, ciepło właściwe, temperaturę i ciepło topienia oraz parowania, a także mającą związek z dynamiką procesu lepkość stopionego materiału [535]. Dla określonej kategorii zagadnień proponuje się nawet odejście od klasycznego podchodzenia do problemów wymiany ciepła w obszarze napromienianym wiązką laserową, co wymaga zastąpienia modelu Fouriera modelem Vernotte'a, a więc uwzględnienia czasu relaksacji τ , [131], [418]. Istotne różnice występują ponadto w zależności od przezroczystości materiałów na promieniowanie zakresu laserowego. Częściej promieniowanie jest jednak wykorzystywane do obróbki materiałów nieprzezroczystych,

a zwłaszcza metali, których właściwości optyczne w zakresie fal emitowanych zwłaszcza przez lasery CO_2 zostały stosunkowo dobrze zbadane [633].

W materiałach nieprzezroczystych początkowa faza nagrzewania laserowego polega na pochłanianiu nie odbitych od powierzchni fotonów przez wolne lub związane elektrony, co powoduje zwiększenie ich energii. Następnie za ich pośrednictwem wskutek relaksacji energia jest przekazywana jonom siatki. Warto przy tym zaznaczyć, że współczynnik odbicia zależy od długości fali. Na przykład dla srebra w obszarze widzialnym wynosi on ok. 92%, w nadfiolecie zaś zaledwie 4%, co czyni laser ekscymerowy tak niesłychanie atrakcyjnym w obróbce metali. Wynika to zresztą także z rys. 11.10, pokazującego gwałtowny wzrost absorpcyjności w w obszarze pracy laserów ekscymerowych.

Przy przyjęciu uproszczonego modelu pochłaniania promieniowania monochromatycznego (tylko przez elektrony swobodne) przez półprzestrzeń można założyć, że promieniowanie nadfioletowe, widzialne i podczerwone jest pochłanianie (w takim samym sensie jak to jest przyjęte przy nagrzewaniu indukcyjnym) w warstwie o grubości równej głębokości wnikania δ [418], [602]. W półprzestrzeni pojawiają się więc źródła ciepła, których gęstość mocy jest określona prawem Lamberta-Bouguera [485]

$$q_z = q_0 e^{-\alpha z} \quad (11.7)$$

przy czym q_0 jest gęstością mocy promieniowania na powierzchni, α jest zaś współczynnikiem pochłaniania, który dla metali przyjmuje wartości $10^8 \div 10^7 \text{ m}^{-1}$, co oznacza, że głębokość wnikania

$$\delta = 1/\alpha = 10^{-8} \div 10^{-7} \text{ m} = 0,01 \div 0,1 \text{ }\mu\text{m} \quad (11.8)$$

W wielu pracach przyjmowany jest wobec tego model pochłaniania promieniowania laserowego na powierzchni ciała. Podejście takie wymaga jednak rozważenia i nie dla całego zakresu impulsów laserowych może być akceptowane.

Jeśli wziąć pod uwagę czasy upływające między kolejnymi zderzeniami elektronów, czasy relaksacji oraz czasy trwania impulsów laserowych większych niż pikosekundowe, to można wykazać iż zasadne jest przyjęcie modelu konwersji, w którym energia fotonów zostaje natychmiast zamieniona na ciepło w miejscu absorpcji promieniowania. W przypadku impulsów pikosekundowych (10^{-12} s) i femtosekundowych (10^{-15} s), a więc uzyskiwanych już obecnie, konieczne jest już odrzucenie tradycyjnego termodynamicznego pojęcia temperatury i operowanie temperaturami elektronów i jonów [418].

Wzrost temperatury obszaru przypowierzchniowego powoduje emisję elektronów oraz jonów. Przy dostatecznie dużej gęstości mocy następuje topienie materiału, front fazy ciekłej przesuwa się, a grubość stopionego materiału rośnie. Przy dostatecznie dużej gęstości energii następuje parowanie materiału i wyrzucanie stopionych cząstek do przestrzeni przypowierzchniowej. Wyrzucony materiał znajdując się na drodze promieniowania pochłania je i podwyższa swoją temperaturę, przekształcając się w stan plazmy, która utrudnia, a nawet całkowicie ekranuje dopływ promieniowania laserowego

do powierzchni. W takich warunkach jest możliwe wykorzystanie tego zjawiska do utwardzania materiału za pomocą fal uderzeniowych, generowanych w wyniku gwałtownego impulsowego oddziaływania rozszerzającej się plazmy [391].

W przypadku obróbki laserowej materiałów przezroczystych, do których zalicza się zarówno ciała stałe, jak i ciecze, pochłanianie energii jest bardziej złożone, ponieważ ma ono charakter powierzchniowo-objętościowy. Przy pewnej, tzw. progowej gęstości mocy absorbowanego promieniowania, powstają uszkodzenia materiału, takie jak krater, pęknięcia, dyslokacje strukturalne, a ponadto mają miejsce zjawiska optyczne (np. samoogniskowanie), akustyczne (fala ultradźwiękowa) oraz elektryczne (przebiecia w powietrzu w miejscu wnikania i wychodzenia wiązki). Zjawiska te mają szczególne znaczenie przy obróbce takich materiałów, jak rubin, szafir, diament, szkło, kwarc, a częściowo także tworzyw sztucznych. Uszkodzenia materiału w wyniku przekroczenia progowej wartości gęstości mocy powstają w miejscach mikrozanieczyszczeń lub mikroporów, przy czym temperatura może tam osiągać wartość kilku tysięcy kelwinów.

Obróbka materiałów przezroczystych i półprzezroczystych może polegać – podobnie jak materiałów nieprzezroczystych – na ich topieniu, odparowaniu i usunięciu z miejsca obróbki, co zwykle wymaga gęstości mocy przekraczających „próg uszkodzenia”. Jest to oczywiście możliwe bez wywołania nadmiernych naprężeń, pęknięć i uszkodzeń w warstwie przylegającej do obszaru oddziaływania wiązki laserowej, jednak wymaga optymalnego doboru jej parametrów.

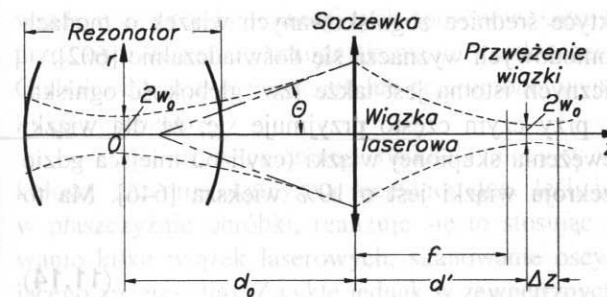
Jeszcze bardziej złożone zjawiska występują podczas pochłaniania promieniowania laserowego w półprzewodnikach. Mają miejsce w takim przypadku następujące postacie absorpcji:

- wewnątrzprasmowa lub międzypasmowa z wytwarzaniem par nośników elektron-dziura, których bezpromienista rekombinacja powoduje przekazywanie energii siatce krystalicznej i wzrost temperatury półprzewodnika,
- sieciowa z wytwarzaniem fotonów, które mogą wywołać naprężenia i mikropęknięcia w materiale [602].

Oddziaływanie promieniowania laserowego na materię jest zwykle intensyfikowane przez jego ogniskowanie (rys. 11.11). Jak wiadomo, promieniowanie laserowe jest generowane w określonej przestrzeni, która charakteryzuje się m.in. najmniejszym promieniem w_0 lub tzw. średnicą przewężenia $2w_0$, która w miarę oddalania się od tego miejsca ($z > 0$) zwiększa się. Wiązkę laserową modu podstawowego TEM₀₀ charakteryzuje gaussowski rozkład gęstości mocy

$$q(r, z) = \frac{2P}{\pi w^2(z)} e^{-[2r^2/w^2(z)]} \quad (11.9)$$

przy czym: P jest całkowitą mocą promieniowania w wiązce laserowej, $w(z)$ – promieniem wiązki w odległości z od miejsca, w którym jej promień $r = w_0$ jest najmniejszy, r – odległością od osi wiązki.



Rys. 11.11. Rozchodzenie się i ogniskowanie wiązki laserowej TEM₀₀, wg [602]

$2w_0$ – najmniejsza średnica wiązki w rezonatorze, $2w'_0$ – najmniejsza średnica wiązki po jej skupieniu przez soczewkę, 2Θ – kąt rozbieżności wiązki, f – ogniskowa soczewki, d_0 – odległość soczewki ogniskującej od przewężenia w rezonatorze, d' – odległość ogniska wiązki od soczewki, Δz – głębokość ogniska

Promień wiązki określa zależność

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2} \quad (11.10)$$

Przez obszar określony promieniem wiązki $w(z)$ przepływa 86,5% całej jej mocy, a dla $r = 1,5w(z)$ jest to już 98,5%. Wiązka TEM₀₀ rozszerza się więc w miarę oddalania od przewężenia w_0 , a jej rozbieżność zależy przede wszystkim od parametrów rezonatora laserowego. Kąt rozbieżności wiązki modu TEM₀₀ definiowany dla dużej odległości od wyjścia lasera

$$\Theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{dw}{dz} = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (11.11)$$

Ogniskowanie wiązki TEM₀₀ za pomocą idealnej soczewki odległej o d_0 od początkowego przewężenia wiązki w_0 daje w odległości d' skupienie wiązki o promieniu w'_0

$$w'_0 = \frac{2f\lambda}{\pi w_0} \quad (11.12)$$

W praktyce, w przypadku wiązek mało rozbieżnych, można we wzorze (11.12) zamiast w_0 przyjąć promień przekroju wiązki tuż przed soczewką ogniskującą. Jak wynika z (11.12), teoretycznie minimalne średnice zogniskowanych wiązek laserowych TEM₀₀ przy $f \approx 4w_0$ mogą być w przybliżeniu równe długości fali promieniowania, czyli $w'_0 \approx \lambda$. W praktyce są one jednak ok. 5 razy większe [602].

W przypadku ogniskowania wiązek o modach wyższego rzędu aniżeli podstawowy, czyli TEM₀₀, uzyskuje się ognisko o półosiach w'_m oraz w'_n

$$w'_m = w'_0 \sqrt{2m + 1}; \quad w'_n = w'_0 \sqrt{2n + 1} \quad (11.13)$$

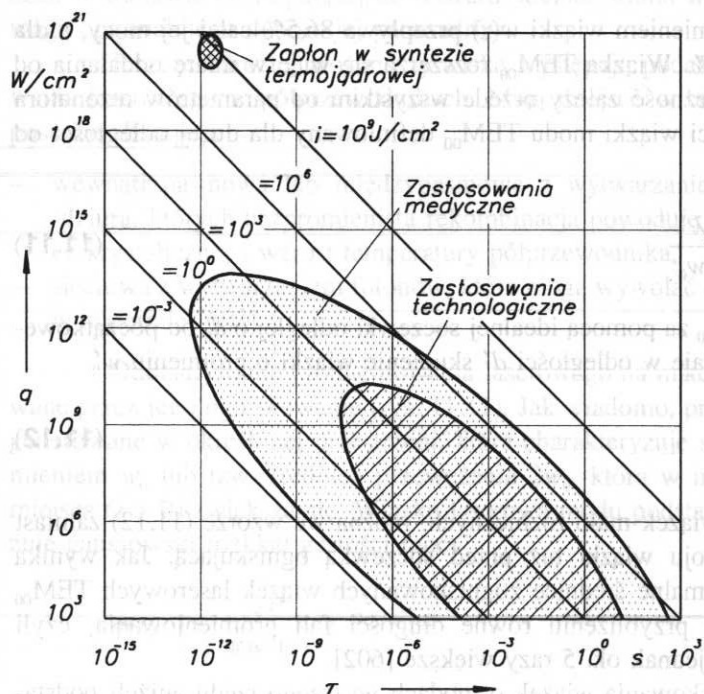
Są to wartości orientacyjne i w praktyce średnice zogniskowanych wiązek o modach wyższych niż podstawowy oraz wielomodowych wyznacza się doświadczalnie [602].

W zagadnieniach technologicznych istotna jest także tzw. głębokość ogniska. Istnieje kilka definicji tej wielkości, przy czym często przyjmuje się, że dla wiązki TEM₀₀ jest to taka odległość od przewężenia skupionej wiązki (czyli od miejsca gdzie $r = w_0'$), w której powierzchnia przekroju wiązki jest o 10% większa [646]. Ma to miejsce w odległości

$$\Delta z \approx 2w_0'^2/\lambda \quad (11.14)$$

W celu ogniskowania wiązki laserowej używa się najczęściej pojedynczych soczewek, obiektywów soczewkowych lub zwierciadlanych. W zakresie promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni stosuje się soczewki szklane, a dla dalszej podczerwieni – soczewki z germanu lub arsenku galu [602].

Nagrzewanie laserowe może być realizowane w sposób podobny do nagrzewania wiązką elektronów. Ze względu na inny charakter tej wiązki najczęściej stosuje się nagrzewanie sekwencyjne lub punktowo-wyspowe przy przesuwie (odchyłaniu) wiązki, przy przesuwie w dwóch kierunkach (precyzyjne stoły x-y) lub obrocie i przesuwie



Rys. 11.12. Podstawowe parametry energetyczne wiązek laserowych w różnych zastosowaniach termicznych, wg [274], [391], [726]
 τ – czas ekspozycji, g – gęstość mocy, i – powierzchniowa gęstość energii

wsadu oraz przy kombinacji tych sposobów. Gęstość doprowadzanej mocy reguluje się przez ogniskowanie i rozogniskowanie wiązki oraz przez zmianę czasu napromienienia. Głębokość warstwy nagrzanej lub przetopionej wynosi zwykle od kilku mikrometrów do kilku milimetrów.

Jak już wspomniano, rozkłady mocy w wiązkach, które mogą mieć przekrój kołowy lub prostokątny, są niejednorodne. Jeśli istnieje potrzeba ich ujednorodnienia w płaszczyźnie obróbki, realizuje się to stosując układy soczewek, przesłon, kolimowanie kilku wiązek laserowych, skanowanie oscylacyjne wiązką (przy użyciu wibrującego zwierciadła). Zwykle jednak w zewnętrznych obszarach gęstość wiązki pozostaje mniejsza. Rastry otrzymane przy użyciu wiązki laserowej i wiązki elektronowej są do siebie podobne.

Uzyskanie pożądanych efektów termicznych przy oddziaływaniu promieniowania laserowego na materię wymaga bardzo zróżnicowanych parametrów wiązki. Z wielkości energetycznych charakteryzujących to promieniowanie ze względu na potrzeby związane z określoną technologią trzema najważniejszymi wielkościami są: gęstość mocy, gęstość energii i czas oddziaływania. Na rysunku 11.12 zaznaczono obszary aplikacji termicznych wiązek laserowych.

11.2. Urządzenia laserowe i ich zastosowania termiczne

11.2.1. Inżynieria powierzchni

Technika laserowa znalazła już bardzo liczne zastosowania w inżynierii powierzchni i jej zasięg stale się rozszerza [391]. Jest ona stosowana głównie do obróbki niewielkich obszarów materiału. Nagrzewanie wsadu realizowane jest przede wszystkim w powietrzu, co ułatwia operowanie wiązką i pozwala dotrzeć do trudno dostępnych elementów wsadu, np. nieobrabiwalnych metodą indukcyjną, z uwagi na brak możliwości zbliżenia się ze wzbudnikiem. Technologie laserowe wykorzystywane są z dużym powodzeniem zwłaszcza do obróbki wsadów stalowych. Nagrzewanie bez trudu daje się także prowadzić w innych niż powietrze gazach, w cieczach oraz w próżni, o ile ośrodki takie są dostatecznie przezroczyste.

Dzięki możliwości koncentracji bardzo wielkich mocy na małych powierzchniach, obszary przylegające do miejsca obróbki praktycznie nie zmieniają swojej temperatury. Ciepło dociera do nich poprzez dyfuzję, z reguły po zakończeniu doprowadzania energii do obrabianej strefy. Dzięki temu minimalizuje się procesy utleniania oraz stwarza się możliwość nagrzewania przez warstwy absorpcyjne bez zanieczyszczania powierzchni materiałami tych warstw [391].

Interesujące efekty technologiczne uzyskuje się przy stosowaniu technologii skojarzonych, np. z obróbką cieplno-chemiczną, z kulowaniem (przed lub po obróbce

laserowej), z natryskiwaniem cieplnym, z nanoszeniem elektroiskrowym lub detonacyjnym, z implantacją oraz z metodami PVD i CVD¹⁾ w zakresie wytwarzania warstw cienkich. Trwałość eksploatacyjna obrabianych laserowo elementów może być nawet kilkukrotnie większa niż przy stosowaniu obróbek konwencjonalnych.

Urządzenia laserowe stosowane w technologiach obróbek termicznych wchodzących w zakres m.in. inżynierii powierzchni są zwykle nazywane obrabiarkami laserowymi. Zgodnie z terminologią stosowaną w elektrotermii, większość z nich należy zaliczyć do kategorii urządzeń bezkomorowych, a więc takich, w którym członem podstawowym – czyli grzejnym – jest nagrzewnica.

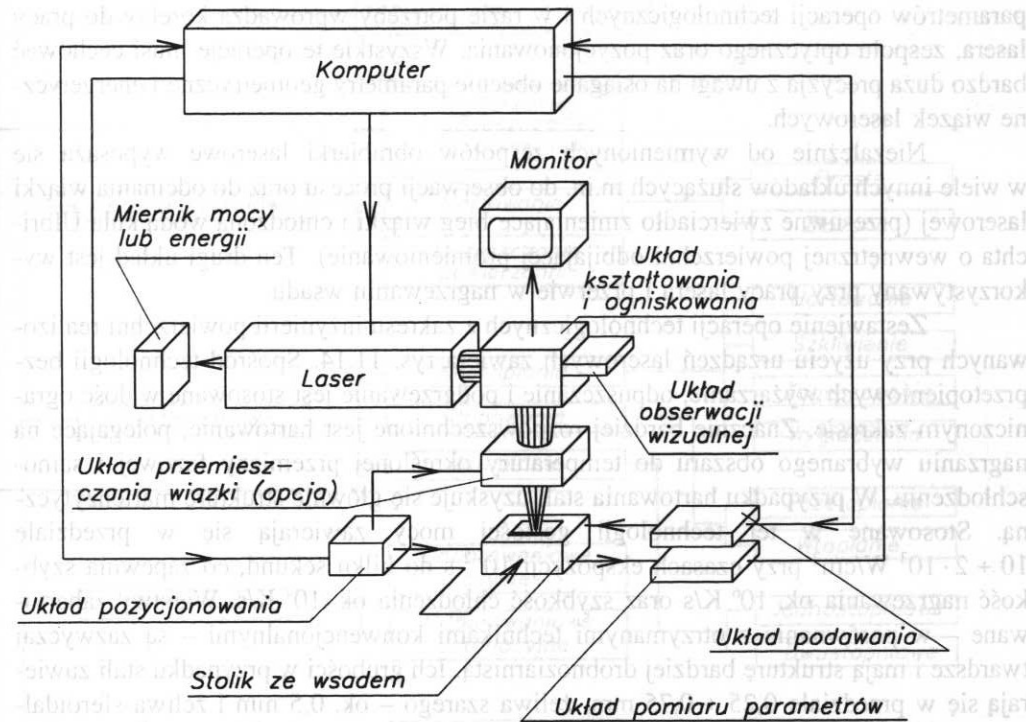
W przypadku obróbek prowadzonych w cieczech, wsad umieszczony jest w wannie, a więc istnieją przesłanki, by tego rodzaju obrabiarki kwalifikować do kategorii urządzeń komorowych, podobnie jak chociażby urządzenia zawierające elektrodowe wanny solne, rezystancyjne piece wannowe itp. Podobnie w przypadku obróbki realizowanej w próżni, zasadne jest nazywanie członu podstawowego piecem laserowym. Częściej jednak w literaturze technicznej – zarówno polskiej, jak i obcej – utożsamia się pojęcia obrabiarki laserowej i nagrzewnicy laserowej, termin piec laserowy zaś dotychczas się nie przyjął.

Urządzenia laserowe wykorzystywane do realizacji procesów technologicznych z zakresu inżynierii powierzchni są konstrukcyjnie zróżnicowane. Wszystkie one mają jednak trzy podstawowe zespoły: laser z zasilaczem, zespół optyczny oraz układ pozycjonowania wsadu (rys. 11.13). Analogiczne trzy zespoły mają obrabiarki stosowane w wielu innych procesach termicznych, z których kilka przedstawionych będzie w następnych podrozdziałach.

W obrabiarkach wykorzystuje się wiele odmian laserów o pracy ciągłej, impulsowej oraz z modulacją dobroci. Najczęściej używa się laserów CO₂, Nd:YAG oraz ekscymerowych, przy czym te ostatnie zyskują na znaczeniu, m.in. z uwagi na bardzo dużą absorpcyjność metali w obszarze nadfioletu. Dzięki stosowanemu niekiedy przetwarzaniu promieniowania emitowanego w zakresie podczerwieni na wyższe harmoniczne, możliwa jest oczywiście obróbka w obszarze nadfioletu przy użyciu np. laserów Nd:YAG. W przypadku stosowania laserów ekscymerowych praca w tym zakresie odbywa się jednak bez potrzeby stosowania przekształcających elementów nieliniowych.

Promieniowanie wytworzone w laserze kierowane jest do zespołu optycznego, w którym następuje jego formowanie i ogniskowanie. Układ formowania jest stosowany, gdy w miejscu napromienianym niezbędne jest otrzymanie jednorodnego rozkładu gęstości mocy oraz ściśle określonych wymiarów przekroju wiązki. Ujednorodnienie rozkładu gęstości mocy uzyskuje się wieloma sposobami. Jednym z nich jest wykorzystanie wielosegmentowego zwierciadła ogniskującego, złożonego z wielu zwierciadeł płaskich

¹⁾ CVD (Chemical Vapour Deposition) – proces modyfikacji warstwy wierzchniej wsadu jako rezultat zmian jej składu chemicznego i struktury poprzez wprowadzenie do nich żądanych pierwiastków znajdujących się w fazie gazowej.



Rys. 11.13. Schemat blokowy obrabiarki laserowej, zaczerpnięto z [422]

rozmeszczonych wewnątrz powierzchni wklęsłej i kierujących różne wycinki wiązki laserowej w jeden obszar obróbki. Dzięki temu do obrabianego obszaru dociera moc o jednorodnej uśrednionej gęstości [422].

W celu zwiększenia gęstości mocy w miejscu obróbki wiązka jest ogniskowana przy użyciu wymiennych soczewkowych obiektywów krótkoogniskowych lub układów zwierciadlanych. Obiektyw w niektórych rozwiązaniach może być automatycznie przemieszczany, przy czym w tej operacji stosuje się układ pomiaru odległości obiektywu od miejsca obróbki. W celu ochrony obiektywu przed zanieczyszczeniem, a nawet zniszczeniem rozpylanym materiałem oraz w celu niedopuszczenia do dodatkowego i niekontrolowanego wzbudzenia lasera, prowadzącego do generacji promieniowania o dużych niejednorodnościach amplitudowych i zmiennej w czasie niepożądanego niestabilności kształtu impulsu laserowego, stosuje się tzw. izolatory optyczne, np. w postaci dysz gazowych.

Wiązka doprowadzana jest do określonego miejsca wsadu dzięki układowi pozycjonowania, a także za pomocą układów bezpośredniego jej odchylenia. Coraz częściej do operacji tych wykorzystuje się roboty. Algorytm ruchu wiązki laserowej lub stolika z umieszczonym na nim wsadem jest sterowany zazwyczaj komputerowo. Komputer określa także prędkość obróbki, przerwy między operacjami, analizuje wyniki pomiarów

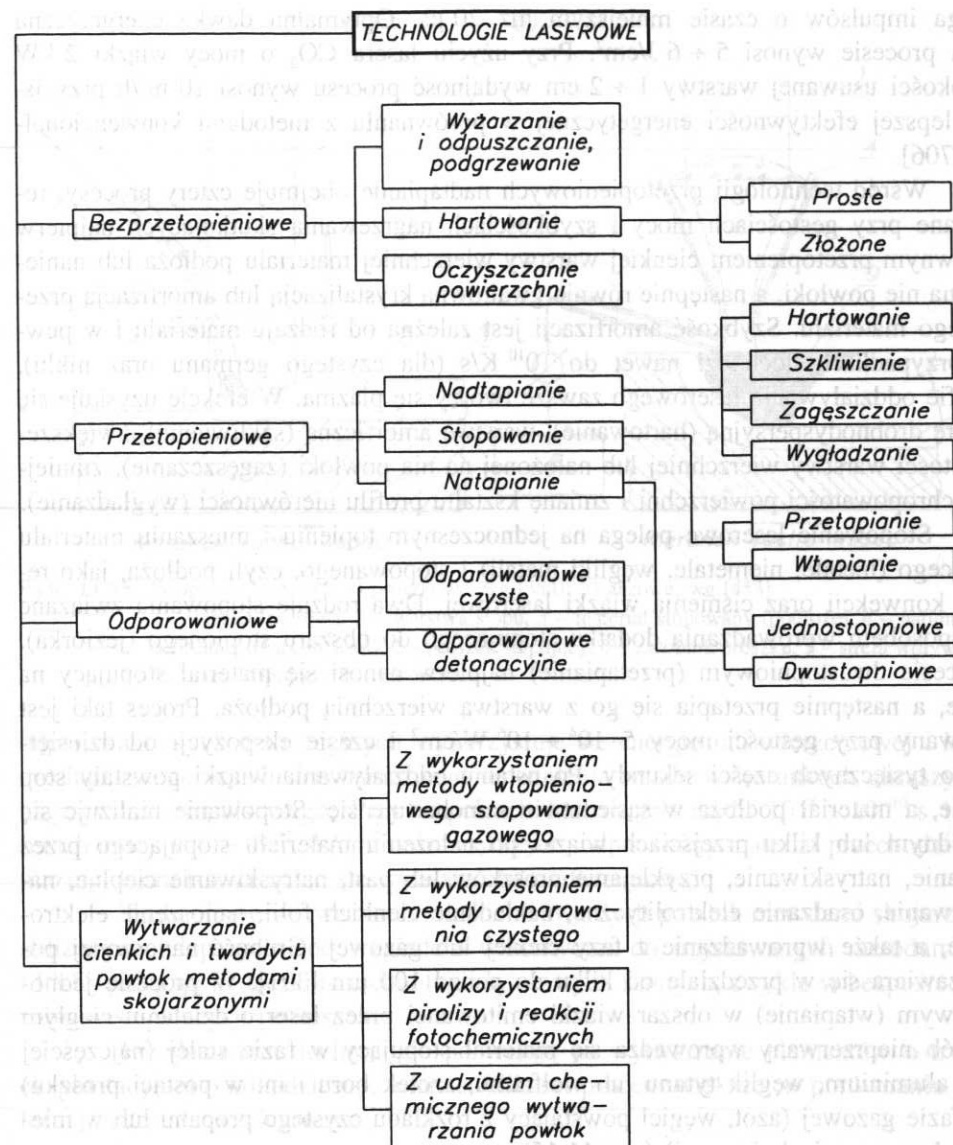
parametrów operacji technologicznych i w razie potrzeby wprowadza korekty do pracy lasera, zespołu optycznego oraz pozycjonowania. Wszystkie te operacje musi cechować bardzo duża precyzja z uwagi na osiągnięte obecnie parametry geometryczne i energetyczne wiązek laserowych.

Niezależnie od wymienionych zespołów obrabiarki laserowe wyposaża się w wiele innych układów służących m.in. do obserwacji procesu oraz do odcinania wiązki laserowej (przesuwne zwierciadło zmieniające bieg wiązki i chłodzona wodą kula Ulbrichta o wewnętrznej powierzchni odbijającej promieniowanie). Ten drugi układ jest wykorzystywany przy pracy lasera i przerwie w nagrzewaniu wsadu.

Zestawienie operacji technologicznych z zakresu inżynierii powierzchni realizowanych przy użyciu urządzeń laserowych zawiera rys. 11.14. Spośród technologii bezprzetopieniowych wyżarzanie, odpuszczanie i podgrzewanie jest stosowane w dość ograniczonym zakresie. Znacznie bardziej rozpowszechnione jest hartowanie, polegające na nagrzaniu wybranego obszaru do temperatury określonej przemiany fazowej i samoschłodzeniu. W przypadku hartowania stali uzyskuje się głównie strukturę martenzytyczną. Stosowane w tej technologii gęstości mocy zawierają się w przedziale $10 \div 2 \cdot 10^3 \text{ W/cm}^2$ przy czasach ekspozycji 10^{-2} s do kilku sekund, co zapewnia szybkość nagrzewania ok. 10^6 K/s oraz szybkość chłodzenia ok. 10^4 K/s . Warstwy zahartowane – w porównaniu z otrzymanymi technikami konwencjonalnymi – są zazwyczaj twardsze i mają strukturę bardziej drobnoziarnistą. Ich grubości w przypadku stali zawierają się w przedziale $0,25 \div 0,75 \text{ mm}$, żeliwa szarego – ok. $0,5 \text{ mm}$ i żeliwa sferoidalnego – ok. 1 mm . Zwiększeniu ulega ich wytrzymałość statyczna i zmęczeniowa, udurowienie i ciągliwość, odporność na korozję i zużycie przez tarcie. Po obróbce laserowej nie ulega też zmianie gładkość powierzchni.

Z dwóch wariantów hartowania, bezprzetopieniowe proste dotyczy wsadów w stanie wynikającym z ostatniej obróbki kształtującej, bez ich wstępnej obróbki powierzchniowej lub cieplnej. Hartowanie bezprzetopieniowe złożone polega na obróbce wsadów poddanych uprzednio konwencjonalnej obróbce cieplnej. Bezprzetopieniowe hartowanie laserowe stosowane jest do umacniania stali narzędziowych do pracy na zimno, szybkoładowanych, konstrukcyjnych, stopowych, stosowanych na płyty pancerne, odpornych na korozję, łożyskowych, żeliw oraz umacniania stopów miedzi [391].

Laserowe oczyszczanie polega bądź na uwalnianiu z przypowierzchniowych warstw wsadów par, gazów i zanieczyszczeń w wyniku ich nagrzewania, zwykle impulsowego i w próżni, bądź na usuwaniu powłok, np. lakierniczych, którymi wsady te są pokryte. W pierwszym przypadku chodzi o oczyszczanie kryształów krzemu, niklu i in. z wtrąceń i zaadsorbowanych atomów, zwłaszcza tlenu, azotu i wodoru. Druga grupa zastosowań jest bardziej zróżnicowana, przy czym najbardziej spektakularne rezultaty uzyskuje się w badaniach nad usuwaniem powłok lakierniczych z całych samolotów i ich podzespołów, co jest konieczne przy okresowych inspekcjach i remontach. Powierzchnia lakiernicza typowego samolotu ma ok. 1500 m^2 i waży ok. 250 kg . By ją usunąć konwencjonalnie potrzeba do tego specjalnych substancji chemicznych o masie 10-krotnie większej oraz wielkich ilości wody obciążających środowisko.



Rys. 11.14. Technologie laserowe stosowane w inżynierii powierzchni

W technice laserowej usuwanie powłoki lakierniczej polega na jej eksplozywnym odparowaniu, wytwarzająca się zaś przy tym plazma niszczy wiązania atomowe substancji lakierniczych, które ulegają rozpadowi na składniki podstawowe (CO_2 i para wodna). Przy zastosowaniu lasera ekscymerowego emitującego energię w impulsach $10 \div 30 \text{ ns}$ przy przerwach międzyimpulsowych $5 \div 25 \text{ ms}$ cieplne obciążenie podłoża lakierniczego jest minimalne. Usuwanie lakieru z wrażliwych termicznie elementów

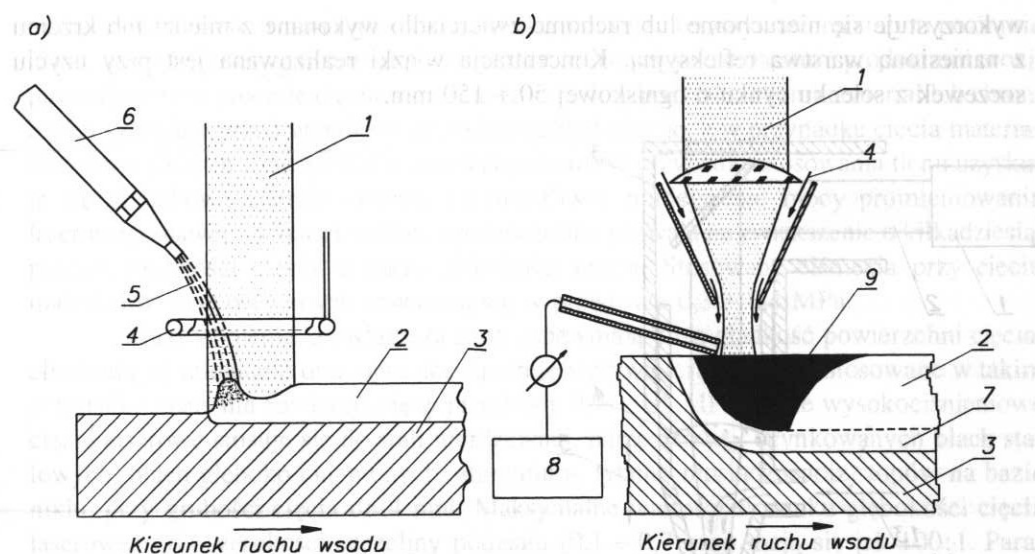
wymaga impulsów o czasie mniejszym niż 20 μs . Optymalna dawka energetyczna w tym procesie wynosi $5 + 6 \text{ J/cm}^2$. Przy użyciu lasera CO_2 o mocy wiązki 2 kW i szerokości usuwanej warstwy $1 + 2 \text{ cm}$ wydajność procesu wynosi $10 \text{ m}^2/\text{h}$ przy istotnie lepszej efektywności energetycznej w porównaniu z metodami konwencjonalnymi [706].

Wśród technologii przetopieniowych nadtapianie obejmuje cztery procesy, realizowane przy gęstościach mocy i szybkościach nagrzewania skutkujących najpierw gwałtownym przetopieniem cienkiej warstwy wierzchniej materiału podłoża lub naniesionej na nie powłoki, a następnie równie gwałtowną krystalizacją lub amorfizacją przetopionego materiału. Szybkość amorfizacji jest zależna od rodzaju materiału i w pewnych przypadkach dochodzi nawet do 10^{10} K/s (dla czystego germanu oraz niklu). W strefie oddziaływania laserowego zawsze tworzy się plazma. W efekcie uzyskuje się strukturę drobnodispersyjną (hartowanie), warstwę amorficzną (szkliwienie), zwiększenie gęstości warstwy wierzchniej lub nałożonej na nią powłoki (zagęszczanie), zmniejszenie chropowatości powierzchni i zmianę kształtu profilu nierówności (wygładzanie).

Stopowanie laserowe polega na jednoczesnym topieniu i mieszaniu materiału stopującego (metale, niemetale, węgliki metali) i stopowanego, czyli podłoża, jako rezultatu konwekcji oraz ciśnienia wiązki laserowej. Dwa rodzaje stopowania związane są ze sposobem wprowadzania dodatku stopującego do obszaru stopionego (jeziorka). W procesie dwustopniowym (przetapianie) najpierw nanosi się materiał stopujący na podłoże, a następnie przetapia się go z warstwą wierzchnią podłoża. Proces taki jest realizowany przy gęstości mocy $5 \cdot 10^4 + 10^6 \text{ W/cm}^2$ i czasie ekspozycji od dziesiątych do tysięcznych części sekundy. Po ustaniu oddziaływania wiązki powstały stop krzepnie, a materiał podłoża w sąsiedztwie samohartuje się. Stopowanie realizuje się przy jednym lub kilku przejściach wiązki po nałożeniu materiału stopującego przez malowanie, natryskiwanie, przyklejanie proszków lub past, natryskiwanie cieplne, naparowywanie, osadzanie elektrolityczne, nakładanie cienkich folii, nanoszenie elektroiskrowe, a także wprowadzanie z fazy ciekłej lub gazowej. Grubość nanoszonej powłoki zawiera się w przedziale od kilku do ponad $100 \mu\text{m}$ [391]. W procesie jedno-stopniowym (wtapianie) w obszar wiązki emitowanej przez laser o działaniu ciągłym w sposób nieprzerwany wprowadza się materiał stopujący w fazie stałej (najczęściej krzem, aluminium, węgiel tytanu lub wolframu, azotek boru i in. w postaci proszku) lub w fazie gazowej (azot, węgiel powstający z rozkładu czystego propanu lub w mieszaninach z gazami obojętnymi) (rys. 11.15).

Natapianie polega na stopieniu grubej warstwy materiału natapianego i na podtopieniu bardzo cienkiej warstwy podłoża, co ma na celu wytworzenie powłoki odpornej na erozję, korozję, ścieranie i inne narażenia eksploatacyjne w warunkach silnego związania podłoża z wytworzoną powłoką. Jedno- bądź dwustopniowość procesu jest tu analogiczna do występującej w stopowaniu.

Technologie odparowaniowe czyste polegają na niezbyt szybkim odparowaniu materiału, który jest następnie osadzany – niekiedy w połączeniu z innym materiałem – na podłożu. Do osadzania stosuje się przy tym metody CVD i PVD. W technologiach



Rys. 11.15. Wtapianie laserowe: a) proszkowe, wg [384]; b) gazowe, wg [453]

1 – wiązka laserowa, 2 – warstwa stopu, 3 – materiał stopowany (podłoże), 4 – nadmuch gazu ochronnego (argon, azot), 5 – proszek stopujący, 6 – zasobnik proszku, 7 – strefa wpływu ciepła, 8 – gazy stopujące, 9 – jeziorko

odparowaniowych detonacyjnych wykorzystuje się energię fali uderzeniowej i impulsu mechanicznego w celu mechanicznego umocnienia wsadu w warunkach ultraszybkiego nagrzewania impulsowego. Przy impulsach laserowych rzędu $10^{-8} + 10^{-10} \text{ s}$ i gęstościach mocy $10^{10} + 10^{12} \text{ W/cm}^2$ oraz większych, odparowany materiał przechodzi w stan plazmy, która rozszerzając się wytwarza falę uderzeniową.

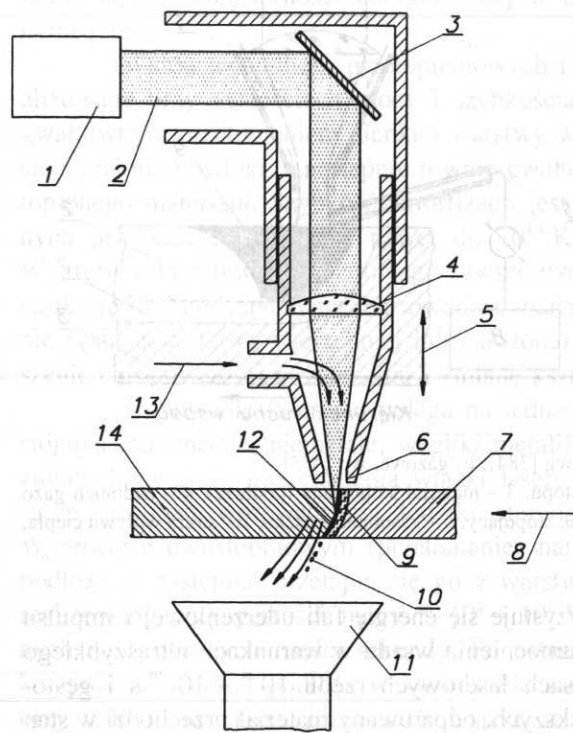
Technologie wytwarzania cienkich i twardych powłok metodami skojarzonymi, zbliżonych i lepszych pod względem właściwości do uzyskiwanych metodami CVD i PVD, polegają na łączeniu technologii laserowych i innych, zwykle w bezpośrednio po sobie następujących procesach.

Przedstawione technologie pozwalają na wytwarzanie elementów o trwałości eksploatacyjnej o kilkadziesiąt, a nawet kilkaset procent większej w porównaniu z trwałością materiału wyjściowego.

11.2.2. Cięcie

Cięcie laserowe jest technologią wykorzystującą termiczne oddziaływanie wiązek o koncentracji mocy w ognisku większej niż $5 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ (rys. 11.16). Wiązka promieniowania laserowego emitowana przez laser najczęściej o działaniu ciągłym, a rzadziej o działaniu impulsowym z dużą częstotliwością repetycji impulsów, doprowadzana jest, zazwyczaj z użyciem światłowodu, do miejsca obróbki. Do zmiany kierunku wiązki

wykorzystuje się nieruchome lub ruchome zwierciadło wykonane z miedzi lub krzemu z naniesioną warstwą refleksyjną. Koncentracja wiązki realizowana jest przy użyciu soczewek z selenku cynku o ogniskowej 50 ± 150 mm.



Rys. 11.16.

Cięcie laserowe

1 – laser, 2 – wiązka, 3 – zwierciadło, 4 – soczewka, 5 – układ śledzący, 6 – dysza, 7 – obrabiany element, 8 – kierunek przesuwu elementu, 9 – strefa topienia, 10 – wyrzut gazu roboczego z usuwaniem z miejsca cięcia materiałem w postaci par i cieczy, 11 – urządzenie odciągowe, 12 – front erozji, 13 – gaz roboczy, 14 – powierzchnia nacięcia

Optymalną koncentrację wiązki, zapewniającą najmniejszą szerokość szczeliny podziału i duże prędkości cięcia uzyskuje się przy jednomodowej pracy lasera (TEM₀₀), a więc w warunkach kołowo-symetrycznego gaussowskiego rozkładu mocy. Ponieważ uzyskiwana prędkość cięcia jest funkcją gęstości mocy, o jakości cięcia w znacznym stopniu decyduje jakość ogniskowania. Soczewki o krótkich ogniskowych umożliwiają uzyskiwanie dużych gęstości mocy, lecz z uwagi na ich małą głębię ostrości, są stosowane do cięcia z dużymi prędkościami, zwłaszcza cienkich elementów. Konieczne jest przy tym utrzymywanie odległości soczewka–miejsce cięcia z odchyleniami nie przekraczającymi $0,2 \pm 0,5$ mm, co wymaga stosowania specjalnych układów sensorowych. Przy użyciu soczewek długoogniskowych uzyskuje się mniejsze gęstości mocy w ognisku, lecz przy dużej głębi ostrości i dlatego wykorzystuje się je przy cięciu grubych materiałów. Najczęściej ognisko lokalizuje się bezpośrednio na powierzchni materiału lub w niewielkiej od niej odległości.

W celu zwiększenia skuteczności promieniowania laserowego, cięcie odbywa się w obecności gazu aktywnego, zwykle tlenu, lub obojętnego (azot, argon, także powietrze), doprowadzanego koaksjalnie z dużą szybkością dyszami. Odległość dyszy od miejsc

ca cięcia wynosi ok. 1 mm i musi być z wielką precyzją utrzymywana na stałym poziomie [274]. Doprowadzany gaz chroni powierzchnie soczewek przed parami i produktami erozji powstającymi w procesie cięcia, usuwa je ze szczeliny podziału, utlenia materiał lub chroni brzegi szczeliny przed wpływem atmosfery schładzając je, a w przypadku cięcia materiałów łatwo palnych zabezpiecza je przed zapłonem. W przypadku stosowania tlenu uzyskuje się dodatkową energię cieplną, co umożliwia zmniejszenie mocy promieniowania laserowego nawet o kilkaset watów, a jednocześnie pozwala na zwiększenie o kilkadziesiąt procent szybkości cięcia, a także głębokości cięcia. Stosowane ciśnienia przy cięciu materiałów cienkościennych zawierają się w przedziale $0,3 \pm 0,4$ MPa.

Gazy obojętne, a zwłaszcza azot, zapewniają dużą gładkość powierzchni cięcia, eliminują jej utlenianie oraz ograniczają strefę wpływu termicznego. Stosowane w takim przypadku ciśnienia zawierają się w przedziale $0,9 \pm 1,5$ MPa. Takie wysokociśnieniowe cięcie laserowe stosuje się do stali nierdzewnej, narzędziowej, ocynkowanych blach stalowych, blach głęboko ciągnionych, aluminium, tytanu, miedzi oraz stopów na bazie niklu, przy grubości cięcia do 4 mm. Maksymalne wartości stosunku głębokości cięcia laserowego do szerokości szczeliny podziału ($0,1 \pm 0,7$ mm) mają się jak 100:1. Parametry cięcia laserowego niektórych materiałów zestawione są w tabl. 11.2.

Tablica 11.2. Parametry cięcia laserowego, wg [378], [401], [422], [602]

Materiał	Moc lasera	Grubość materiału	Prędkość cięcia
	W	mm	m/min
Tektura karbowana	400	8,0	5,0
Gips	300	9,0	0,5
Guma	300	5,0	0,5
Drewno	300	10,0	1,1
Tkanina wełniana	350	2 × 0,5	18,0
Skóra	200	3,0	0,6
PCV	500	4,0	3,2
PTFE	500	4,0	5,0
Azbestocement	500	5,0	1,2
Szkle kwarcowe	500	2,0	1,2
Stal St37	500	2,0	4,0
Stal St37	1200	2,0	6,5
Stal miękka	2000	3,0	5,0
Blacha stalowa ocynkowana	500	1,0	3,0
Aluminium	500	2,0	1,5
Nimonic 75	2000	1,0	7,9
Miedź	500	0,6	0,5
Tytan	1200	2,0	2,2

Z przedstawionego w tej tablicy zestawienia wynika, że laser używany jest do cięcia zarówno niemetali, jak i metali. Niemetale absorbują stosunkowo dobrze promieniowanie podczerwone, a więc emitowane przez lasery CO₂, a także Nd:YAG. Materiały

niemetalowe są też zwykle złymi przewodnikami ciepła i mają niskie temperatury parowania. Sprawia to, że energia promieniowania laserowego koncentrowana jest prawie wyłącznie w ognisku i materiał zostaje odparowany. W tej sytuacji uzyskiwane prędkości cięcia, np. laminatów o grubości 0,5 mm wzmocnionych włóknem szklanym, sięgają 40 m/min. Przy użyciu laserów o mocy kilku kilowatów można ciąć drewno o grubości nawet 75 mm. Spośród materiałów organicznych technologia ta ma duże znaczenie w obróbce wyrobów z papieru, skóry oraz tekstyliów naturalnych i syntetycznych. Jeśli chodzi o materiały organiczne, to nadaje się ona zwłaszcza do cięcia i nacinania szkła kwarcowego i ceramiki.

Z uwagi na gwałtowny spadek refleksyjności metali po przejściu w stan ciekły, laserowo można ciąć praktycznie wszystkie metale. Komercyjne urządzenia do cięcia laserowego umożliwiają wycinanie dowolnych kształtów w blachach stalowych o grubości do 10 mm [422]. W przypadku dobrych przewodników ciepła (Cu, Ag, Au i Al) konieczne jest jednak stosowanie laserów dużej mocy. Technika ta znalazła bardzo duże zastosowanie, zwłaszcza w przemyśle samochodowym, lotniczym, kosmicznym, nuklearnym (cięcie blach z Ti i Al) [401], [422]. Stosowana jest już i w innych przemysłach, a m.in. elektrotechnicznym w procesach obróbki blach elektrotechnicznych z dużą zawartością Si [413], w przemyśle odzieżowym, stoczniowym oraz elektronicznym [418].

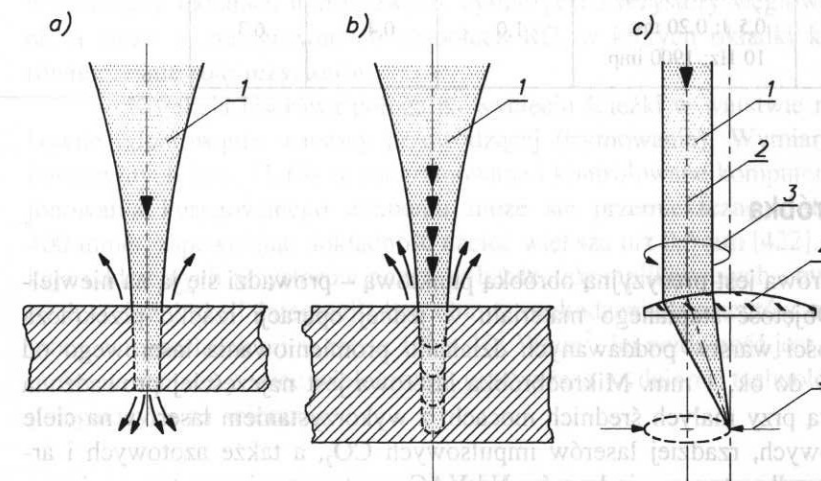
Nowym, bardzo interesującym obszarem aplikacji cięcia laserowego jest szybkie wykonywanie modeli prototypów maszyn, urządzeń i ich elementów składowych przy wspomaganium komputerowym (Rapid Prototyping). Jest to technika wykonywania modeli fizycznych trójwymiarowych na bazie cienkich elementów dwuwymiarowych wykrawanych laserowo w warunkach sterowania komputerowego i pakietowanych w struktury multiwarstwowe [535]. Używa się do tego celu tworzyw sztucznych, folii papierowych lub materiałów ceramicznych. Ostatnio dużą wagę przywiązuje się do metod wytwarzania gotowych części z metalu, a głównie przy wykorzystaniu proszków metalicznych poddawanych spiekaniu (stereolitografia laserowa). W przeciwieństwie do modeli poglądowych z innych materiałów, od modeli metalowych oczekuje się podobnych właściwości, zwłaszcza wytrzymałościowych, jak od detali wykonanych technikami tradycyjnymi [511].

11.2.3. Drażenie

Drażenie laserowe wymaga szczególnie dużej gęstości mocy ($\geq 10^7$ W/cm²), przy czasie ekspozycji $10^{-3} \div 10^{-5}$ s. Energia impulsów wynosi od ok. 10 mJ do ok. 20 J, a najczęściej 0,5 + 2 J przy częstotliwości maksymalnej rzędu kilkudziesięciu kiloherców, zwykle jednak zawartej w przedziale 1 + 10 Hz. Otwory mogą być drażone pojedynczymi impulsami laserowymi (metoda perforacyjna) lub ciągiem impulsów (metoda perkusyjna). Pierwsza z nich umożliwia wytwarzanie otworów o maksymalnej średnicy 0,25 mm i maksymalnej głębokości ok. 2 mm, druga o głębokości 10 mm przy średnicy 1 mm

[274]. Uzyskiwane otwory charakteryzują się maksymalną wartością stosunku głębokości do średnicy ok. 50. Można oczywiście wykonywać otwory o średnicach większych, tzw. metodą trepanacyjną, polegającą na wycinaniu zadanego konturu za pomocą wiązki impulsowej lub ciągłej (rys. 11.17) [422], [696]. Przy stosowaniu techniki wieloimpulsowej o małych energiach impulsów wykonuje się otwory z bardzo dużą dokładnością.

Drażarki pracują najczęściej z laserami Nd:YAG, CO₂ oraz ekscymerowymi, przy użyciu których można wykonywać otwory o średnicy nawet 1 μm. Podobnie jak w procesie cięcia laserowego, przy drażeniu otworów bywa także stosowany nadmuchiwanie gazem, co polepsza jakość otworów. Drażarki pod względem konstrukcyjnym wykazują wiele podobieństw do urządzeń do cięcia laserowego. Niektóre firmy wytwarzają zresztą urządzenia, które mogą być zamiennie używane do cięcia, drażenia i spawania [422].



Rys. 11.17. Drażenie laserowe, wg [696]: a) perforacyjne; b) perkusyjne; c) trepanacyjne
1 – wiązka laserowa, 2 – oś drażonego otworu, 3 – rotacja soczewki wokół osi otworu,
4 – soczewka, 5 – średnica drażonego otworu

Zalety drażenia laserowego uwiadcniają się szczególnie przy wykonywaniu otworów w materiałach twardych, takich jak diament, rubin, szafir, spieki i ceramika. Na przykład czas wykonania otworu w łożysku rubinowym jest krótszy kilkaset razy w porównaniu z czasem przy stosowaniu techniki tradycyjnej. Czas drażenia otworu o średnicy 0,1 mm w diamencie o grubości 1 mm nie przekracza 2 min i realizowany jest ciągiem ok. 600 impulsów o energii ok. 1 J. Dobrą jakość otrzymywanych otworów gwarantuje przede wszystkim praca lasera w modzie podstawowym. Uzyskiwane otwory mogą mieć zarówno kształt stożkowy, jak i walcowy o minimalnej zbieżności.

Wydatność metody jest bardzo duża (tabl. 11.3). Spośród licznych zastosowań drażarek laserowych wymienić należy m.in.: wykonywanie otworów w przeciagadłach diamentowych, łożyskach, dyszach, igłach chirurgicznych, we wtryskiwaczach silników Diesla, przepustach ceramicznych, w półprzewodnikach, w łopatkach turbin.

Tablica 11.3. Parametry drążenia laserowego, wg [422], [602]

Materiał	Parametry wiązki	Głębokość otworu	Średnica otworu	Czas drążenia
		mm	mm	s
Stal miękka	350 W	1,2	0,5	0,4
Stal nierdzewna	350 W	1,2	0,8	0,6
Ceramika	450 W	0,8	1,0	1,0
Żywica fenolowa	450 W	1,0	1,0	1,0
Kwarc	50 W	0,4	0,2	0,06
Ceramika alundowa	230 W	0,6	0,25	0,025
Diament	0,5 J; 0,15 ms; 10 Hz; 600 imp.	1,6	0,1	1,0
Diament	0,5 J; 0,20 ms; 10 Hz; 1900 imp.	1,0	0,4	6,3

11.2.4. Mikroobróbka

Mikroobróbka laserowa jest precyzyjną obróbką punktową – prowadzi się ją na niewielkich obszarach. Objętość stopianego materiału w jednej operacji rzadko przekracza 1 mm^3 przy grubości warstw poddawanych działaniu promieniowania laserowego od kilku mikrometrów do ok. 1 mm. Mikroobróbka laserowa jest najczęściej prowadzona techniką impulsową przy małych średnich mocach, z wykorzystaniem laserów na ciele stałym, ekscymerowych, rzadziej laserów impulsowych CO_2 , a także azotowych i argonowych. W przypadku stosowania laserów Nd:YAG przetwarza się często promieniowanie na drugą harmoniczną ($0,53 \mu\text{m}$), a uzyskiwane dwukrotne zmniejszenie średnicy plamki pozwala na znaczne podwyższenie precyzji obróbki.

Urządzenie do mikroobróbki laserowej składa się: z lasera, ogniskującego układu optycznego, często zintegrowanego z optycznym układem obserwacji procesu, oraz z elementów wyposażeniowych obejmujących układy chłodzenia, zasilania oraz pomiarowo-kontrolne. Głowica laserowa jest zwykle sprzężona ze standardowym mikroskopem stereoskopowym, a promieniowanie jest przesyłane do miejsca obróbki światłowodem z zawierającą układ soczewek końcówką, pozycjonowaną prawie wyłącznie automatycznie.

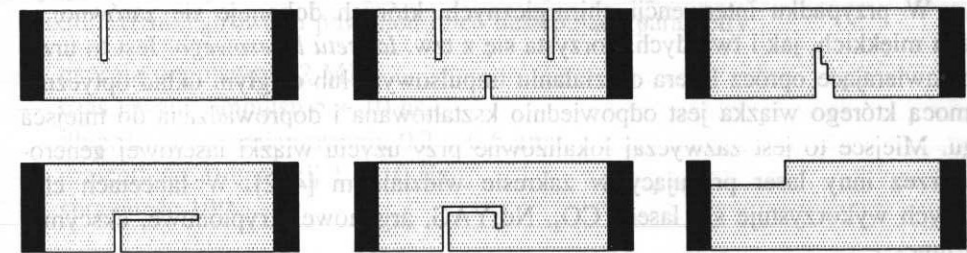
Najważniejsze zastosowania mikroobróbki laserowej to:

- korekcja rezystancji rezystorów grubo- i cienkowarstwowych, cylindrycznych oraz w zintegrowanych obwodach RC,
- nacinanie płytek półprzewodnikowych i ceramicznych,
- wykonywanie masek dla układów scalonych i usuwanie ich uszkodzeń,
- korekcja pojemności kondensatorów ceramicznych,

- korekcja filtrów kwarcowych,
- naporowywanie cienkich warstw,
- znakowanie alfanumeryczne i paskowe.

Z przedstawionego wykazu wynika, że mikroobróbka laserowa ma znaczącą pozycję w technologii elektronicznej. Najbardziej charakterystyczne spośród wymienionych zastosowań są techniki korekcji rezystorów. Potrzeba takich operacji wynika z niedoskonałości współczesnych technologii nanoszenia cienkich warstw, które umożliwiają wytwarzanie rezystorów o wartościach odbiegających od nominalnych o kilka, a nawet kilkadziesiąt procent, a tymczasem niejednokrotnie wymaga się, by odchyłki takie były rzędu $10^{-2} \div 10^{-3}\%$ [422]. Korekcji poddawane są rezystory cienko- i grubowarstwowe w scalonych układach hybrydowych, cylindryczne rezystory węglowe oraz metalizowane, a także w zintegrowanych zespołach RC, w których okładki kondensatora pełnią równocześnie rolę rezystorów.

Korekcja laserowa polega na wycięciu ścieżki w warstwie rezystora przez całkowite odparowanie warstwy przewodzącej (trymowanie). Wymiary i kształt ścieżek korekcyjnych (rys. 11.18) są programowane i kontrolowane komputerowo. Układ pozycjonowania korygowanego elementu może się przemieszczać z dużą prędkością do 400 mm/s , zapewniając dokładność nacięć większą niż $0,5 \mu\text{m}$ [422]. Możliwa jest korekcja oddzielnych rezystorów nawet w bardzo skomplikowanych obwodach elektronicznych o dużej skali integracji, bez obawy uszkodzenia elementów sąsiednich. Gęstości mocy w tej technologii są rzędu $10^6 \div 10^7 \text{ W/cm}^2$. Jej wydajność jest rzędu kiluset rezystorów na minutę, a więc wielokrotnie przewyższa wydajność technologii mechanicznych polegających na ścieraniu.



Rys. 11.18. Przykłady nacięć stosowanych przy korekcji rezystancji rezystorów w scalonych układach hybrydowych

Ostatnie z wymienionych zastosowań (znakowanie) jest przykładem wyjątkowo efektywnego sposobu cechowania podzespołów i elementów elektroniki, detali mechanicznych, a nawet mięsa. Polega to na odparowaniu z powierzchni znakowanego detalu określonego wzoru za pomocą wiązki laserowej, w torze której umieszczona jest maska, lub przez zaprogramowanie jej ruchu zgodnie z nanoszonym znakiem. Metoda ta stosowana jest m.in. do znakowania płytek krzemowych, ferrytowych elementów głowic

magnetycznych, nanoszenia skal i napisów na suwmiarkach i śrubach mikrometrycznych, znaków na pierścieniach, tulejach, łożyskach, wiertłach, kopertach zegarków, wyrobach jubilerskich [422].

11.2.5. Aplikacje medyczne

Metoda laserowa nie jest oczywiście pierwszą z omawianych metod, które pozwalają na bezpośrednią generację ciepła w organizmie ludzkim. Od dawna np. w diatermii stosuje się nagrzewanie promiennikowe i pojemnościowe, lecz termiczne aplikacje metody laserowej są już obecnie znacznie bardziej rozległe i nadal intensywnie rozwijane.

Z rysunku 11.12 wynika, że jeśli pominąć kwestię zapłonu w syntezie termojądrowej, to zakres gęstości mocy wiązki i czasów ekspozycji w zastosowaniach medycznych jest nawet większy niż w technologicznych. Medycynę uważa się za drugi pod względem wielkości rynek sprzętu laserowego, charakteryzujący się bardzo zróżnicowanym rodzajem aparatury, wśród której są oczywiście także urządzenia laserowe do zastosowań nietermicznych.

Zainteresowanie termicznymi możliwościami laserów w medycynie znajduje swoje uzasadnienie z następujących trzech powodów: promieniowanie laserowe umożliwia koagulację, czyli ścinanie (stężanie) substancji tkankowej, jej przecinanie oraz odparowywanie w sposób prawie bezkrwawy i sterylny, ze względu na bezdotykowość metody. Koagulację, cięcie i odparowywanie można realizować przy użyciu tego samego urządzenia, lecz przy różnych parametrach energetycznych wiązki i to zarówno w odniesieniu do tkanek zewnętrznych, jak i wewnętrznych, do których promieniowanie doprowadzane jest za pomocą światłowodów.

W przypadku interwencji chirurgicznych, których dokonuje się zarówno na tkankach miękkich, jak i twardych, korzysta się z tzw. *lancetu laserowego*. Jest to urządzenie zawierające oprócz lasera o działaniu impulsowym lub ciągłym układ optyczny, za pomocą którego wiązka jest odpowiednio kształtowana i doprowadzana do miejsca zabiegu. Miejsce to jest zazwyczaj lokalizowane przy użyciu wiązki laserowej generowanej przez inny laser pracujący w zakresie widzialnym [422]. W lancetach chirurgicznych wykorzystuje się lasery CO₂, Nd:YAG, argonowe, kryptonowe, ekscymerowe i inne.

Drugim co do ważności obszarem zastosowań termicznych laserów jest okulistyka. Wykorzystuje się je w chirurgii oka pod postacią tzw. koagulatorów laserowych w leczeniu odwarstwień siatkówki, niektórych postaci zaćmy, schorzeń naczyńiowych, zapalnych i zwyrodnieniowych. W tym obszarze szczególne znaczenie mają lasery ekscymerowe i Nd:YAG. Pewne nadzieje wiąże się z laserami holmowymi w terapii jaskry [521].

Pozytywne wyniki uzyskuje się także w stomatologii do likwidacji chorej tkanki zębowej oraz szybkiego i bezbolesnego drążenia zębów.

11.2.6. Inne zastosowania laserów

Spośród nie przedstawionych zastosowań laserów do celów termicznych, na pierwszym miejscu należy wymienić spawanie [378], [422], [602], [646]. Spawalnictwo występuje jako odrębny dział techniki i nie jest zaliczane do elektrotermii. Mimo to niektórzy autorzy włączają zwyczajowo do elektrotermii spawanie elektronowe i laserowe. Należy sądzić, że wynika to z wielu podobieństw urządzeń spawalniczych tych dwóch kategorii do wykorzystywanych zwłaszcza w technologiach cięcia i drążenia, a nawet topienia.

Wyniki badań nad syntezą termojądrową umożliwiają kolejne bardzo interesujące zastosowanie polegające na nagrzewaniu i kompresji plazmy. Realizacja syntezy termojądrowej wymaga pokonania olbrzymich sił odpychania elektrostatycznego, działających między naładowanymi jądrami, czyli tzw. bariery potencjału kulombowskiego. W przypadku jąder deuteru i trytu wynosi ona ok. 380 keV. Wymaga to rozpędzenia jąder do prędkości 5000 ÷ 6000 km/s lub podgrzania gazu stanowiącego mieszaninę deuteru i trytu do 10⁸ K, w której następuje oddzielenie elektronów od jąder, a więc powstanie gorącej plazmy.

Średnia energia ruchu cieplnego jąder osiąga wtedy wartości wystarczające do pokonania odpychającego działania sił elektrostatycznych. Taka gorąca plazma musi istnieć przy tym dostatecznie długo, co wynika z tzw. kryterium Lawsona

$$n\tau \geq 2 \cdot 10^{14} \quad (11.15)$$

w którym $n\tau$ – iloczyn koncentracji i czasu życia plazmy deuterowo-trytowej o temperaturze ok. 10⁸ K, wyrażony w s · cm⁻³.

Otóż jedną z metod stosowaną do tego celu jest nagrzewanie laserowe, które ma na celu wyłącznie zainicjowanie reakcji termojądrowej. Według obecnego stanu wiedzy laser dla reaktora termojądrowego powinien mieć następujące parametry:

- energia impulsu ok. 2 MJ,
- czas trwania impulsu 5 ÷ 10 ns,
- długość fali promieniowania 0,2 ÷ 0,6 μm,
- częstotliwość repetycji 1 ÷ 10 Hz,
- sprawność 10%.

Są już jednak rozważane koncepcje syntezy termojądrowej pozwalające na znaczne zmniejszenie energii lasera niezbędnej do zapłonu paliwa, a parametry energetyczne aktualnie uruchamianych laserów (NOVA, PETAWAT) są bliskie wymaganym.

Spośród wielu innych zastosowań należy jeszcze wymienić:

- wytwarzanie przez plazmę laserową promieniowania rentgenowskiego,
- wyważanie elementów obrotowych i eliminacja mimośrodowości,
- czyszczenie rzeźb marmurowych i kamiennych,
- nakładanie powłok ochronnych,
- niektóre zastosowania militarne.