

10. NAGRZEWANIA POJEMNOŚCIOWE I NAGRZEWANIA INDUKCYJNE (ćwiczenie pokazowe)

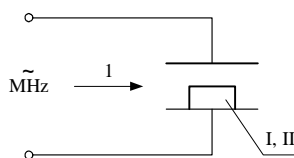
10.1. Cel ćwiczenia:

- zapoznanie się z metodami i urządzeniami elektrotermicznymi nagrzewania pojemnościowego i indukcyjnego,
- zapoznanie się ze zjawiskami elektromagnetycznymi mającymi wpływ na rozkłady gęstości objętościowych mocy wydzielanych we wsadach nagrzewanych pojemnościowo i indukcyjnie,
- przeprowadzenie przykładowych nagrzewania wsadów w urządzeniach elektrotermicznych pojemnościowych i indukcyjnych.

10.2. Wiadomości podstawowe

10.2.1. Nagrzewanie pojemnościowe

Metoda pojemnościowa (dielektryczna) polega na wytworzeniu ciepła na skutek przepływu prądu polaryzacji (przesunięcia) (i ewentualnie prądu przewodzenia) przez ciało stałe lub ciecz, sprężone pojemnościowo z obwodem przez umieszczenie ich w kondensatorze będącym częścią składową obwodu, wzdłuż którego przenosi się energia pola elektromagnetycznego przemiennego o częstotliwości od kilku do kilkudziesięciu megaherców (rys. 10.1).



Rys. 10.1. Przemiany energii w metodzie pojemnościowej – nagrzewanie bezpośrednie; I – przetwornik elektrotermiczny, II – wsad, I – energia elektromagnetyczna

Atrakcyjność metody pojemnościowej (podobnie jak metody mikrofalowej) wynika przede wszystkim ze stosowanego w niej bezpośredniego i objętościowego sposobu nagrzewania wsadów słabo przewodzących ciepło (izolatorów ciepła). Pozwala to na uzyskanie dużej intensywności nagrzewania wsadów, a w związku z tym krótkiego lub bardzo krótkiego czasu ich nagrzania skrośnego przy dużej równomierności nagrzewania. Ponadto, w przypadku wsadów elektromagnetycznie niejednorodnych, wykorzystuje się często w praktyce możliwość ich nagrzewania selektywnego (miejscowego: punktowego, warstwowego).

Zaznaczyć należy, że nie wszystkie dielektryki można nagrzewać w sposób efektywny, korzystając z metody nagrzewania pojemnościowego (lub mikrofalowego). Dotyczy to grupy dielektryków stałych, dla których wartości stratności dielektrycznej $\epsilon''_{rd} = \epsilon'_{rd} \operatorname{tg}\delta_{ed}$ są mniejsze lub dużo mniejsze niż kilka tysięcznych (np. teflon, polietylen, steatyt, kalit) (zob. (10.1) i (10.2)).

Moc urządzeń do nagrzewania pojemnościowego zawiera się w granicach od kilkuset watów do kilkuset kilowatów, zaś ich sprawność elektrotermiczna (i całkowita), wynikająca z iloczynu sprawności cieplnej η_c i małej sprawności elektrycznej η_e , nie przekracza zwykle wartości 0,5. Niewielka sprawność elektryczna jest spowodowana koniecznością stosowania generatorów lampowych – konwersujących energię sieciową w energię elektromagnetyczną o częstotliwości rzędu megaherców – w których sumaryczne ilości energii traconych w poszczególnych częściach (np. lampy elektronowe, prostowniki, sterowniki, układy dopasowujące, transformatory podwyższające, obniżające, żarzeniowe itp.) są znaczne.

Wydzielanie się ciepła w elementarnych objętościach izotropowego dielektryka lub półprzewodnika, poddanych działaniu sinusoidalnie przemiennego pola elektrycznego, opisuje następujący wzór na gęstość objętościową mocy cieplnej:

$$p_e = \frac{dP_c}{dV} = \omega \epsilon_0 \epsilon'_{rd} \operatorname{tg}\delta_{ed} E^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon''_{rd} E^2 \quad (10.1)$$

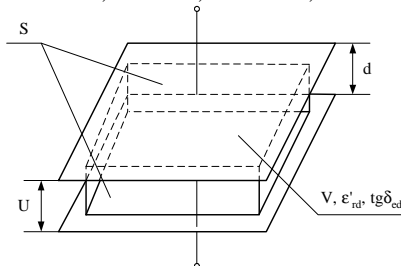
gdzie: ω – pulsacja pola elektrycznego ($\omega = 2\pi f$), ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni ($\epsilon_0 = 8,856 \cdot 10^{-12}$ A·s/V·m), ϵ'_{rd} – składowa rzeczywista względnej przenikalności dielektrycznej, $\operatorname{tg}\delta_{ed}$ – tangens kąta strat dielektrycznych ($\operatorname{tg}\delta_{ed} = \epsilon''_{rd} / \epsilon'_{rd}$), E – wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego ($E = E_m / \sqrt{2}$), ϵ''_{rd} – współczynnik strat dielektrycznych (składowa urojona względnej przenikalności dielektrycznej, stratność dielektryczna), związany z wydzielaniem się ciepła na skutek przepływu składowych czynnych gęstości prądu

przesunięcia (polaryzacji) i prądu przewodzenia ($\epsilon''_{rd} = \epsilon'_{rd} \operatorname{tg} \delta_{ed}$). Wartości ϵ'_{rd} , ϵ''_{rd} i $\operatorname{tg} \delta_{ed}$ są funkcjami wartości pulsacji ω pola elektrycznego i temperatury t nagrzewanego wsadu.

Dla układu makroskopowego, jakim jest wsad wypełniający przestrzeń płaskorównoległego kondensatora grzejnego, przy założeniu jednorodności wsadu i równomierności pola elektrycznego ($\epsilon'_{rd}, \operatorname{tg} \delta_{ed}, E \neq f(x, y, z)$), moc cieplna P_e wydzielona we wsadzie wyrazi się wzorem (zob. (10.2)) (rys. 10.2):

$$P_e = \int_V p_e dV = 5,56 \cdot 10^{-11} f U^2 S \epsilon'_{rd} \operatorname{tg} \delta_{ed} = 5,56 \cdot 10^{-11} f \left(\frac{U}{d} \right)^2 V \epsilon'_{rd} \operatorname{tg} \delta_{ed} \quad (10.2)$$

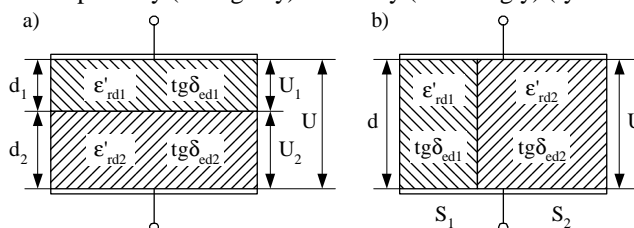
gdzie: P_e jest wyrażona w W, f – w Hz, S – w m^2 , d – w m, V – w m^3 , U – w V.



Rys. 10.2. Prostopadłościenny wsad w płaskorównoległościennym kondensatorze grzejnym bez szczeliny powietrznej

Granice zwiększania natężenia pola elektrycznego $E = U/d$ we wsadzie – w celu zwiększenia wartości (gęstości) mocy wydzielanej we wsadzie – stanowi jego wytrzymałość dielektryczna, której wartości zawierają się w bardzo szerokich granicach i której określenie jest trudne i niejednoznaczne. Przebiecia skrośne dielektryka zdarzają się rzadko, natomiast częstsze są przebiecia warstw powietrza w kondensatorze grzejnym oraz wyładowania ślizgowe na powierzchni dielektryka lub wyładowania koronowe na krawędziach elektrod. Wartości wytrzymałości dielektrycznej zależą od rodzaju dielektryka i konstrukcji elektrod, a maleją np. ze wzrostem częstotliwości pola, czasu działania napięcia, grubości, wilgotności lub stopnia nagrzania dielektryka. Wszystko to powoduje, że bezpieczne dla wsadów, obsługi i urządzeń grzejnych (możliwość zapalenia się wsadu) natężenia pola dobiera się znacznie poniżej granicy określonej wytrzymałością dielektryczną różnych miejsc przestrzeni międzyelektrodowej. Natężenie pola występujące w kondensatorach grzejnych urządzeń przemysłowych wynosi zwykle od kilkuset do kilku (dwóch) tysięcy V/cm. Napięcie wyjściowe generatorów reguluje się za pomocą autotransformatorów lub sterowników tyrystorowych, zmieniających napięcie anodowe lamp generacyjnych, natomiast obniżenie natężenia pól występujących w nagrzewanych wsadach można uzyskać dodatkowo przez wprowadzenie posobnej szczeliny powietrznej w kondensatorze grzejnym (odsunięcie elektrody od wsadu) (zob. (10.3)).

W przypadku zastąpienia wsadu jednorodnego wsadem niejednorodnym (wartości ϵ'_{rd} i $\operatorname{tg} \delta_{ed}$ są funkcją położenia) rozkłady E i p_e przestają być równomierne, a charakter nierównomiernego ich rozkładu zależy od konfiguracji niejednorodności struktury wsadu w kondensatorze grzejnym. Istnieją dwa skrajne przypadki rozkładu niejednorodności struktury wsadu: posobny (szeregowy) i oboczny (równoległy) (rys. 10.3).



Rys. 10.3. Wsad o uwarstwieniu: a) posobnym; b) obocznym

Dla posobnego ułożenia niejednorodności można wyprowadzić wzory (rys. 10.3a):

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon'_{rd2} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{ed2}}}{\epsilon'_{rd1} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{ed1}}} \approx \frac{\epsilon'_{rd2}}{\epsilon'_{rd1}} \quad (10.3)$$

$$\frac{p_{e1}}{p_{e2}} = \frac{\epsilon'_{rd2} \operatorname{tg} \delta_{ed1} (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{ed2})}{\epsilon'_{rd1} \operatorname{tg} \delta_{ed2} (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{ed1})} \approx \frac{\epsilon'_{rd2} \operatorname{tg} \delta_{ed1}}{\epsilon'_{rd1} \operatorname{tg} \delta_{ed2}} \quad (10.4)$$

gdzie: $E_1 = U_1/d_1$ oraz $E_2 = U_2/d_2$.

Ze wzorów powyższych wynika, że większe natężenie pola elektrycznego wystąpi w warstwie o mniejszej wartości ϵ'_{rd} , a intensywniej nagrzewać się będzie warstwa wsadu o większej wartości ilorazu $\text{tg}\delta_{ed}/\epsilon'_{rd}$.

W przypadku ułożenia obocznego otrzymuje się (rys. 10.3b):

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{\epsilon'_{rd1} \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta_{ed1}}}{\epsilon'_{rd2} \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta_{ed2}}} \approx \frac{\epsilon'_{rd1}}{\epsilon'_{rd2}} \quad (10.5)$$

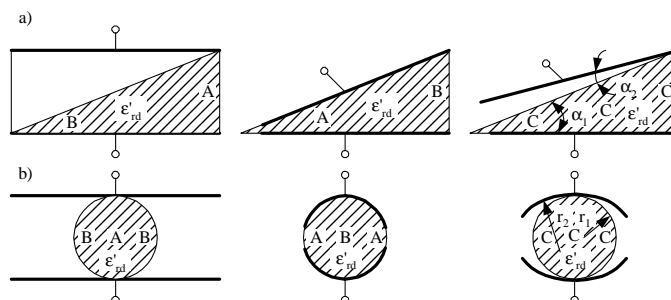
$$\frac{P_{e1}}{P_{e2}} \approx \frac{\epsilon'_{rd1} \text{tg}\delta_{ed1}}{\epsilon'_{rd2} \text{tg}\delta_{ed2}} \quad (10.6)$$

gdzie gęstości prądów: $J_1 = I_1/S_1$ oraz $J_2 = I_2/S_2$.

Ze wzorów (10.5) i (10.6) wynika, że większa gęstość prądu wystąpi w warstwie o większej wartości ϵ'_{rd} , a intensywniej nagrzewać się będzie warstwa wsadu o większej stratności dielektrycznej $\epsilon''_{rd} = \epsilon'_{rd} \text{tg}\delta_{ed}$.

Występowanie niejednorodności w różnych wsadach poddawanych nagrzewaniu pojemnościowemu jest świadomie wykorzystywane do selektywnego nagrzewania poszczególnych miejsc wsadu (np.: nagrzewanie warstw kleju w przypadku łączenia materiałów, niszczenie (dezynsekcja) owadów w zbożach i przetworach zbożowych). Natomiast celowe tworzenie nierównomierności pola w przestrzeni grzejnej (międzyelektrodowej), wypełnionej częściowo wsadem, a częściowo powietrzem, służy do kształtowania równomierności natężenia pola elektrycznego w nieprostokątnym wsadzie jednorodnym (zob. np. rys. 10.4) lub do zmniejszenia mocy cieplnej wydzielanej we wsadzie płaskorównoległościennym na skutek odsunięcia elektrod i utworzenia przerwy powietrznej w przestrzeni międzyelektrodowej.

Gdy wsad jest izotropowy i jednorodny, wówczas natężenie pola, a co za tym idzie, i gęstość objętościowa mocy, mogą być nierównomiernie rozłożone we wsadzie na skutek niedopasowania kształtu elektrod do kształtu wsadu (zob. np. rys. 10.4) oraz na skutek występowania w nim fal stojących i tłumienia fali elektromagnetycznej. Chęć wyeliminowania nierównomiernego nagrzewania się wielkopowierzchniowych wsadów na skutek powstawania w nich fal stojących powoduje konieczność albo zmniejszenia częstotliwości generatora, albo zwiększenia liczby punktów zasilania elektrod.

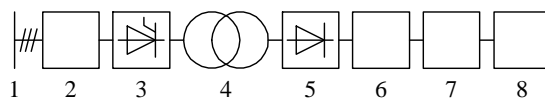


Rys. 10.4. Rozkłady gęstości p_e mocy grzejnej: a) wsad klinowy, płaskie elektrody; b) wsad walcowy, elektrody o różnych promieniach ugięcia; A – przekroje o większej wartości p_e , B – przekroje o mniejszej wartości p_e , C – przekroje o równej wartości p_e

Ze względu na częstotliwość roboczą (rzędu kilku do kilkudziesięciu megaherców) urządzeń do nagrzewania pojemnościowego oraz ich stosunkowo dużą moc (od setek watów do setek kilowatów) do zasilania pojemnościowych urządzeń grzejnych stosuje się wyłącznie lampowe (triodowe) generatory mocy lub lampowe rezonansowe wzmacniacze mocy. Rezonansowe wzmacniacze mocy (tzw. generatory obcowzbudne), stosowane są – ze względu na wyższą cenę i skomplikowaną budowę – o wiele rzadziej niż generatory mocy (tzw. generatory samowzbudne).

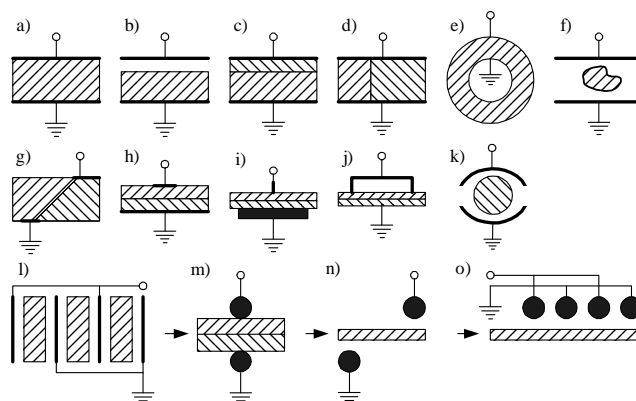
Generatory mocy stosowane w grzejnictwie pojemnościowym, różniące się od antenowych generatorów nadawczych eksploatacyjną zmiennością impedancji obciążenia – spowodowaną głównie zmianami pojemności kondensatora grzejnego, wywołanymi zmianami jego geometrii czy zmiennością temperaturą wartości ϵ'_{rd} wsadu – muszą spełniać pewne specyficzne wymagania energetyczne (sprawnościowe) i częstotliwościowe (kompatybilność elektromagnetyczna). Ze względu na możliwe zakłócenia pracy urządzeń elektronicznych (lub ich części), wydzielono cztery ściśle określone pasma częstotliwości, zarezerwowane dla pojemnościowych urządzeń grzejnych. Pasmami tymi są: 13,560 MHz (13,553 ÷ 13,567) MHz, 27,120 MHz (26,957 ÷ 27,283) MHz, 40,680 MHz (40,660 ÷ 40,700) MHz i (81,360 MHz (80,546 ÷ 82,174) MHz).

Schemat blokowy samowzbudnego generatora triodowego dużej mocy do nagrzewania pojemnościowego przedstawiono na rysunku 10.5.



Rys. 10.5. Schemat blokowy obwodu głównego samowzbudnego generatora triodowego dużej mocy do nagrzewania pojemnościowego: 1 – sieć zasilająca średniego napięcia, 2 – transformator obniżający oraz dławiki i kondensatory filtra przeciwzakłóceńowego, 3 – sterownik tyrystorowy, 4 – transformator podwyższający, 5 – prostownik, 6 – filtr dolnoprzepustowy, 7 – lampa z układem sprzężenia zwrotnego, 8 – obwód drgający (z kondensatorem grzejnym) wraz z układem dopasowującym

Kondensatory grzejne wraz ze wsadami tworzą pojemnościowe układy grzejne. Kształty kondensatorów grzejnych i ich wymiary zależą od rodzajów i kształtów wsadu oraz od rodzaju i przebiegu procesów technologicznych. Przyjmując różne kryteria podziału, można np. wyróżnić następujące rodzaje pojemnościowych układów grzejnych: dwu- lub wieloelektrodowe, do nagrzewania selektywnego lub objętościowego wsadu, ze szczeliną powietrzną lub bez, z ruchomymi lub stacjonarnymi elektrodami, z przemieszczającym się lub stacjonarnym wsadem, z elektrodami: płaskorównoległościennymi, prętowymi, rolkowymi lub dopasowanymi do kształtu wsadu (rys. 10.6).



Rys. 10.6. Pojemnościowe układy grzejne: a) płaskorównoległościenny; b) płaskorównoległościenny ze szczeliną; c) płaskorównoległościenny posobny; d) płaskorównoległościenny oboczny; e) cylindryczny rurowy; f) płaskorównoległościenny ze wsadem asymetrycznym; g) płaskorównoległościenny z przesuniętymi elektrodami; h) płaskorównoległościenny asymetryczny; i) płaskorównoległościenny z elektrodą punktową lub liniową; j) płaskorównoległościenny z elektrodą kubkową; k) niepłaskorównoległościenny ze wsadem cylindrycznym lub kulistym; l) płaskorównoległościenny czteroelektrodowy; m) rolkowy przelotowy; n) prętowy przelotowy dwustronny; o) prętowy przelotowy jednostronny

Nagrzewanie pojemnościowe znalazło najszersze zastosowanie w obróbce cieplnej termoplastycznych i termoutwardzalnych tworzyw sztucznych składających się z polimerów syntetycznych, w procesach klejenia drewna i w procesach suszenia różnych wsadów dielektrycznych.

Wśród tworzyw termoplastycznych – które pod wpływem podwyższonej temperatury stają się miękkie lub półpłynne, a których właściwości po ostygnięciu (od temperatury niższej niż pewna temperatura krytyczna) powracają do stanu pierwotnego – nagrzewaniu pojemnościowemu poddają się tylko te, które mają wystarczająco dużą (większą niż kilka setnych części) wartość stratności dielektrycznej ϵ''_{rd} . Są to przede wszystkim tworzywa zbudowane z polimerów polarnych, tworzących układy trwałych dipoli elektrycznych (np. polichlorek winylu w różnych odmianach). Z procesów obróbki cieplnej tworzyw termoplastycznych (zgrzewanie, nagrzewanie przed gięciem, prasowanie, wtryskiwanie) najbardziej rozpowszechnione jest zgrzewanie, wykonywane w liniowych, punktowych, kubkowych lub przelotowych układach grzejnych (zob. rys. 10.6), a polegające na jednoczesnym nagrzewaniu i międzyelektrodowym dociskaniu łączonych materiałów. Ze względu na nadzwyczaj korzystny i sterowalny rozkład temperatury w przekroju łączonych materiałów (wysoka temperatura wnętrza i kondukcyjne odprowadzenie ciepła z powierzchni przez metalowe elektrody lub metalowe elektrody z izolującymi cieplnie warstwami małostratnych dielektryków), możliwe jest bardzo szybkie (ułamki sekundy, kilka sekund) zgrzewanie materiałów o równych lub różnych grubościach, zawierających się w granicach od dziesiątych części milimetra do przeszło milimetra, z wyeliminowaniem ich przywierania do elektrod.

Nagrzewanie pojemnościowe w procesach klejenia znalazło zastosowanie głównie w przemyśle drzewnym i meblarskim. Stosuje się je np. przy produkcji płyt wiórowych i wysokogatunkowej sklejk oraz do łączenia desek czy wytwarzania elementów mebli. Łączenie elementów z zastosowaniem klejów naturalnych oraz termoutwardzalnych klejów syntetycznych, polimeryzujących w temperaturze pokojowej, wymaga czasu rzędu kilku godzin. Proces ten

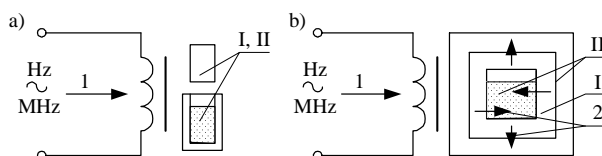
ulega kilkudziesięciokrotnemu skróceniu, jeżeli zastosuje się termoutwardzalne kleje (żywice) syntetyczne, szybko polimeryzujące w podwyższonej temperaturze. Szybki wzrost temperatury cienkich warstw kleju znajdujących się pomiędzy łączonymi materiałami jest możliwy jedynie przy zastosowaniu nagrzewania pojemnościowego w odpowiednich układach grzejnych (zob. np. rys. 10.6g, m, f, c, d). Ze względów energetycznych – przy większych wartościach $\text{tg}\delta_{\text{ed}}$ i znacząco większych wartościach ϵ'_{rd} klejów niż łączonych materiałów – korzystne jest stosowanie wszelkich układów obocznego nagrzewania wsadów. Niemniej jednak pewne procesy technologiczne (np. wytwarzanie sklejki) wymagają stosowania układów do nagrzewania posobnego warstw kleju i drewna.

We wszelkich procesach suszenia materiałów z zastosowaniem – zamiast nagrzewania powierzchniowego – nagrzewania pojemnościowego (objętościowego) proces usuwania wilgoci ulega silnemu przyspieszeniu. Jest to związane z korzystnym i identycznym zwrotem gradientu temperatury i wilgotności w nagrzewanym wsadzie, a także z selektywną maksymalizacją gęstości objętościowej mocy w miejscach najbardziej wilgotnych (o największej stratności dielektrycznej ϵ'_{rd}). Szczególnie korzystne jest stosowanie nagrzewania pojemnościowego w suszeniu wsadów do kontrolowanej, a ściśle określonej wilgotności, wsadów rozwarstwiających się pod wpływem nadmiernego kurczenia się szybciej wysychających warstw przypowierzchniowych (np. drewno suszone w sposób naturalny) oraz wsadów o łamliwych strukturach (np. tytoń) lub o dużych przekrojach (np. belki drewniane, rdzenie formierskie, nici nawinięte na szpule).

Nagrzewanie pojemnościowe znalazło zastosowanie w wielu innych, oprócz wymienionych powyżej, procesach technologicznych, takich jak np.: topienie, hartowanie i zgrzewanie szkła, rozmrażanie, pasteryzacja, sterylizacja i dezynsekcja produktów spożywczych, wulkanizacja gum i kauczuków, kontrolowane nagrzewanie wybranych części organizmu ludzkiego (diatermia) i inne.

10.2.2. Nagrzewanie indukcyjne

Metoda indukcyjna polega na wytworzeniu ciepła na skutek przepływu indukowanych prądów przewodzenia (prądów wirowych) przez ciało stałe lub ciecz sprzężone indukcyjnie z obwodem, wzdłuż którego przynosi się energia pola elektromagnetycznego przemiennego o częstotliwości od kilkunastu herców do kilkudziesięciu megaherców (rys. 10.7).



Rys. 10.7. Przemiany energii w metodzie indukcyjnej: a) nagrzewanie bezpośrednie; b) nagrzewanie pośrednie; I – przetwornik elektrotermiczny, II – wsad, 1 – energia elektromagnetyczna, 2 – ciepło

Metoda nagrzewania indukcyjnego bezpośredniego (zob. rys. 10.7a) – wraz z metodą oporową pośrednią – należy do najbardziej rozpowszechnionych w przemśle metod elektrotermicznych. Jest stosowana przede wszystkim w przemyśle hutniczym i odlewniczym w procesach topienia, podgrzewania i przetrzymywania metali w stanie ciekłym, a także w przemyśle maszynowym, do obróbki cieplnej i przeróbki plastycznej różnorodnych wsadów metalowych. W elektrotermii bytowej a także w incydentalnych przypadkach w elektrotermii przemysłowej wykorzystywana jest metoda indukcyjna pośrednia (zob. rys. 10.7b), służąca do nagrzewania wsadów elektrycznie nieprzewodzących (np. wody lub innych cieczy) lub – z podwyższoną sprawnością – wsadów o bardzo dużej konduktywności.

W nagrzewaniu indukcyjnym wykorzystuje się zjawisko indukcji elektromagnetycznej, polegające na indukowaniu się w dowolnym obwodzie zamkniętym – umieszczonym w zmiennym w czasie polu magnetycznym – siły elektromotorycznej o wartości proporcjonalnej do prędkości zmian i wartości strumienia magnetycznego obejmującego ten obwód. Jeżeli obwód utworzony jest z przewodnika lub z półprzewodnika – w którym występują elektrony (dziury) lub jony swobodne – to pod wpływem siły elektromotorycznej popłynie w nim prąd przewodzenia. W ośrodkach trójwymiarowych występuje wiele obwodów zamkniętych o wektorach natężenia pól elektrycznych opisanych II równaniem Maxwella, pod wpływem których, w przypadku ośrodków przewodzących lub półprzewodzących, tworzy się pole indukowanych prądów wirowych o określonym rozkładzie wektorów gęstości prądów w każdym jego miejscu. Opis matematyczny przemian elektrotermicznych zachodzących w elementarnych objętościach dV ośrodka o konduktywnościach γ (rezystywnościach ρ), w których pod wpływem wirowych natężeń pól o wartościach skutecznych równych $E_{\text{sk(wir)}}$ „płyną” wirowe prądy przewodzenia o gęstościach $J_{\text{sk(wir)}}$, przedstawia wzór na gęstość objętościową p_e mocy P („polowe” prawo Joule’a) równy:

$$p_e = \frac{dP}{dV} = \gamma E_{\text{sk(wir)}}^2 = \rho J_{\text{sk(wir)}}^2 \quad (10.7)$$

Zgodnie z powyższą definicją metody indukcyjnej, zakres częstotliwości pola elektromagnetycznego wykorzystywany przy generowaniu indukcyjnych prądów przewodzenia (prądów wirowych), zawiera się w granicach od kilkunastu herców do kilkudziesięciu megaherców. W związku z tym drugim ważnym zjawiskiem występującym (wykorzystywanym) w nagrzewaniu indukcyjnym jest zjawisko naskórkowości, przejawiające się nierównomiernym rozkładem gęstości prądów w ośrodku przewodzącym i coraz większą ich koncentracją, w miarę wzrostu częstotliwości pola, w warstwach przypowierzchniowych ośrodka.

W urządzeniach indukcyjnych, ze względu na geometryczną bliskość różnych przewodników, rozkłady natężenia pól magnetycznych przy poszczególnych częściach ich powierzchni mogą być nierównomierne. Tak więc trzecim zjawiskiem, które należy brać pod uwagę podczas stosowania metody indukcyjnej, związanym ściśle ze zjawiskiem naskórkowości, jest zjawisko zbliżenia.

Gęstość zarówno prądów indukujących pola magnetyczne, jak i prądów indukowanych może osiągać bardzo duże wartości. Ze względu na niewielkie odległości pomiędzy przewodnikami, przez które płyną prądy indukujące i indukowane, a także – w niektórych przypadkach – „płynność” przewodników z prądami indukowanymi, kolejne zjawiska charakterystyczne dla nagrzewania indukcyjnego wynikają z występowania znacząco dużych sił elektromagnetycznych (Lorentza, Ampère’a), i to zarówno ścisających, jak i odpychających.

Próby przemysłowego wykorzystania nagrzewania indukcyjnego sięgają początku lat dziewięćdziesiątych XIX wieku. Związane były z wykorzystaniem efektów cieplnych wywołanych płynięciem prądów indukowanych w zwoju zwartym będącym uzwojeniem wtórnym transformatora, utworzonym przez metalową obręcz (nagrzewnica rdzeniowa) lub przez topiony metal znajdujący się w rynnie ceramicznej (piec kanałowy). W latach dwudziestych XX stulecia pojawiły się piece indukcyjne bezrdzeniowe (tyglowe), a w latach trzydziestych nastąpił rozwój technik indukcyjnego hartowania powierzchniowego metalu, wykorzystujących efekt naskórkowości przy zasilaniu nagrzewnic indukcyjnych z elektromaszynowych przetwornic częstotliwości (kilka kiloherców) i z samowzbudnych lampowych generatorów mocy (kilka do kilkuset kiloherców). Gwałtowny rozwój różnych technik nagrzewania indukcyjnego stał się możliwy z chwilą pojawienia się wysoko sprawnych, mało zawodnych, wysokomocowych i małogabarytowych źródeł energii elektromagnetycznej, opartych na elementach półprzewodnikowych, a pokrywających całe pasmo częstotliwości wykorzystywane w grzejnictwie indukcyjnym.

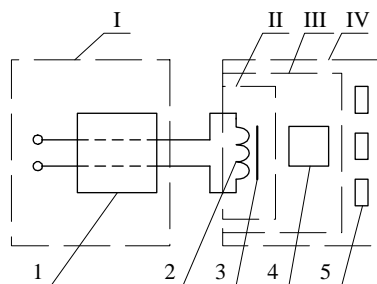
Atrakcyjność metody indukcyjnej wynika przede wszystkim z:

- braku galwanicznego lub elektrodowego styku materiału nagrzewanego ze źródłem energii elektromagnetycznej,
- łatwego czasowo-przestrzennego kształtowania pewnych pól temperatury w nagrzewanych wsadach,
- możliwości generowania dużej gęstości objętościowej lub powierzchniowej mocy grzejnej i wynikającego stąd krótkiego czasu nagrzewania wsadów,
- możliwości wykorzystania sił elektrodynamicznych do mieszania i transportu nagrzewanych wsadów ciekłych lub ograniczania wielkości powierzchni ich styku z ciałami stałymi,
- łatwego automatyzowania pracy urządzeń indukcyjnych i procesów grzejnych,
- chemicznej czystości procesów grzejnych, które mogą odbywać się w próżni lub w różnych atmosferach gazowych.

Różnorodność kryteriów (i wynikających z nich podziałów) stosowanych w odniesieniu do metody indukcyjnej związana jest z:

- niezwykle szerokim pasmem użytkowanych częstotliwości, wytwarzanych przez różnego rodzaju źródła,
- koniecznością i powszechnością wielokrotnego nagrzewania metali podczas stosowania różnorodnych technologii przetwórczych (topienie, rafinacja, hartowanie, odprężanie, kucie, walcowanie, wyłaczanie, przeciąganie, lutowanie, zgrzewanie),
- różnorodnością: mocy urządzeń (części kilowata do dziesiątek megawatów), budowy wzbudników (np.: rdzeniowe, bezrdzeniowe, płaskie, cylindryczne), rodzajów nagrzewania (objętościowe, selektywne, powierzchniowe, skrośne, bezpośrednie, pośrednie), konfiguracji pola (wzdłużne, poprzeczne, nieokreślone), kształtów (płaskie, cylindryczne, nieregularne), wymiarów (małe, duże) i rodzajów (przewodzące, półprzewodzące, ferromagnetyczne lub nie) wsadów, rodzajów ruchów wsadów (nieruchome, obrotowe, postępowe, mieszanie wsadów płynnych) itp.

W każdym indukcyjnym urządzeniu grzejnym można wyróżnić człon zasilający (źródło zasilania) i człon wykonawczy (rys. 10.8). Podstawową częścią członu wykonawczego – połączoną galwanicznie z obwodem wyjściowym członu zasilającego – jest wzbudnik, służący do kształtowania pola elektromagnetycznego oddziałującego na wsad. Wzbudnik (lub wzbudnik z magnetowodem) i wsad tworzą indukcyjny układ grzejny (człon grzejny urządzenia indukcyjnego), a wraz z wyposażeniem (np.: konstrukcja mechaniczna, warstwy ogniotrwałe i termoizolacyjne, układy regulacyjno-pomiarowe, mechaniczne układy transportujące lub obracające, układy studzące (chłodzące)) – człon wykonawczy urządzenia indukcyjnego (np. piec, nagrzewnica).

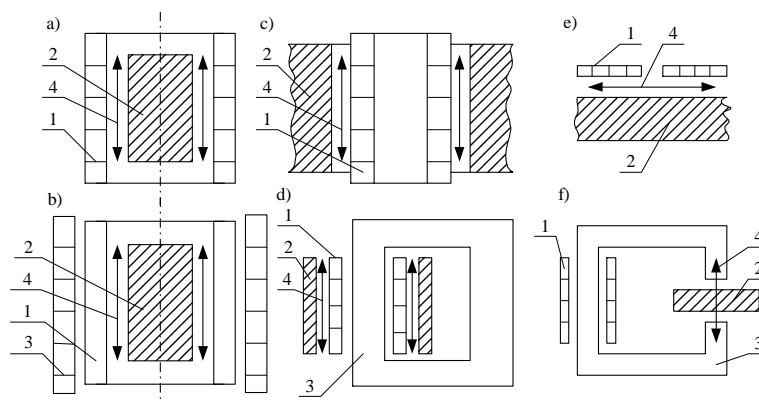


Rys. 10.8. Części składowe indukcyjnego urządzenia grzejnego: I – człon zasilający (źródło zasilania), II – wzbudnik, III – indukcyjny układ grzejny (człon grzejny), IV – człon wykonawczy, 1 – przekształtnik napięcia (prądu) lub przekształtnik napięcia i częstotliwości, 2 – ukształtowany przewód (uzwojenie), 3 – magnetowód, 4 – wsad, 5 – wyposażenie (układy: chłodzące, transportujące, pomiarowe, izolujące i inne)

Do najczęściej stosowanych kryteriów, według których dzieli się indukcyjne urządzenia grzejne, można zaliczyć: kryterium konstrukcji członu wykonawczego urządzenia (piece i nagrzewnice), kryterium częstotliwości (urządzenia o częstotliwości: zmniejszonej (małej) ($f < 50$ Hz), sieciowej, zwiększonej (średniej) ($50 \text{ Hz} < f < 10 \text{ kHz}$) i wielkiej ($10 \text{ kHz} < f < 27 \text{ MHz}$)), kryterium cyklu nagrzewania (urządzenia do pracy przerywanej, okresowej i ciągłej), kryterium ruchu wsadu (urządzenia nieprzelotowe i przelotowe), kryterium środowiska wsadu (urządzenia: próżniowe, z atmosferą naturalną i sztuczną), kryterium wyposażenia wzbudnika (urządzenia rdzeniowe i bezrdzeniowe), kryterium końcowego rozkładu temperatury we wsadzie stałym (nagrzewnice skośne i powierzchniowe), kryterium kształtu komory pieca (piece tyglowe lub kanałowe), kryterium kierunku pola magnetycznego względem wsadu (nagrzewnice o polu podłużnym lub poprzecznym).

Indukcyjny układ grzejny składa się ze wzbudnika i wsadu (zob. rys. 10.8). Uzwojenia wzbudników – wytwarzające i kształtujące pola elektromagnetyczne oddziałujące na wsady i chłodzone zazwyczaj za pomocą zamkniętych systemów wodnych – wykonane są najczęściej z przewodów miedzianych o różnych przekrojach rurowych i o grubości ścian dopasowanej do głębokości wnikania (częstotliwości) pola elektromagnetycznego. Wzbudniki mają kształty pętli (pojedynczych lub wielozwojowych, płaskich lub trójwymiarowych, jedno- lub wielowarstwowych), które mogą być wyposażone dodatkowo (czasami – przy nagrzewaniu powierzchniowym i dużej częstotliwości, zazwyczaj – przy nagrzewaniu skośnym oraz małej i średniej częstotliwości) w magnetowody (boczniki i koncentratory magnetyczne, rdzenie zamknięte i rdzenie ze szczeliną powietrzną). Magnetowody służą do koncentracji pola magnetycznego w określonych przestrzeniach indukcyjnego układu grzejnego, tzn. polepszają sprzężenie magnetyczne między wzbudnikiem i wsadem (wybraną częścią wsadu), a tym samym zmniejszają strumienie rozproszenia (zmniejszają grzanie się metalowych (szczególnie ferromagnetycznych) elementów konstrukcyjnych członu wykonawczego urządzenia indukcyjnego) i zwiększają wartości sprawności i współczynnika mocy układów grzejnych.

Istnieją trzy podstawowe konfiguracje układów wzbudnik (z magnetowodem lub bez) – wsad: wzbudnik obejmujący wsad (rys. 10.9a, b), wsad obejmujący wzbudnik (rys. 10.9c, d) i wsad poza wzbudnikiem (rys. 10.9e, f).



Rys. 10.9. Przykłady podstawowych konfiguracji indukcyjnych układów grzejnych: a) wzbudnik obejmujący wsad; b) wzbudnik z bocznikami magnetycznymi obejmujący wsad; c) wsad obejmujący wzbudnik; d) wsad obejmujący wzbudnik z rdzeniem zamkniętym; e) wzbudnik poza wsadem; f) wsad poza wzbudnikiem w szczelinie otwartego rdzenia; 1 – wzbudnik, 2 – wsad, 3 – magnetowód, 4 – kierunek wektora natężenia pola magnetycznego H

Jeżeli wzbudnik i wsad tworzą indukcyjny układ grzejny, w którym wektor natężenia pola magnetycznego \mathbf{H} jest skierowany stycznie lub głównie stycznie do powierzchni wsadu o wymiarach skończonych (np. rys. 10.9a+e), to pole elektromagnetyczne nazywa się połem podłużnym. Gdy wektor \mathbf{H} jest prostopadły lub głównie prostopadły do powierzchni wsadu (np. rys. 10.9f), wówczas pole elektromagnetyczne nazywa się połem poprzecznym. W zdecydowanej większości indukcyjnych układów grzejnych występują poła podłużne, a rzadko – pola poprzeczne i podłużno-poprzeczne. Układy indukcyjne z polem poprzecznym są często stosowane przy nagrzewaniu płyt, blach czy taśm.

Sprawność elektryczną η_e indukcyjnego układu grzejnego definiuje się jako stosunek mocy czynnej wydzielonej we wsadzie do całkowitej mocy czynnej pobieranej przez układ (dostarczonej do wzbudnika). Wzór

$$\eta_{e\max} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\gamma_2}{\gamma_1 \mu_{r2}}}} \quad (10.8)$$

wyprowadzony dla pewnego wyidealizowanego przypadku, a opisujący maksymalną sprawność elektryczną indukcyjnego układu grzejnego, ma zasadnicze znaczenie w teorii grzejnictwa indukcyjnego w polach podłużnych. Wynika z niego, że η_e zależy głównie od wartości konduktywności γ_1 materiału wzbudnika oraz od wartości konduktywności γ_2 i przenikalności magnetycznej względnej μ_{r2} wsadu i nie może przekroczyć pewnej wartości $\eta_{e\max}$, równej np. dla wsadów: miedzianego w 20°C – około 0,5, miedzianego w 800°C – około 0,67, mosiężnego w 400°C – około 0,65÷0,75, stalowego (ferromagnetycznego) w 20°C – około 0,8÷0,95, stalowego (paramagnetycznego) w 1000°C – około 0,88. Ze względu na to, że nagrzewanie wsadów o mniejszej konduktywności (γ_2) oraz wsadów ferromagnetycznych ($\mu_{r2} \gg 1$) odbywa się z większą sprawnością niż nagrzewanie wsadów o większej konduktywności oraz wsadów paramagnetycznych, np. topienie metali nieżelaznych o dużej konduktywności (np.: srebro, miedź, mosiądz) przeprowadza się z wykorzystaniem ich pośredniego nagrzewania w tyglach stalowych (duże μ_{r2} , małe γ_2) lub grafitowych (małe γ_2) (zob. rys. 10.7b).

Wsady o dużej powierzchni, a małej grubości (np. płyty, blachy, taśmy) nagrzewa się często w polach poprzecznych, dla których wartości η_e mogą być znacznie większe od wynikających ze wzoru (10.8) wartości $\eta_{e\max}$ w polach podłużnych.

Indukcyjne urządzenia grzejne należą do najbardziej zróżnicowanych urządzeń elektrotermicznych, a różnorodność stosowanych kryteriów, według których są dokonywane ich wzajemnie się przenikające podziały, jest bardzo duża.

Członami zasilającymi indukcyjne układy grzejne mogą być: sieć energetyczna o stałej (50 (60) Hz) wartości f i standardowym napięciu U , przekształtniki transformatorowe (autotransformatory, transduktory, transformatory) i półprzewodnikowe sterowniki napięcia (prądu) o stałej (50 (60) Hz) wartości f i kształtowanej wartości napięcia (prądu) oraz przekształtniki napięcia i częstotliwości zwane przebiegami napięciowo-częstotliwościowymi. Przyjmując kryterium ogólnej zasady działania, wśród ww. przekształtników napięcia i częstotliwości można wyróżnić: magnetyczne mnożniki częstotliwości (magnetyczne powielacze częstotliwości), generatory (przetwornice) maszynowe oraz półprzewodnikowe (tyrystorowe, tranzystorowe) i lampowe przebiegami (przekształtniki) statyczne.

Człony wykonawcze urządzeń indukcyjnych składają się z członu grzejnego i różnorodnego wyposażenia warunkującego prawidłową pracę urządzenia indukcyjnego (np. układy: mechanicznego załadunku, wyładunku, przesuwu i obrotu wsadu, chłodzenia wzbudników i studzenia wsadów, pomiarowo-regulacyjne, pompowo-dozujące, mieszająco-transportujące itp.).

Podstawowym kryterium, które bierze się pod uwagę przy omawianiu budowy indukcyjnych urządzeń grzejnych, to kryterium konstrukcji członu wykonawczego, z którego wynika podział na:

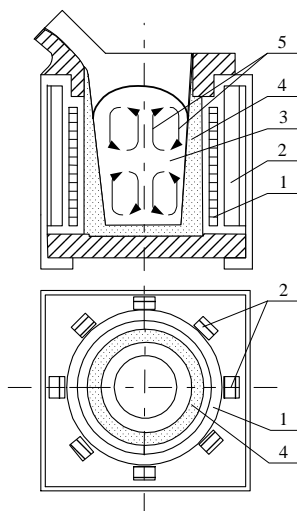
- piece indukcyjne,
- nagrzewnice indukcyjne.

Piece indukcyjne stosuje się do topienia metali, przetrzymywania ich w stanie płynnym i ich dozowania, a także do korekty ich składu chemicznego przed odlewaniem. Charakterystyczną cechą pieców indukcyjnych jest występujące w nich mieszanie stopionych metali, będące m.in. wynikiem działania sił elektrodynamicznych ściskających (zjawisko dośrodkowe), występujących na skutek wzajemnego oddziaływania prądów wirowych w stopionym metalu oraz sił elektrodynamicznych odpychających (zjawisko odśrodkowe), wytworzonych przez wzajemne oddziaływanie prądów wzbudnika i wsadu. Siły elektrodynamiczne, w powiązaniu z siłami grawitacyjnymi, konwekcyjnymi i ciśnienia atmosferycznego, mogą powodować mieszanie metalu, zmianę jego położenia w przestrzeni lub odkształcanie jego powierzchni. Mieszanie indukcyjne metalu jest zwykle zjawiskiem pożądanym, prowadzącym do ujednorodnienia składu chemicznego kąpieli i jej izotermiczności. Moc pieców indukcyjnych wynosi od kilkuset kilowatów do kilkudziesięciu megawatów, pojemność – od kilku do przeszło stu ton,

a sprawność całkowita – od około 0,6 do około 0,85. Wzbudniki tych pieców zasilane są napięciem o wartościach równych od kilkuset do ponad 1000 V.

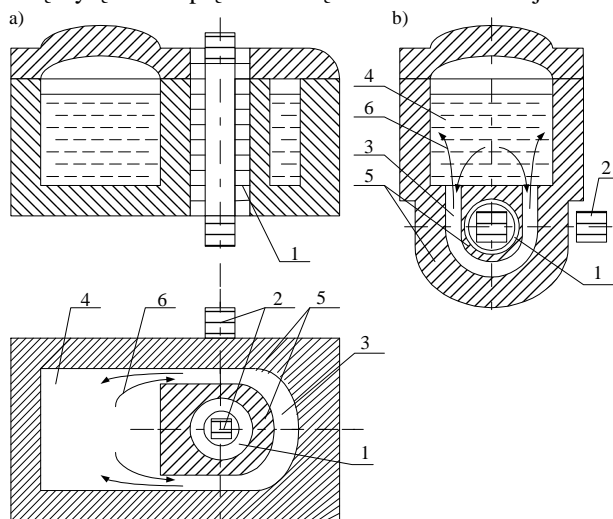
Piecy indukcyjne, wg kryterium kształtu komory pieca dzieli się na piecy tyglowe i piecy kanałowe.

Człony grzejne pieców tyglowych są podobne pod względem budowy i zasady działania do nagrzewnic skośnych, przeznaczonych do nagrzewania w polu podłużnym wsadów cylindrycznych. Części składowe członu grzejnego pieca tyglowego przedstawiono na rysunku 10.10. Piecy tyglowe są najczęściej urządzeniami zasilanymi jednofazowo, przy czym oprócz częstotliwości sieciowej stosuje się też częstotliwość średnią, a incydentalnie – częstotliwość wielką.



Rys. 10.10. Człon grzejny indukcyjnego pieca tyglowego: 1 – przewód wzbudnika, 2 – rdzeń ferromagnetyczny, 3 – płynny metal, 4 – tygiel ceramiczny, 5 – kierunki ruchu metalu

Piecy kanałowe są podobne pod względem budowy i działania do transformatorów jednofazowych w stanie zwarcia. Uzwojeniem pierwotnym w piecu jest wzbudnik obejmujący zamknięty rdzeń ferromagnetyczny, a rolę uzwojenia wtórnego spełnia ciekły metal znajdujący się w wannie i kanale (kanałach) ceramicznym obejmującym wzbudnik (zob. rys. 10.11). Moc cieplna jest wydzielana głównie w metalu wypełniającym kanał, skąd dalej jest przenoszona, na skutek intensywnej cyrkulacji ciekłego metalu, do pozostałej części wsadu znajdującego się w wannie. Piecy kanałowe zasilają się wyłącznie napięciem o częstotliwości sieciowej.

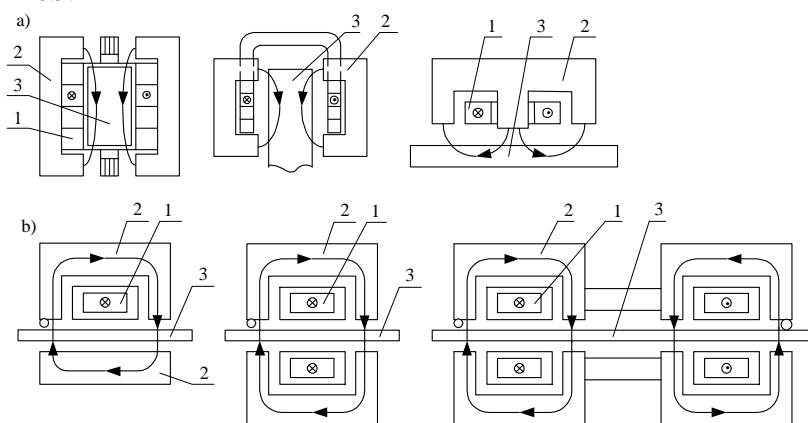


Rys. 10.11. Człon grzejny indukcyjnego pieca kanałowego: a) poziomego; b) pionowego; 1 – przewód wzbudnika, 2 – rdzeń ferromagnetyczny, 3 – kanał grzejny, 4 – wanna, 5 – termoizolacyjna warstwa ceramiki ogniotrwalej, 6 – kierunki ruchu metalu

Nagrzewnice indukcyjne, wg kryterium końcowego rozkładu temperatury we wsadzie, dzieli się na nagrzewnice skośne i nagrzewnice powierzchniowe

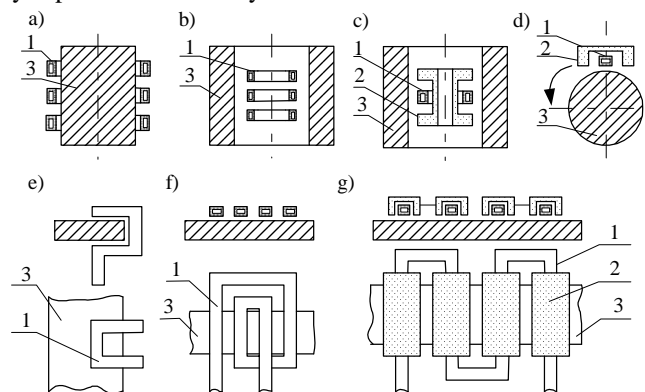
Nagrzewnice indukcyjne skośne o polach poprzecznych lub podłużnych służą do nagrzewania blach, rur, obręczy, prętów i wlewków, zarówno żelaznych, jak i nieżelaznych, przed procesami walcowania, ciągnięcia,

wyciskania i kucia oraz przed takimi rodzajami obróbki cieplnej, jak hartowanie objętościowe, odpuszczanie czy wyżarzanie. Częstotliwości zasilania wzbudników tych nagrzewnic wynoszą od 50Hz (nagrzewanie dużych wsadów) do kilkuset kHz (nagrzewanie małych wsadów ferromagnetycznych), a napięcia zasilania – od kilkudziesięciu do kilkuset woltów. Gęstości prądów w chłodzonych wodą miedzianych przewodach wzbudników zawierają się w granicach od kilkudziesięciu do stu kilkudziesięciu A/mm². Wsady nagrzewa się skośnie w sposób okresowy (jeden wsad we wzbudniku) i przelotowy (kilka przesuwających się wsadów we wzbudniku lub długi wsad przesuwający się w sposób ciągły). Przykładowe konfiguracje (konstrukcje) członów grzejnych nagrzewnic skośnych przedstawiono na rysunkach 10.12 i 10.9.



Rys. 10.12. Konfiguracje członów grzejnych nagrzewnic skośnych o polach: a) podłużnym; b) poprzecznym; 1 – przewód wzbudnika, 2 – rdzeń ferromagnetyczny, 3 – wsad

Nagrzewnice powierzchniowe są wykorzystywane głównie w procesach hartowania powierzchniowego wsadów metalowych, stosowanego w celu utwardzenia warstw przypowierzchniowych wsadu o grubości od kilku do kilkunastu milimetrów, z zachowaniem nieutwardzonego wnętrza wsadu. Hartowanie wymaga dwóch bezpośrednio po sobie następujących zabiegów: nagrzania hartowanej części wsadu do temperatury wyższej – zwykle o kilkadziesiąt stopni Celsjusza – od temperatury hartowania t_h (temperatury odpowiedniej przemiany fazowej) danej stali (dla różnych gatunków stali $750^{\circ}\text{C} < t_h < 1300^{\circ}\text{C}$) i ostudzenia (za pomocą wody lub oleju, przez natrysk lub zanurzenie) tej części wsadu z prędkością większą od prędkości krytycznej. Przykłady konfiguracji członów grzejnych nagrzewnic powierzchniowych przedstawiono na rysunku 10.13.



Rys. 10.13. Konfiguracje członów grzejnych nagrzewnic powierzchniowych cylindrycznych i płaskich o wzbudnikach: a), b) cylindrycznym; c) rdzeniowym, pierścieniowym; d) jednozwojowym, rdzeniowym, płaskim; e) pętlicowym; f) spiralnym, płaskim; g) rdzeniowym, meandrycznym, płaskim; 1 – przewód wzbudnika, 2 – rdzeń ferromagnetyczny, 3 – wsad

Przy hartowaniu spoczynkowym i obrotowym cała hartowana powierzchnia wsadu osiąga wymaganą temperaturę, po czym jest studzona, natomiast przy hartowaniu postępowym lub jednoobrotowym sukcesywnie nagrzewa się i chłodzi kolejne powierzchnie hartowanego wsadu. Głębokość hartowania jest ściśle uzależniona od częstotliwości pola, mocy grzejnej, mocy strat, dyfuzyjności cieplnej, czasu nagrzewania i intensywności studzenia. Dzięki dużej wartości gęstości powierzchniowej mocy grzejnej, wynoszącej zwykle od kilku do kilkudziesięciu kW/cm², czas nagrzewania jest krótki i wynosi zwykle od kilku do kilkudziesięciu sekund. Konieczność nagrzania jedynie powierzchni metalu przy jego dużej dyfuzyjności cieplnej wymaga, oprócz dużej wartości gęstości powierzchniowej mocy we wsadzie, pracy nagrzewnicy z odpowiednio dużą częstotliwością (z odpowiednio małą



głębokością wnikania). Wszystko to powoduje, że do zasilania członów grzejnych nagrzewnic powierzchniowych (hartowniczych) używa się źródeł o odpowiednio (w stosunku do wielkości wsadu) dużej mocy i o częstotliwości od 50 Hz do kilkudziesięciu megaherców.

Oprócz typowych technik nagrzewania i topienia indukcyjnego wsadów metalowych, wykorzystywanych w typowych ww. urządzeniach indukcyjnych, metoda nagrzewania indukcyjnego znalazła zastosowania w wielu innych technologiach przemysłowych. I tak, z jej użyciem wykonuje się m.in.:

- zgrzewanie przez spęczanie doczołowe łączonych prętów i rur,
- zgrzewanie ciągle przez stapianie powierzchni podczas wykonywania rur ze szwem,
- lutowanie elementów metalowych, a w tym płytek z węglików spiekanych, do trzonek narzędzi skrawających,
- nagrzewanie cieczy w rurociągach, zbiornikach lub naczyniach metalowych,
- upłynnianie mas termoplastycznych w formach metalowych,
- suszenie lakierów i polimeryzację klejów nałożonych na podłoża metalowe,
- nagrzewanie gumy w procesie jej oddzielania od metalu,
- nagrzewanie skrośne blach przed cynowaniem,
- połączenia skurczne w procesach nasadzania kół zębatach, wieńców kół zębatach, obręczy czy łożysk,
- dogrzewanie ciekłej stali w procesach ciągłego odlewania,
- topienie lewitacyjne metali,
- topienie w procesach rafinacji strefowej półprzewodników,
- topienie szkieł metalicznych,
- nagrzewanie w procesie wyciągania monokryształów,
- nagrzewanie w celu odgazowania lamp elektronowych i kineskopów,
- nagrzewanie w procesach prostowania lub wyginania elementów metalowych,
- nagrzewanie odprężające spawów.

10.3. Program i przebieg ćwiczenia

10.3.1. Nagrzewanie pojemnościowe

- zapoznać się z danymi znamionowymi nagrzewnicy pojemnościowej, wykonać oględziny nagrzewnicy wskazując, na podstawie schematu elektrycznego, jej poszczególne części,
- nagrzewać różne płaskie (prostopadłościennie) wsady umieszczając je pomiędzy równoległymi elektrodami kondensatora grzejnego,
- wykonać wielowarstwowe zgrzewanie folii termoplastycznych, umieszczając je pomiędzy płaską i liniową (lub kubkową) elektrodą kondensatora grzejnego.

10.3.2. Nagrzewanie indukcyjne

- zapoznać się z danymi znamionowymi i budową płyty indukcyjnej, i nagrzać pośrednio wodę (wsad) znajdującą się w metalowym garnku (przetworniku elektrotermicznym), w którym płyną wirowe prądy przewodzenia na skutek poddaniu go działaniu poprzecznego pola magnetycznego o częstotliwości ok. 20kHz,
- zbudować model indukcyjnej nagrzewnicy rdzeniowej o rdzeniu zamkniętym (jednofazowy transformator dwukolumnowy o regulowanym napięciu pierwotnym i rozwartym uzwojeniu wtórnym) i nagrzewać (w podłużnym polu magnetycznym) obręcz metalową nałożoną na rdzeń, tworzącą uzwojenie wtórne transformatora (w stanie zwarcia),
- zapoznać się z danymi znamionowymi i budową wysokoczęstotliwościowej nagrzewnicy indukcyjnej tranzystorowej i nagrzewać w polach podłużnych i poprzecznych różne metalowe wsady.

Literatura

1. Hauser J.: Elektrotechnika. Podstawy elektrotermii i techniki świetlnej. Wyd. Pol. Poznańskiej, 2006.
2. Hering M.: Podstawy elektrotermii. Cz. 2. WNT, Warszawa 1998.