

**WSKAŹNIKI INTENSYWNOŚCI NAGRZEWANIA W PROJEKTOWANIU
STANÓW PRACY PIECÓW ŁUKOWYCH ¹⁾**

Część 1

**Wskaźniki intensywności nagrzewania jako podstawa
kategoryzacji pieców łukowych**

*Coefficients of Heating Intensity in the Design of Operating States
of Arc Furnaces*

Part 1

*Coefficients of Heating Intensity as a Basis of Categories'
Distribution of Arc Furnaces*

Antoni SAWICKI

Politechnika Częstochowska

Streszczenie: W pracy opisano dotychczasowy rozwój i wskaźniki energetycznej klasyfikacji stalowniczych pieców łukowych prądu przemiennego. Wykorzystując możliwości szczegółowej analizy charakterystyk łuku skutecznego, zaproponowano nowy wskaźnik intensywności nagrzewania związany z promieniowaniem łuku. Obliczono jego wartości dla wybranych pieców przemysłowych. Na podstawie tego wskaźnika zaproponowano nowy podział właściwości energetycznych pieców łukowych.

Summary: This paper describes the existent historical-developing and external coefficients of the energy categories' distribution of steelmaking AC-arc furnaces. Using the possibilities of a detailed analysis of efficient arc characteristics the application of a new coefficient of heating intensity is proposed and its value for some industrial arc furnaces is calculated. On the basis of the coefficient, a new category of distribution of energy properties of arc furnaces is presented.

1. WSTĘP

Pomimo że łuk elektryczny został odkryty prawie 200 lat temu, a pierwsze przemysłowe zastosowania pieców łukowych pojawiły się już na początku obecnego stulecia, to jedno z tych pierwszych rozwiązań konstrukcyjnych w prawie nie zmienionej postaci dotrwało do czasów obecnych. Klasyczne stalownicze piece łukowe prądu przemiennego (trójfazowe z łukami bezpośrednimi), obok konwertorów tlenowych, zajęły obecnie dominującą pozycję w światowym hutnictwie. Być może nie na długo, bo już teraz jesteśmy świadkami znacznego postępu w inwestowaniu w stalownicze piece łukowe prądu stałego (SPLPS), zwłaszcza wielkiej mocy, jednak wydaje się, że współczesne stalownicze

piece łukowe prądu przemiennego (SPLPP), jako agregaty znacznie udoskonalone i nowoczesne, będą w stanie jeszcze ze SPLPS. Z tej przyczyny kontynuowanie badań nad procesami elektrycznymi i cieplnymi w takich piecach jest z pewnością uzasadnione, tym bardziej, że stacjonarny łuk elektryczny prądu zmiennego wielkiej mocy stanowi unikalne zjawisko w różnorodnych, eksploatowanych urządzeniach elektrotermicznych. Ma on bardzo złożoną strukturę fizyczną z dużą różnorodnością i gwałtownością przebiegu procesów elektromagnetycznych, cieplnych, gazodynamicznych, chemicznych itd. Chociaż w odniesieniu do SPLPP zgromadzono obszerny zestaw wyników badań doświadczalnych, to brak odpowiedniego modelu matematycznego łuku uniemożliwia precyzyjne prognozowanie energetycznie optymal-

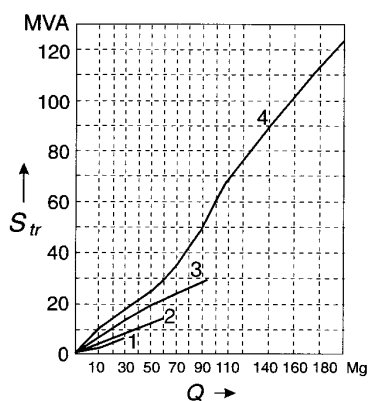
1) Praca została wykonana w ramach projektu badawczego, finansowanego przez KBN: grant nr 8T10 B01214

nych stanów pracy. A przecież modelowanie matematyczne pieców łukowych z wykorzystaniem środków współczesnej techniki obliczeniowej może być bardzo efektywne. Uzyskuje się to dzięki niskim kosztom przygotowanego projektu i mniejszym nakładom czasu w porównaniu z pracami doświadczalnymi wykonywanymi na piecach przemysłowych.

Z uwagi na poważne koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, związane ze stalowniczymi piecami łukowymi (SPL), w literaturze często zamieszczane są ich najrozszybsze analizy i porównania [3, 7, 11] z uwzględnieniem różnych czynników energetycznych, technologicznych, ekologicznych itd., wpływających na efektywność użytkowania pieców. Olbrzymie zużycie energii przez te urządzenia metalurgiczne sprawia, że czynnik energetyczny jest najczęściej brany pod uwagę. Nawet procentowo niewielkie oszczędności pobieranej przez nie energii elektrycznej są w stanie zapewnić poważne zyski finansowe danej firmy. Dlatego w pracy opisano różne kryteria klasyfikacji pieców, mogące służyć do oceny istniejącej infrastruktury stalowni i wyboru najkorzystniejszego wariantu inwestycyjnego, tym bardziej, że w stosunku do istniejących urządzeń przez długi czas stosowano optymalizację tylko elektrycznych stanów pracy. Po modernizacji i przejściu pieców do działania ze stanem ultrawielkiej mocy, powstała konieczność optymalizacji nie tylko ich stanów elektrycznych, ale i energetycznych.

2. UWARUNKOWANIA KLASYFIKACJI STALOWNICZYCH PIECÓW ŁUKOWYCH

Historyczny rozwój SPLPP stanowi jedno z podstawowych i często używanych kryteriów oceny stanu technicznego, technologicznego i ekonomicznego agregatów metalurgicznych. Ma to istotne uzasadnienie. To właśnie te czynniki stymulowały postęp w budowie pieców. Z upływem czasu wzrastały nie tylko pojemność i moce elektryczne budowanych urządzeń, ale i ulegało zmianom bardzo wiele ich elementów konstrukcyjnych oraz zasad wykonywania operacji technologicznych. To skłaniało badaczy do podejmowania prób uogólnienia tych przemian. Przykład takiego działania pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Uogólnione związki między pojemnościami wsadowymi i mocami transformatorów piecowych radzieckich SPLPP (1 — uogólnienie z lat 1934–1935; 2 — z lat 50.; 3 — z 1968 r.; 4 — piece z lat 80.) [1]

Stającą tendencją rozwojową budowy pieców stało się zwiększanie mocy elektrycznej wydzielanej w łukach. Prowadzi to do przyspieszenia przebiegu podstawowego i najbardziej energochłonnego stadium wytapiania metalu, tj. roztopienia złomu. Skutkiem tego jest znaczne zmniejszenie strat względnych i zwiększenie sprawności urządzenia. Ale niestety jednocześnie wzrastają strumienie ciepłe promieniowania łuków na wykładzinę pieca. To powoduje zmniejszenie jej żywotności, wydłużenie sumarycznego czasu przestoju, z przeznaczeniem na remonty ścian oraz sklepienia, i może zlikwidować zalety uzyskane ze zwiększenia mocy. Dlatego stan optymalny pracy pieca jest określony zarówno czynnikami elektrycznymi, jak i cieplnymi [3]. Tak więc zwiększenie wydajności współczesnych SPL napotyka liczne ograniczenia. Dotyczą one nie tylko braku lub zbyt wysokiej ceny odpowiednich wtórnych źródeł energii elektrycznej i wytrzymałych układów elektrodowych, ale i braku wytrzymałych materiałów nadających się do stosowania na wykładzinie. Dlatego dalsze zwiększanie szybkości nagrzewania (może dochodzić do 100 K/min [2]) drogą znacznego zwiększenia wprowadzanej mocy elektrycznej nie jest uzasadnione.

We współczesnych SPL ponad 70% powierzchni ścian bocznych i sklepienia pokrywa się panelami metalowymi chłodzonymi wodą. To umożliwia zwiększenie mocy elektrycznej i bardziej intensywny dopływ tlenu. Taka sytuacja prowadzi do zwiększenia strat jednostkowych energii na jedną tonę stali. Zwiększenie tempa strat (energia/h) może być jednak z nadmiarem skompensowane przez skrócenie długości cyklu wytapiania w wyniku realizacji nowej technologii. Pozostałe, najbardziej narażone strefy wykładziny, są wykonane z materiałów ogniotrwałych. Trzon, który doznaje oddziaływań mechanicznych, chemicznych i cieplnych, jest chroniony przed szybkim uszkodzeniem odpowiednią warstwą ubijaną. Najszybszemu zużyciu ulega pas żuźlowy wykładziny. Jest on wykonywany z wysokowytrzymałej cegły magnezytowo-chromitowej. Materiały ogniotrwałe do budowy sklepienia są dobierane pod względem odporności na działanie wyrzutów gazowo-pyłowych, promieniowania łuków, na udary mechaniczne i cieplne. Zwykle do tego celu wykorzystuje się materiały gliniaste i magnezytowo-chromitowe, a także cegły magnezytowe zawierające węgiel [8].

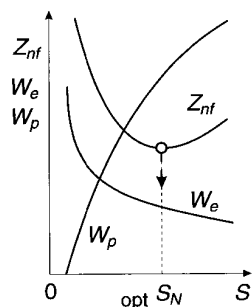
Zastosowanie chłodzenia wodnego ścian i sklepienia pieca oraz wytwarzanie na powierzchni kąpieli grubej warstwy spienionego żuźła umożliwia pracę pieca z długimi łukami. Zmniejsza się wtedy obciążenie elektryczne i cieplne elektrod, zwiększa efektywność wykorzystania układu zasilania i polepszają się warunki pracy personelu.

O kompromisie w wyborze wariantu pieca musi jednak zdecydować czynnik ekonomiczny. Jeśli jako funkcję celu wykorzystywać jednostkowe względne nakłady [2]:

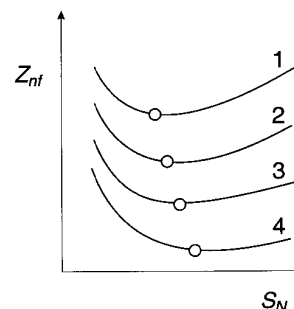
$$Z_{nf} = S_w + K_{ef} \cdot K_w, \quad \text{zł}/(\text{Mg} \cdot \text{rok}) \quad (1)$$

gdzie:

- S_w — koszt wytapiania metalu, zł/(Mg·rok);
- K_w — nakłady kapitałowe na budowę pieca, zł/Mg;
- K_{ef} — współczynnik efektywności ekonomicznej nakładów kapitałowych danej gałęzi przemysłu, zł/(zł·rok)



Rys. 2. Przykład wyboru mocy źródła zasilania pieca o zadanej pojemności wsadowej Q (W_p — wydajność produkcyjna; W_e — jednostkowe zużycie energii elektrycznej; Z_{nf} — względne nakłady finansowe)



Rys. 3. Wpływ skrócenia długości stadium redukcyjnego w piecu na zależność nakładów względnych od mocy urządzenia łukowego: 1 — 1,5h, 2 — 1,0 h, 3 — 0,5 h, 4 — 0 h [2]

można utworzyć bazę techniczno-ekonomiczną wyboru ekonomicznie optymalnej mocy źródła zasilania w postaci mocy znamionowej pieca $opt S_N$ (rys. 2).

Można jednak nie poprzestać na tej wartości, a drogą intensyfikacji wytopiania stali uzyskać dalsze zmniejszenie nakładów (rys. 3). Jak widać, odpowiada temu wzrost mocy optymalnej $opt S_N$. Wynika stąd, że ekonomicznie najkorzystniejsze jest stosowanie w hutnictwie SPŁ typu UHP i SUHP (tabela 1). Dlatego współczesne piece wyposaża się w układy do wstępnego podgrzewania złomu i łączy w zespoły z urządzeniami kadziowymi do pozapiecowej obróbki stali. W układach tych występuje ponadto generacja ciepła reakcjami egzotermicznymi, co daje 10–30% dostarczonej energii.

Moc urządzenia łukowego jest zwykle utożsamiana z mocą transformatora piecowego. Wartość tej ostatniej zależy przede wszystkim od pojemności wsadowej pieca oraz od kategorii całego urządzenia. Niekiedy stosunek mocy transformatora do pojemności wsadowej pieca stanowi wyróżnik określający przynależność do jednej z czterech kategorii urządzeń łukowych (tabela 1), jednak podział ten jest umowny i ma charakter tylko orientacyjny. Mniejsze wartości ilorazów zawarte w podanych przedziałach odnoszą się do transformatorów przeznaczonych do pieców o dużych pojemnościach, a większe — do pieców o pojemnościach małych i średnich. Ta klasyfikacja jest w pewnym stopniu związana z opisaną w [3], tj. wg kategorii od pierwszej do czwartej, jednak w tym przypadku daty szerokiego wdrożenia nowych technologii należy uznać za bardzo rozmyte. Związek między obydwoma klasyfikacjami jest bardzo niejednoznaczny.

Tabela 1. Kategorie energetyczne SPŁPP

Kategoria energetyczna	Oznaczenie	Moc jednostkowa
normalnej mocy	RP	80–350 kVA/Mg
wielkiej mocy (high power)	HP	170–470 kVA/Mg
ultrawielkiej mocy (ultra high power)	UHP	250–650 kVA/Mg
super ultrawielkiej mocy (super ultra high power)	SUHP	400–1000 kVA/Mg

Moc transformatora, przeznaczonego do zasilania SPŁ wielkiej mocy, powinna być dobierana z uwzględnieniem dynamicznego charakteru obciążenia. Nie powinna być ona mniejsza od wynikającej z maksymalnych wartości udarów prądowych powstających na skutek zwarć. Muszą być także przewidziane sposoby i środki ochrony transformatora przed przepięciami powstającymi po zerwaniach łuków i na skutek zjawisk rezonansowych. Z tych względów opisane wskaźniki mogą służyć tylko do celów porównawczych w rozpatrywaniu właściwości technicznych różnych pieców. Są one niejednoznaczne i nie dają żadnej informacji o efektywności technologicznej danego urządzenia łukowego, brak jest tu bowiem bardzo istotnej informacji o skojarzeniu takich wielkości, jak prąd (średnica łuku) i napięcie (jego długość). A przecież pierwszy z nich decyduje o mało efektywnej konwekcyjnej wymianie ciepła, a drugi o wysoce efektywnej radiacyjnej [4, 9].

Bardziej racjonalną klasyfikację pieców łukowych o średnicy wanny 3,4 ÷ 11,6 m zamieszczono w tabeli 2 [7, 10]. Uwzględnia ona poziomy mocy czynnej przypadające na jednostkę masy wsadu oraz objętości i powierzchni pieca. Kryterium f_2 ma istotne znaczenie w początkowym stadium topienia wsadu, a kryteria f_1 i f_3 — w stadium wytopiania z kąpielą ciekłometaliczną.

Na podstawie przedstawionej analizy nie należy zbyt pochopnie sądzić, że piece łukowe dużej mocy należą wyłącznie do grupy nowej generacji, a piece małej mocy do starej. Zastosowanie pieców łukowych jest dość szerokie i daleko wykracza poza ramy przemysłowej produkcji hutniczej. Budowane i eksploatowane są one jako piece odlewnicze

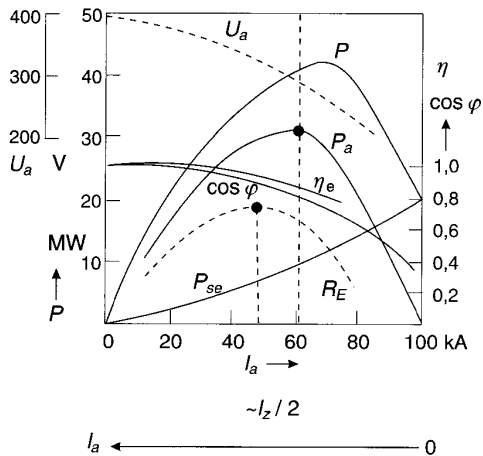
Tabela 2. Klasyfikacja pieców łukowych wg poziomu mocy czynnej

Piec mocy	f_1	f_2	f_3
	kW/Mg stali	kW/m ³ objętości pieca	kW/m ² powierzchni pieca
zwykłej	120–190	140–240	5700–8400
wielkiej	200–260	250–340	8400–11100
ultrawielkiej	300–450	420–900	12000–16700

i obiekty badawcze. Znalezione są nawet przypadki wykorzystania SPL do utylizacji odpadów przemysłowych i komunalnych. Poza tym zaznacza się tendencja zawężania przedziału pojemności wsadowej nowo budowanych SPL. Mieści się on zwykle w granicach między 70 i 150 Mg.

3. ZEWNĘTRZNE WSKAŹNIKI INTENSYWNOŚCI NAGRZEWANIA W STAŁOWNICZYCH PIECACH ŁUKOWYCH

W łuku elektrycznym SPLPP zachodzi jednocześnie szereg procesów elektrycznych, cieplnych i gazodynamicznych. Pomimo tej złożoności w wyborze stanu pracy pieca najczęściej stosuje się analizę tylko jego zewnętrznych charakterystyk elektrycznych (rys. 4). Te zależności od prądu łuku I_a nazywane są także charakterystykami roboczymi. Aby je uzyskać, wykorzystuje się schemat zastępczy obwodu elektrycznego sprowadzony na jedno z napięć transformatora. Najczęściej obejmuje on jedną fazę symetrycznego urządzenia łukowego, a jego wykonanie następuje po sporządzeniu wykresu kołowego [3, 6]. Zarówno wykresy kołowe, jak i charakterystyki robocze urządzenia łukowego należy wykonywać oddzielnie dla każdego stopnia napięciowego. Dlatego odpowiednie doświadczenie obejmuje stan jałowy i zwarcia pieca dla każdego stopnia napięciowego transformatora U_{2l} . Charakterystyki robocze elektryczne pieca mogą mieć różny kształt. Zależy to od schematu zastępczego obwodu zasilającego i jego parametrów (stałych lub zmiennych). Przypadki obwodów zarówno symetrycznych, jak i niesymetrycznych rozpatrzono szczegółowo w pracy [6]. Użyte charakterystyki służą do doboru parametrów znamionowych transformatora: prądu, mocy i napięcia wtórnego.



Proces topienia wsadu	Proces rafinowania kąpieli
$I_a, \cos \varphi, \eta_e, P_{se}$ — rosną	I_a, R_E — maleją
Ekranowanie łuków złomem lub żużłem	Ekranowanie łuków w dołkach kąpieli

Rys. 4. Charakterystyki elektryczne pieca o pojemności 100 Mg pracującego ze stałym napięciem (wg [7])

Na rysunku 4 pokazano przykładowe charakterystyki elektryczne pieca. Moc łuku i moc wypadkowa pieca są przedstawione krzywymi parabolicznymi. Moc łuku osiąga wartość maksymalną z mniejszym prądem niż wypadkowa moc urządzenia. Sprawność elektryczna osiąga wartość maksymalną przy najmniejszym obciążeniu sieci piecem i spada do zera, jeśli prąd odpowiada zwarcia. Taką samą postać ma krzywa współczynnika mocy pieca. Sprawność wypadkowa urządzenia osiąga największą wartość przy prądzie mniejszym niż prąd odpowiadający maksymalnej mocy łuku. Tego typu analiza, wykonywana przez specjalistów, oparta jest na prostych znanych równaniach i parametrach obwodu [3, 10]:

$$P = 3I_a^2 \sqrt{\frac{U_{2l}^2}{3} - (I_a X)^2} \quad \text{— moc czynna pobierana z sieci;}$$

$$P_a = 3I_a^2 \left(\sqrt{\frac{U_{2l}^2}{3} - (I_a X)^2} - I_a R \right) \quad \text{— wypadkowa moc łuków;}$$

$$P_{se} = P - P_a = 3I_a^2 R \quad \text{— straty mocy elektrycznej;}$$

$$\eta_e = \frac{P_a}{P} \quad \text{— współczynnik sprawności elektrycznej;}$$

$$U_a = \sqrt{\frac{U_{2l}^2}{3} - (I_a X)^2} - I_a R \quad \text{— napięcie łuku;}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} I_a U_{2l}} \quad \text{— współczynnik mocy.}$$

Oprócz tego w ocenie zdolności technologicznej nagrzewania i topienia należy uwzględnić wpływ stanu elektrycznego pieca na erozję wykładziny i wskaźniki techniczno-ekonomiczne produkcji stali.

W. E. Schwabe [10] zaproponował oszacowanie zużycia wykładziny pieca w zależności od mocy i długości łuku. W uproszczonym wariacie, z warunkiem równomiernego wydzielania mocy w fazach, pierwotna postać wskaźnika zużycia wykładziny R_E jest wyrażona wzorem:

$$R_E = \frac{P_a U_a}{a^2} = \frac{I_a^3 R_a}{a^2} \quad (2)$$

gdzie:

P_a — moc łuku pod jedną elektrodą;

a — najmniejsza odległość od końca elektrody do wykładziny.

Cechą znaną SPLPP jest występowanie największego zużycia wykładziny w warunkach różnych od maksymalnej mocy łuku. Dlatego uważa się, że celowa jest praca pieców wielkiej mocy w stanie maksymalnej mocy użytecznej ze stosunkowo krótkimi łukami i ze zmniejszonym współczynnikiem mocy.

Wskaźnik zużycia wykładziny nie ma konkretnego sensu fizycznego i jest wielkością czysto empiryczną. Posługiwanie się nim jest jednak wygodne w obliczeniach praktycznych i przygotowanych oszacowaniach do celów projektowych. W jakimś stopniu charakteryzuje on napromieniowanie wykładziny ścian łukami na poziomie ściąg wanny. A więc pozwala sądzić o jej wytrzymałości w różnych piecach i ich stanach pracy. Bardziej dokładnie można go określić analitycznie ze wzoru [11]:

$$R_F = \frac{U_{2l}^2}{X_{ek} a^2} \left(0,1708 \left(\cos^2 \varphi \sin \varphi - 2 \frac{\sin^2 \varphi \cos \varphi}{\operatorname{tg} \theta} + \frac{\sin^2 \varphi}{\operatorname{tg}^2 \theta} \right) \right), \text{ W/cm}^2 \quad (3)$$

gdzie:

- U_{2l} — napięcie liniowe wtórne w czasie pracy pieca, V;
- X_{ek} — reaktancja fazy podczas płonienia łuków na ciekły metal, Ω ;
- $X_{ek} = (1,05 \div 1,15) X_z$, gdzie:
- X_z — reaktancja toru wielkopiękowego uzyskana podczas doświadczenia ze zwarcim, Ω ;
- φ — kąt fazowy między prądem i napięciem w czasie pracy pieca,
- θ — kąt fazowy między prądem i napięciem w czasie zwarcia pieca.

Po wprowadzeniu oznaczenia:

$$F = 0,1708 \left(\cos^2 \varphi \sin \varphi - 2 \frac{\sin^2 \varphi \cos \varphi}{\operatorname{tg} \theta} + \frac{\sin^2 \varphi}{\operatorname{tg}^2 \theta} \right) \quad (4)$$

otrzymuje się zmodyfikowaną postać wskaźnika:

$$R_F = \frac{U_{2l}^2}{X_{ek} a^2} F \quad (5)$$

Stanowi maksymalnej mocy czynnej pieca odpowiada napięcie:

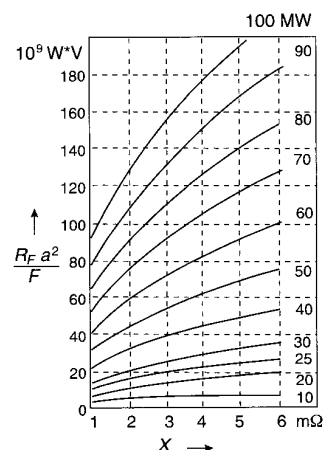
$$U_{2l} = \sqrt{2P_{\max} \cdot X} \quad (6)$$

Po podstawieniu U_{2l} do (5) można uzyskać wyrażenie:

$$R_F = 2\sqrt{2P_{\max}^3 \cdot X} \frac{F}{a^2} \quad (7)$$

Wpływ P_{\max} i reaktancji fazowej X na R_F jest określony wzorem:

$$\frac{R_F a^2}{F} = 2\sqrt{2P_{\max}^3 \cdot X} \quad (8)$$



Rys. 5. Wpływ zmiany reaktancji fazy X na względny wskaźnik zużycia wykładziny $R_F a^2 / F$ z różnymi wartościami mocy pieca P_{\max}

Rysunek 5 pokazuje zmianę względnego zużycia wykładziny $\frac{R_F a^2}{F}$ w funkcji reaktancji X dla wartości mocy P_{\max} z przedziału $10 \div 100$ MW. Tym zależnościom odpowiadają aproksymacje:

$$\frac{R_F a^2}{F} \sim P_{\max}^{1,5} \quad \text{ i } \quad \frac{R_F a^2}{F} \sim \sqrt{X} \quad (9)$$

czyli wzrost wskaźnika zużycia wykładziny wraz ze wzrostem mocy i reaktancji pieca. Z kolei P_{\max} i X są funkcjami pojemności wsadowej pieca.

Rozważania dotyczące wskaźnika Schwabego umożliwiają wysnucie prostego wniosku o stosownym zakresie wyboru prądu znamionowego pieca. Jego wartość powinna znajdować się w pobliżu i na prawo od maksymalnej mocy łuku. Tak więc sposobem zmniejszenia erozji wykładziny jest zmniejszenie długości łuku. Wzrasta wtedy udział mocy dostarczanej do metalu, a maleje udział mocy dostarczanej wykładzinie. Jednocześnie większy prąd i większe siły elektrodynamiczne powodują pogłębienie dołka na powierzchni kąpieli (prądom 20–45 kA odpowiada zagłębienie łuku na 17–57 mm). Takie zalecenia pracy pieców UHP z możliwie krótkimi łukami są jednak dzisiaj coraz częściej ignorowane. Obserwuje się stałą tendencję podnoszenia stopni napięciowych transformatorów piecowych. Jest to możliwe, bo wykorzystuje się zupełnie inne sposoby zmniejszania erozji wykładziny. Do nich należą: wczesne wprowadzanie grubej warstwy spienionego żużla, ograniczenie roli pieca do roztopiania złomu, intensywne chłodzenie wodne ścian i sklepienia, stosowanie możliwie małej średnicy koła podziałowego przez pochylanie elektrod pod kątem $6 \div 8^\circ$ w stosunku do pionu.

Z opisanych przyczyn wskaźniki Schwabego, ani w postaci pierwotnej, ani zmodyfikowanej, nie znalazły zastosowania do kategoryzacji urządzeń piecowych.

4. WSKAŹNIK INTENSYWNOŚCI PROMIENIOWANIA ŁUKOWEGO

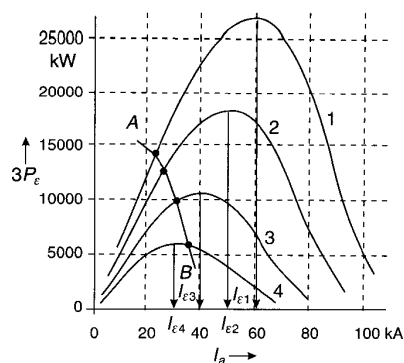
Łuk dynamiczny w SPLPP okresowo zmienia swoje parametry elektryczne, gazodynamiczne, geometryczne, cieplne itd. Dodatkowo nakładają się na to przebiegi stochastyczne, związane z fluktuacjami procesów cieplnych, chemicznych, gazodynamicznych i elektromagnetycznych. Pomijając jednak ich ekstremalne odchylenia i przechodząc do rozpatrywania stanów stacjonarnych — można zastąpić rzeczywisty łuk ekwiwalentnym łukiem skutecznym (efektywnym). Jest to taki łuk prądu stałego, który pod względem rozkładu strumieni cieplnych na promieniowanie, przewodzenie i konwekcję odpowiada łukowi prądu zmiennego.

Okresowe zaniki prądu, wzajemne oddziaływania elektrodynamiczne łuków, ich niestabilność gazodynamiczna wywołują potrzebę utrzymania małej odległości między elektrodami i wsadem w SPLPP. A więc ekwiwalentny łuk skuteczny musi być łukiem krótkim. W tej sytuacji zawiera on zwykle tylko część przykatodową-stożkową, pozbawiony jest natomiast części cylindrycznej [5]. Wg teorii dwuwarstwowej łuku, potwierdzonej licznymi badaniami doświadczalnymi, istnieje różnica w sposobach rozpraszania energii pola elektrycznego z części stożkowej i cylindrycznej. W pierwszej zawsze występuje konwekcyjne odprowadzanie energii na skutek zasysania, nagrzewania i pompowania gazu przez kolumnę łukową [4]. W drugiej części ruch gazu do anody odbywa się na zasadzie sił inercji, a dominującym sposobem odprowadzania ciepła jest promieniowanie. Skracanie łuku, z warunkiem stałej wartości prądu, w zasadniczy sposób wpływa na zmniejszenie udziału promieniowania w całkowitej rozpraszanej z niego energii. Tylko odpowiednie skojarzenie prądu i napięcia (nawet z tą samą wartością mocy) może zapewnić optymalny efekt technologiczny nagrzewania wsadu.

Uzasadnienie poprzednich stwierdzeń wynika z przeprowadzonych badań [11]. W początkowym stadium wytapiania stali, kiedy większa część wsadu nie jest jeszcze nagrzana, pole temperaturowe gazu jest w znacznym stopniu określone polem jego prędkości, a w mniejszym stopniu właściwościami wsadu. Wpływ temperatury gazu na wsad jest jednak bardzo mały. Gaz nie decyduje o temperaturze wsadu. Straty mocy w gazie w stadium roztopiania nie przekraczają 3% mocy łuków. Zwiększenie mocy prowadzi do wzrostu zawartości pyłu w obszarze gazowym komory pieca. To może jednak w pewnym stopniu zmienić warunki wymiany ciepła.

Tak więc poziom mocy promieniowania łuków $P_{\epsilon 3}$ jest wskaźnikiem intensywności technologicznej nagrzewania i topienia. Dlatego z punktu widzenia projektowania pieców interesujące jest zbadanie zależności mocy promieniowania P_{ϵ} od parametrów elektrycznych zewnętrznych pieca. Najsilniejszy wpływ ma tutaj napięcie wtórne liniowe U_{2l} transformatora piecowego.

Najwyraźniej pokazuje to porównanie dwóch stanów pracy pieców japońskich o takiej samej pojemności i z taką samą mocą transformatora piecowego $S_{tr} = 45$ MVA (piece AF12 i AF13 w tabeli 3). Zwiększenie napięcia U_{2l} z 435 do 650 V, z jednoczesnym zmniejszeniem prądu z 60 do 40 kA, doprowadziło do wyraźnego zwiększenia mocy promieniowania łuków $P_{\epsilon 3}$, z 20 556 do 29 155 kW. Pomimo



Rys. 6. Zależność mocy promieniowania łuków od prądu w piecu AF14 (1 — $U_{2l} = 650$ V, 2 — $U_{2l} = 573$ V, 3 — $U_{2l} = 486$ V, 4 — $U_{2l} = 417$ V)

zachowania takiej samej mocy transformatora, osiągnięto wyraźne zwiększenie szybkości topienia i mniejsze zużycie elektrod.

Na rysunku 6 pokazano zależność mocy promieniowania łuków $P_{\epsilon 3}$ od prądu z różnymi napięciami U_{2l} . Rozważania dotyczą pieca AF14. Jeśli nawet zachować stałą moc transformatora $S_{tr} = 25$ MVA (krzywa AB), to po zmniejszeniu prądu I_a i zwiększeniu napięcia U_{2l} z 417 V do 650 V moc promieniowania łuków rośnie z 6000 do 14 000 kW. Jeszcze wyraźniej wzrasta intensywność promieniowania łuku podczas pracy z prądami I_{ϵ} odpowiadającymi maksymalnej mocy promieniowania. Z rysunku widać, że moc maksymalną $P_{\epsilon 3} = 6014$ kW uzyskuje się w warunkach zasilania prądem $I_{\epsilon} = 30$ kA i napięciem $U_{2l} = 417$ V. W drugim przypadku występuje skojarzenie parametrów: mocy $P_{\epsilon 3} = 10 531$ kW, prądu $I_{\epsilon} = 40$ kA i napięcia $U_{2l} = 486$ V. W trzecim jest $P_{\epsilon 3} = 18 129$ kW, $I_{\epsilon} = 50$ kA i $U_{2l} = 573$ V. Natomiast w czwartym uzyskano $P_{\epsilon 3} = 26 591$ kW, $I_{\epsilon} = 60$ kA i $U_{2l} = 650$ V. Poziom mocy promieniowania $P_{\epsilon 3}$ trzech łuków zależy także od prądu zwarcia I_z pieca.

Jako uogólniony bezwzględny wskaźnik intensywności promieniowania łukowego przyjęto oznaczać iloczyn:

$$K_{\epsilon} = \frac{I_z \cdot U_{2l}}{1000}, \text{ MVA} \quad (10)$$

gdzie prąd zwarcia I_z w [kA].

Tak samo względny wskaźnik intensywności promieniowania łukowego może być wielkość względna odniesiona do masy roztopionej stali:

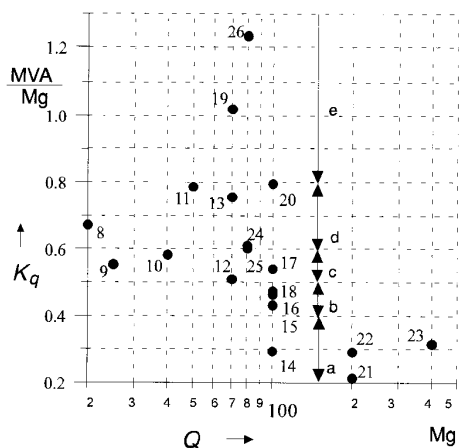
$$K_q = \frac{K_{\epsilon}}{Q} = \frac{I_z \cdot U_{2l}}{1000 \cdot Q}, \frac{\text{MVA}}{\text{Mg}} \quad (11)$$

Jeśli są znane parametry R i X obwodu zastępczego, to:

$$K_q = \frac{U_{2l}^2}{1000 \cdot Q \sqrt{3(R^2 + X^2)}} \quad (12)$$

Tabela 3. Wskaźniki intensywności promieniowania łukowego pieców przemysłowych (I_N — prąd znamionowy jednej fazy z elektrodą)

Oznaczenie — pojemność, kraj lub firma	Parametry transformatora piecowego na pierwszym stopniu napięcia wtórnego			Parametry obwodu elektrycznego pieca			Parametry intensywności łuków		
	S_{tr}	U_{2l}	I_N	R	X	$\frac{I_N}{I_z}$	I_z	$K_\epsilon = \frac{U_{2l} I_z}{1000}$	$K_q = \frac{K_\epsilon}{Q}$
Mg	MVA	V	kA	m Ω	m Ω	—	kA	MVA	MVA/Mg
AF1-0,5 Rosja	0,63	216	1,68	5,85	26,45	0,401	4,604	0,994	1,99
AF2-1,5 Rosja	1,00	225	2,57	2,36	20,15	0,2	6,403	1,441	0,96
AF3-3 Rosja	1,8	242	4,25	1,400	9,14	0,277	15,110	3,657	1,219
AF4-3 Rosja	2,0	243	4,8	2,08	9,70	0,34	14,142	3,437	1,146
AF5-5 Rosja	2,0	200	5,80	1,150	4,83	0,25	23,257	4,651	0,93
AF6-5 Rosja	2,8	257	6,30	1,250	5,85	0,254	24,804	6,375	1,275
AF7-5 Rosja	4,0	281	8,22	1,12	5,31	0,275	29,895	8,4	1,68
AF8-20 Rosja	9,0	270	19,50	0,700	3,05	0,391	49,825	13,453	0,673
AF9-25 Rosja	9,0	318	16,35	0,785	4,14	0,375	43,571	13,856	0,554
AF10-40 Rosja	15,0	368	23,50	0,637	3,29	0,37	63,402	23,332	0,583
AF11-50 Rosja	25,0	417	34,60	0,510	2,50	0,367	94,359	39,348	0,787
AF12-70 Japonia	45,0	435	60,0	0,6	3,0	0,73	82,09	35,709	0,51
AF13-70 Japonia	45,0	650	40	1,0	4,5	0,491	81,409	52,916	0,756
AF14-100 Rosja	25,0	417	34,60	0,575	3,35	0,488	70,831	29,537	0,295
AF15-100 Rosja	29,15	486	34,60	0,580	3,10	0,389	88,97	43,239	0,432
AF16-100 Rosja	32,0	478	38,80	0,500	2,80	0,4	97,027	46,379	0,464
AF17-100 Rosja	50,0	573	50,5	0,30	3,50	0,536	94,175	53,962	0,54
AF18-100 Rosja	63,00	573	60,90	0,490	3,97	0,736	82,703	47,389	0,474
AF19-70 Japonia	71,32	610	67,5	0,805	2,90	0,577	117,018	71,381	1,02
AF20-100 Rosja	80,0	761	60,7	0,28	4,19	0,58	104,627	79,621	0,796
AF21-200 Rosja	45,00	591,6	43,92	0,650	4,65	0,604	72,747	43,037	0,215
AF22-200 Rosja	59,70	690	50,00	0,640	4,65	0,59	84,871	58,561	0,293



Rys. 7. Wskaźnik intensywności promieniowania łuków K_q w piecach przemysłowych (na podstawie tabeli 3)

W przypadku pieca AF14, działającego w stanach pracy z różnymi wariantami zestawu parametrów (rys. 6), wskaźnik intensywności promieniowania łuków K_q zmienia się w szerokich granicach. Napięciu $U_{2l} = 417$ V odpowiada $K_q = 0,2954$, a napięciu $U_{2l} = 650$ V odpowiada $K_q = 0,7177$.

Zaproponowany wskaźnik intensywności promieniowania łukowego K_q jest jednoznacznie związany z poziomem mocy pieca. Pod tym względem jest on lepszy od przyjmowanej do tej pory zależności mocy transformatora piecowego od pojemności wsadowej Q pieca. W tabeli 3 zamieszczono obliczone wartości wskaźnika K_q pieców przemysłowych wyprodukowanych przez różne firmy.

Na rysunku 7 pokazano zależność wskaźnika intensywności promieniowania łuku pieców metalurgicznych o pojemnościach ponad 20 Mg. Wg niego istniejące obecnie piece można sklasyfikować w pięciu kategoriach nagrzewania (tabela 4).

5. WNIOSKI

1. Uwarunkowania klasyfikacji SPŁ nie mogą być wykorzystywane ani do jednoznacznej oceny ich stanu technicznego, ani do przewidywania zdolności technologicznych wytapiania stali.
2. Analiza układów zasilania i zbudowane na jej podstawie charakterystyki robocze nie są wystarczające do optymalnego doboru stanów pracy energetyczno-technologicznych SPŁPP.
3. Dotychczasowe zewnętrzne wskaźniki nagrzewania niosą niewiele informacji o stanach pracy łuków i nie znalazły zastosowania w klasyfikacji urządzeń piecowych.
4. Podział SPŁPP na podstawie wskaźnika intensywności promieniowania łukowego jest jednoznaczny i bardziej dokładny od stosowanego obecnie wg stosunku mocy transformatora piecowego S_p i pojemności wsadowej pieca. Umożliwia on projektowanie optymalnych stanów pracy elektrycznej pieców, którym odpowiadają minimalne nakłady energii z jednoczesnym osiąganiem zadanego poziomu intensywności nagrzewania łukowego.

Tabela 4. Kategorie pieców łukowych ze względu na intensywność promieniowania (K_q — średni wskaźnik intensywności promieniowania)

Kategoria pieca	K_q	\bar{K}_q
	MVA/Mg	MVA/Mg
małej intensywności	0,2 – 0,4	0,30
średniej intensywności	0,4 – 0,5	0,45
wielkiej intensywności	0,5 – 0,6	0,55
ultrawielkiej intensywności	0,6 – 0,8	0,70
super ultrawielkiej intensywności	0,8 – 1,2	1,00

LITERATURA

1. *Elektriceskije promyslennyje pecki. Dugowije pecki i ustanowki specjalnogo nagriewa*. Pod red. A.D. Swieczanskowo. Izd. Energoizdat, Moskwa 1981.
2. Grigorjew W. P., Nieczkin Ju. M., Jegorow A. W., Nikolskij L. E.: *Konstrukciji i projektowanije agriegatow staleplawilnogo proizwodstwa*. Wyd. MISIS, Moskwa 1995.
3. Hering M.: *Podstawy elektrotermii, cz. I*. WNT, Warszawa 1993.
4. Kruczynin A. M., Sawicki A.: *Modelowanie części stożkowej łuku skutecznego na przykładzie wybranych stalowniczych pieców łukowych prądu przemiennego*. JUEE, 1999, 1.
5. Kruczynin A. M., Sawicki A.: *Urządzenia elektrotechnologiczne z nagrzewaniem łukowym i plazmowym, cz. I. Teoria nagrzewania łukowego i plazmowego*. Skrypt 17, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1997.
6. Kurbiel A.: *Elektrotermiczne urządzenia łukowe*. WNT, Warszawa 1988.
7. Powołockij D. Ja., Gudym Ju. A., Zinurov I. Ju.: *Ustrojstwo i robota swierchmoszcznych dugowych staleplawilnych piecej*. Moskwa, Miedalurgija 1980.
8. *Powyszenie efektywności roboty elektrycznych dugowych piecej. Sposoby powyszenia efektywności roboty elektrodugowych piecej*. Nowosti czernoj miedalurgii za rubieżom. 1995, 2, 49–52.
9. Sawicki A., Krouchinin A. M.: *Modelling the cylindrical part of the effective arc in steelmaking arc furnaces*. Elektrowärme International ed B 1998, B4.
10. Schwabe W.: *Ultra high power arc furnaces*. Iron and Steel Engineers 1969, 9, 132–137.
11. Smolarenko V. D.: *Wysokomoszcznyje dugowije staleplawilnnye pecki*. Izd. Energija, Moskwa 1976.



Dr inż. Antoni Sawicki

Urodził się 22.07.1952 roku w Częstochowie. W 1977 roku ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej. Następnie podjął pracę na tej Uczelni na stanowisku asystenta w Zakładzie Elektrotechniki i Metrologii Elektrycznej. W 1988 roku obronił pracę doktorską w Moskiewskim Instytucie Energetycznym. Po awansowaniu na stanowisko adiunkta przystąpił do organizowania zespołu naukowo-dydaktycznego i budowy laboratoriów z zakresu elektrotechnologii. W 1993 roku został powołany na stanowisko kierownika nowego Zakładu Elektrotechnologii w Katedrze Elektrotechniki i Elektrotechnologii. Jest autorem i współautorem ponad 90 publikacji w czasopismach naukowych i materiałach konferencyjnych polskich i zagranicznych, 2 skryptów i 15 indywidualnych projektów wynalazczych. Jego dorobek obejmuje prace z zakresu elektrotechniki teoretycznej, metrologii elektrycznej, elektrotechnologii spawalniczej, elektrotermicznej i elektrochemicznej, elektrometalurgii i elektroekologii. Jest członkiem SEP, od 1997 roku członkiem Zarządu Oddziału Katowickiego Polskiego Komitetu Elektrotermii, od 1998 roku członkiem Prezydium Polskiego Komitetu Elektrotermii. Jego dziedziną zainteresowań jest ogólnie pojęta elektrotechnologia (elektrotermiczna, spawalnicza i elektrochemiczna).
Adres miejsca pracy:
Politechnika Częstochowska, Katedra Elektrotechniki i Elektrotechnologii, 42-200 Częstochowa, al. Armii Krajowej 17, tel. (0-34) 3250816, fax: (0-34) 3250823, email: sawickia@el.pcz.czest.pl.