

STALOWNICZE PIECE ŁUKOWE ZE ZWIĘKSZONĄ LICZBĄ ELEKTROD

Steelmaking Arc Furnaces with Increased Electrodes Number

Antoni SAWICKI

Politechnika Częstochowska

Streszczenie: W artykule opisano ograniczenia techniczne w rozwoju klasycznych stalowniczych pieców łukowych wielkiej mocy z minimalną liczbą elektrod. Przedstawiono wybrane działania konstrukcyjne zmierzające do przełamania tradycyjnych barier utrudniających zastosowanie w hutnictwie pieców wieloelektrodowych. Podano uzasadnienie dotychczasowych niepowodzeń budowy wieloelektrodowych pieców łukowych prądu przemiennego. Wskazano na perspektywy rozwoju wieloelektrodowych pieców łukowych prądu stałego.

Summary: The technical limitations of the development of classical big power steelmaking arc furnaces with a minimal number of electrodes is described in this paper. Selected constructional operations bound for breaking traditional barriers, making difficult the introduction of multi electrodes furnaces into metallurgy, are shown. Reason are given for failures in the construction of ac multi electrodes arc furnaces. Prospects of development of dc multi electrodes arc furnaces are elaborated upon.

1. WSTĘP

Obecnie istnieje szereg obiektywnych czynników sprzyjających przyspieszonemu wprowadzaniu do hutnictwa stalowniczych pieców łukowych (SPL). Najważniejsze z nich to: upowszechnienie się procesów konwertorowo-tlenowych do przerobu surowki i powolny zanik produkcji stali węglowych w nieekonomicznych piecach martenowskich, duże ilości złomu tworzonego przez współczesne cywilizacje przemysłowe, możliwość niemal bezpośredniej redukcji żelaza z rud, rosnące zapotrzebowanie na stale wysokojakościowe i specjalne oraz upowszechnienie się technologii obróbki metali w piecach kadziowych. Duże piece łukowe, w porównaniu z małymi, mają mniejszy stosunek powierzchni do objętości kąpieli. Powoduje to zmniejszenie strat ciepła wskutek przewodnictwa i promieniowania. Poza tym, złożoność mechaniczna i elektryczna konstrukcji zwiększają się znacznie wolniej niż moc urządzenia. Dlatego obserwuje się stałą tendencję budowy pieców o coraz większych pojemnościach i mocach.

Dostarczenie potrzebnych dużych ilości mocy cieplnej do pieców łukowych napotyka liczne problemy techniczne [7,9,10]. Dotyczą one zarówno globalnych wartości mocy, jak i jej rozkładu przestrzennego w obszarze roboczym komory. Szereg problemów, takich jak na przy-

kład budowa układów zasilania energią elektryczną odpowiednio dużej mocy (sieci, transformatorów, prostowników, torów wielkoprądowych, elektrod grafitowych) lub zapewnienie równomiernego rozkładu mocy cieplnej w kotle, może zostać bardzo łatwo rozwiązanych po wprowadzeniu do eksploatacji pieców wieloelektrodowych. Podobne piece, jako łukowo-rezystancyjno-elektrodowe, już od dawna i dość często są stosowane do wytapiania metali z rud. Stabilny charakter płonienia łuku elektrycznego (nawet prądu przemiennego) nie nakłada wysokich wymagań na układy regulacji zarówno źródeł zasilania, jak i napędów elektrod. Inaczej jest w stalownictwie. Skrajnie niestabilne krótkie łuki prądu przemiennego powodują silne ograniczenia w powszechnym użytkowaniu pieców wieloelektrodowych. Przyczyną są bardzo wysokie wymagania dotyczące jakości działania układów regulacji mocy oraz duża złożoność, ciężkie warunki pracy i zwiększona awaryjność układów napędowych elektrod oraz przełączników stopni transformatorów. Z drugiej zaś strony klasyczne stalownicze piece łukowe prądu przemiennego (SPŁPP) już i tak są wyposażone w trzy, jako minimum, elektrody. Wynika to z wielu korzystnych efektów energetycznych i technologicznych wykorzystania sieci trójfazowej i trzech łuków [3,6]. Podobnie wiele korzystnych efektów cieplnych, elektrodynamicznych i magnetohydrodynamicznych (równo-

mierny rozkład strumieni ciepła, brak wzajemnego oddziaływania łuków, efektywne kondukcyjne mieszanie kąpieli) stwierdzono w jednoelektrodowych stalowniczych piecach łukowych prądu stałego (SPŁPS) [2,6–10]. Dlatego takie piece stały się dzisiaj klasyczne w elektrometalurgii. Nie uwzględniono tutaj niestety szeregu innych niezwykle korzystnych możliwości, jakie stwarza uproszczenie układu napędowego elektrody włączonej w obwód z o wiele bardziej stabilnym, chociaż długim, łukiem elektrycznym. Najistotniejsze są jednak możliwości zastosowania cieńszych katod grafitowych i kilku prostowników sterowanych, z których każdy ma znacznie zmniejszoną moc znamionową. Sposób działania i efekty eksploatacji pieców wieloelektrodowych muszą się znacznie różnić od tradycyjnych. W przewidywaniach i planach nie można, w zasadzie, dowolnie stosować zasady superpozycji ani ekstrapolacji liniowych, gdyż zarówno charakterystyki energofizyczne gazów, jak i łuku są silnie nieliniowe [3,6].

Celem tego artykułu jest pokazanie ograniczeń w rozwoju klasycznych stalowniczych pieców łukowych wielkiej mocy z minimalną liczbą elektrod. Na ich tle wskazano na dotychczasowe tendencje budowy SPŁPS. Wynikają one z tradycyjnie przyjmowanych błędnych założeń konstrukcyjnych (np. minimalizacja liczby elektrod jako kryterium uproszczenia konstrukcji i eksploatacji pieca, intensywne mieszanie kondukcyjne metalu jako kryterium efektywności procesów metalurgicznych w piecu do roztapiania złomu). W artykule opisano wybrane działania konstrukcyjne zmierzające do przełamania barier utrudniających zastosowanie w hutnictwie pieców wieloelektrodowych. Podano uzasadnienie dotychczasowych niepowodzeń i wskazano na perspektywy rozwoju wieloelektrodowych SPŁPS.

2. WYBRANE UWARUNKOWANIA TECHNOLOGICZNE BUDOWY PIECÓW BARDZO DUŻYCH MOCY

Współczesne SPŁ bardzo dużych mocy wyróżniają się szeregiem specyficznych właściwości techniczno-eksploatacyjnych. Należą do nich: 1) stosowanie transformatora piecowego wielkiej mocy, 2) specjalna masywna konstrukcja toru wieloprądowego i uchwytów elektrodowych, 3) wykorzystanie elektrod o dużej średnicy wykonanych z grafitu o wysokiej jakości, 4) stosowanie paneli chłodzonych wodą do budowy ścian i sklepienia, 5) wstępne podgrzewanie złomu gazami odlotowymi, 6) umieszczenie pieca w obudowie dźwiękoszczelnej, 7) podawanie materiałów żużłotwórczych i domieszek przez otwór w sklepieniu, 8) stosowanie palników paliwowo-tlenowych do podgrzewania wsadu, 9) praca z realizacją procesu jednożużłowego, 10) stosowanie żużła spienionego, 11) spust metalu do kadzi ustawionej na wózku żużłowym [5]. Sporadycznie stosowanymi dodatkowymi rozwiązaniami są: szyby do podgrzewania złomu, zwiększona wysokość kotła w celu jednorazowego pełnego załadowania złodem, elektrody kombinowane chłodzone wodą i bliźniacze kotły obsługiwane przez pojedynczy system elektrodowy. Wszystkie te środki mają zapewnić wysoką efektywność

topienia, dzięki skróceniu czasu przebywania wsadu w piecu i pełnemu wykorzystaniu mocy zainstalowanych urządzeń elektrycznych.

Niezależnie od mocy pieca, ciepło z łuku jest przekazywane do złomu kilkoma drogami. Są to promieniowanie, konwekcja nagrzanymi gazami, kondensacja par metali tworzonych w strefie łuków i nagrzewanie rezy-stancyjne podczas przepływu prądu przez złom. Udział każdej z tych składowych zależy od mocy łuku, konstrukcji pieca i zastosowanego reżymu technologicznego. W dotychczasowych konstrukcjach pieców istnieje szereg czynników ograniczających wprowadzaną moc elektryczną. W SPŁPP jest to graniczna wartość napięcia (1000 V), a w SPŁPS dopuszczalny prąd pojedynczej elektrody o dostępnej średnicy. Z kolei stosowanie pieców o mniejszym stosunku pojemności do mocy elektrycznej jest ograniczone szybkością nagrzewania (do 5°C/min), ze względu na erozję wykładziny. Dlatego obserwowana stała tendencja powiększania mocy jednostkowej pieców łukowych dotyczy przede wszystkim urządzeń służących do roztapiania złomu. Stosunkowo długotrwałe ekranowanie promieniowania łuku przez ściany studni wytopionej w złomie umożliwia znaczne zwiększenie mocy łuków. Jednak powszechnie stosowana zbyt mała liczba łuków powoduje wiele problemów technologicznych. Należą do nich: konieczność symetrycznego załadowania złomu i niekiedy potrzeba stosowania obracania kotła oraz ograniczona wartość prądu ze względu na stosowane elektrody. W SPŁPP dodatkowo występują istotne problemy elektroenergetyczne, gdyż po zgaśnięciu któregoś z łuków następuje gwałtowny spadek mocy dostarczanej, a po zwarciu lub zerwaniu łuku skokowy wzrost asymetrii w sieci i silny efekt migotania.

Z tabeli 1 widać wyraźne różnice w wymaganiach energetycznych i efektach technologicznych eksploatacji SPŁ służących do roztapiania złomu i do rafinowania metalu. Uzasadniają one największe zapotrzebowanie na piece o zwiększonej liczbie elektrod z przeznaczeniem do roztapiania złomu. W takich przypadkach załadowanie pieca może być nawet asymetryczne. Zgaśnięcie któregoś z łuków na skutek zwarcia, zerwania lub awarii w systemie zasilania nie powoduje gwałtownego spadku mocy doprowadzanej. Efekty asymetrii w sieci lub migotania oświetlenia mogą być wtedy znacznie słabsze.

Stosowanie większej liczby cieńszych elektrod zamiast mniej, a grubszych, normalnie musi wiązać się ze znacznym nasileniem wielu problemów eksploatacyjnych. Wzrost powierzchni bocznej elektrod powoduje zwiększone ich narażenie na bardzo szkodliwe oddziaływanie promieniowania ciepłego i aktywnej atmosfery w komorze piecowej (utlenianie, sublimację) [7]. Zmniejsza się także ich wytrzymałość mechaniczna, a więc odporność na pęknięcia, obłamania i złamania od udarów i naprężeń. Dodatkowo, między bliżej rozstawionymi elektrodami, wzrastają oddziaływania elektrodynamiczne. Ułatwia to powstawanie wibracji i złamań elektrod.

Większa liczba elektrod jest przyczyną znacznego zbliżenia łuków. W zwykłych SPŁPP okresowe odchylenie krótkich łuków w stronę wykładziny ścian jest spowodowane nie tylko oddziaływaniem prądu łuku na pole magnetyczne wytworzone przez własny prąd w kąpieli płynącej przy powierzchni, ale i na wirujące pole mag-

Tablica 1. Różnice w wymaganiach technicznych, efektach fizycznych i skutkach technologicznych stosowania łuków elektrycznych i innych środków wspomagających nagrzewanie w różnych stadiach wytopu

Właściwości technologiczne łuku i pieca	Stadium pracy pieca	
	Roztapianie złomu	Rafinowanie kąpieli
Długość łuku	Wymagana duża długość łuku i duża moc promieniowania cieplnego ze względu na dużą szybkość nagrzewania	Wymagana mniejsza długość łuku i mniejsza moc promieniowania cieplnego ze względu na ochronę wykładziny ścian
	Duże prawdopodobieństwo zwarć i zerwań łuku na skutek zawałów złomu	Duże prawdopodobieństwo zwarć na skutek wahań lustra kąpieli metalowej
Zagłębienie łuku we wsad	Duże, w głębokie studnie wytopione w złomie	Niewielkie, w dołek na powierzchni kąpieli metalowej, którego głębokość rośnie wraz z prądem
	Naturalne ekranowanie promieniowania łuku studniami wytopionymi w złomie	Naturalne ekranowanie promieniowania łuku dołkiem na powierzchni kąpieli i sztuczne ekranowanie grubą warstwą spienionego żużla
	Duża szybkość nagrzewania wsadu	Mała szybkość nagrzewania wsadu
	Łuk w większym stopniu wpływa na erozję wykładziny sklepienia, a w mniejszym na erozję wykładziny ścian	Łuk silnie wpływa na erozję wykładziny ścian bocznych kotła
Ruchliwość łuku	Wymagana duża podczas wytapiania kraterów ze względu na zmiany rozkładu przestrzennego złomu; po utworzeniu jeziora ciekłego metalu też duża, ze względu na ochronę przed przegrzewaniem trzonu	Wymagana mała ze względu na lepszą stabilność płonięcia łuku, głębszy dołek na powierzchni kąpieli i ochronę wykładziny przed przyspieszoną erozją
Odchylenie łuku	Losowe i zależne od rozplywu prądu własnego w złomie, rozkładu geometrycznego złomu oraz procesów termicznych i gazodynamicznych w łuku i studni	Na losowe zaburzenia termiczne i gazodynamiczne nakładają się odchylenia wywołane prądem łuku i prądami w sąsiednich łukach oraz ruchami kąpieli metalowej
	Złom częściowo ekranuje pola wytworzone przez obwody sąsiednich łuków	Brak ekranowania powoduje odchylenie łuków od pionu w stronę ścian wykładziny i jej przyspieszoną erozję
Symetria łuków	Jest trudna do uzyskania, zwłaszcza dynamiczna	Istnieje szereg sposobów skutecznej eliminacji asymetrii statycznej
	Skutkiem asymetrii na początku może być przegrzanie trzonu, a później nierównomierne roztopienie złomu w piecu	Skutkiem asymetrii statycznej jest nierównomierny rozkład temperatur w kąpieli metalowej i żużlu, nieprawidłowy przebieg procesów metalurgicznych oraz nierównomierne zużycie wykładziny
	Asymetria pogarsza jakość energii elektrycznej, powoduje wzrost strat i efekt migotania lamp	Asymetria pogarsza jakość energii elektrycznej w sieci, powoduje wzrost strat
Mieszanie metalu	Zbędne i mało efektywne	Ma duże znaczenie ze względu na przebieg procesów metalurgicznych
	Trudne w realizacji w dużych piecach do roztapiania	Łatwe w realizacji w małych piecach kadziowych do rafinowania
Stosowanie paliw do wytworzenia dodatkowych źródeł ciepła	Przyczynia się do oszczędności drogiej energii elektrycznej i wraz z gazami odlotowymi przyspiesza roztopienie złomu	Przyczynia się do oszczędności drogiej energii elektrycznej, przyspiesza nagrzewanie i wyrównywanie temperatury kąpieli metalowej i żużla
	Niska efektywność konwekcyjnego przejmowania ciepła przez złom, zwłaszcza w wysokich temperaturach i zwiększone nakłady na oczyszczanie gazów odlotowych w znacznym stopniu eliminuje korzyści ze stosowania paliw	Bardzo niska efektywność ze względu na częściowe spalanie węgla do CO w wysokich temperaturach, konieczność dopalania gazów odlotowych do CO ₂

netyczne utworzonego układu trójfazowego. Efekty wzajemnego oddziaływania łuków nasilają się wraz ze wzrostem iloczynu prądów, spadkiem odległości między łukami i wzrostem ich długości. Najwyraźniej to zjawisko występuje w długich łukach prądu stałego. Zgodny kierunek prądów w SPŁPS wieloelektrodowym prowadzi do przyciągania się łuków, aż do utworzenia pojedynczego łuku z rozszczepioną katodą. W przypadku istnienia zbyt

dużych różnic w napięciach zasilania łuków mogą popłynąć między źródłami szkodliwe prądy wyrównawcze, powodujące albo wzajemne obciążanie źródeł, albo zaprzestanie działania jednego z nich. Skrajnym i awaryjnym przypadkiem jest łuk płonący tylko między dwiema elektrodami grafitowymi.

Zwykle stosowanym przeciwdziałaniem wzajemnemu oddziaływaniu łuków jest maksymalnie możliwe oddale-

nie elektrod. Prowadzi to jednak do przybliżenia łuków do ścian i do przyspieszonej erozji wykładziny w najbliższej położonym obszarze.

Zastosowanie większej liczby elektrod w SPŁ dużych mocy nie ma istotnego wpływu na mieszanie kąpieli. W SPLPP ono nie występuje i w razie potrzeby może być wymuszane dodatkowymi mieszadłami indukcyjnymi lub przedmuchiwaniami gazami. W SPLPS występuje intensywne kondukcyjne mieszanie kąpieli, zwłaszcza w piecach jednoelektrodowych z odpowiednią elektrodą trzonową [7]. Zastosowanie wielu katod może znacznie osłabić lub zupełnie wyeliminować ten efekt. Jednak w piecach wielkich mocy służących przede wszystkim do roztopienia wsadu powoływanie się na to kryterium oceny nie jest w pełni uzasadnione.

Opisane wady są główną przyczyną dotychczas małego rozpowszechnienia SPŁ ze zwiększoną liczbą elektrod. Trwają jednak intensywne prace mające na celu pokonanie tych trudności. W artykule zostaną opisane niektóre osiągnięcia naukowo-techniczne i przemysłowe związane z eliminowaniem tych wad i możliwością stosowania w hutnictwie pieców wieloelektrodowych.

3. WIELOELEKTRODOWE STALOWNICZE PIECE ŁUKOWE PRĄDU PRZEMIENNEGO

W ciągu stosunkowo długiej historii rozwoju SPLPP nie nastąpiło upowszechnienie pieców ze zwiększoną liczbą elektrod. Dokładne poznanie przyczyn tego faktu jest bardzo istotne, gdyż do tej pory rzutuje ono na zahamowania w stosowaniu SPLPS ze zwiększoną liczbą elektrod. Ponieważ zarówno łuki elektryczne, jak i układy elektrodowe różnią się w obydwu rodzajach pieców [6,7], to nie można automatycznie przenosić ograniczeń technicznych z jednego rodzaju agregatu na drugi.

3.1. Wpływ zwiększonej liczby elektrod na zagadnienia konstrukcyjno-mechaniczne budowy SPLPP

Zwiększenie liczby elektrod w SPLPP powoduje rozbudowę tylko tej części mechanicznej pieca, która bezpośrednio służy ich przemieszczaniu. Pozostałe układy mechaniczne albo pozostają bez zmian, albo ulegają uproszczeniu (tab. 2). Niemniej układ napędowy i mechanizm przesuwu elektrody (elektromechaniczny lub elektrohydrauliczny) spełniają w piecu najważniejszą rolę. Od szybkości i dokładności ich działania zależy jakość działania całego pieca. Ponieważ liczbie elektrod odpowiada taka sama liczba mechanizmów przesuwu, to budowa pieców wieloelektrodowych wiąże się ze zwiększonymi nakładami inwestycyjnymi. Więcej mechanizmów zwykle prowadzi do wzrostu awaryjności. Z drugiej zaś strony ich warunki pracy ulegają ułatwieniu. Przyczyną jest znaczne zmniejszenie mas elektrod.

3.2. Wpływ zwiększonej liczby elektrod na zagadnienia konstrukcyjno-elektryczne budowy SPLPP

Projektowanie, budowa i eksploatacja klasycznych SPLPP wiążą się z wieloma bardzo poważnymi problemami technicznymi [3,5,6]. Trudne są do uniknięcia różnice w indukcyjnościach wzajemnych poszczególnych faz pieca. Prowadzą one do przenoszenia mocy z jednej fazy do drugiej. Powstają wtedy zjawiska fazy mocnej i słabej. Skutkiem tego jest zmniejszenie wydajności i ekonomizacji pieca, a niekiedy nawet jego uszkodzenie. Od rezystancji toru wieloprądowego zależy sprawność pieca i wartość optymalna prądu. Natomiast od reakcji indukcyjnej zależy spadek napięcia w torze, współczynnik

Tablica 2. Porównanie wpływu liczby elektrod na konstrukcję mechaniczną SPLPP

Cechy konstrukcyjne i eksploatacyjne pieca	Rodzaj SPLPP	
	Trójelektrodowy	Sześcioelektrodowy
Złożoność mechaniczna układu unoszenia elektrod i sklepienia oraz mechanizmów przesuwania elektrod	Duża złożoność wynikająca ze skomplikowanej budowy toru wieloprądowego i wymaganej dużej ruchliwości trzech elektrod	Jeszcze większa złożoność wynikająca z bardziej rozbudowanego toru wieloprądowego i 6 mechanizmów przesuwu elektrod
Skuteczność hermetyzacji kotła	Trzy przepusty szybko i często przesuwanych elektrod powodują niewystarczającą skuteczność uszczelnienia	Sześć przepustów elektrod jeszcze bardziej pogarsza skuteczność uszczelnienia
	Duże skoki ciśnienia od trzech łuków z dużymi prądami	Mniejsze i częstsze skoki ciśnienia od sześciu łuków z mniejszymi prądami
Wytrzymałość mechaniczna i cieplna konstrukcji sklepienia	Typowa na skutek małej liczby dużych otworów	Podobna na skutek większej liczby ale małych otworów
	Silne nagrzewanie sklepienia promieniowaniem cieplnym od łuków i rozgrzanych elektrod	Słabsze nagrzewanie łukami ze słabszymi prądami, a większa liczba elektrod spełnia rolę ekranów dla promieniowania sąsiednich łuków
Efektywność działania układu obracania kotła	Znacznie skraca stadium roztopienia złomu, zwłaszcza w piecach z krótkimi łukami	Nie ma znaczącego wpływu na szybkość roztopienia wsadu, nie ma potrzeby stosowania nawet w piecach z krótkimi łukami
Nakłady inwestycyjne na konstrukcję mechaniczną pieca	Typowe, jak dla SPLPP	Znacznie zwiększone, głównie na tor wieloprądowy i mechanizmy przemieszczania elektrod

mocy i warunki ciągłości płonienia łuku. Obecność różnych części składowych w torze wieloprądowym, w tym elastycznych, znacznie komplikuje obliczanie parametrów projektowanego pieca. Tak więc pomimo bardzo małej długości tor wieloprądowy stanowi niezwykle istotny i trudny do optymalizacji element konstrukcyjny pieca. Dalsza jego rozbudowa, na przykład dla pieców sześcieelektrodowych, jeszcze bardziej komplikuje całą konstrukcję.

Możliwe są dwa podstawowe warianty budowy pieca sześcieelektrodowego. W pierwszym — na każde z sześciu uzwojeń strony wtórnej transformatora przypada jeden łuk. W drugim — każde uzwojenie zasila po dwa łuki połączone szeregowo. Na rysunku 1a przedstawiono schemat takiego toru wieloprądowego. W celu zmniejszenia prądów we wsadzie i mocy strat oraz polepszenia warunków pracy pieca zaproponowano inny schemat [3] przedstawiony na rysunku 1b. Oba te obwody z szeregowym połączeniem łuków wykorzystują uproszczoną konstrukcję transformatora piecowego, jednak występuje w nich silne oddziaływanie elektryczne jednego łuku na drugi. Utrudnia to znacznie sterowanie mocą pieca. Jeśli nie nastąpiło zwarcie, to zgaśnięcie jednego z łuków powoduje zanik prądu w drugim.

Układ zasilania pieca sześcieelektrodowego wg schematu sześciofazowego zaproponował Wasilenko [11]. Dzięki temu rozwiązaniu w stanie symetrycznym nie powstają napięcia między punktami zerowymi pieca i transformatora. Zwiększa to stabilność płonienia łuków i pracy

automatycznych regulatorów przemieszczenia elektrod. Elektrody w takim piecu są rozmieszczone parami i zasilane z przeciwnych faz. Skutkiem tego jest zmniejszenie indukcyjności toru wieloprądowego.

W tabeli 3 zamieszczono porównanie wpływu liczby elektrod na zasilanie energią elektryczną SPLPP o takich samych mocach znamionowych. Z jej analizy i z analizy tabeli 2 wynika konieczność znacznego skomplikowania konstrukcji pieca sześcieelektrodowego. Uzyskiwane korzyści są zbyt małe w zestawieniu ze zwiększonymi nakładami środków inwestycyjnych na budowę takich pieców.

3.3. Wpływ zwiększonej liczby elektrod na zagadnienia technologiczno-eksploatacyjne SPLPP

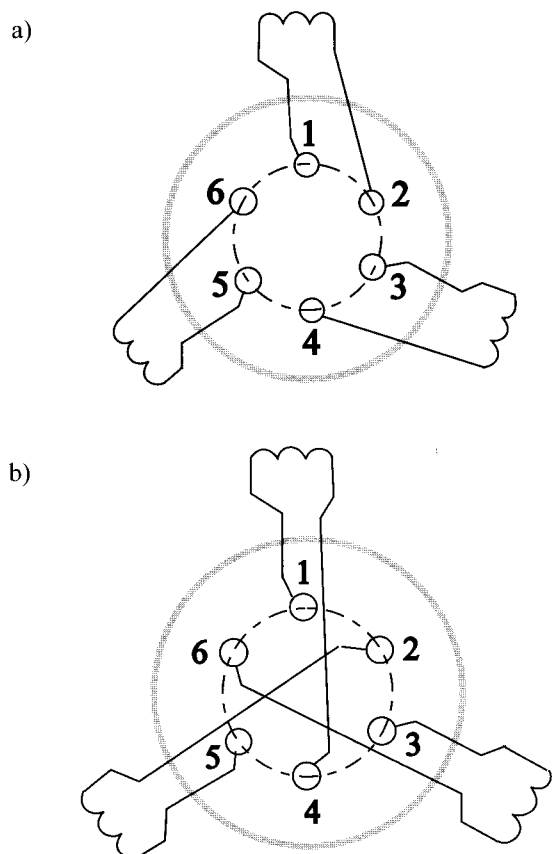
Cechą charakterystyczną SPLPP jest trudność uzyskania stali z niską zawartością węgla. Pochodzi on m.in. ze złamanych elektrod, których warunki pracy są niezwykle ciężkie. Zastąpienie ich cieńszymi, o mniejszej wytrzymałości mechanicznej, musi prowadzić do pogorszenia efektów technologicznych eksploatacji pieców. Słabsze łuki powodują wytapianie węższych studni z większymi możliwościami zawałów i złamań elektrod. Z kolei mniejsze prądy wywołują niższe temperatury plazmy i zmianę struktury łuków skutecznych. Wzrasta wtedy udział mało efektywnej wymiany konwekcyjnej ciepła ze złomem w porównaniu z efektywniejszą wymianą promienistą. Słabsze łuki prądu przemiennego stają się przez to mniej stabilne. Po zgaśnięciu łuku operacja powtórnego zapłonu przez zetknięcie elektrody ze złomem często prowadzi do uszkodzeń elektrody i nawęglania wsadu. Z tego opisu i z tabeli 4 można wnioskować, że zastępowanie trójelektrodowych SPLPP wieloelektrodowymi wiąże się z pogorszeniem wielu efektów technologicznych.

4. WIELOELEKTRODOWE STALOWNICZE PIECE ŁUKOWE PRĄDU STAŁEGO

Piece wieloelektrodowe pojawiły już na wczesnym etapie rozwoju SPLPS. W wariantcie trójelektrodowym powstawały jako efekt przebudowy pieców trójfazowych. Wykorzystywały więc wszystkie możliwości układów mechanicznych SPLPP. Później SPLPS jako symetryczne jednoelektrodowe ze skutecznym mieszanym kondukcyjnym kąpielą i „niezbyt dużymi” prądami (poniżej 80 kA) szybko zdominowały oferty firm metalurgicznych i stały się dzisiaj prawdziwym standardem. Stosowane niekiedy w nich dodatkowe elektrody grafitowe spełniają jedynie rolę anod rozruchowych [7].

4.1. Wpływ zwiększonej liczby elektrod na zagadnienia konstrukcyjno-mechaniczne budowy SPLPS

SPLPS powstałe z przebudowy SPLPP nie w pełni wykorzystują możliwości dynamiczne układów napędowych elektrod. Przyczyną jest znacznie stabilniejsze płonienie łuku prądu stałego. Krótkie łuki w SPLPP powodują niekorzystny (zamknięty i półsferyczny) kształt studni [6] z częstymi zawałami złomu. Zmusza to konstru-



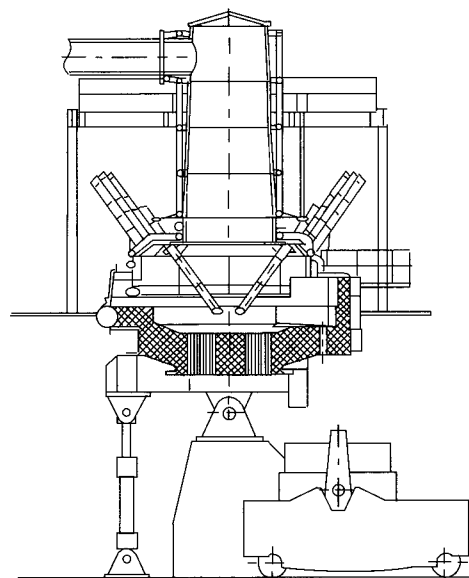
Rys. 1. Schematy torów wieloprądowych pieców sześcieelektrodowych: a) zwykły, b) ulepszony [3]

Tablica 3. Porównanie wpływu liczby elektrod na zasilanie energią elektryczną SPLPP

Cechy konstrukcyjne i eksploatacyjne pieca	Rodzaj SPLPP	
	Trójelektrodowy	Sześcioelektrodowy
Złożoność układu zasilania po stronie wysokiego napięcia	Sieć WN z mocą zwarcia ok. 40–80 razy większą od mocy znamionowej pieca	Sieć WN może mieć moc zwarcia nieco mniejszą ze względu na mniejsze o połowę moce poszczególnych łuków
	Typowy transformator piecowy	W piecu trójfazowym typowy, a w piecu sześciofazowym specjalny
Złożoność elektryczna toru wieloprądowego	Duża dla torów o lepszych właściwościach elektrycznych	Jeszcze większa niż w klasycznym SPLPP
Dynamika układu napędowego przesuwu elektrod	Użycie trzech masywnych elektrod powoduje zle właściwości dynamiczne układu napędowego każdej z nich	Użycie sześciu mniejszych elektrod powoduje lepsze właściwości dynamiczne układu napędowego każdej z nich
Wibracje elektrod	Znaczne siły elektrodynamiczne na skutek oddziaływania dużych prądów mogą powodować wibracje i złamanie elektrod	Mniejsze odległości i cieńsze elektrody znacznie ułatwiają wibracje i złamanie elektrod
Wzajemne oddziaływanie elektrodynamiczne łuków	Słabe, efekty odchylenia łuków głównie od własnych prądów w kąpeli	Ułatwione ze względu na mniejsze odległości
	Brak możliwości wyeliminowania	Istnieje możliwość takiego rozmieszczenia elektrod, która minimalizuje skutki oddziaływania
Stabilność płonienia łuku	Niska stabilność, zwłaszcza w stadium roztapiania złomu	W piecu z szeregowymi łukami jeszcze bardziej pogorszona stabilność
	Krótkie łuki z przewagą konwekcyjnej wymiany ciepła ze wsadem	Mniejsze moce zwiększają udział konwekcyjnej wymiany ciepła
Wahania napięcia i migotanie lamp zasilanych z sieci	Znaczne z uwagi na dużą niestabilność łuków i ich duże moce	Mniejsze ze względu na mniejsze o połowę moce łuków
Asymetria obciążenia sieci zasilającej	Pojawia się na skutek zaburzeń w płonieniu łuków i zaburzeń w układach regulacji	Mniejsza z uwagi na mniejsze moce poszczególnych łuków
Poziom harmonicznych	Wysoki pod względem amplitud i zakresu częstotliwości	Nieco niższy ze względu na mniejsze moce poszczególnych łuków, wzrasta w przypadkach interferencji
Nakłady inwestycyjne na konstrukcję elektryczną pieca	Wysokie, typowe jak dla SPLPP (bardzo kosztowny kompensator dynamiczny mocy biernej)	Znacznie zwiększone z powodu niestandardowego toru wieloprądowego (transformatora) oraz większej liczby regulatorów i napędów elektrod

ktorów do pionowej lokalizacji elektrod. Taką tendencję zachowano potem w budowie jednoelektrodowych SPLPS, pomimo że łuk uległ znacznemu wydłużeniu i zmienił się kształt studni (szeroki lej). Z tej przyczyny nagrzewanie złomu gorącymi gazami w kotle pieca w dalszym ciągu odbywa się w sposób nieoptymalny, od góry. Zawieszenie elektrody w uchwycie ponad sklepieniem wymaga zastosowania bardzo masywnej konstrukcji wysięgnika, zmniejsza jej wytrzymałość mechaniczną i silnie naraża na szkodliwe działanie rozgrzanych gazów. Porównanie efektów stosowania takich rozwiązań konstrukcyjnych w SPLPS jednoelektrodowych i ze zwiększoną liczbą elektrod zawiera tabela 5.

Prawdziwy przełom w poglądach na budowę SPLPS ze zwiększoną liczbą elektrod nastąpił dopiero po zaproponowaniu przez firmę VAI pieca typu COMELT [1,4]. Jego pojemność może wynosić ponad 150 Mg. Piec jest wyposażony w cztery boczne elektrody (rys. 2). Są one rozstawione symetrycznie na obrzeżach kotła i nachylone pod kątem 40°. Pojedyncza elektroda trzonowa typu wielopłytkowego jest umieszczona symetrycznie. Osio-



Rys. 2. Schemat pieca typu COMELT [4]

Tablica 4. Porównanie wpływu liczby elektrod na procesy metalurgiczne w SPLPP

Cechy technologiczne pieca	SPLPP	
	Trójelektrodowy	Sześcielektrodowy
Załadowanie pieca	Wymagane symetryczne w piecu klasycznym po uniesieniu sklepienia i trzech elektrod	Wymagane symetryczne po uniesieniu sklepienia i sześciu elektrod
	Jest asymetryczne w piecu z szybem po uniesieniu trzech elektrod	Jest asymetryczne w piecu z szybem po uniesieniu sześciu elektrod
Rozruch pieca	Typowy przez zetknięcie każdej elektrody ze wsadem	Utrudniony w piecach z szeregowymi łukami
Postać studni	Trzy wąskie zakończone półsferami	Sześć wąskich studni zakończonych małymi półsferami
	Duża możliwość zawałów i niekiedy potrzeba obracania kotła	Duża możliwość zawałów, obracanie kotła jest zbędne
Mieszanie kąpieli metalowej	Na powierzchni pod płamą mało intensywne	Pod mniejszą płamą jeszcze mniej intensywne
	Wewnątrz kąpieli brak	Wewnątrz kąpieli brak
Rozkład mocy cieplnej w kotle	Nierównomierny, największe moce cieplne skupione w trzech obszarach, izotermy zewnętrzne mają kształty zbliżone do jednokładnych trójkątów	Bardziej równomierny, największe moce cieplne skupione w sześciu obszarach, izotermy zewnętrzne mają kształty zbliżone do jednokładnych sześciokątów
Ekranowanie wykładziny	Na początku stadium roztopienia bardzo efektywne za pomocą złomu	Na początku stadium roztopienia bardzo efektywne za pomocą złomu
	W pozostałych stadiach dołkiem i grubą warstwą żużla spienionego	W pozostałych stadiach utrudnione ze względu na bliższe położenie łuków
Zużycie elektrod	Duże (3,2–4,5 kg/Mg) na skutek utleniania i częstych złamań	Jeszcze większe z powodu większej powierzchni utleniania i mniejszej wytrzymałości mechanicznej
Nawęglanie metalu	Wysokie, na skutek obłamań i złamań elektrod	Jeszcze wyższe, gdyż złamania są ułatwione
Utlenianie złomu nagrzanego w koszu lub w szybie	Wysokie na skutek dużej wymiany gazowej z otoczeniem	Prawie takie samo jak dla SPLPP
Wydzielanie pyłów i gazów	Duże, na skutek dużych skoków ciśnienia w komorze i zgaru wsadu	Prawie takie samo jak dla SPLPP
Poziom hałasu	Wysoki do 120 dB, konieczność umieszczania pieców w obudowach	Nieco mniejszy od słabszych łuków
Koszty eksploatacji pieca	Wysokie na skutek dużego zużycia elektrod, zgaru dodatków stopowych, konieczności oczyszczania gazów, przeciągłego procesu roztopienia	Wyższe na skutek większego zużycia elektrod

wo, pośrodku sklepienia, znajduje się pionowy szyb. Ma on dwa boczne otwory. Poprzez górny otwór ładowany jest wsad w postaci złomu lub żelaza gąbczastego. Przez dolny otwór podawany jest koks i kamień wapienny. Natomiast sam szczyt szybu jest połączony z instalacją oczyszczania gazów odlotowych. Pomimo takiego rozwiązania piec ma stosunkowo mało ruchomych części. Nie ma w nim wysięgników elektrod i urządzeń do podnoszenia i odsuwania na bok elektrod oraz podnoszenia sklepienia.

4.2. Wpływ zwiększonej liczby elektrod na zagadnienia konstrukcyjno-elektryczne budowy SPLPS

Zastosowanie prądu stałego do zasilania SPL znacznie upraszcza budowę toru wieloprądowego. Zanik wpływu

indukcyjności własnych i wzajemnych umożliwia wydłużenie doprowadzeń prądowych. W przypadku zespołu pieców łukowych sumaryczna liczba elektrod wcale nie musi odpowiadać liczbie zasilaczy. Prostowników może być znacznie mniej i mogą być one przełączane na różne piece. Zależnie od stadium wytopu dany piec może pracować jako wieloelektrodowy (roztopienie złomu) lub jednoelektrodowy. W przypadkach utrudnionego rozruchu pieca część elektrod może być nawet wykorzystywana jako anody rozruchowe.

Budowa pieców wielkiej mocy wiąże się ze wzrostem ich wydajności i sprawności. Podobnie jest z prostownikami tyrystorowymi. Jednak ten przyrost nie jest tutaj aż tak wyraźny, gdyż nawet dla mniejszych mocy zasilacze te mają wysoką sprawność. Zysk energetyczny z budowy pieca o większej mocy z nadmiarem kompensuje straty

Tablica 5. Porównanie wpływu liczby elektrod na konstrukcję SPLPS

Cechy konstrukcyjne i eksploatacyjne pieca	SPLPS	
	Jednoelektrodowy	Wieloelektrodowy
Złożoność układu unoszenia elektrod i sklepienia	Tor wieloprądowy długi pojedynczy i o dużym przekroju, wymaga nieskomplikowanego układu unoszenia	Kilka długich i cieńszych torów wieloprądowych wymaga nieskomplikowanego układu unoszenia W piecu COMELT układy są najprostsze, bo kocioł jest przechylany, szyb odsuwany, a elektrody przesuwane po prowadnicach
Skuteczność hermetyzacji kotła	Jeden przepust dla katody powoduje dużą skuteczność uszczelnienia	Kilka przepustów dla katod zmniejsza skuteczność uszczelnienia
Wytrzymałość mechaniczna i cieplna konstrukcji sklepienia	Typowa na skutek istnienia jednego dużego otworu, erozja powstaje na skutek radiacji łuku i rozgrzanej elektrody Każde odchylenie łuku od pionu zwiększa erozję wykładziny sklepienia	Typowa na skutek istnienia większej liczby, ale za to małych otworów, erozja powstaje na skutek promieniowania odchylonych łuków Dla bocznego rozmieszczenia elektrod istnieje zagrożenie radiacją dla ścian bocznych i sklepienia
Efektywność działania układu obracania kotła	Ze względu na efektywną wymianę radiacyjną ciepła łuku ze złomem nie ma potrzeby stosowania układu	Jeszcze lepsza wymiana radiacyjna ciepła łuku ze złomem i dlatego nie ma potrzeby stosowania układu

Tablica 6. Porównanie wpływu liczby elektrod na zasilanie energią elektryczną SPLPS

Cechy konstrukcyjne i eksploatacyjne pieca	SPLPS	
	Jednoelektrodowy	Wieloelektrodowy
Złożoność toru wieloprądowego	Mała ze względu na brak wpływu indukcyjności	Większa ze względu na kilka torów wieloprądowych
Dynamika układu napędowego	Niska na skutek dużej masy elektrody	Wyższa na skutek mniejszych mas elektrod
Wzajemne oddziaływanie elektrod dynamiczne łuków	Brak, tylko z polem doprowadzeń prądowych	Znaczne w piecach z pionowymi elektrodami W piecu COMELT nieznaczne na skutek oddalenia elektrod
Stabilność płonienia łuku	Wysoka ze względu na ciągłość prądu Bardzo wysoki udział mocy promieniowania w wymianie ciepłej łuku o dużym prądzie	Wysoka ze względu na ciągłości wszystkich prądów Mniejszy udział mocy promieniowania w wymianie ciepłej łuków o mniejszych prądach
Migotanie w sieci	Niski poziom migotania	Niższy poziom migotania ze względu na mniejsze moce łuków, wzrost tylko w momentach interferencji
Symetria obciążenia	Wysoka z powodu stosowania prostowników	Wysoka z powodu stosowania prostowników
Poziom harmonicznych	Niskie amplitudy o ustalonym wąskim widmie	Jeszcze niższe amplitudy o ustalonym wąskim widmie
Nakłady inwestycyjne na konstrukcję elektryczną pieca	Nieco wyższe niż na SPLPP, głównie na prostownik	Niższe z powodu tańszych prostowników

z zamiany dużego prostownika na kilka sztuk mniejszych.

W piecu COMELT [4] boczne rozmieszczenie elektrod zwróconych ku sobie znacznie zmniejsza ich zużycie. Są one słabiej utleniane, ponieważ gorące gazy odlotowe unoszą się środkiem pieca do góry, aż do szybu. Przenikają one przez obszar złomu omijając elektrody. Z po-

wodu zmniejszonych prądów elektrody są dużo cieńsze (średnica od 250 do 450 mm zamiast jednej grubszej 600 mm), a przez to znacznie tańsze. Podczas kilkuletniej eksploatacji prototypowego pieca [1] nie stwierdzono przypadków złamań elektrod. Wynika to z ich lokalizacji w wolnych obszarach komory. Są one wytworzone przez

Tablica 7. Porównanie wpływu liczby elektrod na procesy metalurgiczne w SPLPS

Cechy technologiczne pieca	SPLPS	
	Jednoelektrodowy	Wieloelektrodowy
Załadowanie pieca złomem	Może być asymetryczne ze względu na wysoką efektywność wymiany ciepłej z łukiem	Stopień asymetrii może być jeszcze wyższy W piecu COMELT symetryczny
Rozruch pieca	Utrudniony, ze względu na styk z elektrodą trzonową	Łatwy, ze względu na wykorzystanie części elektrod jako startowych
Postać studni	Szeroki lej	Kilka szerokich lejów W piecu COMELT kilka głębokich jam
Mieszanie metalu	W dołku pod płamą bardzo intensywne Wewnątrz kąpieli bardzo intensywne mieszanie kondukcyjne	W kilku płytszych dołkach mniej intensywne Zanik mieszania
Rozkład mocy ciepłej w kotle	Nierównomierny, największe skupienie w środku pieca Izotermy mają kształt współosiowych okręgów	Bardziej równomierny, największe skupienie w kilku obszarach Izotermy zewnętrzne mają kształt epicykloid
Ekranowanie wykładziny	W stadium roztopienia złomu przez studnię W pozostałych stadiach grubą warstwą żużła spienionego i dołkiem	W stadium roztopienia złomu przez kilka studni lub jam W pozostałych stadiach grubą warstwą spienionego żużła i dołkami
Zużycie elektrod	Małe (1–1,5 kg/Mg), bo gruba elektroda ma dużą wytrzymałość mechaniczną	W piecach z pionowymi elektrodami większe na skutek utleniania W piecach COMELT znacznie mniejsze
Nawęglanie metalu	Małe ze względu na sporadyczne złamania katody	Małe ze względu na sporadyczne złamania katod
Utlennianie złomu nagrzewanego w koszu lub szybie	Małe ze względu na atmosferę słabo utleniającą	Małe ze względu na atmosferę słabo utleniającą
Wydzielanie pyłów i gazów	Małe	Jeszcze mniejsze
Poziom hałasu	Poniżej 90 dB	Jeszcze mniejszy
Koszty eksploatacji pieca	Niskie	Wyższe ze względu na większe zużycie elektrod W piecu COMELT bardzo niskie ze względu na małe zużycie elektrod

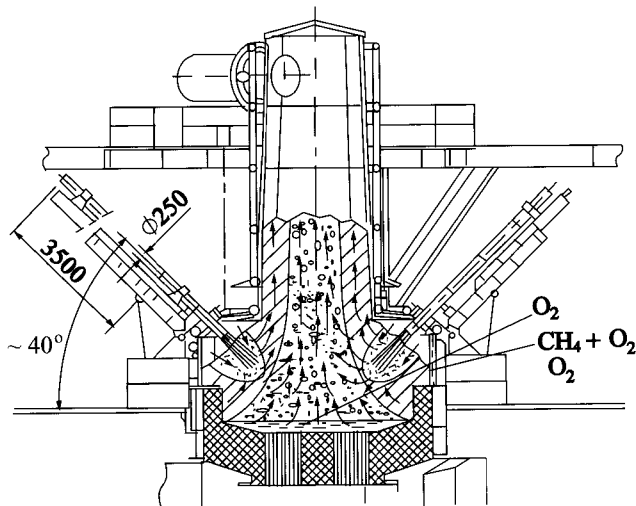
odpowiedni dobór stosunku średnic kotła i szybu oraz przez wytopienie w złomie głębokich jam (rys.3). Podczas zwykłych zawałów złom nie jest w stanie dotrzeć do katod. Uniemożliwiają to znaczne odległości między elektrodami a wsadem. Te duże odległości powstają właśnie dzięki możliwej dużej długości łuku prądu stałego.

Uchwyty i prowadnice stosowane do przesuwania elektrod mają bardzo prostą budowę i są łatwe w obsłudze. Ich warunki pracy są bardzo lekkie. W dodatku ich żywotność i żywotność kabli zasilających jest zwiększona. Nie są one wystawione na obryzanie metalem lub żużlem oraz na gorące opary. Poza tym elektrody nie są unoszone i obracane. Dzięki temu nie występuje skręcanie elementów i zginanie kabli.

Każdy z czterech łuków prądu stałego ma długość ponad 1 m. Wszystkie one odznaczają się bardzo wysoką efektywnością nagrzewania i dużą wrażliwością na zew-

nętrne pole magnetyczne [4,6,7]. Zjawiska odchylenia łuków w SPL są normalnie bardzo szkodliwe. W piecu COMELT wykorzystano oddziaływania łuku z własnym prądem, płynącym w obwodzie (doprowadzeniach i po powierzchni wsadu). Przez to uzyskano pochylone łuki. Oddziaływania prądów płynących w obwodach na łuki są niewielkie. Przyczyną jest symetryczne i dalekie rozstawienie elektrod przewodzących nieduże prądy. Wytworzone w ten sposób pola magnetyczne są słabe i nie powodują szkodliwych efektów.

W tabeli 6 zamieszczono porównanie wpływu liczby elektrod na zasilanie energią elektryczną SPLPS o takich samych mocach znamionowych. Z jej analizy i analizy tabeli 5 wynika znaczna przewaga konstrukcyjna pieców wieloelektrodowych nad jednoelektrodowymi, zwłaszcza typu COMELT.



Rys. 3. Schemat procesu topienia złomu w piecu typu COMELT [1]

4.3. Wpływ zwiększonej liczby elektrod na zagadnienia technologiczno-eksploatacyjne SPLPS

Różnice we właściwościach elektrotermicznych łuków elektrycznych prądu przemiennego i prądu stałego [6] prowadzą do powstawania różnic w efektach metalurgicznych eksploatacji SPLPP i SPLPS [8]. W pierwszym przypadku powstają trudności technologiczne związane ze zwiększonym nawęglaniem kąpieli i dużym zgarem dodatków stopowych, a w drugim z jej naazotowaniem. Zwiększenie liczby elektrod z jednoczesnym zmniejszeniem ich średnicy powoduje zmniejszenie ich wytrzymałości mechanicznej. O ile w SPLPP z krótkimi i niestabilnymi łukami występują dość często złamanie elektrod, prowadzące do nawęglania wsadu, to w SPLPS z długim i stabilnym łukiem nie ma takiego niebezpieczeństwa (tab. 7). Również i problem naazotowania wsadu w piecach do topienia złomu nie ma dużego znaczenia. Kilka słabszych łuków w wieloelektrodowym SPLPS powoduje wyparcie żużła i odsłonięcie małych obszarów na powierzchni kąpieli adsorbujących azot, zamiast jednego dużego obszaru pochodzącego od łuku z kilkakrotnie większym prądem. Znane i stosowane są liczne sposoby i środki przeciwdziałające naazotowaniu stali. Należą do nich lepsze uszczelnienie pieca, wczesne wprowadzanie żużła spienionego i dodawanie domieszek wiążących azot [8]. Zagadnienie to jest jednak o wiele bardziej istotne w piecach kadziowych. Poza tym należy nadmienić, że stale z podwyższoną zawartością równomiernie rozłożonego azotu, odtlenione i rafinowane stanowią dzisiaj coraz bardziej cenny materiał konstrukcyjny. Przyczynami są polepszone właściwości metalu, takie jak: odporność korozyjna, wytrzymałość mechaniczna i plastyczność.

Podstawową korzyścią bocznej lokalizacji nachylonych elektrod jest występowanie pochylonych długich łuków [1]. Płoną one w jamach wytopionych w dolnej części obszaru komory pieca wypełnionej złomem. Umożliwia to bardzo szybkie roztopienie całej masy wsadu wstępnie nagrzanej w szybie gazami odlotowymi. Szyb i zawarty

w nim złom spełnia także rolę filtra znacznie zmniejszając ilość wydzielanych pyłów. Zakładany czas wytopu w piecu to 30–50 minut, a zużycie elektrod jest o 30% mniejsze niż w klasycznych SPLPS. Dodatkowo w ściankach bocznych pieca mogą być zamontowane palniki lub dysze wsuwane w jamy wytopione łukami. One i szyb powodują, że zapotrzebowanie na energię elektryczną jest o 100 kWh/Mg ciekłej stali mniejsze. Bardzo istotnymi zaletami pieca są bardzo dobre wskaźniki ekologiczne. COMELT wymaga tylko 60 procent rozmiaru urządzeń do oczyszczenia gazów z pyłu w stosunku do konwencjonalnego systemu. Zwarta konstrukcja i całkowicie zamknięty system zapewnia stosunkowo wysoką hermetyczność. Poziom hałasu jest więc obok niego o 10 do 15 dB mniejszy niż obok konwencjonalnego SPLPS.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

1. Ponieważ każdy oddzielny łuk elektryczny ma istotne ograniczenia energetyczne [9], a dodatkowe spalanie paliw nie może w sposób efektywny zapewnić odpowiednio dużej mocy cieplnej [10], to jedynym skutecznym środkiem wzrostu mocy i wydajności pieca łukowego jest przejście na użytkowanie urządzeń wieloelektrodowych.
2. Duża złożoność konstrukcyjna torów wieloprądowych i mechanizmów przesuwania elektrod są głównymi przyczynami braku przemysłowego rozpowszechnienia SPLPP ze zwiększoną liczbą elektrod.
3. Obecne konstrukcje SPLPS jednoelektrodowych wielkiej mocy w niewielkim stopniu wykorzystują możliwości, jakie stwarza długi łuk, lekkie warunki pracy mechanizmów napędowych elektrod i wydłużone tory wieloprądowe z zaniechanymi indukcyjnościami.
4. Konstrukcja i technologia wytopu stali w piecu wieloelektrodowym COMELT umożliwia obecnie najbardziej optymalne wykorzystanie możliwości technologicznych kilku długich łuków prądu stałego.
5. Można przypuszczać, że SPLPS bardzo dużych mocy ze zwiększoną liczbą elektrod staną się w przyszłości podstawowymi urządzeniami do topienia złomu.

LITERATURA

1. Berger H., Mittag P.: *Der Comelt-Elektrolichtbogenofen mit schräg angeordneten Seitenelektroden*. Stahl und Eisen 1995, 115, 9, 53–58.
2. Goujet P.: *Has the DC furnace come of age?* Steel Times 1992, supl.: „Elec. Arc”, S24.
3. Makarow N.A.: *Elektriceskije cepi i rieżimy dugowych elektropiecznych ustanowok*. Energija, Moskwa 1975.
4. McAloon T.P.: *COMELT — A new generation of electric arc furnace*. Iron and Steelmaker 1994, 21, 10, 63–66.
5. Powolockij D.Ja., Gudim Ju.A., Zinurow I.Ju.: *Ustrojstwo i rabota swierchmocznych dugowych staleplawilnych piecej*. Miettallurgija, Moskwa 1990.
6. Sawicki A.: *Łuk prądu przemiennego i łuk prądu stałego — dwa różne źródła ciepła we współczesnej elektrometalurgii stali*. Hutnik — Wiadomości Hutnicze 1997, 2, 50–55.
7. Sawicki A.: *Układ elektrodowy i układ katodowo-anodowy — dwa różne doprowadzenia prądowe we współczesnych piecach łukowych*. Hutnik — Wiadomości Hutnicze 1997, 3, 103–109.

8. Sawicki A.: *Stalownicze urządzenia łukowe prądu przemiennego i prądu stałego — dwa różne agregaty technologiczne współczesnej metalurgii*. Przegląd Elektrotechniczny 1997, 5, 123–127.
9. Sawicki A.: *Wybrane ograniczenia i perspektywy rozwoju elektrotechnologii stalowniczych pieców łukowych*. Hutnik — Wiadomości Hutnicze (skierowany do redakcji)
10. Sawicki A.: *Stalownicze urządzenia łukowe prądu przemiennego i prądu stałego — dwa różne obiekty energetyczne współczesnej elektrometalurgii*. Hutnik-Wiadomości Hutnicze (skierowany do redakcji).
11. Wasilcnko N.A.: *K teorii szestifaznych dugowych pieców*. Ruk. dep. w Informielekro 28.05.96., no 388-et. Kujbyszewskij polit. in-t. Kujbyszew 1986, 1–9.



Dr inż. Antoni Sawicki

Kierownik Zakładu Elektrotechnologii, członek SEP. Dziedziny zainteresowań — elektrotechnologia (elektrotermia, spawalnictwo elektryczne i elektrochemia). Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Zakład Elektrotechnologii, 42-200 Częstochowa, al. Armii Krajowej 17, tel. (0-34) 250816.