

Adam GIEREK

Instytut Inżynierii Materiałowej
Politechnika Śląska

Franciszek FIKUS

Instytut Metalurgii
Politechnika Śląska

Filip MEDER

Huta Zabrze

PŁOMIENNO-ŁUKOWY WIELOWANNOWY AGREGAT METALURGICZNY

Streszczenie. W pracy opisano oryginalne polskie rozwiązanie płomiennie-łukowego wielowannowego agregatu metalurgicznego WAM-6 do produkcji stali. Proces wytopu stali prowadzony jest równocześnie w trzech wannach piecowych o pojemności 6 ton każda, umieszczonych na platformie obrotowej.

W porównaniu z piecami łukowymi o podobnej pojemności w WAM-6 uzyskuje się skrócenie czasu wytopu, zwiększenie wydajności, obniżenie zużycia energii elektrycznej, zmniejszenie zużycia elektrod.

1. UWAGI WSTĘPNE

W związku z wciąż rosnącą konkurencyjnością na rynkach stali w świecie notuje się stały postęp w budowie urządzeń piecowych do jej wytwarzania. Dąży się do maksymalnego obniżenia kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych tych urządzeń. Obserwuje się, że stalownicze piece łukowe, służące prawie wyłącznie do przetapiania złomu, wypierają coraz bardziej wszelkiego rodzaju piece płomienne. Duże piece łukowe odznaczają się niższymi kosztami eksploatacyjnymi niż piece martenowskie i zezwalają na otrzymywanie stali lepszej jakości.

W przypadku małych i średnich stalowniczych pieców łukowych koszty energii elektrycznej kształtują się, przy dzisiejszych jej cenach, powyżej kosztów paliw gazowych lub płynnych dla odpowiednich pieców płomien-nych. Różnice te są znaczne przy nagrzewaniu wadu zimnego, np. do temperatury 500°C, a w miarę jej wzrostu szybko maleją. Fakt ten zainicjował budowę urządzeń do płomiennego podgrzewania wadu.

Z drugiej strony dążność do zwiększenia wydajności pieców łukowych doprowadziła do zbudowania pieców dużej mocy (UHP). Transformator jest w

nich w pełni obciążony jednak tylko w czasie roztapiania, natomiast w okresie świeżenia i rafinacji układ elektryczny wykorzystany jest jedynie w 50%. Mankament ten rośnie wraz ze wzrostem stosunku czasu świeżenia i rafinacji do czasu roztapiania.

Celem wyeliminowania wymienionych wad współczesnego stalowniczego pieca łukowego w Polsce opracowano i zbudowano wielowannowy płomienny-łukowy agregat metalurgiczny. Od 4 lat pracuje już takie urządzenie o wydajności rzeczywistej 7,9 t/h; w projektowaniu znajduje się agregat o wydajności większej.

Koszty energii elektrycznej i gazu ziemnego są w poszczególnych krajach różne, a ponadto zmieniają się jeszcze w czasie. Ostatnio wyraźnie rosną. Z punktu widzenia celowości doboru nośnika energii dla pieca metalurgicznego ważny jest stosunek kosztu 1 Gcal uzyskanej z gazu do 1 Gcal uzyskanej z energii elektrycznej. Przy poborze gazu od 10^3 do 10^6 Gcal/rok wynosi on w większości krajów średnio od 0,4 do 0,2 [1] (w Polsce ok. 0,4), tzn., że ciepło uzyskane z gazu jest od 2,5 do 5 razy tańsze od energii elektrycznej ($k = 2,5-5$). Drugim kryterium jest sprawność pieca gazowego i łukowego. Jak wiadomo, dla stalowniczych pieców łukowych leży ona w granicach $\eta_e = 0,7-0,85$. W nowoczesnych piecach łukowych wartość ta zależna jest od temperatury wsadu (tabl. 1) [2]. Dla temperatury wsadu $400-500^\circ\text{C}$ można przyjąć, za tablicą 1, że sprawność cieplna podgrzewania gazowego $\eta_c = 0,5$, a więc dla wsadów zimnych przy $\eta_e = 0,8$, otrzymuje się

$$\frac{\eta_c}{\eta_e} = \frac{0,5}{0,8} = 0,625.$$

Tablica 1

Zależność sprawności cieplnej podgrzewania gazowego od temperatury wsadu

Temperatura wsadu $^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500
Sprawność cieplna η_c %	80	70-75	60-65	50-55	40-45

Uwzględniając, że zakres stosunku kosztów $k = 2,5-5$, można wyliczyć, że nagrzewanie wsadów do temperatury $400-500^\circ\text{C}$ za pomocą gazu jest od 1,5 do 3 razy tańsze:

$$A = k \frac{\eta_c}{\eta_e} = (2,5-5) \cdot 0,625 = 1,5-3.$$

Jeżeli wziąć pod uwagę, że gazowe urządzenia podgrzewcze, z uwagi na nietypową konstrukcję, mogą mieć nieco niższą sprawność, np. $\eta_c = 0,4$, to podgrzewanie wsadu płomieniem gazowym jest nadal wysoce opłacalne, lecz

przy dużych poborach gazu i przy dużym współczynniku k . I tak przy $k = 5$ wartość A będzie wciąż jeszcze 2,5.

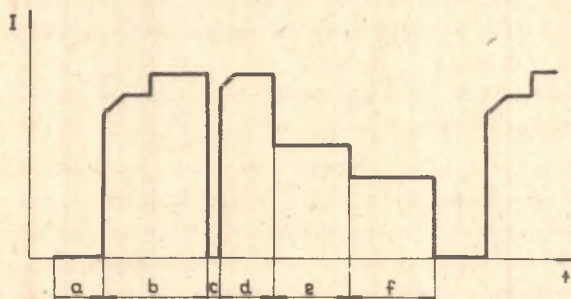
Płomieniowego podgrzewania wsadu dokonuje się obecnie w koszach przeznaczonych do napełniania pieców żukowych. Kosze te, zwane podgrzewaczami, swoją konstrukcją daleko odbiegły od budowy kosza tradycyjnego. Różnią się podgrzewacze niskotemperaturowe ($300-400^{\circ}\text{C}$) i wysokotemperaturowe ($400-800^{\circ}\text{C}$). W wyniku podgrzewania żelomu w podgrzewaczach niskotemperaturowych maleje zużycie energii elektrycznej pieców żukowych średnio o czterdzieści kilka kWh/t, w przypadku wysokotemperaturowych o ponad 100 kWh/t. Odpowiednie skrócenie czasu roztopiania mieści się w dość szerokich granicach od 8 do 30%. Podgrzewanie wsadu w koszu daje więc ewidentne efekty ekonomiczne. Proces ten charakteryzuje się jednak szeregiem wad.

I tak m.in.:

- wymagane jest specjalne stanowisko w pobliżu pieca żukowego,
- kosze często ulegają awariom, szczególnie w podgrzewaczach wysokotemperaturowych z wymurówką,
- przy zakłóceniach rytmiczności pracy pieców żukowych wsad nagrany stygnie, przyczyniając się nawet do zwiększenia strat energii cieplnej.

2. IDEA WIELOPOZYCYJNEGO AGREGATU PIECOWEGO

W przebiegu natężenia prądu pobieranego przez piec żukowy w czasie wytopu (rys. 1) można wyróżnić cztery podstawowe etapy: pierwszy "a" prze-

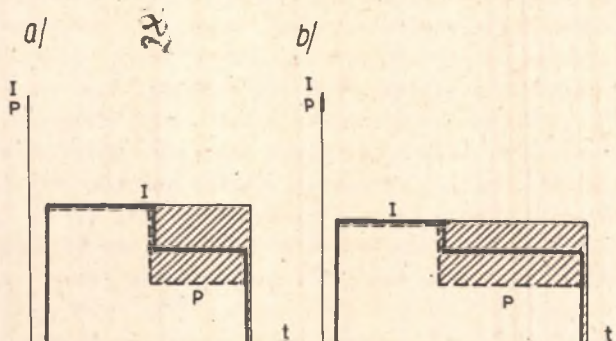


Rys. 1. Przebieg prądu pieca żukowego w czasie wytopu

a - przerwa (spust, naprawa, ładowanie), b - roztopianie, c - dosadzka, d - roztopianie, e - świeżenie, f - rafinacja

znaczony na spust, naprawę i ładowanie, kiedy transformator nie pracuje; drugi "b" do "d" obejmuje roztopianie przedzielone często przerwą na dosadzkę "c" i trzeci "e" to świeżenie, a ostatni czwarty "f" - rafinacja. Przy analizie obciążenia układu elektrycznego z transformatorami i dławia-

kciem wygodnie jest posługiwać się przebiegiem uproszczonym, w którym prądy okresów "e" i "f" przedstawiono jednym zastępczym.



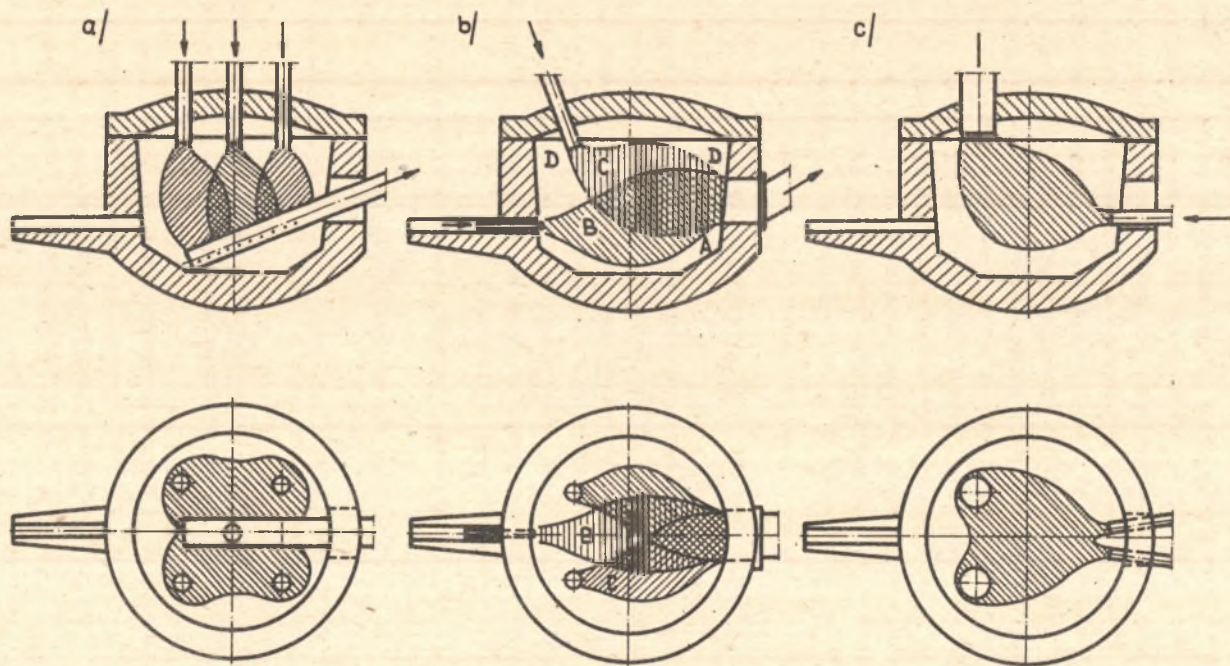
Rys. 2. Uproszczone przebiegi prądu i mocy w czasie wytopu
a - stal węglowa, b - stal stopowa

Przebiegi a) i b) na rys. 2 dla zwykłej stali węglowej i stali stopowej różnią się w sposób zasadniczy czasem rafinacji. Zakreśkowane pole nad przebiegiem P oznacza zainwestowaną moc nie wykorzystaną. Mając na uwadze okres niedociążenia po stopieniu przeciąża się transformator nieco w czasie roztopiania, ale zabieg ten nie rozwiązuje w całości problemu właściwego wykorzystania układu elektrycznego.

Na podstawie powyższych rozważań można dojść do wniosku, że:

- wstępne płomieniowe podgrzewanie wsadu jest korzystne i prowadzi do zmniejszenia kosztów energii oraz do zwiększenia wydajności pieca żukowego,
- układ elektryczny, a w szczególności transformator, nie są w czasie wytopu w pełni wykorzystane.

Wymienionych wad można by uniknąć w układzie wyidealizowanym, w którym podgrzewanie wsadu odbywałoby się już w wannie pieca, nie powodując jednocześnie przerw w pracy transformatora. Transformator mógłby być bowiem w czasie spustu, naprawy i sadzenia oraz płomieniowego podgrzewania wykorzystany do roztopiania wsadu w innej wannie. Do świeżenia i rafinacji należałoby zastosować odpowiednio mniejszy transformator, który w tych fazach wytopu byłby w pełni wykorzystany. Powstaje pytanie, jak zrealizować tę ideę w sposób technicznie prosty i ekonomicznie korzystny? Odpowiedzi należy szukać w wykorzystaniu zasady urządzeń wielopozycyjnych, w których struktura organizacyjna odpowiada rozdziałowi cyklu roboczego na kilka pozycji po to, by nastąpiła ich koncentracja w czasie, a tym samym poważne skrócenie taktu w stosunku do cyklu [3]. Taki sposób zastosowano w wielowannowym agregacie metalurgicznym polskiej konstrukcji, tzw. WAM-6. Optymalny rozkład temperatury przy wstępnym podgrzewaniu złomu można uzy-



Rys. 3. Sposoby podgrzewania wsadu w wannie pieca żukowego (w wannie agregatu WAM-6 na pozycji I)

skąć w przypadku umieszczenia nad wannę I palników w sklepieniu i odciągu gazów przez dno - jak w podgrzewaczu wolno stojącym. Takie rozwiązanie jest w przypadku wanny pieca łukowego niemożliwe. Można jednak zastosować rurę ssawną wprowadzaną do wanny przez specjalny otwór lub okno robocze. Rura ssawna musi mieć silną konstrukcję po to, by nie została uszkodzona przez spadający złom. Rozpływ gorących spalin pokazano na rys. 3a.

Prostszą konstrukcją charakteryzuje się rozwiązanie (rys. 3b), w którym dla odciągu spalin wykorzystuje się okno robocze. Palniki usytuowane w specjalnie wykonanym otworze spustowym i sklepieniu powodują rozpływ spalin w całej prawie objętości wanny. Złom w strefie B nagrzewany będzie przede wszystkim przez palnik w otworze spustowym, a w strefie C przez palniki w sklepieniu. Najmniej nagrzany będzie wsad w strefach A i D. Zimny złom w strefie A przyjmie zmagazynowane ciepło w grubym dnie pieca, przyczyniając się do zmniejszenia strat energii tą drogą.

Inne, jeszcze prostsze rozwiązanie posiada palnik tylko w oknie roboczym, zaś odciąg spalin odbywa się przez otwory w sklepieniu (rys. 3c).

3. KONSTRUKCJA AGREGATU WAM-6 I OSIĄGNIĘTE WSKAŹNIKI

Polska konstrukcja wielowannowego agregatu metalurgicznego realizuje ideę pieca 3-pozycyjnego. W odróżnieniu od koncepcji ASEA-SKF [4] ruchome są wanny. Różnica polega również na tym, że gazem podgrzewa się jedynie stały wsad, a nie ciekły metal, jak to ma miejsce w metodzie szwedzkiej. Proces technologiczny wytopu stali jest prowadzony równocześnie w trzech wannach piecowych, usytuowanych na obrotowej platformie (rys. 4) w rozstawie $co\ 120^{\circ}$, w następującej kolejności:

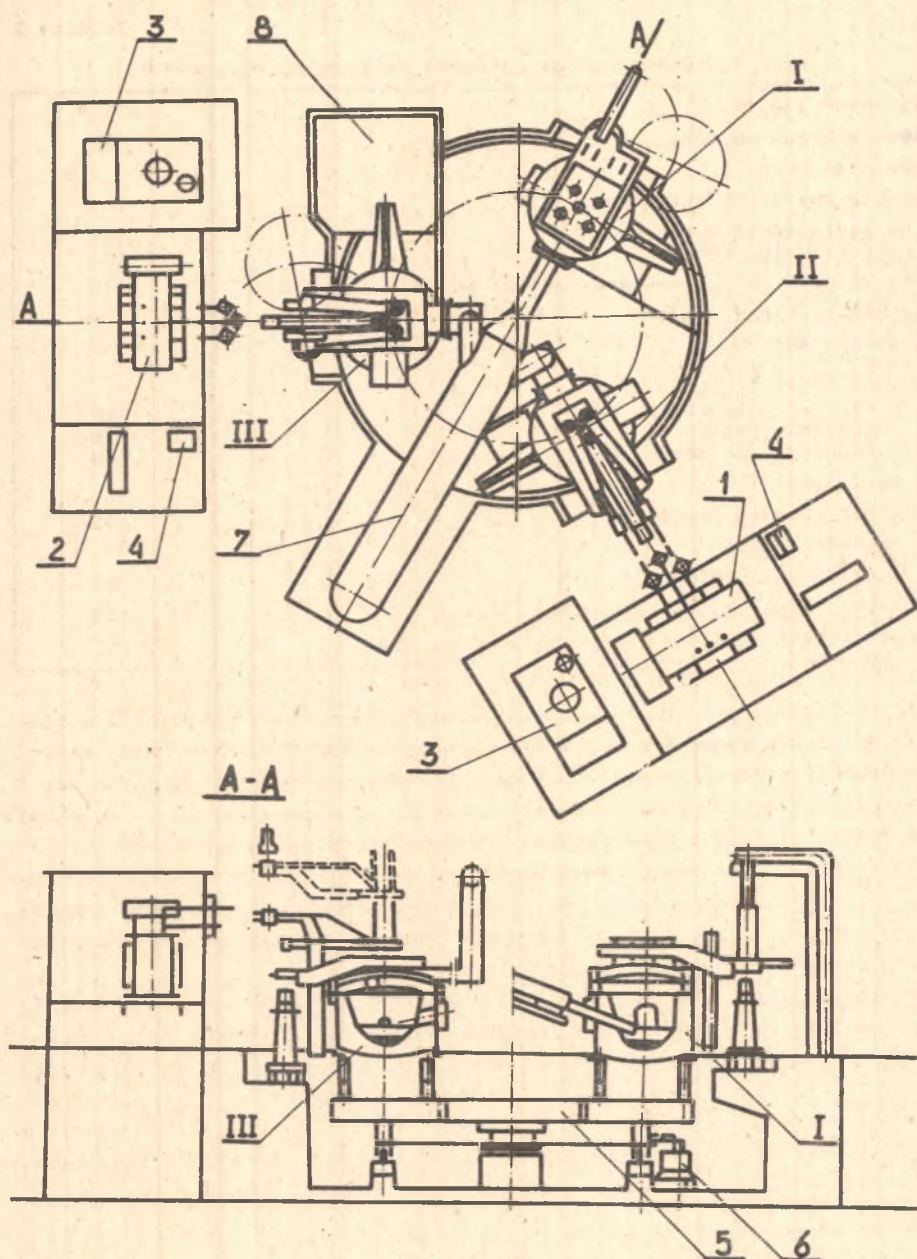
- na pozycji I przeprowadza się naprawy pospustowe, sadzenie i wstępne podgrzewanie wsadu,
- na pozycji II prowadzi się roztopianie podgrzanego wsadu za pomocą łuku elektrycznego,
- na pozycji III zachodzi świeżenie, rafinacja i spust płynnego metalu do kadzi.

Na pozycji I znajduje się normalna piecowa z urządzeniem do wstępnego podgrzewania złomu oraz aparatura kontrolno-pomiarowa podawania gazu do palników.

Na stanowiskach II i III zastosowano handlowe piece łukowe, przy czym piec na stanowisku II jest UHP. Jedna i ta sama wanna, w wyniku okresowej rotacji platformy podchodzi pod kolejne sklepienia.

Zasadnicze parametry WAM-6, uzyskiwane obecnie przy świeżeniu rudą, podano w tablicy 2.

Nie jest w pełni wykorzystana zainstalowana moc grzewcza na pozycji I ani moc transformatora na pozycji II, bo świeżenie rudą wydłuża czas ope-



Rys. 4. Schemat prototypowego agregatu WAM-6

1 - transformator 3 MVA, 2 - transformator 5 MVA, 3 - stacja hydrauliczna,
 4 - kabina sterownicza, 5 - platforma obrotowa ϕ 12000, 6 - mechanizm
 obrotu, 7 - odciąg gazów, 8 - dół odlwniczy

Tablica 2

Parametry wielowannowego agregatu metalurgicznego WAM-6

Pojemność pieców, t	3 x 6/8,5
Ilość wytopów na dobę	22
Wydajność, t/h	7,9
Zużycie energii elektrycznej	
- na roztopienie wsadu, kWh/t	387
- na rafinację, kWh/t	104
Zużycie gazu do podgrzewania wsadu, Nm ³ /t	15
Zużycie elektrod, kg/t	5
Czasy operacji	
a) na pozycji I	
- naprawa pospustowa, min.	10
- sadzenie, min.	5
- podgrzewanie wsadu, min.	40
b) na pozycji II	
- roztopianie wsadu, min.	55
c) na pozycji III	
- świeżenie, rafinacja, min.	55
Ogólny czas wytopu (cykl wytopu), min.	165
Częstotliwość spustów (takt urządzenia), min.	55

racji na pozycji III, które narzuca takt urządzenia. Po zastosowaniu tlenku do świeżenia zmniejszy się czas operacji na pozycji III o 10 minut. Jak wykazały próby przy wykorzystaniu istniejących rezerw na pozycjach I i II możliwe jest utrzymanie taktu 45 minut, co w porównaniu z wynikami zawartymi w tablicy 2 daje dalszy wzrost wydajności o 18%.

Porównanie wskaźników różnych urządzeń następcza zwykle dużo trudności, szczególnie gdy pracują one w odmiennych warunkach. Odnosi się to również do oceny konkurencyjności wielowannowych agregatów metalurgicznych w stosunku do tradycyjnych pieców łukowych.

Wskaźniki, uzyskane przy eksploatacji WAM-6 z trzema wannami o łącznej pojemności 18/25,5 ton i dwoma transformatorami 5 + 3 MVA^{x)}, można porównać np. z parametrami pojedynczego pieca łukowego o zbliżonej pojemności i mocy transformatora. W tablicy 3 zestawiono dane WAM-6 i wskaźniki katalogowe pieca firmy Birlec [5] o pojemności 20/25 t, z transformatorem o mocy 7,5 MVA. Jak widać z porównania poszczególnych parametrów zastosowanie wielowannowego agregatu metalurgicznego przynosi następujące efekty:

- skrócenie czasu wytopu o 55 min.,
- zwiększenie wydajności o 16%,
- obniżenie zużycia energii elektrycznej o 68 kWh/t.

^{x)} Vide uwaga w tablicy 3.

Tablica 3

Porównanie wskaźników pieca żukowego i agregatu WAM-6

Parametry	Piec żukowy jednodopozycyjny wg [5]	WAM-6	Różnice	Uwagi
Moc transformatorów, MVA	7,5	5 2,5 = 7,5 ^{x)}	-	x) Obecnie na pozycji III zabudowany jest transformator 3 MVA. Moc jego okazała się zbyt duża, dlatego w przyszłości dla WAM-6 zostanie zastosowany transformator 2,5 MVA.
Pojemność, t	20/25	3 x 6/8,5	-	
Roztapianie				
- czas roztopienia, min.	140	55	85	
- zużycie energii elektr., kWh/t	455	387	68	
- zużycie gazu, kWh/t	-	105 ^{xx)}	-	xx) Zgodnie z p. 2 koszt 1 kWh uzyskanej z gazu jest 2,5 x tańszy od 1 kWh energii elektr.
Wytop z 1 żużlem				
- czas, min.	220	165 ^{xxx)}	55	xxx) Dla WAM policzono czas wytopu łącznie ze spustem, naprawą pospustową i sadzeniem.
- wydajność, t/h	6,8	7,9	1,1 (16%)	

Zgodnie z tablicą 3 na roztopianie wsadu w WAM-6 zużywa się: na pozycji I - 15 Nm³/t, co w przypadku gazu o wartości opałowej 6000 kcal/Nm³ odpowiada 105 kWh/t oraz na stanowisku II - 387 kWh/t. Łączne zużycie energii wynosi więc 492 kWh/t, a więc jest wyższe niż w porównywanym pojedynczym piecu żukowym. Należy jednak pamiętać, że zgodnie z analizą przeprowadzoną w rozdziale 1 jednostkowy koszt energii uzyskanej z gazu jest 2,5 x niższy od ceny energii elektrycznej. Tak więc, w wyniku zastosowania wstępnego podgrzewania wsadu, w WAM-6 uzyskuje się, w porównaniu z piecem żukowym firmy Birlec, zmniejszenie kosztów energii o ok. 6%.

Czteroletni okres pracy prototypowego agregatu wykazał ponadto jego następujące wymierne walory techniczno-eksploatacyjne: obniżenie zużycia elektrod, znaczne obniżenia kosztów obsługi, wyraźne zmniejszenie nakładów inwestycyjnych na roboty budowlane oraz na urządzenia transportu w halach wsadowych i lejniczych. Poza tym stwierdzono jeszcze szereg efektów niewymiernych, występujących w czasie zakłóceń awaryjnych w stalowni.

4. UWAGI KOŃCOWE

W oparciu o pozytywne wyniki eksploatacyjne, uzyskane na urządzeniu WAM-6, podjęto decyzję wybudowania podobnego agregatu WAM-30 z trzema piecami 30 tonowymi. Ze względu na większą pojemność pieców w projekcie przewiduje się:

- zwiększenie wielkości platformy,
- zwiększenie mocy transformatorów (na pozycji II - 16 MVA, na pozycji III - 7,5 MVA),
- posadowienie pieców na poziomie +8,0 m w stosunku do poziomej podłogi hali lejnicznej,
- odprowadzanie żużła kadziami zainstalowanymi na wózkach,
- spust stali do kadzi na wozie,
- zmianę sposobu ujęcia gazów z poszczególnych wanien.

Ponieważ wskaźniki techniczno-ekonomiczne pieców łukowych rosną wraz ze wzrostem pojemności wanny, należy się spodziewać, że w agregacie WAM-30 i w większych uzyska się jeszcze lepsze parametry niż w WAM-6.

WAM może być stosowany:

- a) do produkcji stali zwykłych i niskostopowych,
 - b) do współpracy z automatami odlewniczymi,
 - c) do produkcji stali wysokostopowych,
- ad a) przy zastosowaniu tlenu do świeżenia może pracować z taktom 45 minut i jest agregatem wysokokonkurencyjnym dla pieców normalnych. Nadaje się w szczególności do mniejszych stalowni o zmiennym profilu produkcji,
- ad b) dzięki krótkiemu taktowi zezwala na praktycznie ciągłą, potokową dostawę ciekłego metalu, co pozwala uniknąć zbiorników lub pieców do jego przetrzymywania,
- ad c) dla produkcji stali wysokostopowych wymaga dozbroyenia w urządzenie do tzw. metalurgii pozapiecowej. W zasadzie wystarcza stanowisko dla kadzi z mieszadłem indukcyjnym i pokrywą.

W wannie pieca III, stojącej do dyspozycji w czasie taktu rzędu 45 minut, przeprowadzi się świeżenie, wprowadzi odpowiednio do pierwszych prób dodatki, przede wszystkim te, które wymagają znacznych energii do roztopienia, dalej wtępne odtlenienie i podgrzanie do takiej temperatury, by prawidłowo mógł przebiegać drugi etap rafinacji wytopu w kadzi, nie wymagający już żużli i dużych ilości energii.

Z omówienia zakresu stosowania wynika, że WAM jest agregatem uniwersalnym. Jego zalety występują tym wyraźniej, gdy w czasie taktu wykona się wszystkie operacje przewidziane dla danej pozycji. Małe odstępstwa nie powodują jednak widocznego pogorszenia wskaźników. Przykładowo, można przystąpić do świeżenia na pozycji II, jeżeli zakończono już roztopia-

nie, a na pozycji III nie nastąpił jeszcze spust i odwrotnie, jeśli po spuście wad na pozycji II nie jest jeszcze całkowicie roztopiony, zakończenie roztopienia może się odbyć na pozycji III.

WAM jest urządzeniem zapełniającym lukę pomiędzy tradycyjnym i nowoczesnym UHP pięćem żukowym, mogącym w zależności od chwilowych potrzeb zastąpić każdy z nich.

LITERATURA

- [1] Eurostat: Gas prices 1970-1976. Electrical energy prices 1970-74.
- [2] Laws W.R.: Steel Times t. 199, nr 6, 1973.
- [3] Einerklaer I.: Iron Steel, t. 47, nr 4, 1970.
- [4] Thielker K.H.: Stahl und Eisen, t. 90, nr 10, 1970.
- [5] Schmidt F.: Stahl und Eisen, t. 90, nr 10, 1970.
- [6] Pfeifer F.: Stahl und Eisen, t. 93, nr 16, 1973.
- [7] Scheridan J.: Publikacje wybrane z zagranicznej literatury hutnictwa zelaza i stali, nr 8, 1976.
- [8] Birlec: Arc melting furnaces.

ПЛАМЕННО-ДУГОВОЙ МНОГОЛОТКОВЫЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ АГРЕГАТ

Резюме

В статье рассматривается оригинальное польское решение пламенно - дуговой многолотковой металлургической агрегат WAM-6 для производства стали. Процесс плавки стали проводится одновременно в трёх печных ваннах ёмкостью 6 т. каждая, находящихся на вращающихся платформах.

В сравнении с дуговыми печами похожей ёмкости в WAM-6 получается сокращённое время плавки, увеличение производительности, снижение расхода электроэнергии и уменьшение износа электродов.

THE AIR-ARC MULTI-BATH METALLURGIC PLANT

Summary

The paper describes the original Polish design of the air-arc multi-bath metallurgic plant WAM-6 serving in steel production process. The process of melting the steel is carried out simultaneously in three furnace-baths (capacity 6 t each) placed on a rotary platform.

Compared with the arc furnaces of the similar capacity, WAM-6 melting time is shorter, its output is bigger, the electric energy consumption lower, electrodes wear smaller.