

WYBRANE ELEMENTY ORGANIZACJI PRODUKCJI PRZY WDROŻENIU INNOWACYJNEJ TECHNOLOGII AZOTOWANIA JONOWEGO

Marzena OGÓREK, Zbigniew SKUZA, Tadeusz FRĄCZEK

Streszczenie: Zastosowanie azotowania jonowego metodą „active screen” w odniesieniu do klasycznego azotowania katodowego powoduje wzrost efektywności technologicznej, energetycznej i w ostateczności efektywności ekonomicznej. Zmniejszenie o prawie 40% kosztów wynika przede wszystkim z możliwości skrócenia czasu trwania omawianego procesu.

Słowa kluczowe: efektywność, azotowanie jonowe, ekran aktywny, innowacje, wdrożenie

1. Technologia azotowania jonowego

Proces azotowania jonowego można podzielić na dwa zasadnicze etapy. Pierwszy z nich to etap nagrzewania do zadanej temperatury azotowania. Podczas jego trwania w wyniku występowania zjawiska rozpylania katodowego, następuje uaktywnienie powierzchni obrabianych oraz ewentualne usunięcie pasywnych warstw tlenkowych. Po osiągnięciu zadanej temperatury, rozpoczyna się właściwy proces azotowania prowadzący do nasycenia obrabianej powierzchni azotem (wytworzenie na jego powierzchni strefy związków oraz strefy azotowania wewnętrznego) [1].

Wytwarzanie warstw azotowanych podczas azotowania jonowego i ich właściwości zależą od takich parametrów technologicznych jak: temperatura procesu, czas procesu, skład atmosfery azotującej, ciśnienie atmosfery, napięcie i natężenie pola elektrycznego między elektrodami oraz gęstość prądu, a także wzajemne rozłożenie detali i elektrod w komorze roboczej pieca do azotowania [2].

Stosowana temperatura procesu azotowania jonowego może być taka, jak w procesie azotowania klasycznego ($480\div 500^{\circ}\text{C}$), ale w wyniku uaktywnienia atmosfery w środowisku wyładowania jarzeniowego możliwe jest obniżenie zakresu temperatury do $400\div 500^{\circ}\text{C}$ [1]. Obecnie podejmowane są działania mające na celu zwiększenie intensywności procesu azotowania jonowego – na przykład w wyniku stosowanie ekranu aktywnego (tzw. metoda „active screen” - co może skutkować obniżeniem temperatury lub skróceniem czasu tego procesu [3÷5]. W procesie azotowania jonowego, jako atmosfery czynne stosowane są: mieszaniny azotu, wodoru i argonu, czysty azot, amoniak oraz mieszaniny amoniaku i wodoru. Proces azotowania jonowego zachodzi przy ciśnieniu $100\div 1300$ Pa oraz w zakresie napięcia $400\div 1800$ V. Czas procesu dla zadanych warunków azotowania uzależniony jest od oczekiwanej grubości warstwy [1].

Element przeznaczony do azotowania jonowego powinien być obrabiony mechanicznie „na gotowo”, gdyż jedynym zabiegiem obróbki mechanicznej dopuszczalnym po azotowaniu jest polerowanie. Bezpośrednio przed rozpoczęciem procesu elementy przeznaczone do azotowania jonowego oczyszcza się i odfłuszcza, a następnie umieszcza w komorze roboczej pieca jarzeniowego. Po zamknięciu komory i dokładnym jej

próżniowym odpompowaniu (przy zastosowaniu atmosfery azotowo-wodorowej stosuje się ciśnienie w zakresie 100-300 Pa), ustawia się właściwy przepływ atmosfery azotującej – powoduje to dokładne oczyszczenie komory z powietrza. Kolejną czynnością podczas procesu azotowania jonowego jest otwarcie zaworu dozującego atmosferę i włączenie zasilacza prądowego, wynikiem tego jest rozpoczęcie procesu rozpylania katodowego w celu uaktywnienia i dokładnego oczyszczenia powierzchni azotowanego elementu. Dzięki rozpylaniu katodowemu powstaje możliwość kompensacji przyrostu wymiaru na skutek wbudowania się azotu pod powierzchnię elementu [1].

Nagrzewanie elementu polega na stopniowym podwyższaniu natężenia prądu. W chwili osiągnięcia zadanych parametrów (ciśnienia, temperatury, natężenia i napięcia prądu) liczy się właściwy czas procesu. Zabieg chłodzenia elementu prowadzi się w środowisku próżni [1]. Po procesie azotowania jonowego elementy nadają się bezpośrednio do montażu. Ze względu na właściwości uzyskanych warstw wierzchnich dodatkowa obróbka skrawaniem jest niewskazana. Dopuszczalne jest jedynie honowanie (wygładzanie) lub polerowanie [1].

Uzyskane w procesie azotowania jonowego warstwy wierzchnie charakteryzują się poprawą właściwości tribologicznych i wytrzymałościowych, a także lepszą plastycznością w odniesieniu do warstw uzyskanych w wyniku azotowania tradycyjnego [8, 9].

Azotowanie jonowe znalazło zastosowanie w przemyśle obrabiarkowym, maszyn budowlanych, samochodowym oraz narzędziowym. Władowanie jarzeniowe zapewnia równomierność warunków fizykochemicznych na powierzchni azotowanego elementu oraz możliwość precyzyjnego sterowania strukturą warstwy, co pozwala na efektywną obróbkę elementów o dużych gabarytach i wysokich wymaganiach w zakresie tolerancji wymiarowych i trwałości eksploatacyjnej [1].

1.1. Zalety i wady obróbek jonowych

Proces azotowania jonowego posiada wiele pozytywnych cech w odniesieniu do innych technik azotowania. Do zalet tego rodzaju azotowania można zaliczyć:

- oszczędność energii elektrycznej [8];
- ograniczenie zużycia surowców technologicznych [9];
- niższa temperatura procesu wynikająca z większej aktywności chemicznej powstałych cząstek [8, 10];
- małe zmiany wymiarowe azotowanych elementów [1];
- niższa energia aktywacji procesów powierzchniowych [10];
- możliwość azotowania materiałów tzw. trudnoazotujących się o dużej podatności do pasywacji w atmosferze powietrza [3];
- możliwość eliminacji szkodliwego dla zdrowia amoniaku silnie oddziaływującego na błony śluzowe jako atmosfery reaktywnej [3].

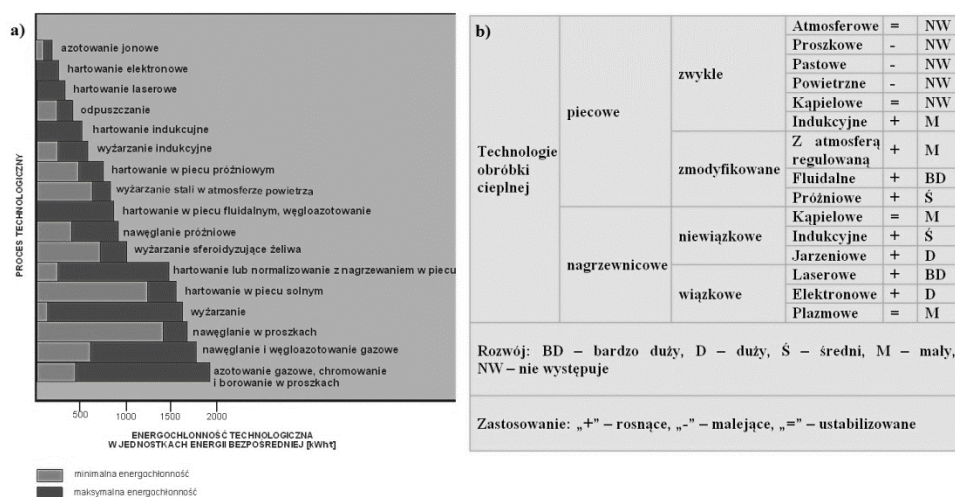
Technologiczny proces azotowania jonowego posiada również wady, do których zalicza się:

- wysokie koszty urządzeń technologicznych do prowadzenia obróbek jonowych [10], jednak obecnie porównywalne z kosztami urządzeń do np. regulowanego azotowania gazowego;
- duża liczba parametrów technologicznych utrudniających zarówno projektowanie, a także przeprowadzanie procesu.

Podsumowując - azotowanie jonowe należy obecnie do jednych z najbardziej

ekonomicznych i szybko rozwijających się procesów technologicznych obróbki cieplno-chemicznej, zwłaszcza w kontekście ilości zużytej energii elektrycznej na jednostkę masy obrabianego materiału (rys. 1a).

Stosowane w technologii azotowania jonowego wyładowanie jarzeniowe powoduje nagrzewanie tylko elementów azotowanych, bez nagrzewania całej komory roboczej pieca. Energochłonność procesu jest mniejsza o 30÷50%, w porównaniu do konwencjonalnych obróbek cieplno-chemicznych [13]. Dodatkowe obniżenie kosztów procesu związane jest z niewielkim zużyciem gazów niezbędnych do przeprowadzenia procesu oraz skróceniem czasu procesu w porównaniu do klasycznych metod azotowania. Konwencjonalne azotowanie gazowe natomiast zaliczane jest do jednych z najdroższych procesów technologicznych spośród obróbek cieplno-chemicznych [11]. Pomimo nieznacznych niedogodności, obróbki jonowe należą do dynamicznie rozwijających się procesów technologicznych (rys.1b) [8, 10].



Rys. 1. a) Ranking energochłonności niektórych procesów technologicznych obróbki cieplnej; b) Rozwój i zastosowanie różnych technologii obróbki cieplnej [14]

Możliwe jest dalsze obniżenie energochłonności procesu azotowania jonowego poprzez zastosowanie niskotemperaturowych metod tego procesu. Na przykład zastosowanie ekranu aktywnego (metoda „active screen”) do procesu azotowania jonowego, umożliwia skrócenie czasu azotowania, a także pozwala na obniżenie jego temperatury. Konsekwencją tego jest kolejne zmniejszenie energochłonności procesu azotowania jonowego, a co z tym związane zwiększenie efektywności tego procesu, co jest bardzo korzystne z ekonomicznego punktu widzenia.

2. Efektywność procesu azotowania jonowego

Celem przeprowadzonych badań było porównanie efektywności ekonomicznej procesu azotowania jonowego z zastosowaniem metody „active screen” w odniesieniu do procesu azotowania katodowego. W celu uproszczenia oceny efektywności ekonomicznej procesu azotowania jonowego z zastosowaniem metody „active screen” i procesu azotowania

katodowego, odniesiono się wyłącznie do głębokości dyfuzji azotu, wybierając próbki, na których uzyskano takie same wartości (lub bardzo zbliżone) głębokości dyfuzji azotu. Prezentowane w pracy dane dotyczą procesów azotowania jonowego realizowanych w laboratorium Politechniki Częstochowskiej w półprzemysłowym piecu do obróbek jarzeniowych.

W analizowanym przypadku najbardziej przydatną metodą, ze względu na możliwość obróbki różniących się technologicznie wielu różnych wyrobów, wydaje się być kalkulacja według miejsc powstawania kosztów. Możliwymi kosztami do określenia na obecnym etapie analizy są:

- koszty odpisów amortyzacyjnych (cena pieca 600 000 zł, amortyzacja 18%, zgodnie z klasyfikacją środków trwałych (KŚT) opublikowaną w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 10.12.2010 r. w sprawie Klasyfikacji Środków Trwałych (KŚT) (Dz. U. nr 242, poz. 1622);
- koszty powierzchni (koszt wynajęcia powierzchni wynosi 20 zł + 23% VAT na miesiąc za m², co stanowi koszt 2656,80 zł brutto miesięcznie (31881,60 zł brutto na rok);
- koszty energii, czyli koszt zużycia energii elektrycznej i mediów gazowych (tab. 1, 2);
- koszty bezpośrednie robocizny (tab. 3).

Należy pamiętać, że zgodnie z ustawą z dnia 29 września 1994 r. o rachunkowości, amortyzacji podlegają wszystkie środki trwałe o wartości powyżej 3500 zł. Koszty remontu, czyli koszt dostosowania wynajmowanej powierzchni do potrzeb procesu produkcyjnego mogą również podlegać amortyzacji.

Tabela 1. Koszty zużycia gazów

Koszty zużycia gazów				
Gaz	1 zmiana	3 zmiany (1 dzień)	tydzień (15 zmian)	1 rok
	Koszt [zł]	Koszt [zł]	Koszt [zł]	Koszt [zł]
Wodór	14,87	44,61	223,05	10706,4
Azot	1,08	3,24	16,20	777,60
Argon	0,06	0,18	0,90	43,20
Suma	16,01	48,03	240,15	11527,2

Tabela 2. Koszty zużycia energii elektrycznej

Koszty zużycia energii elektrycznej				
Etap procesu	1 zmiana	3 zmiany (1 dzień)	tydzień (15 zmian)	1 rok
	Koszt [zł]	Koszt [zł]	Koszt [zł]	Koszt [zł]
Nagrzewanie	3,97	11,91	59,55	2858,40
Ekspozycja	9,37	28,11	140,55	6746,40
Suma	13,34	40,02	200,10	9604,80

Tabela 3. Wynagrodzenie pracownika i wynikające z niego koszty

Wynagrodzenie pracownika i wynikające z niego koszty												
Ilość pracowników	netto	Składki pracownika					brutto	Składki pracodawcy				koszt
		społeczne	rentowe	chorobowe	zdrowotne	zaliczka		emerytalne	Rentowe	FP	FGŚP	
1	1808,10	342,75	37,50	61,25	194,15	155,00	2500,00	244,00	162,50	61,25	2,50	3018,50
6	10848,60	2056,50	225,00	367,50	1164,90	930,00	15000	1464	975	367,5	15	18111

Pełna analiza kosztowa wymaga szczegółowych i precyzyjnych planów, założeń, kosztorysów (np. remontu pomieszczenia) dotyczących konkretnych działań związanych z planowanym procesem produkcji odnoszącym się do rzeczywistych warunków rynkowych.

3. Założenia do wdrożenia technologii azotowania jonowego metoda „active screen” w praktyce przemysłowej

Oryginalność proponowanego rozwiązania wynika z prawie bezkosztowej innowacji w odniesieniu do i tak już atrakcyjnej metody obróbki cieplno-chemicznej, jaką jest azotowanie jonowe. Przeprowadzone porównanie kosztów obu rozpatrywanych procesów azotowania, może być jedynie czynnikiem motywującym dla obecnych przedsiębiorców oraz potencjalnych inwestorów, poprzez wskazania możliwości jakie istnieją w stosowanych dotychczas lub planowanych do wdrożenia procesach mających na celu zwiększenie trwałości eksploatacyjnych i użytkowych wytwarzanych elementów konstrukcyjnych lub części maszyn.

Proponowana technologia oprócz zalet posiada również pewne ograniczenia, które wyznaczają warunki jej stosowania. Rodzaj materiału, z którego wykonany jest dany element oraz jego kształt determinują każdorazowo określanie parametrów omawianego procesu azotowania, które gwarantowałyby otrzymanie pożądanych i zakładanych przez konstruktora właściwości użytkowych. Z tego powodu oczywistym jest, iż najbardziej korzystnym z ekonomicznego punktu widzenia byłby proces produkcyjny odnoszący się do ściśle określonego produktu lub grupy produktów wytwarzanych np. w ramach stałej kooperacji lub długoterminowego portfela zamówień.

3.1. Urządzenie do azotowania jonowego

Stanowisko robocze przeznaczone jest do procesu azotowania jonowego powierzchni elementów wykonanych z żelaza i jego stopów. Wchodzący w skład stanowiska piec poziomy przeznaczony jest do azotowania detali w pozycji stojącej. Instalacja dozowania gazu pozwala na realizację procesów azotowania jonowego na bazie atmosfery azot-wodór.

Podstawowym elementem urządzenia jest komora próżnioszczelna o ściankach chłodzonych wodą. W komorze tej, na specjalnych przepustach prądowych, mocuje się obrabiane wyroby metalowe. Wyroby te podłączone są do ujemnego bieguna stałoprądowego zasilacza wyładowania jarzeniowego i stanowią katodę. Ściany komory próżniowej są natomiast podłączone do uziemionego bieguna dodatniego zasilacza

i stanowią anodę. Zespół dozujący oraz zespół pompowy realizują w komorze próżniowej odpowiedni cykl zmian ciśnienia, przepływu i składu gazu roboczego. Do realizacji procesu azotowania jonowego stosuje się, jako atmosferę reaktywną, mieszanekę wodoru i azotu. Stosowane ciśnienie leży zwykle w zakresie 1-4 hPa.

W skład stanowiska do procesu azotowania jonowego wchodzi: piec jarzeniowy, układ pompowo-dozujący (zespół pompowy, tablica zasilania gazowego i sterowania, panel sterowania zespołem pompowym), zasilacz elektryczny jonizacyjny, instalacja chłodzenia wodnego oraz wewnętrzne instalacje stanowiskowe (wodna, próżniowa, gazów technologicznych, pomiaru temperatury). Wymienione zespoły mogą być rozmieszczone dowolnie względem siebie, w zależności od warunków zainstalowania u zamawiającego. Koszt zakupu urządzenia do obróbek jonowych wraz z oprzyrządowaniem wynosi 600 000 PLN.

3.2. Usytuowanie pieca w warunkach przemysłowych

Piec do obróbek jonowych i jego szafa sterownicza usytuowano w pomieszczeniu (8 m x 13,5 m) wydzielonym z hali produkcyjnej, która wyposażona jest w niezbędne instalacje woda (obieg zamknięty do pieca), prąd (przyłącze o mocy 10 kW), gaz (pomieszczenie z butlami znajduje się poza halą produkcyjną), samoczynna instalacja gaśnicza. Pomieszczenie zostało wydzielone z hali produkcyjnej, gdyż znajdują się na niej inne jednostki produkcyjne (inne firmy), które mają również wydzielone swoje pomieszczenia. Hala produkcyjna, z której wyodrębniono pomieszczenie do procesu azotowania jonowego jest halą posiadającą wiele stref, które są wynajmowane przez różne firmy. Wydzielenie konkretnej powierzchni pozwala zagwarantować specyficzne dla danego procesu warunki, związane nie tylko z daną technologią, lecz również gwarantujące przestrzeganie wymagań np. bhp i ergonomii [5].

W szafie sterowniczej zainstalowano: zasilacz regulowany, rejestratory temperatury, transformatory separujące, obudowę izolacyjną układu pomiarowego temperatury, zespół regulacji dozowania gazów, zawór dozujący, regulator ciśnienia, próżniomierz oraz głowicę do pomiaru próżni.

W pomieszczeniu wyznaczono trzy zasadnicze strefy do obsługi pieca i szafy sterowniczej [5]:

- strefa pomarańczowa – całkowity zakaz ruchu (tylko w wyjątkowych awaryjnych sytuacjach po wyłączeniu prądu i gazu) – 1m; znajdują się tu: zespół zaworów i pompa próżniowa, wylot gazu, silnik rotacyjnej pompy próżniowej, falownik;
- strefa żółta – ograniczony zakaz ruchu niezbędny do obsługi urządzeń i czujników pomiarowych pieca - 1,5m;
- strefa brązowa – 1,5 m obszar bezpośredniej obsługi pieca wyłożony gumową antyprzebiciową wykładziną.

W hali głównej zostało wydzielone miejsce do ewentualnego dostawienia drugiego pieca – zezwalają na to wszystkie instalacje i przyłącza (wymiaru pieca i jego oprzyrządowania, szafa sterownicza).

3.3. Bezpieczeństwo i higiena pracy na stanowisku do obróbek jonowych

Zgodnie z następującymi aktami prawnymi [15-17]:

- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (Dz.U.2003.169.1650 z późn. zm.);
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U.2002.75.690 z późn. zm.);
- PN-EN 12464-1:2004 Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach,

w stosunku do każdego pracownika na stanowisku pracy powinny być spełnione następujące wymagania:

- co najmniej 13 m³ wolnej objętości pomieszczenia oraz co najmniej 2 m² wolnej powierzchni podłogi;
- w pomieszczeniach pracy należy zapewnić temperaturę odpowiednią do rodzaju wykonywanej pracy nie niższą niż 14°C chyba, że względy technologiczne na to nie pozwalają;
- w pomieszczeniu przeznaczonym na pobyt ludzi stosunek powierzchni okien, liczony w świetle ościeżnic do powierzchni podłogi, powinien wynosić co najmniej 1:8; jeżeli względy technologiczne nie stoją na przeszkodzie, każde pomieszczenie stałej pracy powinno być oświetlone światłem dziennym; niezależnie od oświetlenia dziennego, w pomieszczeniach pracy należy zapewnić oświetlenie elektryczne o odpowiednim natężeniu;
- zasadą ogólną jest, że wymiary otworów drzwiowych w każdym pomieszczeniu powinny być odpowiednie do liczby pracowników z nich korzystających oraz do rodzaju i wielkości stosowanych urządzeń transportowych oraz przemieszczanych ładunków; drzwi wejściowe do budynku i ogólnodostępnych pomieszczeń użytkowych powinny mieć w świetle ościeżnicy co najmniej 0,9 m szerokości i 2 m wysokości; natomiast drzwi do pomieszczenia przeznaczonego na stały pobyt ludzi powinny mieć szerokość co najmniej 0,8 m szerokości i 2 m wysokości w świetle ościeżnicy;
- podłogi w pomieszczeniach powinny być stabilne, nieśliskie, niepyłące, odporne na ścieranie oraz nacisk, przystosowane do łatwego utrzymania w czystości;
- we wszystkich pomieszczeniach pracy należy zapewnić odpowiednią wymianę powietrza przez zastosowanie wentylacji naturalnej lub mechanicznej albo łączenie jednej i drugiej; strumień objętości powietrza wentylacyjnego w pomieszczeniach przeznaczonych na stały i czasowy pobyt ludzi powinien wynosić 20 m³/h dla każdej przebywającej osoby; pomieszczenia higieniczno-sanitarne powinny znajdować się w budynku, w którym odbywa się praca, albo w budynku połączonym z nim obudowanym przejściem, które w przypadku przechodzenia z ogrzewanych pomieszczeń pracy powinno być również ogrzewane;
- szatnie powinny być urządzone w oddzielnych lub wydzielonych pomieszczeniach, powinny być urządzone w oddzielnych lub wydzielonych pomieszczeniach, powinny być one suche i w miarę możliwości oświetlone

światłem dziennym; w szatniach powinny być zapewnione miejsca siedzące dla co najmniej 50% zatrudnionych na najliczniejszej zmianie.

4. Wybrane elementy organizacji produkcji

Omawiana technologia azotowania jonowego, zarówno na katodzie jak i metodą „active screen” wymaga każdorazowo doboru określonych warunków i parametrów azotowania wynikających z rodzaju materiału metalicznego poddawanego azotowaniu elementu oraz jego kształtu. Z tego też względu praktycznie niemożliwa jest jednorazowa obróbka elementów wykonanych z różnych materiałów metalicznych - jednoczesne azotowanie jonowe elementów wykonanych z tytanu i stali. Możliwa jest natomiast grupowa obróbka elementów wykonanych z podobnych gatunków stali i o zbliżonym kształcie, np. rozpatrywanych zaworów trójdrożnych wykonywanych najczęściej ze stali austenitycznych (gatunku X5CrNi18-10 oraz X2CrNiMo17-12-2).

4.1. Charakterystyka zaworu trójdrożnego

Procesowi azotowania jonowego z zastosowaniem metody „active screen” poddano zawór trójdrożny wykonany z jednej z najczęściej stosowanych stali austenitycznych z grupy stali chromowo-niklowo-molibdenowych, a mianowicie stal X2CrNiMo17-12-2 według PN-EN 10088-1:1998 (316L wg AISI).

Zawór trójdrożny (rys. 2) znajduje zastosowanie w dozownikach tłokowych, które w sposób automatyczny napełniają opakowania szklane, metalowe i plastikowe produktem półgęstym (majonez, ketchup, dżemy, kremy, musztarda, marmolada itp.).



Rys. 2. Zawór trójdrożny [18]

Aby zawór trójdrożny spełniał zakładane i pożądane przez konstruktora właściwości eksploatacyjne, w procesie azotowania jonowego „active screen” należy uzyskać następujące właściwości użytkowe warstwy wierzchniej:

- twardość na poziomie ok. 800÷900 HK0,5;
- odporność na zużycie ściernie, określana ubytkiem masy próbki poniżej 3 mg;
- wymagana głębokość dyfuzji azotu minimum 15 μm .

W celu uzyskania zakładanych właściwości użytkowych, określono następujące parametry obróbki cieplno – chemicznej (parametry dobrano na podstawie danych zawartych w niniejszej dysertacji oraz danych literaturowych dotyczących azotowania jonowego stali austenitycznych [19]):

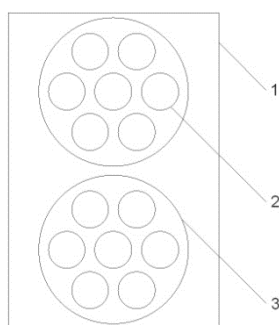
- temperatura 460°C;

- czas 5h;
- ciśnienie 150 Pa;
- atmosfera reaktywna 75% H₂+25% N₂.

Proces azotowania składa się z czasu nagrzewania pieca do zadanej temperatury, czasu ekspozycji próbki w zadanej temperaturze i określonym czasie, oraz z czasu chłodzenia pieca do temperatury 80°C. Uzasadnione jest to tym, że w temperaturze poniżej 80°C, w stali austenitycznej nie zachodzą żadne zmiany strukturalne oraz na powierzchni materiału nie tworzą się warstwy tlenkowe. Podczas chłodzenia nie następuje dostarczenie energii elektrycznej do zasilacza. Temperatura 80°C jest bezpieczna dla materiału, ale także ułatwia obsługę pieca z organizacyjnego punktu widzenia (możliwość wyciągnięcia azotowanego detalu w rękawicach żaroodpornych).

4.2. Rozmieszczenie zaworów trójdrożnych w komorze roboczej pieca

Planując proces produkcyjny zawory trójdrożne rozmieszczono na katodzie o wymiarach 450 mm x 600 mm (rys. 3); jest to największa możliwa do umieszczenia w komorze pieca katoda. Umieszczone na katodzie zawory trójdrożne są odsunięte i od ekranu aktywnego o 20 mm; ekrany aktywne odsunięte są od siebie o 20 mm, a od krawędzi katody o 10 mm. Zawory trójdrożne rozmieszczane są za pomocą szablonu.



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia zaworów trójdrożnych w komorze roboczej pieca:
1 – katoda, 2 – zawór trójdrożny, 3 – ekran aktywny

W przypadku azotowania jonowego metodą „active screen” należy wziąć pod uwagę nie tylko rozmiar katody i azotowanego detalu, ale także rozmiar ekranu aktywnego, który znacznie ogranicza rozmieszczenie detali na katodzie. Biorąc pod uwagę kształt ekranu aktywnego i wymiary zaworów trójdrożnych zaproponowano jeden z możliwych sposobów, rozmieszczenia wsadu w komorze roboczej pieca (rys. 3). Zaproponowane rozmieszczenie zaworów trójdrożnych odnosi się do pieca identycznego, jaki jest stosowany w warunkach laboratoryjnych. Zaznaczyć należy, iż piece do azotowania jonowego konstruuje się pod konkretny element, co ułatwia rozmieszczenie danych elementów w komorze roboczej pieca, możliwe jest także zastosowanie innego kształtu katody (np. okrągła). Azotowanie detali o rozmiarach mniejszych niż opisywany zawór trójdrożny, pozwoli na umieszczenie pod ekranem aktywnym większej liczby detali.

Zastosowany ekran aktywny ma następujące wymiary $\phi 320 \times 150$ mm; wykonany jest z perforowanej ze stali austenitycznej gatunku X2CrNiMo17-12-2, a więc identycznego jak

azotowany zawór trójdrożny.

Wstępna kontrola jakości będzie polegał na obserwacji naazotowanych zaworów trójdrożnych i wykryciu nieprawidłowości. Pełna kontrola jakości odbywać się będzie zgodnie z zasadami ustalonymi z kooperantem (przyjęcie odpowiednich norm np. ISO). Należy pamiętać, że zawory trójdrożne poddane całkowitej kontroli jakości (badanie twardości, ścieralności, głębokości dyfuzji) będą już produktem niemożliwym do użycia.

4.3. Wstępne założenia dotyczące procesu produkcyjnego

Praca na stanowisku do obróbek jonowych odbywa się w systemie trzy zmianowym. Pracownicy pracują 8 h na dobę, 3 zmiany na dzień, w tygodniu 15 zmian, 5 dni roboczych. Taki system pracy jest zgodny z art. 128 i art. 129 Kodeksu Pracy. Podczas jednej na stanowisku będzie pracować dwóch pracowników (jest to zgodne z wymogami bhp). Planowany rozkład pracy pieca (dla otrzymania konkretnych właściwości użytkowych): okres nagrzewania do temperatury 460°C – 1,5 h; okres ekspozycji w zadanej temperaturze – 5 h; okres chłodzenia do temperatury pokojowej – 1 h; załadunek i rozładunek komory roboczej – 0,5 h; łącznie 8 h.

Jednorazowo w komorze roboczej pieca na katodzie rozmieszczonych jest 14 zaworów trójdrożnych (rys. 3). Planowana produkcja tygodniowa 210 sztuk zaworów, w skali roku ok. 10080 szt. zaworów. W opisywanym przypadku przyjmujemy 1 rok jako 48 tygodni, ponieważ sierpień zakładany jest jako miesiąc urlopowy i czas przeglądów technicznych i konserwacji maszyn i urządzeń – podobnie jak u producenta zaworów).

W procesie azotowania jonowego metodą „active screen” można zaplanować i przewidzieć zużycie gazów i energii elektrycznej. Biorąc pod uwagę objętość butli z gazami (argon, azot, wodór) należy zaplanować cykl dostaw i pamiętać o posiadaniu co najmniej jednej butli każdego gazu jako rezerwowej. Butle z azotem i wodorem powinny być dostarczane co 8 tygodni.

Biorąc pod uwagę masę (1,85kg) i wymiary ($\phi 79 \times 110$ mm) zaworu trójdrożnego określono możliwy transport do odbiorcy. Zawory mogą być dostarczane w opakowaniach wielokrotnego użytku (drewniane skrzynki) lub jednorazowego użytku (pudełka kartonowe). Czynnikiem determinującym ilość przewożonych jednorazowo zaworów trójdrożnych jest ich ilość a nie objętość.

W rozpatrywanym przypadku zawory trójdrożne będą umieszczane pojedynczo w pudełkach o wymiarach 130mm x 100mm x 100mm, a następnie będą pakowane w ilości 12 sztuk w standardowe pudełko przemysłowe, tzw. opakowanie zbiorcze o wymiarach 400mm x 200mm x 200mm [20].

Transport gotowych i spakowanych zaworów będzie odbywał się samochodem typu bus z plandeką, ładowność 1,6 tony [21]. Biorąc pod uwagę ładowność i wagę zaworów, a także wagę opakowań możliwy jest jednorazowy transport około 71 opakowań zbiorczych, co daje 798 sztuk zaworów.

Rozpoczynając proces produkcyjny należy wziąć pod uwagę zapasy minimalne, które powinny znajdować się w magazynie na wypadek opóźnienia dostaw. Należy również ustalić zapasy bieżące (produkcyjne) niezbędne do zapewnienia wystarczającej ilości materiałów między kolejnymi dostawami.

Biorąc pod uwagę zapasy rezerwowe i produkcyjne, po uruchomieniu produkcji dostawa powinna być dostarczana w 19 dniu produkcji. Zapas produkcyjny wynosić będzie wynosić 798 sztuk zaworów, co wynika z przyjętej organizacji transportu. Natomiast zapas rezerwowy przyjęto, iż stanowić będzie 126 sztuk zaworów, co zezwala

na 3 dniową produkcję. Po okresie rozruchu procesu produkcyjnego, wielkość zapasu minimalnego powinna być ustalona na podstawie rzeczywistych terminów dostaw, tzn. obejmować liczbę dni odchylenia od średniego cyklu dostaw oraz czas potrzebny na przyjęcie dostawy do magazynu i skierowanie jej do produkcji. Planowane zapasy mogą ulec zmianie w przypadku zainstalowania drugiego pieca do obróbek jonowych i zwiększeniu produkcji.

Podsumowanie

Jak wykazano w pracy zastosowanie ekranu aktywnego prowadzi do intensyfikacji procesu azotowania (efektywność technologiczna), a tym samym dalszego obniżenia kosztów omawianej obróbki powierzchniowej poprzez skrócenie czasu jej trwania. Owe skrócenie czasu procesu przyczynia się do zmniejszenia zużycia energii elektrycznej i mediów gazowych (efektywność energetyczna) jak i w efekcie zmiany kosztów roboczogodziny (efektywność energetyczna).

Oczywistym jest, że takie postępowanie wskazuje jedynie na najbardziej istotne czynniki kosztotwórcze różniące obydwie porównywane metody i nie wyczerpuje wszystkich możliwych skutków zastosowania metody „active screen”. W pracy pominięto np. zmianę logistyki przepływów materiałowych czy mogących mieć istotny wpływ na efektywność ekonomiczną zmianę sposobu rozmieszczenia próbek w komorze roboczej pieca (kształt ekranu aktywnego ogranicza rozłożenie próbek i może zmniejszyć ich ilość w stosunku do klasycznego procesu azotowania jonowego).

Literatura

1. Kowalski S., Łataś Z., Rogalski Z., Sobusiak T., Trojanowski J.: Obróbka cieplna metali. Technika atmosferyczna, fluidalna, próżniowa, jarzeniowa. IMP, Warszawa 1987.
2. Olszański W., Sułkowski I., Tacikowski J., Zysk J.: Obróbka cieplno-chemiczna. Poradnik dla słuchaczy Studium Korespondencyjno-Słuchowego, Warszawa 1979.
3. Frączek T.: Niekonwencjonalne niskotemperaturowe azotowanie jarzeniowe materiałów metalicznych. Wyd. WIPMiFS, Częstochowa 2011.
4. Olejnik M.: Niskotemperaturowe i krótkookresowe azotowanie jarzeniowe stali austenitycznej X2CrNiMo17-12-2. Praca doktorska, Częstochowa 2011.
5. Ogórek M.: Efektywność azotowania jonowego stali austenitycznej X5CrNi18-10 metodą „active screen”. Praca doktorska, Częstochowa 2014.
6. Kięsa A., Marciniak A., Roliński E., Karpiński T.: Azotowanie jonowe stali. XVI Sepinarium IMP, zeszyt 2, 1977, s. 108÷118.
7. Leciejewicz A., Trojanowski J.: Zastosowanie procesu azotowania jonowego dla polepszenia właściwości użytkowych części maszyn i narzędzi. XXIV Seminarium IMP, 1984, s. 87÷92.
8. Burakowski T.: Kierunki rozwoju obróbki cieplnej. 40 posiedzenie Sekcji podstaw technologii komitetu budowy maszyn PAN, IMP, Warszawa 1988.
9. Burakowski T., Dronio B., Dybiec C., Kęsy B., Konarski J., Lampe J., Nakonieczny A., Sala A., Senatorski J.: Obróbka cieplna metali. Badania wyników obróbki cieplnej. Energochłonność procesów obróbki cieplnej, IMP, Warszawa 1987.
10. Olszański W., Sułkowski I., Talikowski J., Zysk J.: Nowoczesne technologie obróbki cieplnej. Obróbka cieplno-chemiczna. IMP, Warszawa 1979.

11. Alves Jr. C., E. F. da Silva, Martinelli A. E.: Effect of workpiece geometry on the uniformity of nitrated layers. *Surface and Coatings Technology* 139 (2001), p. 1÷5.
12. Michel H., Czerwiec T., Gantois M., Ablitzer D., Ricard A.: Progress in the analysis of the mechanisms of ion nitriding. *Surface and Coatings Technology* 72 (1995), p. 103÷111.
13. Frączek T., Olejnik M.: Struktura i własności warstwy wierzchniej stali austenitycznej 316L po azotowaniu jarzeniowym. X Międzynarodowa Konferencja Naukowa. Nowe Technologie i Osiągnięcia w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej. Częstochowa 2009.
14. Dobrzański L. A.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego. WNT, Warszawa 2002.
15. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (Dz.U.2003.169.1650 z późn. zm.).
16. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U.2002.75.690 z późn. zm.).
17. PN-EN 12464-1:2004 Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach.
18. Materiały producenta zaworów trójdrożnych.
19. Frączek T.: Niekonwencjonalne niskotemperaturowe azotowanie jarzeniowe materiałów metalicznych. Wyd. WIPMiFS, Częstochowa 2011.
20. www.neopak.pl – data wejścia 18.12.2014
21. www.modo-transort.eu – data wejścia 18.12.2014

Dr inż. Marzena OGÓREK
 Dr inż. Zbigniew SKUZA
 Katedra Zarządzania Produkcją i Logistyki
 Politechnika Częstochowska
 Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów
 42-200 Częstochowa, al. Armii Krajowej 19
 tel./fax: (0-34) 325 07 53
 e-mail: marzenaogorek@wip.pcz.pl
skuza@wip.pcz.pl

Dr hab. inż. Tadeusz FRĄCZEK
 Instytut Inżynierii Materiałowej
 Politechnika Częstochowska
 Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów
 42-200 Częstochowa, al. Armii Krajowej 19
 tel./fax: (0-34) 325 07 53
 e-mail: fraczek@wip.pcz.pl