

EKONOMICZNE ASPEKTY AZOTOWANIA JONOWEGO STALI AUSTENITYCZNEJ METODĄ „ACTIVE SCREEN”

Marzena OGÓREK, Tadeusz FRĄCZEK, Zbigniew SKUZA

Streszczenie: O „atrakcyjności” innowacyjnej technologii w stosunku do innych decyduje powtarzalna, lepsza efektywność przy której możliwie jest osiągnięcie zbliżonych do zadanych wartości cech wyrobu. Dla stali austenitycznych azotowanie jonowe metodą „active screen” z pewnym reżimem technologicznym (ograniczenie czynnika ludzkiego) spełnia te warunki i jest aktualnie jedną z najbardziej efektywnych i ekonomicznych metod azotowania.

Słowa kluczowe: efektywność, ekonomia, azotowanie jonowe, ekran aktywny

1. Wstęp

Zachodzące przez ostatnie dwudziestolecie w Polsce przemiany wynikające z dokonywanej transformacji systemowej i procesu integracji ze wspólnotami europejskimi w różnym stopniu i z różną dynamiką objęły wszystkie dziedziny gospodarki narodowej. Dostosowanie się do zasad gospodarki rynkowej i do wymogów stawianych przez Unię Europejską w przypadku wielu przedsiębiorstw przebiegało równoległe i wymusiło daleko idące zmiany m.in. organizacyjne, własnościowe, ekonomiczne i technologiczne. Aktualnie polskie przedsiębiorstwa funkcjonują w pełni w gospodarce rynkowej.

W czasach globalizacji umiejętność sprostania wymogom klienta i utrzymania się na rynku zależy głównie od skutecznego i efektywnego przebiegu procesów danej organizacji. Procesy te winny zatem być ciągle doskonalone, tak by poprawie ulegała relacja efektów do poniesionych nakładów.

W przedsiębiorstwach przemysłowych obok doskonalenia procesów zarządzania systemem produkcyjnym, jedną z podstawowych metod zwiększania efektywności i konkurencyjności jest innowacyjność w sferze technologicznej. Nowa, lepsza (szybciej, taniej) metoda wytwarzania danego wyrobu może przyczynić się do wzrostu efektywności całego systemu nie tylko po przez zmianę środków technicznych. Sama zmiana może bowiem ograniczać możliwość powstawania ewentualnych błędów będących efektem subiektywnego analizowania procesów technologicznych przez człowieka. Wprawdzie człowiek w organizacji jest jedynym zasobem o charakterze podmiotowym zdolnym świadomie kształtować pozostałe zasoby organizacji to każde zmniejszenie ilości parametrów w procesie decyzyjnym może przyczynić się do zwiększenia ich trafności.

Wytwarzanie warstw powierzchniowych metodami inżynierii powierzchni wymaga podejmowania ciągu procesów decyzyjnych, zaczynając od wyboru metody dla konkretnego obrabianego elementu, kończąc na wyborze parametrów technologicznych, a więc warunków w jakich ten proces będzie realizowany. Każdy proces produkcyjny, a więc i procesy technologiczne obciążone są pewnym ryzykiem, co może skutkować uzyskaniem niezadawalających i niewystarczających efektów eksploatacyjnych. Spowodowane to może być niewłaściwym doбором procesu wytwarzania danego elementu

lub warunkami w jakich jest on prowadzony.

Innym czynnikiem zwiększającym zakres możliwych błędów jest fakt, iż inżynieria materiałowa, a więc i inżynieria powierzchni, a także powiązana z nimi inżynieria produkcji są dziedzinami nauki charakteryzującymi się dużą ilością innowacji. Innowacje te będące w obecnym czasie motorem postępu i czynnikiem decydującym o atrakcyjności danego wyrobu, jednocześnie rozszerzają dotychczasowe możliwości technologiczne uzyskania konkretnych efektów. Dlatego też, nieodzownym wydaje się określenie szczegółowych wytycznych postępowania pracownika (czynnik ludzki) podczas realizacji konkretnych działań.

Obecnie do najszybciej rozwijających się metod inżynierii powierzchni należą: azotowanie, obróbka cieplna i cieplno-chemiczna w próżni, plazmie niskotemperaturowej oraz metody plazmowe i laserowe [1, 2]. W metodach tych szczególną uwagę przywiązuje się do modyfikacji warstw powierzchniowych poprzez rozwój procesów [3]:

- azotowania i jego pochodnych z zastosowaniem wyładowania jarzeniowego;
- nawęglania i jego pochodnych przy obniżonym ciśnieniu z impulsowym dozowaniem mediów gazowych;
- azotowania gazowego i jego odmian, stosowanego do wytwarzania warstw odpornych na zużycie w warunkach tarcia oraz na korozję, gatunków stali trudnoazotujących się.

Nadmienić należy, że wymienione metody inżynierii powierzchni są ciągle przedmiotem badań naukowych, co skutkuje wprowadzeniem w ich metodykę i technologię wielu nowych rozwiązań. Jednym z takich innowacyjnych rozwiązań okazać się może niskotemperaturowe i krótkookresowe azotowanie jonowe metodą „active screen”. Innowacyjność tej metody polega m.in. na znacznym skróceniu czasu i obniżeniu temperatury procesu azotowania jonowego, będącego wynikiem zastosowania ekranu aktywnego.

W aspekcie użytkowym istotną rolę odgrywa możliwość uzyskania przy danych nakładach zamierzonych efektów tj. wymaganych przez konstruktorów właściwości użytkowych obrabianych elementów. Powinno to być osiągnięte poprzez ścisłe przestrzeganie wypracowanych warunków niezbędnych do realizacji wybranego procesu technologicznego. W innym przypadku otrzymanie konkretnych rezultatów często opiera się na wiedzy i umiejętnościach pracowników. Stan taki stwarza sytuację w której prawidłowość przebiegu np. procesu azotowania jonowego zależy od doświadczenia człowieka.

2. Materiał do badań, stanowisko badawcze

Azotowaniu jonowemu poddano stal austenityczną z grupy stali chromowo – niklowych X5CrNi18-10 wg PN-EN 10088-1:1998. Proces azotowania jonowego przeprowadzono zgodnie z opracowanym modelem matematycznego planowania doświadczeń, według tzw. kwadratu łacińskiego [4]. Proces ten przeprowadzono w urządzeniu półprzemysłowym do azotowania typu JON-600 [5] przyjmując następujące parametry azotowania w plazmie wodorowo-azotowej: ciśnienie atmosfery roboczej $p=150$ Pa, temperatura $T=325\div 400^{\circ}\text{C}$, czas $t=2\div 4$ h.

Zakres zastosowanego czasu i temperatury azotowania przyjęto na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych dotyczących krótkookresowego i niskotemperaturowego azotowania jonowego stali austenitycznych. Najważniejszym wyznacznikiem podczas wyboru parametrów azotowania, było uzyskanie warstw

azotowanych o satysfakcjonujących właściwościach tribologicznych przy zachowaniu dobrej odporności korozyjnej azotowanej stali austenitycznej.

Zastosowano dwa warianty rozmieszczenia próbek w komorze jarzeniowej:

- próbki umieszczono bezpośrednio na katodzie,
- próbki umieszczone na katodzie dodatkowo przykryto ekranem aktywnym wykonanym z perforowanej blachy ze stali austenitycznej.

Uzyskane efekty azotowania jonowego stali austenitycznej X5CrNi18-10 porównano z wynikami [6] azotowania jonowego stali austenitycznej X2CrNiMo17-12-2 otrzymanymi po azotowaniu w tych samych warunkach.

3. Wyniki badań

Test odporności na zużycie ściernie w warunkach tarcia suchego w układzie rolka - kłosek przeprowadzono na testerze T-05, współpracującym z elektronicznym układem rejestracji danych Spider 8 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik oraz oprogramowaniem Catman Express. Badanie odporności na zużycie ściernie przeprowadzono przy obciążeniu 13,73 N w czasie 2 godzin (4 cykle po 30 min). Miarą odporności na zużycie ściernie był ubytek masy próbek po każdym z cykli testu tribologicznego.

Stwierdzono, że zastosowanie w procesie azotowania jonowego ekranu aktywnego powoduje wzrost odporności na zużycie ściernie badanych gatunków stali austenitycznych (tab. 1÷4).

Tab. 1. Procentowy wzrost odporności na zużycie ściernie, po 30 min testu tribologicznego, badanych stali austenitycznych azotowanych jonowo metodą „active screen” w odniesieniu do azotowania katodowego

Czas, h	Gatunek stali							
	X5CrNi18-10				X2CrNiMo17-12-2			
	Temperatura azotowania, °C							
	325	350	375	400	325	350	375	400
2	8%	44%	99%	43%	7%	44%	99%	30%
3	20%	80%	99%	67%	15%	86%	100%	48%
4	28%	93%	99%	33%	28%	94%	99%	44%

Tab. 2. Procentowy wzrost odporności na zużycie ściernie, po 60 min testu tribologicznego, badanych stali austenitycznych azotowanych jonowo metodą „active screen” w odniesieniu do azotowania katodowego

Czas, h	Gatunek stali							
	X5CrNi18-10				X2CrNiMo17-12-2			
	Temperatura azotowania, °C							
	325	350	375	400	325	350	375	400
2	1%	38%	46%	97%	18%	38%	38%	98%
3	26%	42%	95%	26%	28%	41%	94%	70%
4	24%	96%	98%	47%	28%	96%	100%	79%

Tab. 3. Procentowy wzrost odporności na zużycie ścierne, po 90 min testu tribologicznego, badanych stali austenitycznych azotowanych jonowo metodą „active screen” w odniesieniu do azotowania katodowego

Czas, h	Gatunek stali							
	X5CrNi18-10				X2CrNiMo17-12-2			
	Temperatura azotowania, °C							
	325	350	375	400	325	350	375	400
2	0%	11%	19%	98%	32%	88%	100%	66%
3	10%	18%	66%	97%	23%	28%	72%	80%
4	17%	85%	99%	54%	32%	88%	100%	66%

Tab. 4. Procentowy wzrost odporności na zużycie ścierne, po 120 min testu tribologicznego, badanych stali austenitycznych azotowanych jonowo metodą „active screen” w odniesieniu do azotowania katodowego

Czas, h	Gatunek stali							
	X5CrNi18-10				X2CrNiMo17-12-2			
	Temperatura azotowania, °C							
	325	350	375	400	325	350	375	400
2	2%	10%	2%	98%	19%	19%	14%	98%
3	1%	7%	41%	97%	21%	20%	60%	97%
4	2%	44%	97%	40%	19%	59%	98%	96%

Pomiary twardości powierzchniowej wykonano metodą Knoppa na mikrotwardościomierzu FM7, stosując obciążenie 25G oraz 50G. Stwierdzono, że zastosowanie w procesie azotowania jonowego ekranu aktywnego powoduje wzrost twardości powierzchniowej badanych gatunków stali austenitycznych (tab. 5÷6).

Tab. 5. Procentowy wzrost twardości powierzchniowej badanych stali austenitycznych azotowanych jonowo metodą „active screen” w odniesieniu do azotowania katodowego, przy obciążeniu 50G.

Czas, h	Gatunek stali							
	X5CrNi18-10				X2CrNiMo17-12-2			
	Temperatura azotowania, °C							
	325	350	375	400	325	350	375	400
2	11%	6%	46%	52%	24%	33%	75%	106%
3	6%	18%	89%	112%	26%	63%	66%	103%
4	2%	5%	62%	0%	21%	88%	79%	51%

Tab. 6. Procentowy wzrost twardości powierzchniowej badanych stali austenicznych azotowanych jonowo metodą „active screen” w odniesieniu do azotowania katodowego, przy obciążeniu 25G.

Czas, h	Gatunek stali							
	X5CrNi18-10				X2CrNiMo17-12-2			
	Temperatura azotowania, °C							
	325	350	375	400	325	350	375	400
2	43%	60%	151%	250%	26%	60%	103%	69%
3	39%	68%	269%	248%	69%	94%	116%	70%
4	42%	82%	206%	64%	66%	114%	121%	33%

Na podstawie analizy składu chemicznego pierwiastków w warstwie wierzchniej oceniono głębokość dyfuzji azotu. Badania te przeprowadzone zostały na optycznym spektrometrze emisyjnym z wyładowaniem jonowym HORIBA Jobin Yvon GD-Profilier HR, z wyładowczą lampą Grimm'a o średnicy katody 4 mm.

Stwierdzono znaczny wzrost głębokości dyfuzji azotu w wyniku zastosowania azotowania jonowego metodą „active screen” w odniesieniu do azotowania na katodzie (tab.7).

Tab. 7. Procentowy wzrost głębokości dyfuzji azotu badanych stali austenicznych azotowanych jonowo metodą „active screen” w odniesieniu do azotowania katodowego.

Czas, h	Gatunek stali							
	X5CrNi18-10				X2CrNiMo17-12-2			
	Temperatura azotowania, °C							
	325	350	375	400	325	350	375	400
2	67%	225%	460%	382%	91%	178%	156%	187%
3	125%	267%	500%	281%	82%	138%	94%	122%
4	220%	250%	142%	192%	158%	104%	87%	153%

4. Aspekt ekonomiczny

W ramach określenia aspektu ekonomicznego podstawowym działaniem jest wyznaczenie efektywności przedsięwzięcia (procesu). Efektywność wyrażona za pomocą kategorii ekonomicznych staje się efektywnością ekonomiczną [7].

Efektywność ekonomiczna jest to różnica lub iloraz efektu użytkowego (wyniku) i nakładów poniesionych na jego uzyskanie [8]. Metody obliczania efektów, ustalania i bilansowania nakładów, rozkład nakładów i efektów w czasie oraz mierniki bądź formuły oceny działalności kształtują ocenę efektywności ekonomicznej przedsięwzięć. Słuszność tej oceny w procesie podejmowania decyzji zależy od [7]:

- wymierności i porównywalności czynników określających efektywność,
- możliwości wariantowania parametrów technicznych przedsięwzięć.

Efektywność przedsięwzięć powinna uwzględniać nie tylko efekty wymierne wartościowo, ale także powinna określać wpływ efektów niemierzalnych, związanych bezpośrednio z przedsięwzięciem, np. poprawa parametrów technicznych i użytkowych produkowanych wyrobów. W wielu wypadkach efekty te mogą decydować o wyborze przedsięwzięcia (procesu). Całościowa ocena uwzględniać powinna efekty niewymierne takie jak: BHP, ergonomia, ochrona środowiska itp. [7].

Każde zadanie produkcyjne w warunkach współczesnej techniki można wykonać różnymi sposobami. W obróbce cieplnej wybiera się różne technologie, które realizuje się na urządzeniach produkcyjnych różniących się między sobą. Dokonanie właściwego wyboru wymaga rozważań technologicznych, organizacyjnych i przede wszystkim ekonomicznych [9].

Kryterium wyboru najkorzystniejszego wariantu stanowi najwyższa wartość wyrażenia (1):

$$E = \frac{P}{I + K} \quad (1)$$

gdzie:

E – efektywność ekonomiczna,

P – określona produkcja w czasie (efekt),

I - nakłady inwestycyjne,

K – nakłady eksploatacyjne,

którą nazywa się efektywnością ekonomiczną. Należy zawsze wybrać wariant techniczno-organizacyjny, który ma najwyższą efektywność [9].

Dla praktycznego wykorzystania wzoru (1) do oceny poszczególnych wariantów procesu przekształcić go należy do postaci (2):

$$e = \frac{\frac{I}{T} + Kr}{Pr} \quad (2)$$

gdzie:

T – okres zwrotu nakładów inwestycyjnych,

I – nakłady inwestycyjne,

Pr – roczna produkcja,

Kr – roczne koszty eksploatacji (koszty napraw i konserwacji, koszty energii).

Najniższa wartość wskaźnika e świadczy o najwyższej efektywności [8].

W omawianym w artykule przypadku zastosowanie innowacyjnego azotowania jonowego z wykorzystaniem metody „active screen” w odniesieniu do azotowania katodowego wymaga wytworzenia ekranu aktywnego. Koszt wytworzenia takiego ekranu w odniesieniu do pozostałych kosztów (np. koszt całego urządzenia) jest minimalny i w dalszych rozważaniach może być pominięty.

Podstawą obliczenia efektywności ekonomicznej będzie więc określenie w konkretnych przypadkach kosztów maszynogodziny odnoszących się do eksploatacji danego urządzenia produkcyjnego. Koszty maszynogodziny ujmują wszystkie rodzaje kosztów dotyczące danego urządzenia stanowiącego zasób systemu wytwarzania.

Według autorów pracy [12] koszt maszynogodziny jest wielkością rozliczeniową, wyrażającą koszty maszynowe odniesione do godziny pracy maszyny. Koszt maszynogodziny jednego urządzenia wyznacza się zależności (3) [12]:

$$K_{MH} = \frac{K_A + K_Z + K_R + K_E + K_I}{T_N} \quad (3)$$

gdzie:

K_{MH} – koszty maszynogodziny [zł/h],

K_A – koszty odpisów amortyzacyjnych [zł/rok],

K_Z – koszty odsetek kalkulacyjnych [zł/rok],

K_R – koszty lokalowe [zł/rok],

K_E – koszty energii [zł/rok],

K_I – koszty utrzymania maszyny w ruchu [zł/rok],

T_N – roczny fundusz czasu pracy maszyny (czas użytkowania) [h/rok].

Autorzy pracy [12] posługują się także pojęciem kosztów roboczogodziny która jest równa (4):

$$K_{RH} = K_{MH} + K_P \quad (4)$$

gdzie:

K_{RH} – koszt roboczogodziny [zł/h],

K_{MH} – koszty maszynogodziny [zł/h],

K_P – koszt godzinowej płacy personelu obsługującego.

W pracy [13] przedstawiono koszt maszynogodziny jako następującą zależność (5):

$$K_{Mh} = \frac{K_A + K_Z + K_R + K_E + K_I + K_N + K_{PB} + K_{PP}}{T_N} \quad (5)$$

gdzie:

K_{Mh} – koszty maszynogodziny [zł/h],

K_A – koszty odpisów amortyzacyjnych [zł/rok],

K_Z – koszty odsetek [zł/rok],

K_R – koszty lokalowe [zł/rok],

K_E – koszty energii [zł/rok],

K_I – koszty utrzymania maszyny w ruchu [zł/rok],

K_N – koszty narzędziowe [zł/rok],

K_{PB} – koszty personelu bezpośredniego [zł/rok],

K_N – koszty personelu pośredniego [zł/rok],

T_N – roczny fundusz czasu pracy maszyny (czas użytkowania) [h/rok].

Prezentowane w pracy dane dotyczą procesów azotowania jonowego realizowanych w laboratorium Politechniki Częstochowskiej w półprzemysłowym piecu do obróbek jarzeniowych. Z tego względu wszystkie dalsze rozważania ekonomiczne dotyczyć będą analogicznych uwarunkowań. Zatem należy przyjąć, iż koszt wykonania danego wariantu procesu azotowania jonowego, biorąc pod uwagę wzory (3) i (4) można obliczyć z wzoru (6):

$$K_{CP} = K_{MH} + K_P \quad (6)$$

gdzie:

K_{CP} – koszt całkowity procesu [zł/h],

K_{MH} – koszty maszynogodziny [zł/h],

K_P – koszt godzinowej płacy personelu obsługującego [zł/h].

Zaobserwowane zależności (tab. 1÷7) pozwalają stwierdzić, iż w każdym przypadku zastosowanie ekranu aktywnego powoduje poprawę wszystkich uzyskiwanych właściwości, więc z ekonomicznego punktu widzenia zastosowanie metody „active screen” jest korzystniejsze niż proces katodowy.

W dalszych rozważaniach nad efektywnością procesu azotowania jonowego odniesiono się wyłącznie do głębokości warstwy dyfuzyjnej, ponieważ to ona ma wpływ na właściwości warstwy wierzchniej takie jak: twardość i odporność na zużycie tribologiczne. Dane zawarte w tabeli 8 i 9 wskazują, iż dla azotowania katodowego największą grubość warstwy dyfuzyjnej tj. 2,5 μm uzyskano podczas 4-godzinnego azotowania w temperaturze 400°C. Zbliżoną, a nawet większą grubość warstwy dyfuzyjnej (2,8 μm) przy zastosowaniu ekranu aktywnego można osiągnąć w temperaturze 350°C i 4h lub 375°C i 2h. Poniesione więc w obu przypadkach nakłady finansowe różnić się będą kosztami związanymi z czasem i temperaturą procesu azotowania jonowego.

Tab. 8. Głębokości dyfuzji azotu dla stali X5CrNi18-10

Czas, h	Głębokość dyfuzji azotu, μm							
	Ekran aktywny				Katoda			
	Temperatura azotowania, °C							
	325	350	375	400	325	350	375	400
2	0,5	1,3	2,8	5,3	0,3	0,4	0,5	1,1
3	0,9	2,2	4,2	6,1	0,4	0,6	0,7	1,6
4	1,6	2,8	4,6	7,3	0,5	0,8	1,9	2,5

Tab. 9. Energia nagrzewania i ekspozycji podczas azotowania jonowego stali X5CrNi18-10

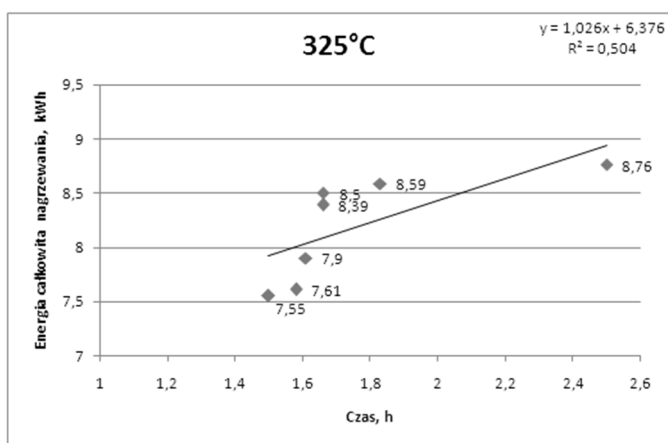
Czas, h	Energia nagrzewania, kWh				Energia ekspozycji, kWh			
	Temperatura azotowania, °C							
	325	350	375	400	325	350	375	400
2	7,62	8,34	10,04	13,48	6,94	8,14	9,02	10,29
3	7,90	8,19	10,15	10,34	11,11	12,51	13,71	15,19
4	8,39	13,09	12,89	16,27	14,61	16,13	17,95	19,92

Całkowity proces w obydwu wariantach azotowania jonowego składa się z okresu nagrzewania potrzebnego do osiągnięcia zadanej temperatury i okresu ekspozycji próbek w zadanej temperaturze. Charakterystyczną cechą i zaletą procesu azotowania jonowego jest to, iż nagrzewane są wyłącznie elementy azotowane i dzięki temu pomijane jest zbędne nagrzewanie całej komory roboczej pieca.

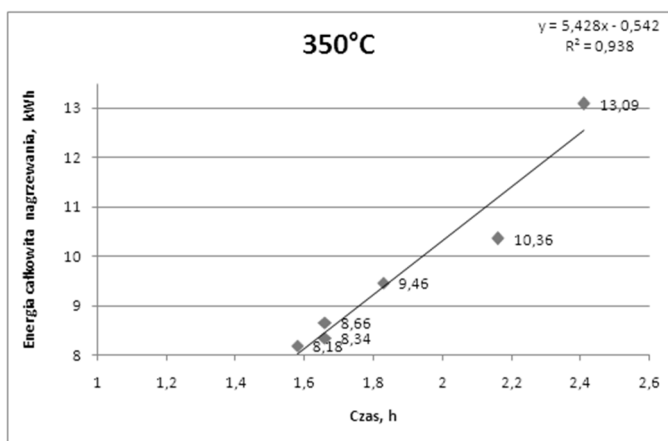
Analizując dane z przeprowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono, że pomiędzy energią całkowitą nagrzewania, a czasem nagrzewania zauważyć można występowanie tendencji liniowej (rys. 1÷4). Obliczony dla poszczególnych temperatur

współczynnik determinacji R^2 wskazuje, iż istnieje zauważona tendencja która powinna zostać potwierdzona w kolejnych eksperymentach celem optymalizacji procesu nagrzewania pieca.

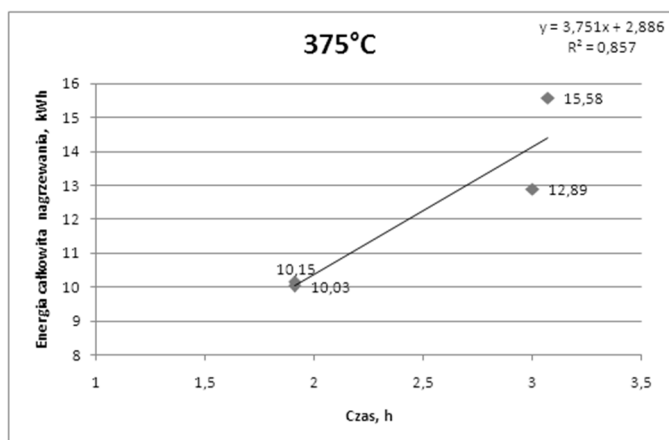
Do dalszych obliczeń dla wszystkich energii (tab. 8÷9) przyjęto wartości uśrednione (z wszystkich procesów realizowanych w danych warunkach). Przy czym pod pojęciem energii całkowitej należy rozumieć iloczyn czasu (nagrzewania/ekspozycji próbki) i mocy całkowitej (suma mocy efektywnej i mocy krążącej).



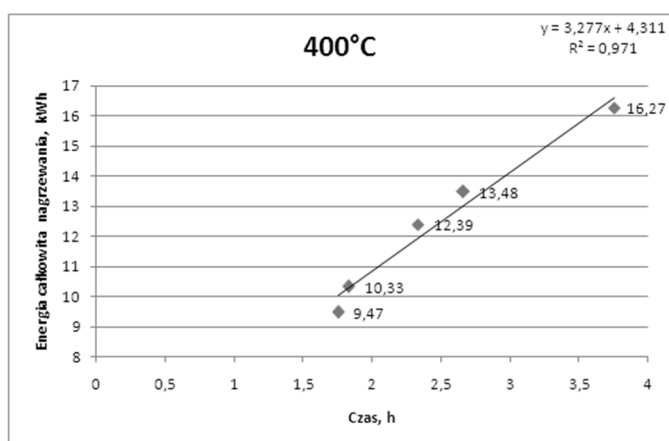
Rys. 1. Zależność między energią całkowitą nagrzewania, a czasem nagrzewania dla temperatury 325°C



Rys. 2. Zależność między energią całkowitą nagrzewania, a czasem nagrzewania dla temperatury 350°C



Rys. 3. Zależność między energią całkowitą nagrzewania, a czasem nagrzewania dla temperatury 375°C



Rys. 4. Zależność między energią całkowitą nagrzewania, a czasem nagrzewania dla temperatury 400°C

Koszty związane z procesem nagrzewania i okresem ekspozycji próbki dla obydwu wariantów procesu azotowania są takie same. W przypadku energii elektrycznej poniesione nakłady przedstawiono w tabeli 10. Łatwo można zauważyć, iż podczas azotowania katodowego koszt energii elektrycznej potrzebny do uzyskania 2,5 μm głębokość warstwy dyfuzyjnej wynosi 17,98 zł. Analogicznie dla azotowania jonowego metodą „active screen” przy głębokość warstwy dyfuzyjnej 2,8 μm koszty wynoszą odpowiednio 14,04 zł (350°C, 4h) i 10,82 zł (375°C i 2h). Zestawienie tych kosztów jednoznacznie wskazuje, iż najbardziej optymalnym wariantem jest proces azotowania jonowego prowadzony w możliwie najkrótszym czasie (w zakresie warunków określonych parametrami przeprowadzonych eksperymentów). Zwiększenie głębokość warstwy dyfuzyjnej powinno być zatem związane najpierw ze wzrostem temperatury azotowania, a dopiero później z zwiększeniem czasu ekspozycji próbki. Zależności empiryczne zamieszczone w pracy [11] pozwalają również stwierdzić, iż skrócenie ekspozycji próbki (z 4 do 2h) przy

jednoczesnym zwiększeniu temperatury azotowania (o 25°C) nie wpływa znacząco na właściwości tribologiczne.

Tab. 10. Koszty energii elektrycznej zużytej podczas nagrzewania pieca i ekspozycji próbki w zadanej temperaturze, 1kWh = 0,44 zł/netto + 23% VAT

Zadana temperatura [°C]	Koszt nagrzania do zadanej temperatury [zł]	Koszt ekspozycji w zadanej temperaturze i określonym czasie [zł]		
		2h	3h	4h
325	4,30	3,75	6,00	7,89
350	5,33	4,39	6,76	8,71
375	5,95	4,87	7,40	9,69
400	7,22	5,56	8,20	10,76

Koszty energii elektrycznej są oczywiście jedną ze składowych określających całkowite koszty azotowania jonowego. W celu określenia faktycznej efektywności ekonomicznej azotowania jonowego metodą „active screen” należy uwzględnić wszystkie nakłady finansowe zgodnie z wzorem 6, który ostatecznie można przedstawić zależnością (7):

$$K_{CP} = \frac{K_A + K_Z + K_R + K_{EE} + K_{MG} + K_W + K_I}{T_N} + K_P \quad (7)$$

gdzie:

K_{CP} – koszt całkowity procesu [zł/h],

K_A – koszty odpisów amortyzacyjnych [zł/rok],

K_Z – koszty odsetek kalkulacyjnych [zł/rok],

K_R – koszty lokalowe [zł/rok],

K_{EE} – koszty energii elektrycznej [zł/rok],

K_{MG} – koszty mediów gazowych [zł/rok],

K_W – koszty zużycia wody [zł/rok],

K_I – koszty utrzymania maszyny w ruchu [zł/rok],

T_N – roczny fundusz czasu pracy maszyny (czas użytkowania) [h/rok].

K_P – koszt godzinowej płacy personelu obsługującego [zł/h].

5. Podsumowanie

Rosnące wymagania jakościowe odnośnie właściwości powierzchni materiałów metalicznych powodują wprowadzanie innowacyjnych i ekonomicznych technologii obróbek powierzchniowych. Do takich technologii można zaliczyć azotowanie jonowe z zastosowaniem metody „active screen”. Zastosowanie tego nowego rozwiązania technologicznego pozwala: na uzyskanie zakładanych właściwości eksploatacyjnych materiałów, na obniżenie energochłonności procesu oraz na minimalizację kosztów.

Jednym z aspektów stopnia innowacyjności procesu azotowania jonowego metodą „active screen” jest możliwość zmierzenia jego efektywności.

Stwierdzono znaczny wzrost głębokości dyfuzji azotu (nawet o 500%) w wyniku zastosowania azotowania jonowego metodą „active screen” w odniesieniu do azotowania na katodzie. Zauważono, że zastosowanie w procesie azotowania jonowego ekranu aktywnego powoduje wzrost twardości powierzchniowej (nawet o 269%) badanych gatunków stali austenitycznych. Zaobserwowano także, że zastosowanie w procesie azotowania jonowego ekranu aktywnego powoduje wzrost odporności na zużycie ściernie (nawet o 99%) badanych gatunków stali austenitycznych.

W dalszych badaniach należy eksperymentalnie potwierdzić czy z ekonomicznego punktu widzenia zwiększanie głębokości warstwy dyfuzyjnej powinno być najpierw związane z wzrostem temperatury azotowania, a dopiero później z zwiększeniem czasu ekspozycji próbki. W tym celu trzeba:

- określić optymalne warunki procesu nagrzewania komory roboczej pieca do zadanej temperatury (czas nagrzewania, moc prądu),
- biorąc pod uwagę 8 – godzinny czas pracy, okres nagrzewania i chłodzenia komory pieca wyznaczyć realnie najdłuższy czas ekspozycji próbki (najkrótszy czas ekspozycji próbki tj. 2 h określono w pracy [11]),
- przeprowadzić dla maksymalnych czasów ekspozycji próbki procesy azotowania jonowego metodą „active screen” w zakresie temperatur 400°C–500°C (powyżej tej temperatury następuje dechromizacja powierzchni co skutkuje pogorszeniem odporności korozyjnej[11]).

Uzyskane dane umożliwią(w zakresie warunków przeprowadzonych eksperymentów) jednoznacznie wyznaczyć optymalne parametry prowadzenia procesu azotowania jonowego metodą „active screen”. Parametry te z kolei pozwolą określić wszystkie niezbędne rodzaje kosztów i tym samym w efekcie efektywność ekonomiczną omawianego procesu.

Literatura:

1. Wierzchoń T.: Współczesne kierunki rozwoju inżynierii powierzchni. Konferencja „Problemy metaloznawstwa w technice XXI wieku”, Cedzyna k. Kielc, Druk: Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, seria: Mechanika, nr 72, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2000, s. 55÷63.
2. Burakowski T.: Rozwój obróbki cieplnej na przestrzeni 4000 lat i co dalej? Konferencja „Problemy metaloznawstwa w technice XXI wieku”, Cedzyna k. Kielc, Druk: Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, seria: Mechanika, nr 72, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2000, s. 33÷54.
3. Burakowski T.: Areologia. Powstanie i rozwój. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom 2007.
4. M. Ogórek, T. Frączek, Z. Skuza: Effectiveness of the Ion Nitriding of Steels X5CrNi18-10, X2CrNiMo17-12-2. W: Innovations in Management and Production Engineering. Ed. Ryszard Knosala. Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją. Opole 2013, s. 128-138.
5. Ogórek M., Frączek T., Skuza Z., Maźniak K.: Krótkookresowe i niskotemperaturowe azotowanie jarzeniowe stali austenitycznej X5CrNi18-10

- z zastosowanie ekranu aktywnego. Inżynieria Materiałowa 5/2013, s. 513-516.
6. Olejnik M.: Niskotemperaturowe i krótkookresowe azotowanie jarzeniowe stali austenitycznej X2CrNiMo17-12-2. Praca doktorska, Częstochowa 2011.
 7. S. Marciniak, R. Rafalski: Efektywność przedsięwzięć techniczno-organizacyjnych. PWE, Warszawa 1983.
 8. Mała Encyklopedia Ekonomiczna. Warszawa 1974, s. 185.
 9. Luty W., Poradnik inżyniera. Obróbka cieplna stopów żelaza. Wyd. Naukowo Techniczne, 1977.
 10. Frączek T., Kolmasiak C., Olejnik M., Skuza Z.: Assessment of the effectiveness of 316L austenitic steel unconventional glow discharge nitriding. Metalurgija (Zagreb), Vol. 50, nr 2, 3011, s. 97-100.
 11. Frączek T.: Niekonwencjonalne niskotemperaturowe azotowanie jarzeniowe materiałów metalicznych. Wyd. WIPMiFS, Częstochowa 2011.
 12. Warnecke H. J., Bullinger H. –J., Voegelé A.: Rachunek kosztów dla inżynierów. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszaw 1995.
 13. Orłowski K. A., Walichnowski A.: Analiza ekonomiczna produkcji warstw licowych podłóg klejonych warstwowo. Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty. 2013, vol. 56, nr 189, s. 115-127.

Mgr inż. Marzena Ogórek
Dr hab. inż. Tadeusz Frączek, prof. PCz
Dr inż. Zbigniew Skuza
Politechnika Częstochowska
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów
Al. Armii Krajowej 19
42-200 Częstochowa
e-mail: marzenaogorek@wip.pcz.pl
fraczek@wip.pcz.pl
skuza@wip.pcz.pl