

NISKOEMISYJNE, EKOLOGICZNE AZOTOWANIE ELEMENTÓW POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH PRZY WYKORZYSTANIU METODY ZEROFLOW

W artykule omówiona została nowoczesna metoda regulowanego azotowania gazowego ZeroFlow, znajdująca zastosowanie w azotowaniu wybranych elementów pojazdów samochodowych. Dzięki zastosowaniu modeli symulacyjnych opisujących kinetykę wzrostu warstwy azotowanej możliwe jest opracowanie specjalnie dedykowanych procesów o odpowiednio dobranych parametrach; pozwala to na otrzymanie warstw azotowanych o ściśle określonych własnościach: wymaganej budowie fazowej wraz z grubościami stref/faz w niej występujących oraz wymaganych rozkładach twardości. Ponadto, dzięki zastosowaniu modeli symulacyjnych warstwy te są wytwarzane w możliwie najkrótszym czasie i przy najmniejszym zużyciu energii; proces azotowania metodą ZeroFlow jest zatem procesem ekonomicznym i ekologicznym. W artykule przedstawiono istotę procesu regulowanego azotowania gazowego ze szczególnym naciskiem na wpływ parametrów procesu azotowania na otrzymywane rezultaty. Informacje te stanowią podstawę do zrozumienia zagadnienia kinetyki wzrostu warstwy azotowanej, a co za tym następuje – dla jego praktycznego zastosowania w projektowaniu, regulacji i kontroli procesów azotowania przy wykorzystaniu modeli symulacyjnych (symulatora kinetyki wzrostu warstwy azotowanej). Projektowanie procesów azotowania ZeroFlow w oparciu o kinetykę wzrostu warstwy azotowanej wyjaśniono na przykładzie azotowania wałów korbowych dla silników samochodów sportowych.

WSTĘP

ZeroFlow jest to nowoczesna technologia regulowanego azotowania gazowego, opracowana na Politechnice Poznańskiej, dzięki której możliwe jest precyzyjne wytwarzanie warstw azotowanych w oparciu o kinetykę azotowania. Charakteryzuje się ona zmniejszeniem zużycia gazów, jak również uproszczeniem stanowiska do azotowania oraz samego procesu, przy jednoczesnym zachowaniu pełnej kontroli kinetyki wzrostu warstwy. Podobnie jak metoda tradycyjna, ZeroFlow zakłada użycie atmosfery składającej się wyłącznie z samego amoniaku, jednak w przeciwieństwie do konwencjonalnej metody azotowania możliwa jest kontrola kinetyki dzięki regulacji składu chemicznego atmosfery w retorcie pieca (a tym samym regulacji potencjału azotowego) poprzez regulację natężenia przepływu amoniaku przez retortę, a ściślej mówiąc – poprzez regulację natężenia (okresowe zamykanie i otwieranie) dopływu amoniaku do retorty. Istotne znaczenie ma tutaj fakt, iż w metodzie ZeroFlow natężenie dopływu amoniaku do retorty jest okresowo ograniczane do wartości zerowej, co znacznie ułatwia kontrolę składu chemicznego atmosfery. Podsumowując, zastosowanie atmosfery jednoskładnikowej sprawia, że metoda ZeroFlow jest prostsza od popularnych obecnie metod bazujących na atmosferach dwuskładnikowych, a jednocześnie dzięki regulacji dopływu amoniaku do retorty tak jak one pozwala na kontrolę kinetyki wzrostu warstwy azotowanej [4]. Do chwili obecnej metoda azotowania ZeroFlow została wdrożona w 26 zakładach w Polsce oraz wielu krajach na świecie, takich jak Włochy, Wielka Brytania, Kanada, Szwecja, Singapur, Korea Południowa, Niemcy, Czechy, Białoruś, Rosja, Indie, Pakistan, Szwajcaria. Wykonano i wdrożono już 36 instalacji przemysłowych, a kolejne 4 są uruchamiane. Łącznie przeprowadzonych zostało kilka tysięcy procesów azotowania różnych części maszyn i pojazdów z wynikiem pozytywnym, co jest najlepszą weryfikacją słuszności opracowanej metody.

Zebrane doświadczenia wykazały, iż metodą ZeroFlow można wytwarzać warstwy azotowane o określonej budowie fazowej, wymaganych grubościach występujących stref oraz wymaganych rozkładach twardości. Dzięki wykorzystaniu modeli fenomenologicznych warstwy te są wytwarzane w możliwie najkrótszym czasie, a więc przy najmniejszym zużyciu energii. Modele pozwalają dodatkowo na kształtowanie budowy fazowej wraz z grubościami występujących w niej stref (faz) w funkcji parametrów procesu, tj. czasu, temperatury i potencjału azotowego. Wytworzona w ten sposób warstwa nie wymaga kosztownego i czasochłonnego szlifowania przypowierzchniowej strefy azotków, tak jak to ma miejsce w przypadku tradycyjnego azotowania gazowego, co z kolei oznacza mniejsze zużycie energii i materiałów. O ekonomicznym i ekologicznym charakterze procesu ZeroFlow świadczy również to, iż charakteryzuje się on kilkukrotnie mniejszym zużyciem gazów technicznych w porównaniu z ich zużyciem w pozostałych obecnie stosowanych procesach azotowania, a w konsekwencji – znacznie mniejszą emisją gazów poprocesowych do atmosfery.

Jak wynika z powyższego, azotowanie ZeroFlow jest nowoczesną, dynamicznie rozwijającą się metodą, wpisującą się w obecnie panujące na świecie trendy: minimalizacji zużycia surowców i energii oraz negatywnego oddziaływania na środowisko [4]. Należy jednak podkreślić, iż metoda ZeroFlow, podobnie jak inne dotychczas stosowane procesy azotowania, jest ogólnym rozwiązaniem technologicznym i konstrukcyjnym, umożliwiającym prowadzenie procesów w różnych, odpowiednio dobranych parametrach, takich jak temperatura, potencjał azotowy atmosfery, czas, szybkość nagrzewania, redukcja potencjału itp. Każdy element wymaga zatem opracowania konkretnego procesu o określonych parametrach; w tym celu wykorzystywane są modele symulacyjne, które znacznie przyspieszają opracowywanie nowych procesów [2,6]. Warto zauważyć, że symulacje procesów obróbki cieplno-chemicznej są niezwykle istotnym zagadnieniem, pozwalającym na ukazywanie często niedostrzeganych w praktyce przemysłowej (a niekiedy nawet

w badaniach eksperymentalnych) rozmaitych zjawisk i ich przebiegów. Stanowią one również element regulacji i kontroli procesów [3].

Wytwarzanie warstw azotowanych odbywa się na stalach, które są najczęściej stosowane w budowie maszyn transportowych, takich jak pojazdy samochodowe i statki powietrze oraz w budowie maszyn technologicznych i narzędzi stosowanych m.in. dla przemysłu drzewnego; azotowaniu ZeroFlow są zatem poddawane takie elementy maszyn i pojazdów, jak koła zębate do elektrowni wiatrowych, matryce do kucia aluminium, matryce do wyciskania profili aluminiowych na gorąco itd. Przeprowadzono również procesy dla wielu elementów silników spalinowych, m.in. wałów korbowych, wałków rozrządu, pierścieni tłokowych, sprężyn i grzybków zaworów, sworzní tłokowych, czy też dysz do pompowtryskiwaczy. Azotowanie tych elementów ma na celu wytworzenie warstwy o podwyższonej twardości, zwiększonej wytrzymałości zmęczeniowej oraz odporności na ścieranie, zacieranie czy korozję. Warstwa taka zwiększa zatem trwałość azotowanych detali, a co jest z tym związane – trwałość eksploatacyjną maszyn i pojazdów.

1. ISTOTA PROCESU AZOTOWANIA

Regulowane azotowanie gazowe ZeroFlow prowadzi się w podwyższonej temperaturze (zawierającej się zazwyczaj w przedziale pomiędzy 490°C a 590°C) z użyciem atmosfery zawierającej amoniak. Gaz ten ze względu na małą trwałość cząsteczek (w przeciętnych temperaturach azotowania amoniak jest w niestabilnym stanie termodynamicznym) po zetknięciu z powierzchnią stalową podlega rozpadowi według następującej katalitycznej reakcji dysocjacji:

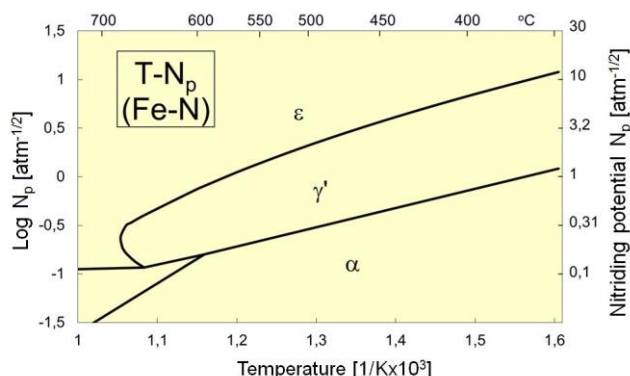


W wyniku dyfuzji azotu atomowego do powierzchni stali wytwarza się warstwa wierzchnia o innych właściwościach niż materiał pierwotny (materiał rdzenia). Jej budowa fazowa, grubości występujących stref, a w konsekwencji i własności, zależą zarówno od gatunku stali, jak i od parametrów azotowania: temperatury T , potencjału azotowego atmosfery N_p oraz czasu t . Pod pojęciem potencjału azotowego atmosfery rozumiany jest iloraz ciśnień cząstkowych czynnych składników atmosfery. Azot i wodór w stanie atomowym, otrzymane na skutek dysocjacji amoniaku, dążą do jak najszybszej rekombinacji do cząsteczek dwuatomowych, natomiast dyfuzja azotu ma miejsce tylko i wyłącznie wtedy, kiedy jest on w stanie atomowym – stąd też do przeprowadzenia procesu niezbędne jest ciągle dostarczanie do retorty pieca świeżego amoniaku. Atmosfera w retortie pieca składa się zatem z następujących gazów: gazu azotującego NH_3 i gazu odazotowującego H_2 , będących składnikami czynnymi atmosfery, oraz gazu obojętnego N_2 [1,4,7]. Potencjał azotowy atmosfery możemy wyrazić więc następującym wzorem:

$$N_p = \frac{p_{NH_3}}{p_{H_2}^{3/2}} \quad (2)$$

W zależności od aktywności azotu w atmosferze (związanej z potencjałem azotowym atmosfery), azotowaniu stali może towarzyszyć wzrost warstwy jedno-, dwu- lub trójfazowej (α , $\gamma' + \alpha$, $\varepsilon + \gamma' + \alpha$). Zależność budowy fazowej od potencjału N_p i temperatury T została przedstawiona na układzie równowagi $T-N_p$, zwanym inaczej układem Lehrera (Rys. 1). Granice występowania poszczególnych faz na tym wykresie (α/γ , α/γ' , γ/ε , γ'/ε) są przedstawione w postaci funkcji temperatury T i potencjału azotowego atmosfery

Np. Warto również zaznaczyć, że potencjały chemiczne azotu w poszczególnych fazach na granicach międzyfazowych są sobie równe, a w warunkach równowagi z atmosferą $\text{NH}_3 + \text{H}_2$ są równe potencjałowi chemicznemu azotu w tej atmosferze.

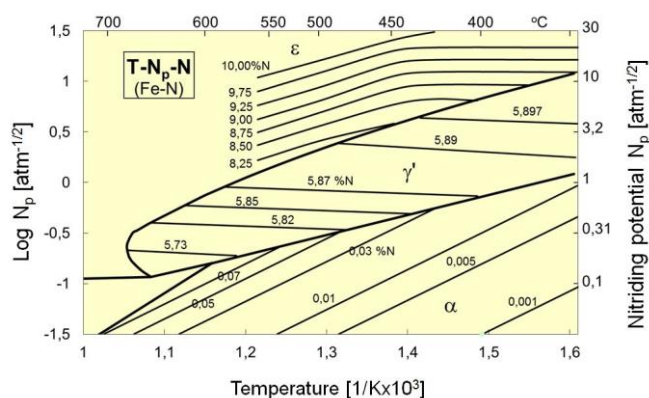


Rys. 1. Układ równowagi T-N₀

Analizując układ Lehrera możemy zauważyć, iż w zależności od potencjału azotowego atmosfery (przy tej samej temperaturze procesu), warstwa uzyskana na żelazie i stalach węglowych może przybierać następujące postaci:

- warstwa jednostrefowa α – przy potencjale azotowym atmosfery N_p^α , znajdującym się na wykresie w zakresie występowania fazy α ;
- warstwa dwustrefowa $\gamma'+\alpha$ – przy potencjale azotowym atmosfery $N_p^{\gamma'}$, znajdującym się na wykresie w zakresie występowania fazy γ' ;
- warstwa trójstrefowa $\varepsilon+\gamma'+\alpha$ – przy potencjale azotowym atmosfery N_p^ε , znajdującym się na wykresie w zakresie występowania fazy ε .

O ile układ Lehrera pozwala w pewnym stopniu przewidzieć budowę fazową warstwy azotowanej, to jednak nie dostarcza on danych o stężeniach azotu w fazach α , γ' i ε w funkcji temperatury T i potencjału azotowego N_p , a dane te są podstawą do opisu kinetyki wzrostu warstwy azotowanej. L. Małdziński na podstawie własnych analiz i badań wyznaczył w układzie T - N_p linie i krzywe izokonceńtracji – tzn. stałych wartości stężeń azotu – w zależności od temperatury i potencjału, co pozwoliło na stworzenie zmodyfikowanego układu równowagi T - N_p - N (Rys. 2). Dostarcza on niezbędnych informacji potrzebnych do opracowania modeli kinetyki wzrostu warstwy azotowanej, których brak przez długi czas stanowił zasadniczą przeszkodę dla rozwoju badań i kinetycznego opisu wzrostu warstwy [3,4].



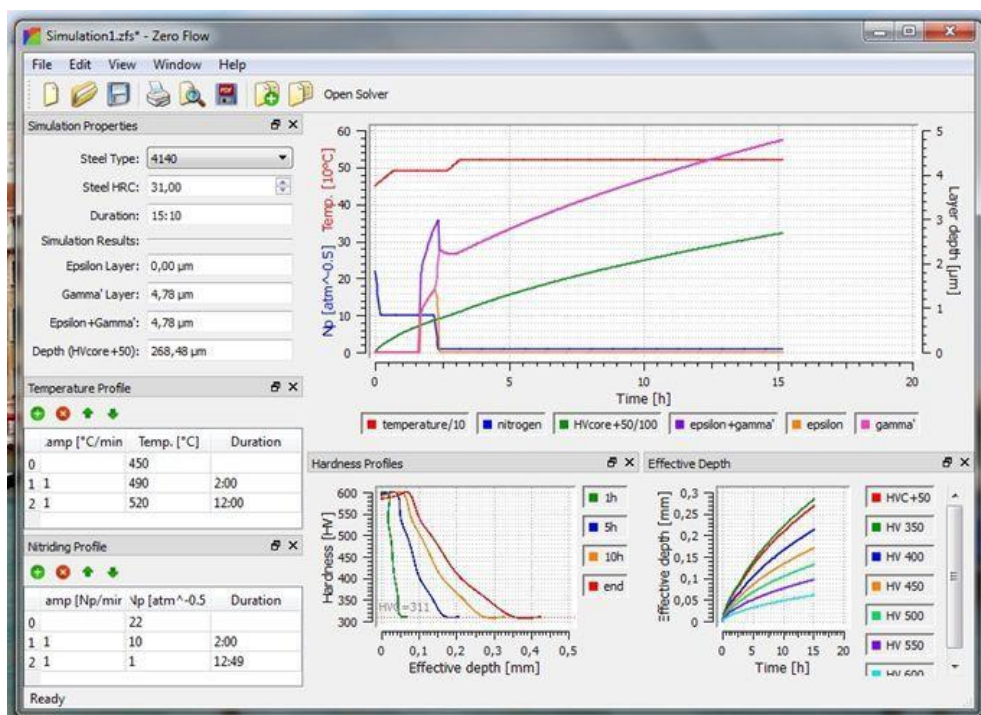
Rys. 2. Układ równowagi $T-N_p-N$

Obserwując układ równowagi T-N_p-N nie można jednak formułować wniosków o kinetyce (szybkości) wzrostu warstwy azotowanej oraz występujących w niej strefach. Budowa fazowa i grubości stref zależą bowiem również od czasu procesu. Wpływ czasu został uwzględniony w modelach fenomenologicznych kinetyki wzrostu warstwy azotowanej na żelazie i stalach stopowych, opracowanych przez L. Małdzińskiego i współpracowników [4]. Modele te uwzględniają również sumaryczny wpływ pierwiastków stopowych i węgla na strumienie dyfuzyjne atomów azotu do stref ϵ , γ' i α , a w efekcie – na szybkość wzrostu tych stref. Nie można bowiem zapominać, iż układ równowagi T-N_p-N dotyczy czystego żelaza, podczas gdy w rzeczywistości azotowaniu poddawane są przede wszystkim jego stopy z węglem (stałe węglowe) i dodatkami stopowymi (stałe stopowe). L. Małdziński wykazał, że wykres T-N_p-N można stosować jedynie do stali stopowych zawierających Cr, Mn, Mo, V, jako że zawartość tych pierwiastków nie wpływa na jego kształt [3,4].

Jak wynika z powyższego, ilość czynników wpływających na przebieg procesu azotowania sprawia, iż do precyzyjnego kształtowania warstwy azotowanej o określonej budowie fazowej, wymaganych grubościach stref/faz w niej występujących oraz wymaganych rozkładach twardości niezbędne jest zastosowanie modeli matematycznych. Opracowane modele fenomenologiczne kinetyki wzrostu warstwy azotowanej znajdują zatem zastosowanie w symulacjach procesów azotowania, gdzie poprzez zmianę parametrów procesu umożliwiają kształtowanie budowy fazowej warstwy, tj. zarówno rodzajów tworzących się faz (stref) i ich grubości, jak i stężeń powierzchniowych oraz profili stężeń azotu w poszczególnych strefach. Ponadto pozwalają na śledzenie wzrostu grubości stref ϵ i γ' w funkcji potencjału azotowego atmosfery i temperatury nie tylko procesach jednostopniowych, ale również w bardziej złożonych procesach wielostopniowych. Podsumowując, modele te umożliwiają kształtowanie kinetyki wzrostu warstwy azotowanej i jej poszczególnych stref (faz) w funkcji parametrów procesu, tj. czasu, temperatury i potencjału azotowego atmosfery. Warto również zaznaczyć, że dzięki wykorzystaniu modeli fenomenologicznych warstwy te są wytwarzane w możliwie najkrótszym czasie, a więc przy najmniejszym zużyciu energii [4]. Na podstawie modeli matematycznych opracowany został przez L. Małdzińskiego symulator kinetyki wzro-

stu warstwy azotowanej (Rys. 3), stanowiący narzędzie wspomagające projektowanie procesów azotowania przy wykorzystaniu metody ZeroFlow. Dzięki symulatorowi kinetyki wzrostu warstwy azotowanej użytkownik ma możliwość precyzyjnego symulowania przebiegu procesów azotowania w funkcji parametrów, tj. czasu, temperatury i potencjału azotowego atmosfery. Parametry te mogą być dowolnie dostosowywane w postaci profili: temperaturowego oraz potencjału azotowego, w rezultacie otrzymywane są szczegółowe wyniki dotyczące wzrostu grubości warstwy azotowanej wraz z występującymi w niej strefami/fazami (ϵ , γ' , $\epsilon+\gamma'$), jak również profile rozkładu twardości oraz wzrost grubości efektywnej. Wyniki te prezentowane są zarówno w postaci liczbowej, jak i w postaci graficznej, za pomocą wykresów. O ile wartości liczbowe odzwierciedlają jedynie efekt końcowy symulowanego procesu azotowania, o tyle wykresy umożliwiają śledzenie całego przebiegu procesu oraz odczytywanie na ich podstawie konkretnych wartości w danej ustalonej chwili [5].

Oprócz dostosowywania profilu temperaturowego i potencjału azotowego symulator oferuje użytkownikowi również inne możliwości, mające na celu jak najdokładniejsze odzwierciedlenie rzeczywistych warunków procesu azotowania. Przede wszystkim, w ramach każdego z profili może zostać dowolnie zmieniona – tzn. zwiększona lub zmniejszona – ilość stopni procesu. Dodatkowo dla każdego ze stopni oprócz docelowej wartości temperatury/potencjału azotowego oraz czasu trwania danego stopnia określana jest rampa, czyli prędkość z jaką jest osiągana zadana wartość docelowa. Rampa związana jest z rzeczywistymi warunkami nagrzewania i redukcji potencjału azotowego, wynikającymi m.in. z wielkości pieca (a dokładniej jego retorty) czy też gabarytów wsadu. Ponadto użytkownik ma również możliwość wyboru spośród 13 gatunków stali (w tym stali nisko- i średniowęglowych oraz nisko- i średniostopowych), z których może być wykonany wsad, oraz określenia jego twardości rdzenia. Nie należy także zapominać o jednej z najważniejszych zalet symulatora kinetyki wzrostu warstwy azotowanej, a mianowicie funkcji „Simulation Solver”. Pozwala ona na dostosowywanie parametrów procesu w celu uzyskania zamierzonych rezultatów procesu azotowania. Dzięki temu narzędziu możliwa jest zatem optymalizacja parametrów procesu, a w rezultacie –



Rys. 3. Okno symulatora kinetyki wzrostu warstwy azotowanej

wytwarzanie warstwy azotowanej w możliwie najkrótszym czasie oraz z minimalnym zużyciem gazów i energii [5].

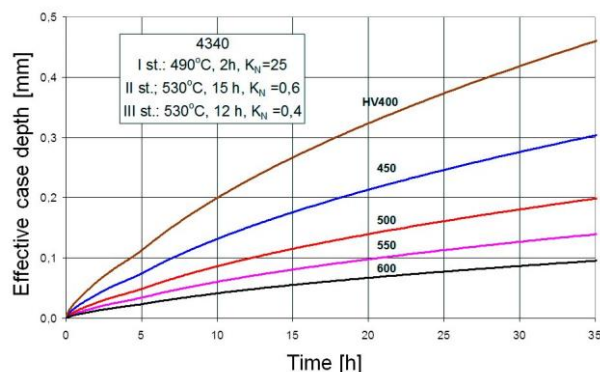
W dalszej części artykułu omówiony zostanie przykład projektowania procesu azotowania przy wykorzystaniu modeli (a dokładniej symulatora) kinetyki wzrostu warstwy azotowanej.

2. PROJEKTOWANIE PROCESU AZOTOWANIA NA PRZYKŁADZIE AZOTOWANIA WAŁÓW KORBOWYCH DLA SAMOCHODÓW SPORTOWYCH

Technologia azotowania metodą ZeroFlow została opracowana m.in. dla wałów korbowych przeznaczonych do silników samochodów sportowych. Azotowanie wałów korbowych stosowane jest w celu uzyskania dużej twardości czopów i dotyczy stali węglowych wyższej jakości oraz stali stopowych. Omawiane wały wykonane zostały ze stali chromowo-niklowo-molibdenowej 4340 (40HNMA wg PN), przeznaczonej do ulepszania cieplnego, zawierającej 0,37÷0,44% C, 0,5÷0,8% Mn, 0,17÷0,37% Si, 0,6÷0,9% Cr, 1,25÷1,65% Ni, 0,15÷0,25% Mo, max 0,03% P, max 0,025% S i max 0,3% Cu. Ze względu na przeznaczenie i warunki pracy narzucone zostały wysokie wymagania, dotyczące m.in. budowy fazy warstwy azotowanej, grubości występujących w niej stref oraz jej grubości efektywnej i twardości, czy też zmian kształtu i wymiarów. Do najważniejszych wymagań związanych z procesem azotowania należały:

- strefa azotków żelaza $\epsilon + \gamma'$ o grubości 5÷6 μm ;
- grubość efektywna warstwy azotowanej przy kryterium twardości nie mniejszej niż twardość rdzenia +50HV (HVC+50) $g_{r50} = 0,4\text{mm}$ (należy zaznaczyć, iż twardość rdzenia wynosiła 350HV);
- grubość efektywna warstwy azotowanej z zapewnieniem twardości nie mniejszej niż 600HV $g_{600} = 0,15\text{mm}$;
- twardość powierzchniowa ok. 63HRC.

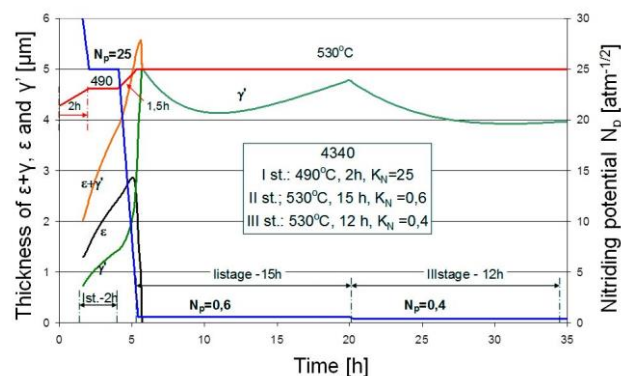
W celu ustalenia parametrów procesu, umożliwiających osiągnięcie podanych wyżej wartości, przeprowadzono szereg symulacji z użyciem modeli kinetyki wzrostu warstwy azotowanej. Na podstawie dotychczasowych doświadczeń do obliczeń założony został proces 2-stopniowy ze względu na temperaturę: 490°C w stopniu I oraz 530°C w stopniu II. Jak widać na podstawie symulacji wzrostu efektywnej grubości warstwy (Rys. 4), wymaganą grubość efektywną przy założeniu twardości nie mniejszej niż HV400 (HV400 odpowiada twardości rdzenia +50HV) warstwa osiąga po ok. 29h procesu azotowania (I stopień/490°C/2h, II stopień/530°C/27h).



Rys. 4. Wzrost grubości efektywnej warstwy na stali 4340

Kolejnym etapem było dobranie potencjału azotowego atmosfery N_p tak, aby w czasie 29h trwania procesu uzyskać wymaganą grubość strefy azotków żelaza ($\epsilon + \gamma'$) 5÷6 μm (Rys. 5). Najpierw, w I stopniu procesu założono potencjał na poziomie $N_p^I = 25$, czego

efektem był intensywny wzrost strefy $\epsilon + \gamma'$. Następnie w II stopniu potencjał został obniżony do $N_p^{II} = 0,6$ celem zahamowania dalszego, niepożądanego wzrostu strefy azotków żelaza; jednocześnie znacznej redukcji uległa strefa ϵ . Początkowo strefa γ' również uległa w pewnym stopniu redukcji, jednak po upływie kilku godzin zaczęła ona stopniowo wzrastać (zjawisko to jest związane z gradientem stężeń powierzchniowych azotu c_N na granicach poszczególnych faz oraz wynikającymi z tego strumieniami atomów azotu J_N [2]). Aby temu zapobiec, zastosowano kolejne obniżenie potencjału do $N_p^{III} = 0,4$, co przyczyniło się do ponownej redukcji strefy γ' , a następnie – zahamowania jej dalszego wzrostu.

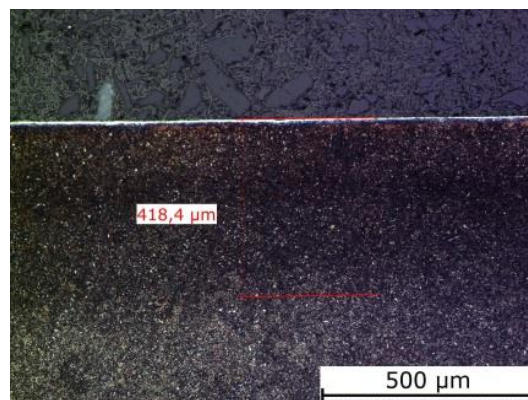


Rys. 5. Wzrost strefy azotków żelaza na stali 4340

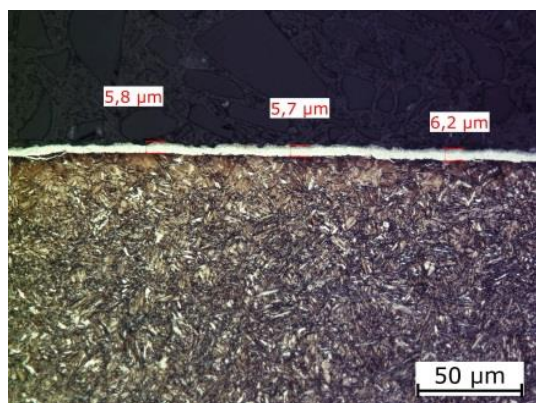
Tab. 1. Parametry procesu azotowania wałów korbowych do samochodów sportowych metodą ZeroFlow

Stopień	Temperatura $T [^{\circ}\text{C}]$	Czas $t [\text{h}]$	Potencjał $N_p [\text{atm}^{-1/2}]$	Czas $t [\text{h}]$
1	490	2	25	2
2	530	27	0,6	15
3			0,4	12

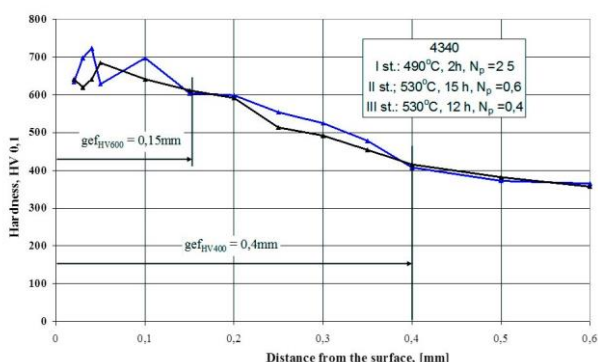
Na podstawie symulacji został zatem opracowany proces azotowania o parametrach przedstawionych w Tab.1, któremu następnie zostały poddane wały korbowe wraz z próbkami do badań metalograficznych. Przeprowadzone po procesie badania metalograficzne wykazały, że grubość strefy azotków żelaza wynosiła 5,7÷6,2 μm (Rys. 6), a efektywna grubość warstwy azotowanej HV400 ok. 0,4mm (Rys. 7), co potwierdził również wyznaczony rozkład twardości (Rys. 8). Ponadto na rozkładzie twardości widać, że grubość efektywna HV600 wynosi ok. 0,16mm, co oznacza, że wszystkie wymagania zostały spełnione. Dzięki zamocowaniu wału w pozycji pionowej za pomocą specjalnego uchwytu oraz wydłużeniu czasu nagrzewania i chłodzenia wsadu zminimalizowano również powstałe w trakcie obróbki cieplnej deformacje.



Rys. 6. Zdjęcie zglądu metalograficznego warstwy azotowanej uzyskanej na stali 4340 w procesie azotowania metodą ZeroFlow

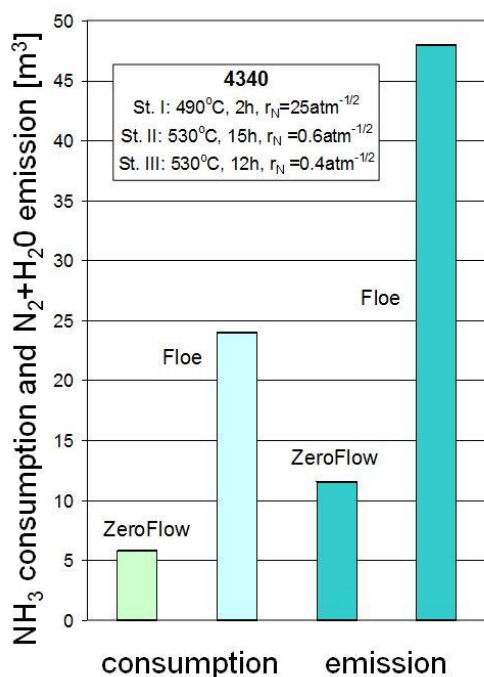


Rys. 7. Zdjęcie zglądu metalograficznego strefy azotków żelaza uzyskanej na stali 4340 w procesie azotowania metodą ZeroFlow



Rys. 8. Rozkład twardości w warstwie azotowanej na stali 4340 uzyskanej w procesie azotowania metodą ZeroFlow

Warto również zauważyć, że w trakcie procesu azotowania wałów korbowych do silników samochodów sportowych metodą ZeroFlow całkowite zużycie amoniaku oraz emisja gazów poprocesowych było kilkukrotnie niższe, niż w przypadku azotowania tych samych wałów metodą tradycyjną (Rys. 8).



Rys. 8. Porównanie całkowitego zużycia amoniaku i emisji gazów poprocesowych w procesie azotowania wałów korbowych metodą ZeroFlow oraz tradycyjną

PODSUMOWANIE

Przykład azotowania wałów korbowych do silników samochodów sportowych pokazuje, że dzięki wykorzystaniu modeli symulacyjnych, bazujących na kinetyce wzrostu warstwy azotowanej, możliwe jest precyzyjne kształtowanie warstw pod względem wymaganej budowy fazowej, grubości poszczególnych stref/faz w niej występujących oraz rozkładu twardości. Ponadto, zastosowanie modelu pozwala na optymalizację parametrów procesu, dzięki czemu warstwy są uzyskiwane w możliwie najkrótszym czasie i przy najmniejszym zużyciu gazu oraz energii. Modele (symulator) kinetyki wzrostu warstwy azotowanej wspomagają zatem projektowanie procesów azotowania i opracowanie technologii dla nowych elementów, a dodatkowo pełnią funkcję kontrolną i regulacyjną.

Zbrane dane z procesów eksperymentalnych i przemysłowych nie tylko potwierdziły skuteczność i precyzję metody ZeroFlow, ale również potwierdziły skuteczność zastosowania symulatora jako narzędzia wspomagającego. Oznacza to, że metoda ZeroFlow może być z powodzeniem stosowana w procesach azotowania wybranych części silników spalinowych, umożliwiając wytworzenie warstw spełniających stawiane im wymogi, co z kolei przekłada się na trwałość eksploatacyjną danych elementów.

BIBLIOGRAFIA

1. Campbell F.C., *Elements of metallurgy and engineering alloys*, ASM International, Ohio, 2008.
2. Kowalska J., *Regulacja i kontrola kinetyki wzrostu warstwy azotowanej na stalach w procesie regulowanego azotowania gazowego ZeroFlow*, Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce. Nauki Techniczne i Inżynieryjne, Monografie 2015(12), Wyd. Młodzi Naukowcy, str. 120-126, Poznań, 2015.
3. Małdziński L., *Termodynamiczne, kinetyczne i technologiczne aspekty wytwarzania warstwy azotowanej na żelazie i stalach w procesach azotowania gazowego*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2002.
4. Małdziński L., *Niskoemisyjne, ekonomiczne regulowane azotowanie gazowe ZeroFlow*, Technologie zero-emisji, Wyd. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Poznań, pp. 189-229, Poznań, 2011.
5. Małdziński L., *Opracowanie symulatora kinetyki wzrostu warstwy azotowanej na stalach*, report No. 6ZR8 2008 C/07141, unpublished, 2009.
6. Małdziński L., Bazel M., Korecki M., Miliszewski A., Przygoński T., *Controlled nitriding using a ZeroFlow method. Industrial experiences*, Heat Treating Progress, July/August, p. 19-22, 2009.
7. Pye D., *Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing*, ASM International, Ohio, 2003.

Low-emission, ecological nitriding of motor vehicles components using ZeroFlow method

Paper presents new method of controlled gas nitriding called ZeroFlow, which is used for nitriding of selected motor vehicles components. Through the use of simulation models it was possible to develop the specially dedicated process with specific parameters; it allows forming of nitrided layer with strictly expected properties: required phase structure with thicknesses of each zone occurs in it and required hardness distribution. Moreover, through the use of simulation models this layers are obtained in the shortest possible time, which is connected with the lowest energy consumption; therefore, nitriding process using ZeroFlow method is both

economical and environmentally friendly. This article will discuss the essence of controlled gas nitriding process, with an emphasis on the influence of process parameters on results of nitriding process. This information are the basis to understand the issue of the kinetics of nitrided layer growth, and as it follows – for its practical application in designing, regulation and control of nitriding processes using simulation models (simulator of the kinetics of nitrided layer growth). Designing of ZeroFlow nitriding processes on the basis of the kinetics of nitrided layer will be shown on the example of nitriding of crankshafts for sports car engines.

Autorzy:

mgr inż. **Jagoda Kowalska** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych