

**Paweł HERMANOWICZ, Jerzy SMOLIK**  
Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

## **NAWĘGLANIE PRÓŻNIOWE STALI NISKOSTOPOWEJ DC04 W ATMOSFERZE WĘGLOWODORÓW ALIFATYCZNYCH**

### **Słowa kluczowe**

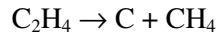
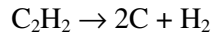
Nawęglanie próżniowe, projektowanie warstw nawęglonych.

### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki projektowania parametrów technologicznych procesu nawęglania próżniowego stali niskowęglowej DC4 w celu uzyskania założonych parametrów warstwy nawęglanej, tj. powierzchniowego stężenia węgla  $I_{c_{Surf}}$ , efektywnego stężenia węgla  $I_{c_{Effect}}$  oraz efektywnej grubości warstwy nawęglanej  $D_{c_{Effect}}$ . Proces projektowania parametrów technologicznych nawęglania próżniowego przeprowadzono z wykorzystaniem pakietu symulacyjnego *SimVac Plus v.2.7.3(EN)*. Dla otrzymanych warstw nawęglanych przeprowadzono badania zmian zawartości węgla (*GDOES*) oraz rozkłady zmian twardości (*Vickers*) w funkcji odległości od powierzchni. Dokonano porównania rzeczywistych zmian zawartości węgla w wytworzonych warstwach nawęglanych ze zmianami wyznaczonymi w procesie symulacji. Dla wytworzonych warstw nawęglanych przeprowadzono również analizę zmian twardości w funkcji odległości od powierzchni, na podstawie której określono przedziały twardości uzyskiwane w stali DC4 dla danej wartości stężenia węgla i parametrów obróbki cieplnej.

## 1. Wprowadzenie

Nawęglanie próżniowe najczęściej odbywa się z wykorzystaniem atmosfery będącej mieszaniną acetyleny ( $C_2H_2$ ), etylenu ( $C_2H_4$ ) i wodoru ( $H_2$ ). Źródłem węgla dla dyfuzyjnego nasycenia austenitu jest w tym przypadku dysocjacja termiczna nienasyconych węglowodorów alifatycznych takich, jak acetylen i etylen [1–3], która przebiega wg reakcji:



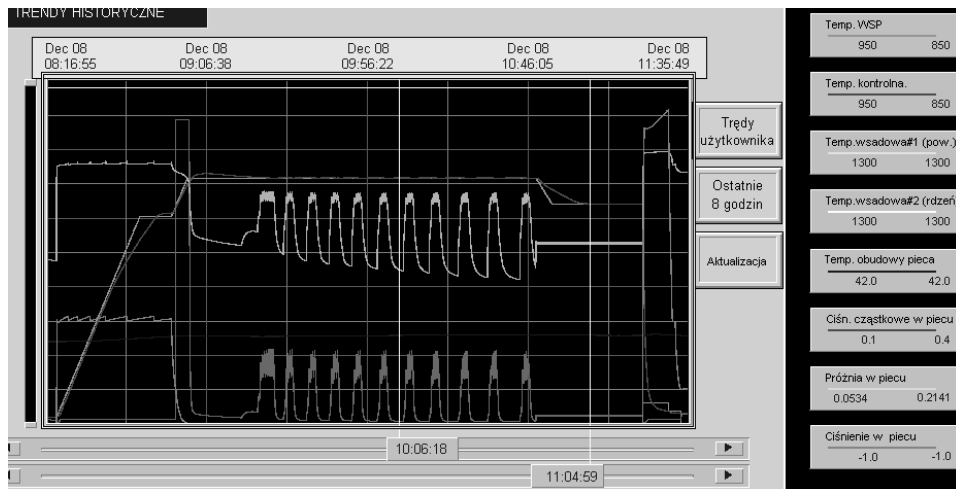
Ponieważ atmosfera węglonośna stosowana do realizacji nawęglania próżniowego posiada duży współczynnik przenoszenia węgla z atmosfery do powierzchni wsadu, proces wzbogacania warstwy powierzchniowej w węgiel przebiega szybko i umożliwia uzyskanie warstw nawęglonych w zdecydowanie krótszym czasie niż przy zastosowaniu nawęglania gazowego. W procesie nawęglania próżniowego uzyskiwane jest wysokie powierzchniowe stężenie węgla w austenicie. Z tego powodu każdy cykl nawęglania składa się z fazy nasycania oraz z fazy dyfuzji. Faza nasycania obejmuje uwolnienie atomów węgla, adsorpcję ich na powierzchni stali i sorpcję węgla przez austenit, natomiast w fazie dyfuzji węgiel transportowany jest ze strefy przypowierzchniowej w głąb materiału.

Wyróżnia się dwie metody organizacji faz nasycania i dyfuzji w procesie nawęglania próżniowego.

Pierwsza z nich to metoda impulsowa, która polega na okresowym dozowaniu mediów reakcyjnych do komory grzejnej pieca – jest to **faza nasycania**, a następnie na odpompowaniu produktów reakcji do osiągnięcia próżni technicznej i utrzymaniu jej przez kilka minut – jest to **faza dyfuzji**. Metoda ta może składać się z kilku cykli faz nasycania i dyfuzji wielokrotnie powtarzanych podczas realizacji procesu (rys. 1).

Druga metoda nazywana jest metodą iniekcji. Polega ona na ciągłym dostarczaniu gazów nawęglających do komory roboczej pieca. Cykl nawęglania zwykle składa się z jednej fazy nasycania i następującej bezpośrednio po niej fazy dyfuzji [4]. Faza nasycania w tej metodzie przebiega przy stałym ciśnieniu atmosfery reakcyjnej. W przypadku konieczności wytworzenia warstwy nawęglonej o podwyższonej grubości niezbędne jest zastosowanie kilku sekwencji tych faz.

Zaletą metody impulsowej jest lepsza penetracja przestrzeni procesowej przez atmosferę nawęglającą, co powoduje uzyskiwanie równomiernych i powtarzalnych warstw nawęglanych w miejscach trudno dostępnych dla atmosfery reaktywnej (głębokie otwory, przewężenia itp.). Zaletą metody iniekcji jest mniejsza intensywność wydzielania sadzy, co z kolei istotnie przedłuża czystość pieca i tym samym jego trwałość.



Rys. 1. Przebieg procesu nawęglania próżniowego zrealizowanego metodą impulsową wg technologii Fine Carb w temperaturze 950°C

Nawęglanie próżniowe posiada szereg znaczących zalet w stosunku do innych metod nawęglania. Warstwy nawęglone charakteryzują się dobrymi właściwościami mechanicznymi, gdyż poprzez zastosowanie węglowodorów jako nośników węgla wyeliminowano utlenienie wewnętrzne. Dzięki możliwości przeprowadzenia procesu w wyższej temperaturze niż 950°C skraca się czas nawęglania. Zaletami nawęglania próżniowego obok względów ekonomicznych (małe zużycie mediów przy osiągnięciu stężenia węgla i grubości warstwy nawęglonej) jest również niska emisja substancji toksycznych do atmosfery, możliwość dostosowania szybkości chłodzenia do kształtu i gabarytów wsadu – mniejsze odkształcenia niż przy hartowaniu w oleju [5].

Ze względu na różnorodność kształtów elementów przeznaczonych do nawęglania, typów stali oraz wymagań stawianych warstwom nawęglanym, dobranie odpowiednich parametrów procesu nawęglania wymaga przeprowadzenia kosztownych i długotrwałych próbnych procesów technologicznych. Problem ten rozwiązuje program symulacji komputerowej SimVaC<sup>TM</sup>Plus v.2.7.3 (EN) opracowany przez zespół badawczy Politechniki Łódzkiej pod kierunkiem Prof. Piotra Kuli, dla realizacji technologii FineCarb. Umożliwia on programowanie i optymalizowanie parametrów procesu nawęglania dla uzyskania struktury warstwy nawęglanej o założonych parametrach. Dzięki bogatej bazie danych materiałowych program SimVaC<sup>TM</sup>Plus v.2.7.3 (EN) umożliwia przeprowadzanie symulacji dla różnych stali stopowych z uwzględnieniem kształtu nawęglanych elementów. Przyjęty w programie model fizyczny opracowany został na bazie danych doświadczalnych. Uwzględni on zależność współczynnika dyfuzji węgla od temperatury i składu chemicznego stali (słuszną dla stężeń węgla

w zakresie  $0 \div 2,0\%$ ). Program SimVaC<sup>TM</sup>Plus wyposażono w kreatory pozwalające użytkownikowi projektować proces nawęglania próżniowego krok po kroku (rodzaj materiału, konfiguracja wsadu i dobór wymagań, co do właściwości warstwy po procesie) [6].

## 2. Projektowanie i realizacja procesów nawęglania przy obniżonym ciśnieniu oraz obróbki cieplnej dla stali DC04

W celu oceny możliwości projektowania właściwości warstw nawęglanych z wykorzystaniem pakietu symulacyjnego SimVaC<sup>TM</sup>Plus wybrano głębokotłoczną stal niskowęglową DC04 o zawartości węgla  $< 0,1\%$  o bardzo dobrych właściwościach plastycznych. W bardzo wielu przypadkach, ze względu na przeznaczenie elementów produkowanych ze stali DC04, konieczne jest, aby posiadały one wysoką twardość w strefie przypowierzchniowej. Mała zawartość węgla uniemożliwia objętościowe utwardzanie stali DC04 na drodze ulepszenia cieplnego. Dopiero zwiększenie zawartości węgla w warstwie wierzchniej stali, w procesie nawęglania, umożliwi w efekcie powierzchniowe jej utwardzanie na drodze obróbki cieplnej. Skład chemiczny stali DC04 przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny stali niskowęglowej DC04

C%	Mn%	Mo%	Ni%	Cr%	Nb%	S%	P%
0,09	0,18	0,02	0,05	0,05	0,006	0,018	0,04

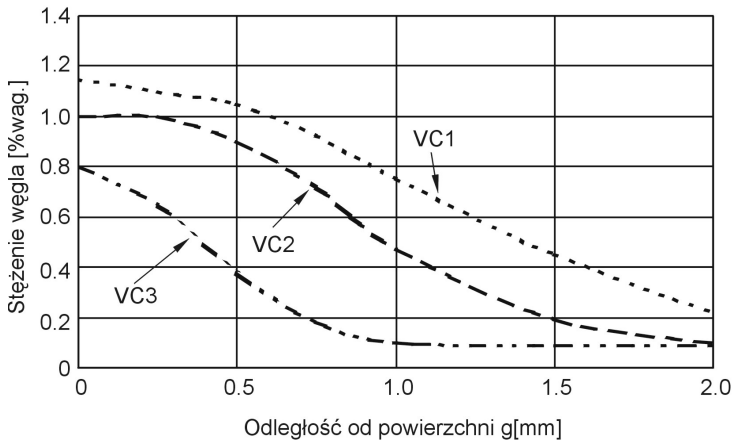
Jako parametry charakteryzujące warstwę nawęgloną w celu zaprojektowania procesów nawęglania próżniowego przyjęto: powierzchniowe stężenie węgla  $I_{C_{Surf}}$ , efektywne stężenie węgla  $I_{C_{Efekt}}$  oraz efektywną grubość warstwy nawęglanej  $D_{C_{Efekt}}$  przedstawione w tabeli 2. Procesy zrealizowano dla próbek o wymiarach 20 mm x 20 mm wykonanych z blachy o grubości 4 mm. Wyniki symulacji stężenia węgla w funkcji odległości od powierzchni uzyskane dla parametrów przedstawionych w tabeli 2 przedstawiono na rys. 2. W tabeli 3 przedstawiono parametry realizowanych procesów nawęglania. Procesy nawęglania próżniowego zrealizowano w piecu próżniowym 10.0 VPT-4035/36IQ/K firmy Seco/Warwick (rys. 3).

Tabela 2. Parametry warstw nawęglanych przyjęte w procesie projektowania procesów nawęglania próżniowego z wykorzystaniem pakietu symulacyjnego SimVaC<sup>TM</sup>Plus dla stali niskowęglowej DC04

Numer procesu nawęglania	Powierzchniowe stężenie węgla $I_{C_{Surf}}$ [%]	Efektywne stężenie węgla $I_{C_{Efekt}}$ [%]	Efektywna grubość warstwy nawęglanej $D_{C_{Efekt}}$ [mm]
VC-1	1,15	0,8	0,9
VC-2	1,0	0,8	0,6
VC-3	0,8	0,4	0,5

Tabela 3. Parametry procesów nawęglania próżniowego wyznaczone z wykorzystaniem pakietu symulacyjnego SimVaC™Plus dla stali niskowęglowej DC04

Numer procesu nawęglania	Temperatura procesu [°C]	Czas nawęglania [min]	Czas dyfuzji [min]	Temperatura podchłodzenia [°C]
VC-1	950	232	465	900
VC-2	950	112	235	900
VC-3	950	13	92	900



Rys. 2. Wyniki symulacji stężenia węgla w funkcji odległości od powierzchni wyznaczone z wykorzystaniem pakietu symulacyjnego SimVaC™Plus



Rys. 3. Piec próżniowy 10.0 VPT-4035/36IQ/K firmy Seco/Warwick przystosowany do realizacji procesów nawęglania próżniowego

Austenityzowanie i odpuszczanie przeprowadzono w piecu komorowym KO 1150/60-30-30 zgodnie z parametrami przedstawionymi w tabeli 4.

Tabela 4. Parametry obróbki cieplnej warstw nawęglanych wytworzonych w procesach nawęglania próżniowego stali niskowęglowej DC04.

Temperatura austenitzowania T [°C]	Czas austenitzowania t [min]	Ośrodek chłodzący	Temperatura odpuszczania T [°C]	Czas odpuszczania t [min]
840	10	woda	200	30

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. *Badania stężenia procentowego węgla w funkcji grubości warstwy nawęglanej*

W celu określenia zmian zawartości węgla w badanych warstwach nawęglanych wykorzystano metodę *Glow Discharge Optical Emission Spectrometry (GDOES)* [7÷9], polegającą na spektralnej analizie widma emitowanego przez atomy wzbudzone w procesie wyładowania jarzeniowego. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem spektrometru firmy Jobin Yvon typ: JY 10000 RF zgodnie z parametrami przedstawionymi w tabeli 5.

Tabela 5. Parametry badań GDOES dla wyznaczenia zawartości węgla w warstwach nawęglanych wytworzonych w stali DC04 metodą nawęglania próżniowego

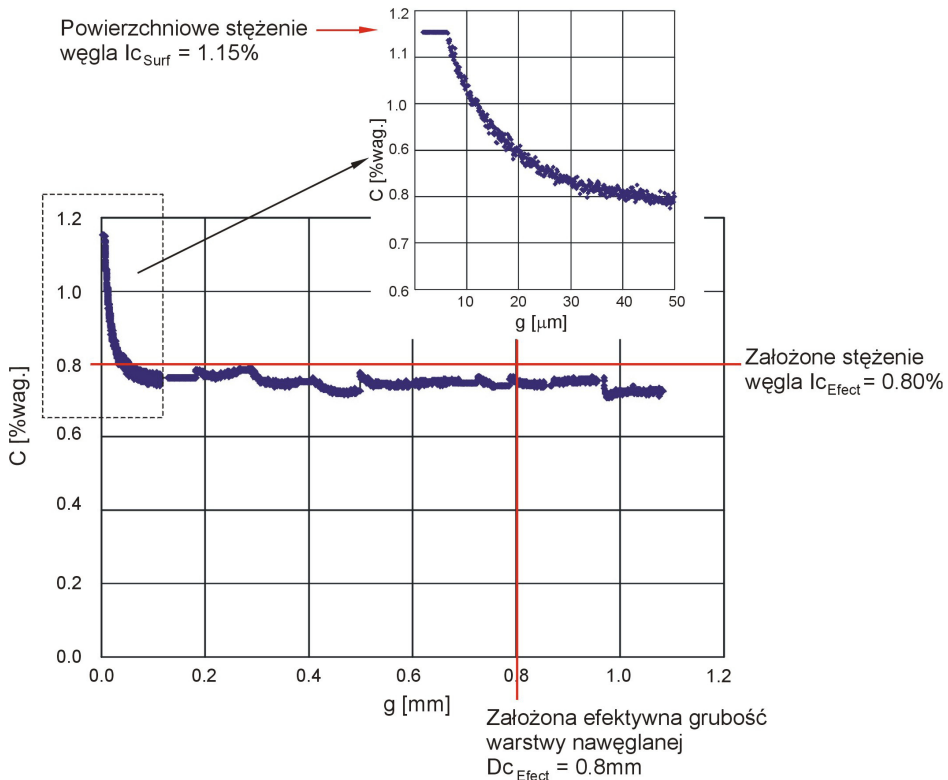
Atmosfera	Ciśnienie [Pa]	Rodzaj wyładowania	Moc wyładowania [W]	Czas [s]
Ar	700	RF	50	120

Maksymalny czas pojedynczego badania umożliwił wykonanie analizy zawartości węgla w stali DC04 do głębokości około 120÷150 µm. Dla warstw nawęglanych, wytworzonych zgodnie z założeniami podanymi w tabeli 2, konieczne było dokonanie analizy zawartości węgla do głębokości 1 mm. W tym celu po wykonaniu każdej analizy GDOES usuwano w procesie precyzyjnego szlifowania zbadaną warstwę materiału. Następnie próbkę poddawano kolejnej analizie na głębokość około 120 µm. Zgodnie z przyjętą metodyką zbadanie zawartości węgla do głębokości 1 mm wymagało przeprowadzenia około 7÷8 pojedynczych analiz. Wyniki uzyskane w kolejnych badaniach danej warstwy nawęglanej łączono w jeden plik numeryczny  $C[\%wag]=f(mm)$ . Wyniki badań zawartości węgla w wytworzonych warstwach nawęglanych przedstawiono na rys. 4÷6.

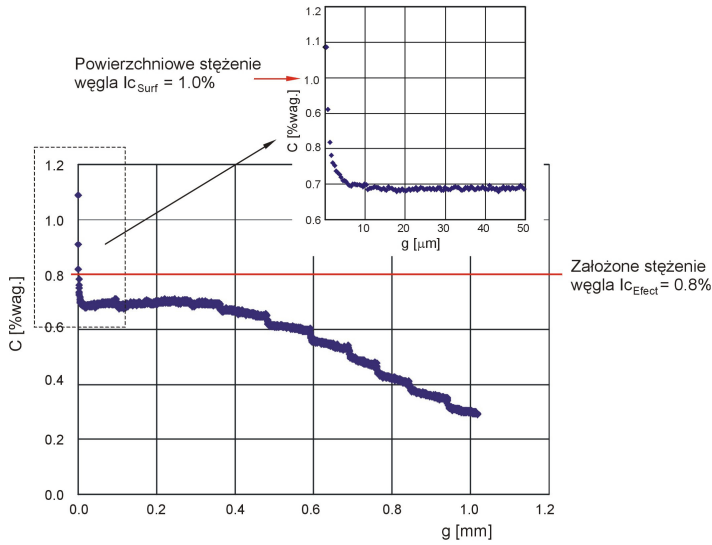
Niedokładność procesów szlifowania wynosząca około 10  $\mu\text{m}$  oraz występujące w każdej analizie efekty powierzchniowe, powodujące zawyżanie wartości mierzonej, powodują powstawanie na wykresie charakterystycznych schodków.

Zgodnie z założeniami przyjętymi w procesie nawęglania próżniowego VC-1, stężenie powierzchniowe węgla powinno wynosić  $I_{c_{\text{Surf}}} = 1,15\% \text{ C}$ , a efektywne stężenie węgla na głębokości  $D_{c_{\text{Efekt}}} = 0,9 \text{ mm}$  powinno wynosić  $I_{c_{\text{Efekt}}} = 0,8\% \text{ C}$ . Jak widać na rys. 4 uzyskane stężenie powierzchniowe węgla dokładnie odpowiada założonej wartości i utrzymuje się do głębokości około 7  $\mu\text{m}$ . Stężenie efektywne węgla na wymaganej głębokości wynosi  $I_{c_{\text{Efekt}}} = 0,75\% \text{ C}$  i jest bardzo bliskie wymaganej wartości 0,8% C.

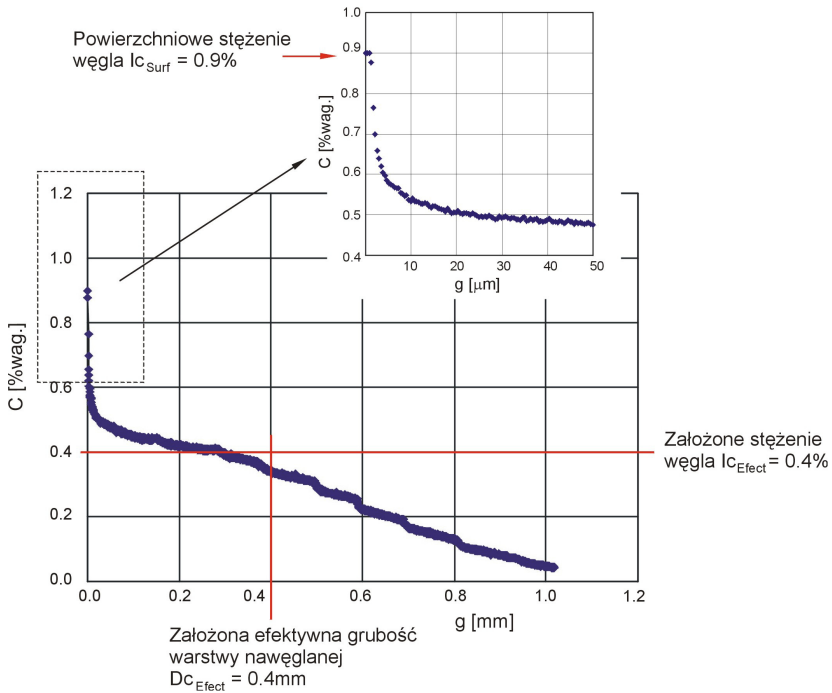
Bardzo stabilna i odpowiadająca założonej wartości powierzchniowego stężenia węgla świadczy zdaniem autorów o bardzo dobrze dobranych parametrach stężeniowych procesu nawęglania. Jednocześnie wysokie stężenie węgla utrzymujące się również na głębokości  $>D_{c_{\text{Efekt}}}$  świadczy o zbyt długim czasie jego realizacji.



Rys. 4. Wyniki badań zawartości węgla w warstwie nawęglanej otrzymanej metodą nawęglania próżniowego zgodnie z parametrami dla procesu VC-1



Rys. 5. Wyniki badań zawartości węgla w warstwie nawęglanej otrzymanej metodą nawęglania próżniowego zgodnie z parametrami dla procesu VC-2



Rys. 6. Wyniki badań zawartości węgla w warstwie nawęglanej otrzymanej metodą nawęglania próżniowego zgodnie z parametrami dla procesu VC-3



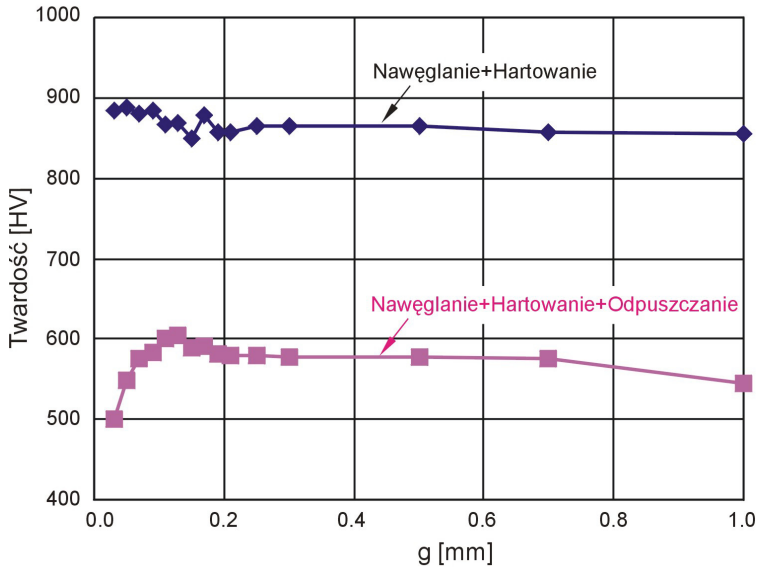
W procesie nawęglania próżniowego VC-2, stężenie powierzchniowe węgla powinno wynosić  $I_{c_{\text{Surf}}} = 1,0\% \text{ C}$  oraz efektywne stężenie węgla na głębokości  $D_{c_{\text{Efekt}}} = 0,6 \text{ mm}$  powinno wynosić również  $0,8\% \text{ C}$ . Jak widać na rys. 5 uzyskane stężenie powierzchniowe węgla odpowiada założonej wartości natomiast stężenie efektywne węgla na wymaganej głębokości  $D_{c_{\text{Efekt}}} = 0,6 \text{ mm}$  wynosi jedynie  $0,6\% \text{ C}$ . Jednocześnie w całej grubości warstwy nawęglanej stężenie węgla jest niższe niż przyjęte w założeniach, tj.  $I_{c_{\text{Efekt}}} = 0,8\% \text{ C}$ . Należy zauważyć, że do głębokości  $0,4 \text{ mm}$  stężenie węgla utrzymuje się na stabilnym poziomie  $\approx 0,7\% \text{ C}$ . Według autorów świadczy to o zbyt małej intensywności procesu nawęglania, co w efekcie sprawia, że dla przyjętego stężenia powierzchniowego węgla  $I_{c_{\text{Surf}}} = 1,0\%$  nie jest możliwe uzyskanie wyższego stężenia efektywnego w warstwie nawęglanej niż  $\approx 0,7\% \text{ C}$ .

W przypadku warstwy nawęglanej otrzymanej w procesie nawęglania próżniowego VC-3 badania stężenia węgla wykazały, iż stężenie powierzchniowe węgla jest wyższe od założonego i wynosi  $I_{c_{\text{Surf}}} = 0,9\%$ , natomiast wymagane stężenie efektywne węgla  $I_{c_{\text{Efekt}}} = 0,4\%$  utrzymuje się do głębokości  $D_{c_{\text{Efekt}}} \approx 0,4 \text{ mm}$ . Ze względu na to, że do głębokości  $0,2 \text{ mm}$  stężenie efektywne węgla utrzymuje się powyżej stężenia  $0,4\%$ , a także, iż uzyskane stężenie powierzchniowe węgla ( $0,9\%$ ) jest wyższe od założonego ( $0,8\%$ ), intensywność nawęglania wydaje się być zbyt duża dla przyjętych założeń, natomiast czas realizacji etapów dyfuzji zbyt krótki.

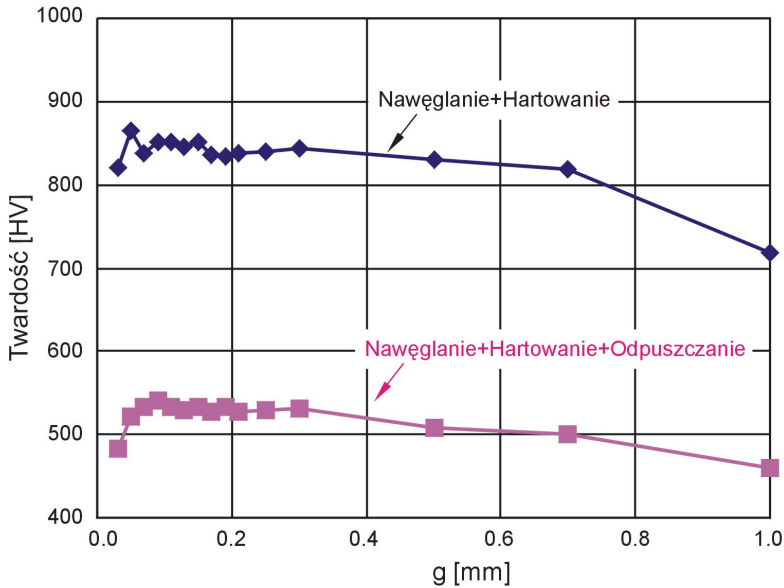
### 3.2. Badania rozkładu twardości

W celu zbadania rozkładów twardości dla warstw nawęglanych wytworzonych w stali DC04 zgodnie z parametrami procesów nawęglania próżniowego, przedstawionymi w tabeli 3, przeprowadzono pomiary twardości metodą Vickersa z wykorzystaniem twardościomierza typ: *EMCO-TEST M4R 075*. Pomiary zrealizowano zarówno po etapie hartowania, jak również po etapie odpuszczania. Wyniki pomiarów twardości dla warstw nawęglanych otrzymanych w procesach VC-1, VC-2 i VC-3 przedstawiono na rys. 7÷9. Dla wszystkich trzech otrzymanych warstw nawęglanych profil rozkładu twardości wyznaczony po hartowaniu jest ściśle związany z zawartością i rozkładem węgla w warstwie nawęglanej.

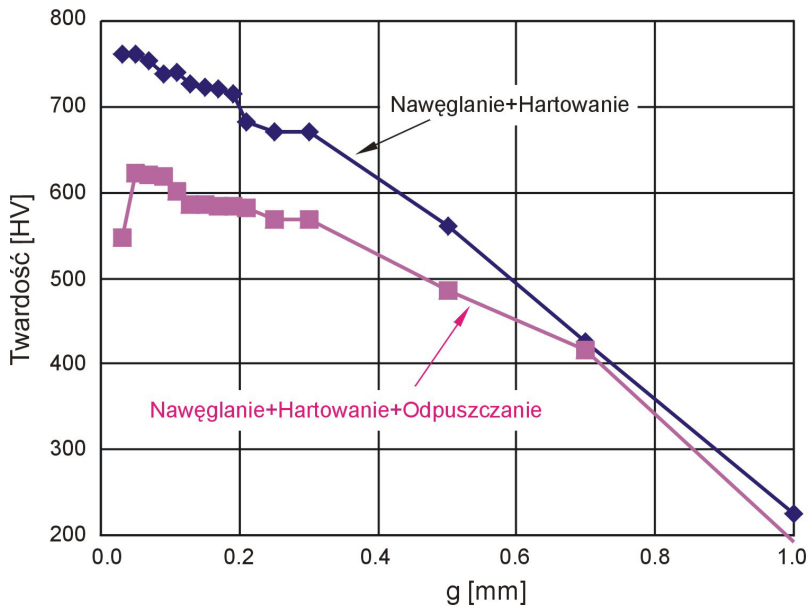
Analiza profili twardości wyznaczonych dla próbek, które po hartowaniu poddane zostały procesowi odpuszczania, wykazała wyraźną ich zmianę w stosunku do profili po procesie hartowania. W wyniku procesu odpuszczania w temperaturze  $t = 200^{\circ}\text{C}$  i  $\tau = 30 \text{ min}$  dla warstw nawęglanych otrzymanych w procesach VC-1 (rys. 7) i VC-2 (rys. 8) nastąpiło zmniejszenie ich twardości o około  $300 \text{ HV}$ . W przypadku warstwy nawęglanej otrzymanej w procesie VC-3 (rys. 9) zmniejszenie twardości wyniosło jedynie około  $150 \text{ HV}$ .



Rys. 7. Wyniki badań twardości w warstwie nawęglanej otrzymanej metodą nawęglania próżniowego zgodnie z parametrami dla procesu VC-1



Rys. 8. Wyniki badań twardości w warstwie nawęglanej otrzymanej metodą nawęglania próżniowego zgodnie z parametrami dla procesu VC-2



Rys. 9. Wyniki badań twardości w warstwie nawęglanej otrzymanej metodą nawęglania próżniowego zgodnie z parametrami dla procesu VC-3

#### 4. Podsumowanie i wnioski

W zakresie projektowania procesów nawęglania próżniowego wykorzystano metodę manualną oprogramowania symulacyjnego *SlimVac Plus v.2.7.3 (EN)*. Jako parametry wejściowe przyjęto: powierzchniowe stężenie węgla –  $I_{c_{Surf}}$ , efektywne stężenie węgla –  $I_{c_{Efekt}}$  oraz efektywną grubość warstwy nawęglanej –  $D_{c_{Efekt}}$ . W efekcie procesu symulacji określono całkowity czas etapów nawęglania i dyfuzji, dokonano podziału na poszczególne etapy nawęglania i dyfuzji realizowane naprzemiennie oraz wyznaczono temperaturę procesu. Wyznaczono również profil zmian zawartości węgla w materiale podłoża w funkcji głębokości warstwy nawęglanej.

Przeprowadzona analiza ilościowa zmian stężenia węgla w funkcji głębokości warstw nawęglanych wykazała, że dla trzech analizowanych parametrów, tj. powierzchniowego stężenia węgla ( $I_{c_{Surf}}$ ), efektywnego stężenia węgla ( $I_{c_{Efekt}}$ ) oraz efektywnej grubości warstwy nawęglanej ( $D_{c_{Efekt}}$ ) parametr  $I_{c_{Surf}}$  jest najlepiej odwzorowywanym parametrem w stosunku do wartości przyjętych w procesach symulacyjnych z wykorzystaniem programu *SlimVac Plus v.2.7.3 (EN)*.

W procesie technologicznym VC-1 wszystkie z założonych w procesie symulacyjnym parametrów warstwy nawęglanej:  $I_{c_{Surf}} = 1,15\% C$ ,  $I_{c_{Efekt}} = 0,8\% C$ ,  $D_{c_{Efekt}} = 0,9 mm$  zostały uzyskane w procesie technologicznym. Stężenie węgla  $>0,75\% C$  utrzymuje się do głębokości  $\approx 0,95 mm$ . Niewielkie różnice w sto-

sunku do wartości  $I_{C_{\text{Efekt}}}$  i  $D_{C_{\text{Efekt}}}$  założonych w procesie symulacji mogą wynikać z bardzo trudnej i realizowanej wieloetapowo analizy stężenia węgla metodą GDOES.

W procesie technologicznym VC-2 nie udało się uzyskać żadnego z parametrów warstwy nawęglanej przyjętych w procesie symulacji, tj.:  $I_{C_{\text{Surf}}} = 1,0\% \text{ C}$ ,  $I_{C_{\text{Efekt}}} = 0,8\% \text{ C}$ ,  $D_{C_{\text{Efekt}}} = 0,6 \text{ mm}$ . Pomimo uzyskania wyższej wartości stężenia powierzchniowego ( $1,1\% \text{ C}$ ), praktycznie na całej głębokości warstwy nawęglanej ( $>7 \mu\text{m}$ ) stężenie węgla było mniejsze niż  $0,7\%$ . Zdaniem realizatorów zadania wskazuje to na zbyt krótki czas całego procesu nawęglania oraz za mały udział etapów dyfuzji w stosunku do czasu trwania etapów nawęglania.

W procesie technologicznym VC-3 również nie uzyskano żadnego z parametrów przyjętych w procesie symulacji, tj.:  $I_{C_{\text{Surf}}} = 0,8\% \text{ C}$ ,  $I_{C_{\text{Efekt}}} = 0,4\% \text{ C}$ ,  $D_{C_{\text{Efekt}}} = 0,5 \text{ mm}$ . Należy jednak zauważyć, że w tym przypadku zarówno stężenie powierzchniowe węgla jest większe od przyjętego w procesie symulacji i wynosi  $0,9\% \text{ C}$ , jak również stężenie węgla do głębokości  $0,3 \text{ mm}$  jest większe od przyjętego w procesie symulacji  $I_{C_{\text{Efekt}}}$ . Zdaniem realizatorów zadania w przypadku procesu nawęglania VC-3, przy zachowaniu czasu trwania całego procesu, należy wydłużyć czas etapów dyfuzji w stosunku do czasu trwania etapów nawęglania.

Analiza zmian twardości w funkcji głębokości warstwy nawęglanej, przeprowadzona zarówno dla warstw nawęglanych po procesie hartowania, jak również po procesach hartowania i odpuszczania, wykazała korelację zmian twardości w stosunku do wyznaczonych profili zmian stężenia węgla. Pozwoliło to przeprowadzić analizę porównawczą wyników zmian twardości oraz wyników zmian stężenia węgla w funkcji głębokości warstw nawęglanych i tym samym wskazać przedziały twardości uzyskiwane w stali DC4 dla danej wartości stężenia węgla i parametrów obróbki cieplnej przedstawionych w tabeli 3. W przypadku, kiedy zawartość węgla zmienia się w zakresie  $0,5 \div 0,8\% \text{ C}$  twardość bezpośrednio po hartowaniu zmienia się w zakresie  $800 \div 900 \text{ HV}$ . Dla zawartości węgla w przedziale  $0,2 \div 0,5\% \text{ C}$  oraz poniżej  $0,2\% \text{ C}$  twardość bezpośrednio po hartowaniu wynosi odpowiednio  $700 \div 800 \text{ HV}$  oraz  $<700 \text{ HV}$ .

*Praca wykonana w ramach projektu badawczego rozwojowego R 1503303 pt. „Opracowanie hybrydowej technologii wytwarzania kompozytów warstwowych w celu zwiększania odporności na zużycie przez tarcie oraz odporności erozyjnej elementów ze stali niskowęglowej”, finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.*

## Bibliografia

1. Grafen W., Edenhofer B.: Acetylene ow – pressure carburising – a novel and superior carburising technology. Heat Treatment of Metals 1999, 4, 79.

2. Edenhofer B., et all.: Process for carburising metallic workpieces in vacuum furnaces. European Patent EP 0882811.
3. Abd El-Rahman A.M., et.all.: Effect of N<sub>2</sub> to C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> ratio on r.f. plasma surface treatment of austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology* 2004, 1832, 68.
4. Kula P., Kołodziejczyk Ł., M Górecki., Rzepkowski A., Rzepkowski A., Krasiński A., Dybowski K., Siniarski D.: Komputerowe wspomaganie procesu nawęglania próżniowego. Materiały VI Seminarium Grupy SECO/Warwick pt. „Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej”, Świebodzin 2002.
5. Kula P.: Nawęglanie próżniowe – technologia, ekonomia, urządzenia. Materiały IV Seminarium Grupy SECO/Warwick pt. „Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej”, Świebodzin 2000.
6. Siniarski D., Kula P., Kaczmarek Ł., Pietrasik R., Atraszkiewicz R., Dybowski K., Stańczyk-Wołowicz E.: Rozwój wspomagania komputerowego w aplikacjach procesów dyfuzyjnych na przykładzie oprogramowania SimVAC. Materiały X Seminarium Grupy SECO/Warwick pt. „Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej”, Łagów 2006.
7. Payling R., Jones D.G., Bengston A.: *Glow Discharge Emission Spectrometry*, Wiley, New York 1997.
8. Weiss Z., Marshall K.: Elemental depth profiling of coated and surface-modified materials by GD-OES: hard coatings on cutting tools, *Thin Solid Films*, Volumes 308–309, 1997.
9. Markus R.K.: *Glow Discharge Spectroscopies*. Plenum Press, New York 1993.

Recenzent:  
**Tadeusz BURAKOWSKI**

### **Vacuum carburizing of low carbon steel DC4 in atmosphere composed by aliphatic hydrocarbons**

#### **Key words**

Vacuum carburizing, designing of carburizing zones.

#### **Summary**

This paper presents the results of the research work concerning the design of the vacuum carburising processes of low carbon steel grade DC4, in order to obtain the required parameters of carburising zone, i.e. surface concentration of

carbon  $I_{C_{Surf}}$ , efficient concentration of carbon  $I_{C_{Effect}}$  and the efficient thickness of carburising zone  $D_{C_{Effect}}$ . The special simulation software *SimVac Plus v.2.7.3(EN)* was used in this research. For all the investigated structures, the authors carried out chemical composition analysis with the use of the GDOS method and hardness patterns in the changes of depth of the carburising zone with the use of the Vickers method.

The results of investigations into chemical composition of carbon were compared with the results obtained by the simulation method. The authors carried out the analysis of the range of hardness of low carbon steel grade DC4, which was obtained for different chemical compositions of carbon and for the selected parameters of heat treatment.