

Wpływ sposobu hartowania na wielkość odkształceń detali wykonanych ze stali 16MnCr5 nawęglanych niskociśnieniowo

WPROWADZENIE

Nawęglanie to jeden z podstawowych sposobów obróbki powierzchniowej stali. Najnowocześniejszą odmianą tego procesu jest nawęglanie prowadzone pod obniżonym ciśnieniem atmosfery obróbczej, tzw. nawęglanie niskociśnieniowe lub próżniowe [1÷3].

Niskociśnieniowa odmiana nawęglania przewyższa nawęglanie konwencjonalne pod względem wydajności oraz cechuje się szeregiem zalet, takich jak: brak utleniania wewnętrznego, większa równomierność uzyskiwanych warstw, energooszczędność i proekologiczność [4].

Obróbka cieplna po nawęglaniu niskociśnieniowym może być realizowana, podobnie jak w tradycyjnym nawęglaniu, w oleju hartowniczym lub jako medium hartownicze stosuje się gaz pod wysokim ciśnieniem, rzędu 1 do 3 MPa. Gazowe ośrodki oziębiające, oparte głównie na azocie, helu, wodorze lub ich mieszaninach, są proekologiczne, nie zanieczyszczają środowiska naturalnego, zapewniają czystą, metaliczną powierzchnię obrabianych detali. Tak obrabiane części nie wymagają żadnych dodatkowych zabiegów po procesie. W przypadku hartowania w oleju jest konieczne mycie detali, najczęściej w kąpielach alkalicznych, następnie płukanie i suszenie. Powoduje to konieczność neutralizacji ścieków i utylizacji cząstek oleju zebranych w separatorach. Ponadto, w przypadku stosowania urządzeń z hartowaniem w oleju, instalacje są znacznie bardziej rozbudowane i zajmują więcej miejsca na halach produkcyjnych [4÷6].

Największym mankamentem chłodzenia w gazach jest ich zdolność do przejmowania ciepła. Efektywność chłodzenia nawęglonego wsadu w gazach silnie zależy od ich rodzaju, ciśnienia oraz od szybkości strumienia gazu opływającego chłodzone detale. Największe zdolności hartownicze spośród gazów stosowanych w hartowaniu ma hel i wodór [4, 6].

Pomimo większego współczynnika przejmowania ciepła, oba te gazy mają mniejsze perspektywy aplikacyjne jako nowoczesne ośrodki chłodzące w obróbce cieplnej. Hel z powodu bardzo wysokiej ceny, która pociąga za sobą konieczność instalowania kosztownych i rozbudowanych instalacji do recyklingu. Wodór natomiast z powodu dużego zagrożenia wybuchowego i wynikających z tego kłopotów logistycznych, które usiłuje się wyeliminować przez np. możliwość magazynowania wodoru w złączach [6, 7].

Obecnie najczęściej do chłodzenia wsadu stosuje się azot w komorach pieców przystosowanych do pracy pod ciśnieniem do 2,5 MPa. Są to piece jedno- i dwukomorowe oraz linie modułowe. Piec jednokomorowy charakteryzuje się tym, że ta sama komora pieca służy zarówno do grzania, jak i do chłodzenia wsadu. Chłodzenie odbywa się w wyniku cyrkulacji gazu w zamkniętej przestrzeni roboczej pieca, który jest kierowany na wsad przez system dysz. Piec dwukomorowy natomiast ma wydzieloną komorę grzania i zimną komorę chłodzenia, w której wsad jest hartowany.

Oddzielna komora chłodzenia ma za zadanie zapewnić większą intensywność hartowania w gazach. W produkcji masowej, w której ze względu na liczbę detali jest wymagana intensyfikacja procesów obróbczych, stosuje się linie modułowe, w których jedna komora chłodzenia obsługuje kilka komór do nawęglania próżniowego [5, 6, 8]. Podobnie jak w przypadku hartowania gazowego, piece do nawęglania i hartowania olejowego są piecami dwukomorowymi, wyposażonymi dodatkowo w wannę olejową, w której odbywa się hartowanie detali. W porównaniu z hartowaniem w gazie hartowanie olejowe przy wielu wymienionych wyżej mankamentach ma jedną zasadniczą przewagę, mianowicie cechuje się większym współczynnikiem przejmowania ciepła, co pozwala na hartowanie detali wykonanych ze stali o mniejszej hartowności, dlatego też ten sposób chłodzenia nadal jest stosowany w przemyśle [6, 9].

Celem niniejszej pracy jest porównanie wielkości odkształceń na przykładzie średniej wielkości kół zębatych wykonanych ze stali 16MnCr5, poddanych nawęglaniu niskociśnieniowemu i hartowanych w gazie pod wysokim ciśnieniem oraz w oleju. Pozwoli to na wskazanie korzystnych warunków obróbki cieplnej po nawęglaniu ze względu na minimalizację odkształceń.

WYNIKI BADAŃ

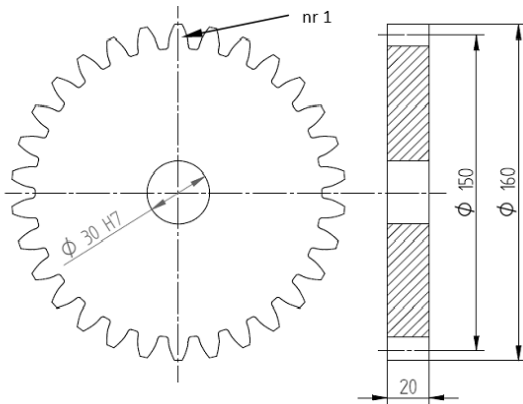
Nawęglano niskociśnieniowo koła zębate wykonane ze stali 16MnCr5, o module $m = 5$ i liczbie zębów = 30 (rys. 1). Nawęglanie prowadzono w piecu jednokomorowym z chłodzeniem w azocie pod wysokim ciśnieniem oraz w piecu dwukomorowym z wanną olejową, oba urządzenia firmy Seco/Warwick S.A. Każde z kół było ustawione pionowo w komorze pieca (zgodnie z rysunkiem 1), na specjalnie wykonanym oprzyrządowaniu, co gwarantowało jednoznaczne i powtarzalne rozmieszczenie podczas nawęglania i podczas chłodzenia. Dwa pierwsze zęby każdego koła zostały trwale oznakowane na powierzchniach bocznych w celu zapewnienia powtarzalnych warunków badań. Atmosferę nawęglającą pozyskano z mieszaniny acetylen-etylen-wodór. Nawęglanie wykonano technologią FineCarb® [10]. Temperatura procesu nawęglania każdorazowo wynosiła 950°C. Parametry zaprojektowanej warstwy nawęglonej: stężenie powierzchniowe: 0,75% C, efektywna grubość warstwy: 0,5 mm (dla kryterium = 0,4% C). Czasy poszczególnych etapów nasycania/dyfuzji dla uzyskania założonego profilu stężenia węgla dobrano na podstawie symulacji wykonanej w programie SimVaCPlus®. Po nawęglaniu zastosowano hartowanie z temperatury 860°C, w pierwszym przypadku w gazie (azot) pod ciśnieniem 1,4 MPa, natomiast w drugim przypadku w oleju hartowniczym o temperaturze 50°C w wannie olejowej z zastosowaniem mieszania. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono mikrostrukturę warstwy wierzchniej po obu rodzajach obróbki cieplnej. W obu przypadkach uzyskano mikrostrukturę martenzytu z austenitem szczątkowym o zbliżonych zawartościach tych faz. Po hartowaniu w gazie zawartość austenitu szczątkowego w warstwie wynosiła 19±2%, a po hartowaniu w oleju 19±3%. Zawartość austenitu szczątko-

Dr hab. inż. Konrad Dybowski (konrad.dybowski@p.lodz.pl), prof. dr hab. inż. Piotr Kula, dr inż. Radomir Atraszkiewicz, dr inż. Bartłomiej Januszewicz, dr inż. Adam Rzepkowski, mgr inż. Krzysztof Jakubowski – Instytut Inżynierii Materiałowej, Politechnika Łódzka

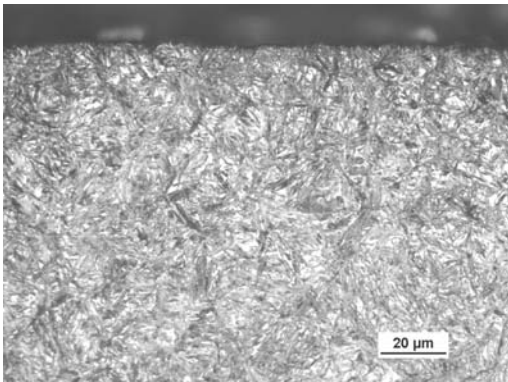
wego określono metodą rentgenowską za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego PROTO iXRD. Profile stężenia węgla w warstwie wierzchniej, symulowany oraz uzyskany w procesach nawęglania niskociśnieniowego, przedstawiono na rysunku 4. Pomiarów zawartości węgla w warstwie dokonano za pomocą spektrometru optycznego GDOES firmy Leco.

Na rysunku 5 przedstawiono profile mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni stali 16MnCr5 uzyskane po nawęglaniu niskociśnieniowym i hartowaniu w gazie i oleju.

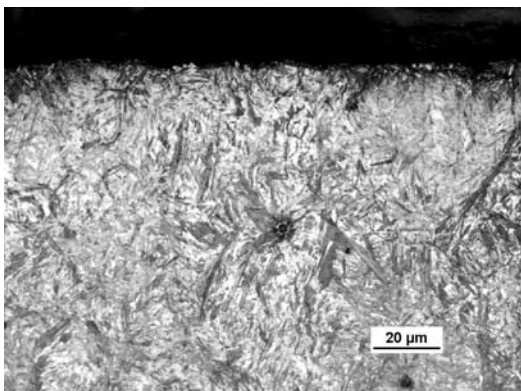
Następnie określono stan naprężeń własnych w kołach poddanych dwóm wariantowym rodzajom obróbki cieplnej. Pomiaru dokonano dla każdego koła na tych samych zębach nr: 1, 6, 12, 18 i 24 (rys. 6). Pomiaru naprężeń dokonano metodą rentgenowską $\sin^2\psi$ za pomocą dyfraktometru PROTO iXRD, według normy SAE HS-784.



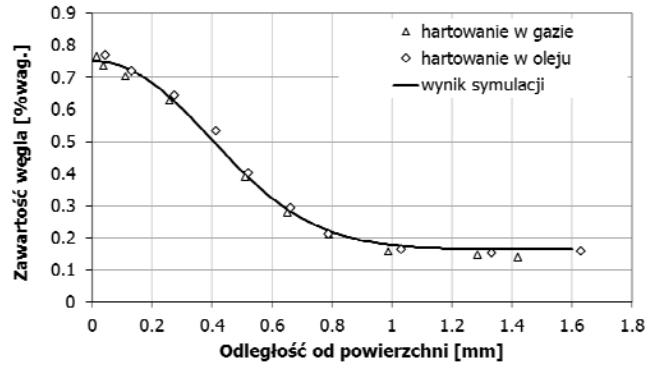
Rys. 1. Koło zębate użyte do badań, moduł = 5, liczba zębów = 30
Fig. 1. Gear wheel used to research, module = 5, number of teeth = 30



Rys. 2. Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali 16MnCr5 po nawęglaniu niskociśnieniowym i hartowaniu w gazie
Fig. 2. Microstructure of the surface layer of 16MnCr5 steel after low pressure carburizing with gas hardening

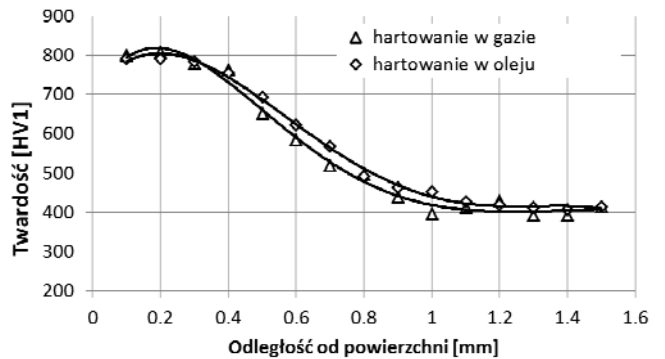


Rys. 3. Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali 16MnCr5 po nawęglaniu niskociśnieniowym i hartowaniu w oleju
Fig. 3. Microstructure of the surface layer of 16MnCr5 steel after low pressure carburizing with oil hardening



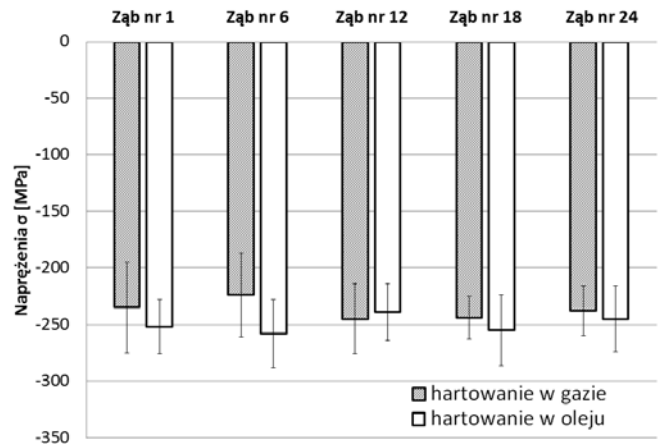
Rys. 4. Profile stężenia węgla uzyskane w wyniku nawęglania niskociśnieniowego stali 16MnCr5

Fig. 4. The carbon profiles after low pressure carburizing processes of 16MnCr5 steel



Rys. 5. Profil mikrotwardości stali 16MnCr5 po nawęglaniu niskociśnieniowym i hartowaniu

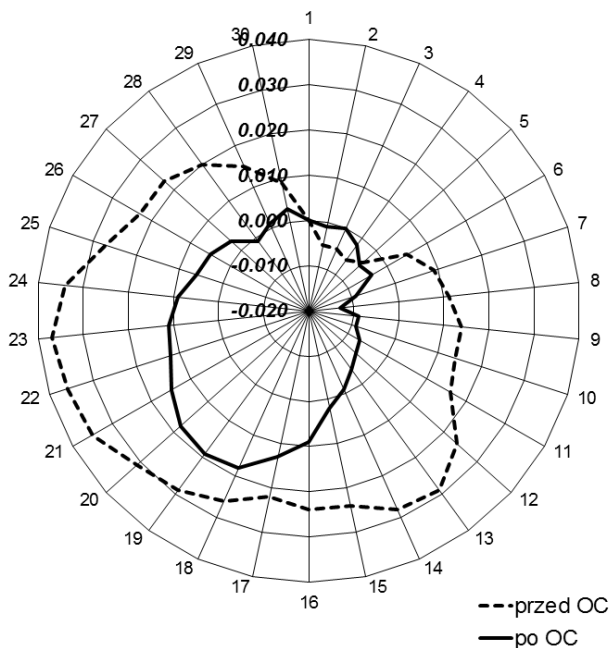
Fig. 5. Microhardness profile of 16MnCr5 steel after low pressure carburizing with hardening



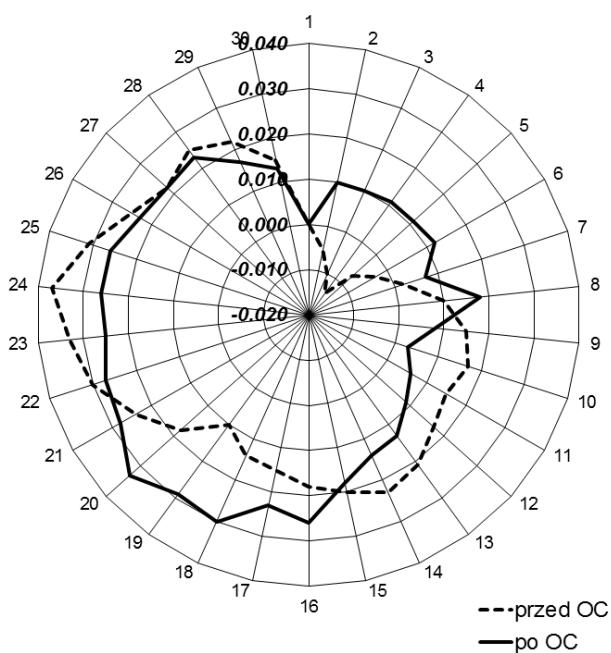
Rys. 6. Naprężenia własne kół zębatach wykonanych ze stali 16MnCr5 po nawęglaniu niskociśnieniowym i hartowaniu

Fig. 6. Residual stresses of gear wheel made of 16MnCr5 steel after low pressure carburizing with hardening

W celu oszacowania wpływu obróbki cieplnej na stopień odkształcenia kół użytych do badań poddano je pomiarom. Określono bicie promieniowe uzębienia mierzone na średnicy podziałowej przed oraz po procesie nawęglania z hartowaniem. Badania bicia promieniowego wykonano przyrządem do pomiarów kół zębatach firmy Carl Zeiss Jena z dokładnością $\pm 1 \mu\text{m}$. Pomiaru wykonano, mierząc promień od osi obrotu do średnicy podziałowej dla każdego zęba. Wyniki pomiarów zestawiono na wykresach przedstawionych poniżej na rysunkach 7 i 8. Średnia wartość odkształcenia po hartowaniu w gazie wynosi $17 \pm 9 \mu\text{m}$, a po hartowaniu w oleju $9 \pm 6 \mu\text{m}$.



Rys. 7. Bicie promieniowe koła zębatego wykonanego ze stali 16MnCr5 przed i po nawęglaniu z hartowaniem w gazie
 Fig. 7. Radial run-out of gear wheel made of 16MnCr5 steel before and after low pressure carburizing with gas hardening



Rys. 8. Bicie promieniowe koła zębatego wykonanego ze stali 16MnCr5 przed i po nawęglaniu z hartowaniem w oleju
 Fig. 8. Radial run-out of gear wheel made of 16MnCr5 steel before and after low pressure carburizing with oil hardening

PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

W wyniku przeprowadzonych obróbek uzyskano prawidłową budowę strukturalną warstwy wierzchniej stali 16MnCr5, typową dla warstwy nawęglonej poddanej hartowaniu, o takim samym składzie fazowym niezależnie od sposobu zastosowanego hartowania. W każdym z wariantów obróbki uzyskano warstwy

zgodne z założonymi kryteriami, o określonym profilu stężenia węgla oraz twardości.

Wielkość naprężeń własnych kół zębatych po nawęglaniu niskociśnieniowym i hartowaniu w oleju jak i w gazie wyniosła średnio około -250 MPa.

Porównując uzyskane wyniki odkształceń dla poszczególnych kół zębatych, stwierdzono, że po nawęglaniu niskociśnieniowym z hartowaniem w gazie pod wysokim ciśnieniem uzyskano większy stopień odkształceń niż po nawęglaniu i hartowaniu w oleju. Natomiast w przypadku hartowania w gazie charakter odkształceń jest jednorodny w przeciwieństwie do hartowania w oleju. Na całym obwodzie koła zębatego uzyskano zmniejszenie średnicy podziałowej. W przypadku hartowania w oleju częściowo nastąpił skurcz, a częściowo przyrost średnicy podziałowej koła.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Zastosowany sposób hartowania po nawęglaniu niskociśnieniowym wpłynął na wielkość odkształcenia mierzonego na średnicy podziałowej koła zębatego. W przypadku hartowania w oleju średnia wielkość bicia promieniowego była niższa niż w przypadku hartowania w gazie.
2. Hartowanie w gazie skutkowało większą powtarzalnością odkształceń na całym obwodzie koła zębatego, co ułatwia przewidywanie stopnia deformacji i określenie naddatków na korektę wymiarów po obróbce cieplnej.
3. Niezależnie od wariantu obróbki wielkość powstałych w kołach zębatych naprężeń własnych była na tym samym poziomie.

PODZIĘKOWANIA

Badania zrealizowano częściowo w ramach projektu INNOTECH-K1/IN1/5/159396/NCBR/12 oraz projektu UOD-DEM-1-193/001.

LITERATURA

- [1] Gräfen W., Edenhofer B.: New developments in thermo-chemical diffusion processes. *Surface & Coatings Technology* 200 (2005) 1830÷1836.
- [2] Kula P., Korecki M., Pietrasik R., Stańczyk-Wołowiec E., Dybowski K., Kołodziejczyk Ł., Atraszkiewicz R., Krasowski M.: FineCarb® – the flexible system for low pressure carburizing. New options and performance. *The Japan Society for Heat Treatment* (2009) 133÷136.
- [3] Gräfen W., Hornung M., Irretier O., Rink M.: Applications of low-pressure carburizing with high temperatures (1000°C to 1050°C) in industrial practice. *Haertere-Technische Mitteilungen* 62 (3) (2007) 97÷102.
- [4] Preisser F., Seemann, Zenker W. R.: Vacuum carburizing with high pressure gas quenching – the application. *Proc. of The 1st International Automotive Heat Treating Conference, Puerto Vallarta, Mexico* (1998) 135÷147.
- [5] Kula P.: Obróbka cieplno-chemiczna w próżni – perspektywy rozwoju. *Inżynieria Materiałowa* 5 (112) (1999) 221÷223.
- [6] Kula P.: *Inżynieria warstwy wierzchniej*. Wydawnictwo PŁ, Łódź (2000).
- [7] Cieślak J., Kula P., Filipek S.: Research on compressor utilizing hydrogen storage materials for application in heat treatment facilities. *Journal of Alloys and Compound* 480 (2009) 612÷616.
- [8] Hoffmann F. T., Lübben T., Mayr P.: Innovations in quenching systems and equipment: current status and future developments. *Heat Treatment of Metals* 3 (1999) 63÷67.
- [9] Herring D. H., Houghton R. L.: The influence of process variables on vacuum carburizing. *Proc. of the Sec. Intern. Conf. Carburizing and Nitriding with Atmospheres, Cleveland* (1995) 103÷108.
- [10] European Patent No.: EP1558780 (2007), United States Patent No.: US 7513958 (2009), Kula P., Olejnik J., Heilman P.