

	Organizatorzy:	XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKİ ŚCIERNEJ Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	Politechnika Łódzka		
	Wydział Mechaniczny		
• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn			

Wpływ nowoczesnych procesów obróbki ciepłno-chemicznej i ścierniej na rozkład naprężeń w warstwie wierzchniej stali 17CrNi6-6

The influence of modern thermo-chemical and abrasive treatments on the distribution of residual stresses in the surface layer of 17CrNi6-6 steel

BOGDAN KRUSZYŃSKI
JACEK SAWICKI
RYSZARD WÓJCIK *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.373

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące określenia stanu naprężeń własnych powstałych w wyniku kształtowania warstwy wierzchniej materiału poprzez obróbkę nawęglania próżniowego i szlifowania. Synergiczny wpływ obróbki ciepłno-chemicznej i ścierniej badano na próbkach pierścieniowych wykorzystywanych do badań naprężeń własnych metodą Dawidenkowa. Próbki poddano procesowi nawęglania próżniowego i następnie szlifowano ściernicą elektrokorundową - 38A60K8V oraz ściernicą z ziarnami CBN - RNB80/63B75V. Podczas szlifowania stosowano ciecze obróbkowe: emulsja olejowa 5%, wydatek ok. 20 l/min, olej Micro5000 podawany z minimalnym wydatkiem (MQL) ok. 25 ml/h, obróbka na sucho. Na podstawie przeprowadzonych badań określono wpływ rodzaju ściernicy oraz czynnika chłodząco-smarującego na rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Najlepsze efekty szlifowania, w odniesieniu do rozkładu naprężeń własnych, uzyskano przy podawaniu cieczy obróbkowej (emulsji olejowej) w trybie obfitym podczas szlifowania ściernicą z ziarnami CBN.

SŁOWA KLUCZOWE: synergizm, naprężenia własne, nawęglanie próżniowe, szlifowanie

In this paper we present research concerning the determination of the stresses resulting from forming the material surface layer by vacuum carburizing and grinding. The

synergistic effect of thermo-chemical and abrasive treatments was studied on ring samples used for Dawidenkow stress calculation method. The samples were subjected to vacuum carburizing and then grinded using aloxite grinding wheel - 38A60K8V and CBN-RNB80/63B75V. When grinding, apart from dry machining, selected cutting fluids were used: 5% oil emulsion with quantity lubrication approx. 20 l/min, oil Micro5000 administered with a minimum quantity lubrication (MQL) approx. 25 ml/h. Based on the study, the effect of grinding-cooling lubricant type on the stresses distribution in the surface layer was defined. Optimum results with respect to the distribution of stresses were achieved for the abrasive treatment in fluid (oil emulsion) under rich lubrication regime using CBN grinding wheel.

KEYWORDS: synergy, residual stresses, vacuum carburizing, grinding

Wprowadzenie

Dotychczas problem kształtowania stanu naprężeń własnych w procesach utwardzania powierzchniowego na drodze obróbki cieplnej i ciepłno-chemicznej [1-6] i ich superpozycji z naprężeniami od zewnętrznych obciążeń eksploatacyjnych [2,7,8] oraz naprężenia własne pochodzące od obróbki ubytkowej przez szlifowanie tradycyjnymi i nowoczesnymi materiałami ściernymi [9-12] stanowiły przedmiot odrębnych rozważań. Istnieje potrzeba wspólnego i wzajemnie sprzężonego rozpatrywania tych zagadnień, gdyż transformacja stanu naprężeń w trakcie kształtowania technologicznej warstwy wierzchniej obejmuje wszystkie

* prof. dr hab. inż. Bogdan Kruszyński (bogdan.kruszynski@p.lodz.pl),
dr hab. inż. Jacek Sawicki (jacek.sawicki@p.lodz.pl),
dr hab. inż. Ryszard Wójcik, prof. PŁ (ryszard.wojcik@p.lodz.pl)

zabiegi technologiczne i nie jest prostą sumą wynikającą z procesów jednostkowych.

Wielkoseryjne przemysłowe procesy w zakresie inżynierii powierzchni ulegają ciągłym modyfikacjom mającym na celu ich doskonalenie pod względem technicznym, ekonomicznym i ekologicznym. W chwili obecnej dwa rozwiązania innowacyjne w tym zakresie stanowią niewątpliwie rewolucję technologiczną na wielką skalę. Są to: nawęglanie próżniowe w kompaktowym rozwiązaniu polegającym na hartowaniu w gazach obojętnych (azocie lub helu) pod wysokim ciśnieniem [13-18] oraz wprowadzenie do szlifowania ściernic nowej generacji – z ziarnami z regularnego azotku boru wraz z zastosowaniem różnych cieczy obróbkowych [7-12]. Powszechnie znany jest szereg aplikacji przemysłowych obu tych nowych rozwiązań oraz problemy, które wyniknęły przy ich wdrażaniu i upowszechnianiu. Najważniejszym z nich jest ostateczne ukształtowanie technologicznej warstwy wierzchniej tak, aby zapewnić wytworzonym elementom wysoką wytrzymałość na zmęczenie stykowe oraz wysoką wytrzymałość zmęczeniową zębów na zginanie. Obie te właściwości zależą zarówno od budowy strukturalnej utwardzonych warstw wierzchnich oraz od ostatecznego rozkładu w nich naprężeń własnych.

Metodyka i warunki badań

Celem badań było sprawdzenie możliwości uzyskania efektu synergicznego w odniesieniu do właściwości eksploatacyjnych przedmiotu poprzez zastosowanie nowoczesnych procesów technologicznych obróbki cieplno-chemicznej i ubytkowej. W zakresie obróbki cieplno-chemicznej badania koncentrowały się na procesie nawęglania próżniowego, natomiast w zakresie obróbki ubytkowej na szlifowaniu z wykorzystaniem różnych narzędzi ściernych (ściernice z ziarnami z mikrokystalicznego korundu spiekanego i CBN) i czynnika chłodząco-smarującego.

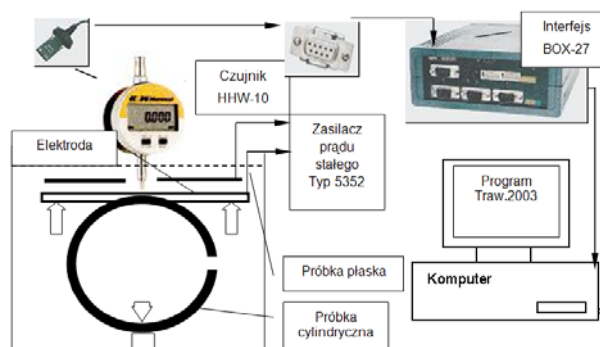
Próbki ze stali 17CrNi6-6 wykonano w postaci pierścieniowych próbek o wymiarach: średnica zewnętrzna $\phi 45$ mm, średnica wewnętrzna $\phi 38$ mm i szerokość 6 mm. Próbki po wstępnej obróbce kształtującej, w celu usunięcia naprężeń pochodzących od obróbki mechanicznej, wyżarzano w piecu próżniowym w temperaturze 823 K w czasie 2 h. Po wyżarzeniu próbki chłodzono razem z piecem i następnie poddano obróbce cieplno-chemicznej nawęglania próżniowego (tabela 1). Parametry procesu nawęglania dobrano tak aby efektywna grubość warstwy nawęglanej wynosiła około 0,6 mm dla kryterium 0,40%C.

Tab. 1. Parametry procesu nawęglania próżniowego stali 17CrNi6-6

Parametry obróbki cieplno-chemicznej	Obróbka cieplna	
	Temperatura 950°C Czas nawęglania 90 min	Hartowanie z temp. 870°C w azocie

Próbki po obróbce cieplno-chemicznej poddawano procesom obróbki ubytkowej w celu końcowego ukształtowania warstwy wierzchniej. Szlifowanie wgłębne powierzchni cylindrycznych zewnętrznych przeprowadzono przy użyciu ściernicy elektrokorundowej-38A60K8V oraz CBN-RNB80/63B75V, próby prowadzono dla ściernic ostrych przy następujących parametrach: prędkość szlifowania (stała), $v_s=30$ m/s, głębokość szlifowania: 0,025 mm. Podczas szlifowania stosowano cieczy obróbkowe: emulsja olejowa

5%, wydatek ok. 20 l/min, olej Micro5000 podawany z minimalnym wydatkiem (MQL) ok. 25 ml/h, obróbka na sucho.

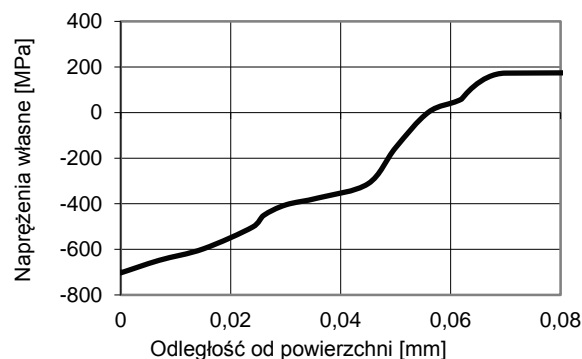


Rys. 1. Schemat stanowiska do pomiaru naprężeń własnych wg metody Dawidenkowa

Badania naprężeń własnych prowadzono wg metody Dawidenkowa dla próbek pierścieniowych na zaprojektowanym i zbudowanym w Instytucie Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn PŁ stanowisku. Schemat tego stanowiska pokazano na rysunku 1. Proces ciągłego usuwania kolejnych warstw materiału w trakcie pomiarów realizowano w 10% HNO₃ ze wspomaganie prądem stałym i z wymuszonym przepływem elektrolitu przez mieszadło. Gęstość prądu w czasie elektrochemicznego usuwania materiału wynosiła $0,3 \pm 0,4$ A/cm². Do trawienia elektrochemicznego wykorzystano zasilacz prądu stałego typu 5352 o napięciu od 0 do 20 V i regulowanym natężeniu prądu od 0 do 5 A. W czasie trawienia elektrolitycznego kontrolowano w sposób ciągły temperaturę elektrolitu i w przypadku jej wzrostu o 2 K proces trawienia przerywano. Zapewniało to jednakową prędkość usuwania materiału. W stanowisku pomiarowym zastosowano czujniki pomiarowe HHW o nacisku 1,47 N. Wartość zmiany ugięcia próbki pierścieniowej w wyniku zmiany jej grubości podczas procesu usuwania materiału nie przekracza $0,1 \mu\text{m}$ (nie przekracza wartości działki elementarnej czujnika).

Wyniki pomiarów naprężeń własnych

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki – średnia z 3 pomiarów naprężeń własnych w próbkach po procesie nawęglania próżniowego (bez obróbki ubytkowej). Jak można zauważyć wartość naprężeń własnych na powierzchni wyniosła - 703 MPa. Naprężenia te malały monotonicznie wraz z odległością od powierzchni osiągając poziom zerowy na głębokości ok. 0,56 mm.

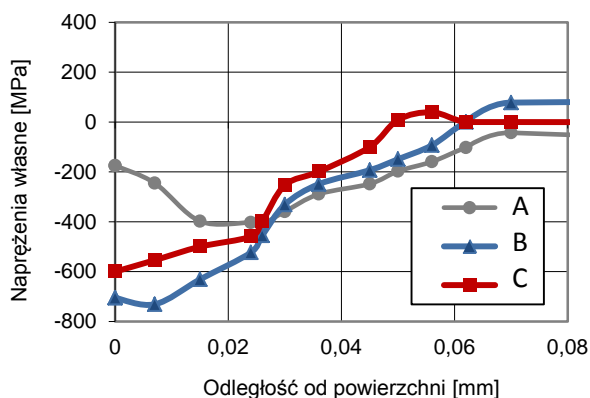


Rys. 2. Rozkład naprężeń własnych po obróbce cieplno-chemicznej nawęglania próżniowego

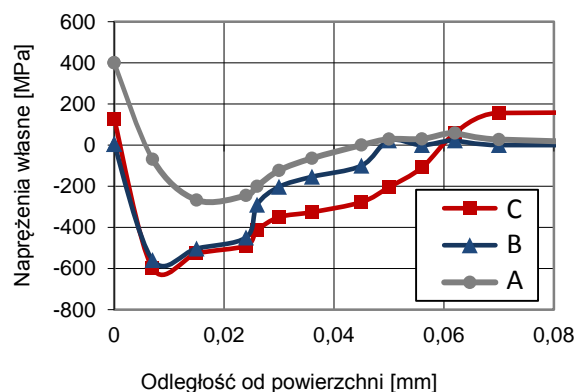
Na rysunku 3 i 4 przedstawiono porównanie rozkładów naprężeń własnych dla próbek nawęglanych próżniowo a następnie obrabianych ściernicą z ziarnami CBN (rys. 3) i ściernicą elektrokorundową (rys. 4). Dodatkowo zaprezentowany jest wpływ rodzaju cieczy obróbkowej na rozkład naprężeń w warstwie wierzchniej.

Na rysunku 3 widać, że przy zastosowaniu ściernicy CBN w każdym przypadku uzyskiwano korzystne, ściskające naprężenia własne w pobliżu powierzchni. Szlifowanie z zastosowaniem emulsji olejowej (rys. 3 – krzywa B) jako cieczy obróbkowej nie zmieniło wartości naprężeń na powierzchni natomiast zmienił się charakter ich zmian pod powierzchnią – prawdopodobnie na skutek oddziaływań mechanicznych i modyfikacji stanu naprężeń wskutek usunięcia nadmiaru obróbkowego. Największe naprężenia ściskające zalegają na głębokości ok. 6 μm i wyniosły - 735 MPa. Nieznaczne zmniejszenie wartości naprężeń własnych zaobserwowano w wyniku szlifowania ściernicą z ziarnami CBN z podawaniem cieczy obróbkowej z minimalnym wydatkiem (MQL) (rys. 3 – krzywa C). Naprężenia ściskające na powierzchni zmniejszyły się do poziomu - 600 MPa w stosunku do stanu przed obróbką i zdążyły do zera lub niewielkich wartości dodatnich (rozciągających) wraz z odległością od powierzchni. Pomimo spadku wartości ściskających naprężeń własnych można uznać, że zastosowanie metody MQL podczas szlifowania ściernicami z ziarnami CBN daje dobre rezultaty i może stanowić ekologiczną alternatywę dla podawania cieczy obróbkowej w trybie obfitym. Najgorszy wynik, zgodnie z oczekiwaniami uzyskano dla szlifowania ściernicą CBN na sucho (rys. 3 – krzywa A). Widać, że przy takim szlifowaniu rozkład naprężeń własnych jest modyfikowany poprzez wpływy ciepłone i odpuszczenie powierzchni próbki. Niemniej jednak wartość - 175 MPa można uznać za pozytywną w odniesieniu do właściwości użytkowych przedmiotu, chociaż nie tak korzystną jak w dwóch pozostałych przypadkach.

Z rysunku 4 wynikają podobne ogólne zależności dotyczące roli cieczy obróbkowej w kształtowaniu końcowych właściwości warstwy wierzchniej w procesie szlifowania. Najlepsze wyniki uzyskano dla szlifowania z udziałem emulsji olejowej podawanej w trybie obfitym (krzywa B na rys. 4) a najgorsze dla szlifowania na sucho (krzywa A). Szlifowanie z podawaniem cieczy obróbkowej z minimalnym wydatkiem (MQL - krzywa C) dało wynik niewiele gorszy od szlifowania z udziałem emulsji i znacznie lepszy od szlifowania na sucho.



Rys. 3. Rozkład naprężeń własnych w próbkach nawęglanych próżniowo i szlifowanych ściernicą CBN z zastosowaniem: emulsji olejowej (krzywa B), MQL (krzywa C) oraz bez cieczy obróbkowej (krzywa A)



Rys. 4. Rozkład naprężeń własnych próbek nawęglanych próżniowo i szlifowanych ściernicą elektrokorundową z zastosowaniem: emulsji olejowej (krzywa B), MQL (krzywa C) oraz bez cieczy obróbkowej (krzywa A)

Natomiast samo zastosowanie ściernicy elektrokorundowej (rys. 4) dało znaczne pogorszenie się stanu naprężeń własnych w stosunku do próbek szlifowanych ściernicą z ziarnami CBN (rys. 3). Jest to spowodowane znacznie wyższą ilością ciepła płynącego do przedmiotu, znacznie wyższymi temperaturami szlifowania co powoduje niekorzystne zmiany strukturalne (miedzy innymi proces odpuszczenia stali). Co prawda szlifowanie z udziałem emulsji olejowej (ale przy niskich parametrach szlifowania dało poziom naprężeń własnych na powierzchni w pobliżu zera (+5 MPa) co można, dla części maszyn pracujących przy niższych obciążeniach, zaakceptować, niemniej jednak jest to wynik znacznie gorszy niż dla szlifowania ściernicą CBN w tych samych warunkach (-705 MPa). Jest to również znaczne pogorszenie się stanu naprężeń w stosunku do próbek poddanych tylko nawęglaniu, bez obróbki ścierniczej (rys. 2). Nie można więc w tym przypadku mówić o efekcie synergicznym. Zastosowanie MQL przy ściernicy elektrokorundowej spowodowało już zmianę naprężeń własnych na powierzchni w zakres naprężeń rozciągających (+128 MPa). Widać co prawda, że skuteczność smarowania w zastosowaniu MQL jest dostateczna niemniej jednak brak efektu chłodzącego powoduje podniesienie temperatury szlifowania i w efekcie pogorszenie stanu warstwy wierzchniej.

Zdecydowanie niekorzystny rozkład naprężeń otrzymano dla szlifowania na sucho. W tym przypadku naprężenia osiągnęły na powierzchni wartość 406 MPa (rys. 4 - krzywa A) co jest nie do zaakceptowania z punktu widzenia eksploatacji przedmiotów, szczególnie pracujących w warunkach zmęczeniowych. Można przyjąć, że zwiększenie parametrów obróbki (wydajności obróbki) pogorszyłoby i tak niekorzystny stan naprężeń własnych.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów rozkładu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek nawęglanych próżniowo i szlifowanych w różnych warunkach (różne ściernice i sposoby podawania cieczy obróbkowej) można stwierdzić, że:

- po nawęglaniu próżniowym uzyskano korzystny rozkład naprężeń własnych z wysokimi naprężeniami własnymi w pobliżu powierzchni,
- synergiczny efekt w odniesieniu do stanu naprężeń własnych wynikający z połączenia obróbki cieplnochemicznej i ścierniczej można uzyskać jedynie przy szlifowaniu ściernicami z ziarnami CBN. Ściernice elektrokorundowe nie dają takich możliwości,

- najlepsze efekty szlifowania, w odniesieniu do rozkładu naprężeń własnych, uzyskuje się przy podawaniu cieczy obróbkowej (emulsji olejowej) w trybie obfitym. Należy jednak stwierdzić, że podawanie cieczy obróbkowej z minimalnym wydatkiem (MQL) może dać również bardzo pozytywne efekty, szczególnie podczas szlifowania ściernicami CBN, ale na pewno wymaga bardziej precyzyjnego doboru warunków szlifowania,
 - wzmocnienie efektu synergicznego wymaga badań nad optymalnym doбором warunków skrawania w celu zwiększenia wydajności obróbki (co na pewno jest możliwe), przy zachowaniu żądanych właściwości warstwy wierzchniej.
17. Gräfen W., Hornung M., Irretier O., Rink M., Applications of low-pressure carburizing with high temperatures (1000°C to 1050°C) in industrial practice. *Haerterei-Technische Mitteilungen*, Vol.62(3), 97-102, 2007.
18. 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, 135-147, 1998.

LITERATURA

1. Gawroński Z., Wpływ stanu naprężeń własnych w warstwach azotowanych na zużycie o charakterze zmęczenia stykowego. *Praca habilitacyjna, Zeszyt naukowy nr 755, PŁ*, 1999.
2. Golański D, Bielański P., Wierchoń T., Numerical modelling of residual stresses in boride layers on steel. *Surface Engineering*, Vol.13, No.2, 145-148, 1997.
3. Ramalingam S., Zheng L., Film-substrate interface stresses and their role in the tribological performance of surface coatings. *Tribology International*, Vol.28, No.3, 145-161, 1995.
4. Djabella H., Arnell R.D., Finite element analysis of the contact stresses in elastic coating/substrate under normal and tangential load. *Thin Solid Films*, Vol.223, Issue 1, 87-97, 1993.
5. Djabella H., Arnell R.D., Two dimensional finite element analysis of elastic stresses in double layer systems under combined surface normal and tangential loads. *Thin Solid Films*, Vol. 226, Issue 1, 65-73, 1993.
6. Bell T., Mao K., Sun Y., Surface engineering design: modelling surface engineering systems for improved tribological performance. *Surface & Coatings Technology*, Vol.108-109, 360-368, 1998.
7. Gawroński Z., Kruszyński B., Kula P., Synergistic effects of thermo-chemical treatment and super abrasive grinding in gears' manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.159, 249-256, 2005.
8. Kruszyński B.W., Gawroński Z., Sawicki J., Zgórnjak P., Enhancement of gears fatigue properties by modern thermo-chemical treatment and grinding processes. *Mechanics and Mechanical Engineering*. Vol. 12 , No .4, 387-395, 2008,
9. Kruszyński B., *Surface Integrity in Grinding*. University Press, Łódź 2001.
10. Kruszyński B., Koncepcja oceny wpływu procesu szlifowania na właściwości warstwy wierzchniej. *Konferencja nt. Kształtowanie części maszyn przez usuwanie materiału. I Forum Prac Badawczych, Koszalin 1994.*
11. Kruszyński B., Togo S, Wójcik R., The Influence of Power Density and Contact Time on the Surface Integrity in Grinding. *Międzynarodowa Konferencja "Development in Metal Cutting DMC 2000" Košice (Słowacja)*, 2000.
12. Stachurski W., Sawicki J.: Wpływ warunków obróbki ostrzenia frezów ślimakowych na stan warstwy wierzchniej ostrzy. *Inżynieria Materiałowa*, Nr 4, 2010, 1241-1244.
13. Kula P., Olejnik J., Some technological aspects of vacuum carburizing. *Proc. of the 12th International Federation of Heat Treatment and Surface Engineering Congress*. Melbourne, Vol. 3, 195-200, 2000.
14. Kula P., Olejnik J., Kowalewski J., New vacuum carburizing technology. *Heat Treating Progress*, Vol. 1, 57-60, 2001.
15. Gräfen W.; Edenhofer B., New developments in thermo-chemical diffusion processes. *Surface & Coatings Technology*, Vol.200, 1830-1836, 2005.
16. 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*, 133-136, 2009.