

Zbigniew GAWROŃSKI*, Jacek SAWICKI*

**WPLYW NOWOCZESNYCH PROCESÓW OBRÓBK
CIEPLNO-CHEMICZNEJ I ŚCIERNEJ
NA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE
POWIERZCHNI**

**THE INFLUENCE OF MODERN THERMO-CHEMICAL
AND ABRASIVE TREATMENTS ON TRIBOLOGICAL
PROPERTIES OF THE SURFACE**

Słowa kluczowe:

nawęglanie, szlifowanie, naprężenia własne, wytrzymałość zmęczeniowa

Key-words:

carburizing, grinding, residual stresses, fatigue strength

Streszczenie

W referacie przedstawiono właściwości warstwy wierzchniej uzyskane w procesie nawęglania próżniowego i konwencjonalnego oraz po szlifowaniu ściernicami nowej generacji. Przeanalizowano właściwości użytkowe warstwy wierzchniej (naprężenia własne, mikrotwardość, mikrostrukturę). Określono równocześnie wpływ wyżej wymienionych parame-

* Instytut Inżynierii Materiałowej, Politechnika Łódzka, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 1/15; e-mail:zbigniew.gawronski@p.lodz.pl

trów na odporność na zużycie i współczynnik tarcia materiału przy ślizganiu. Przeprowadzone badania wykazały, że znacznie korzystniejsze właściwości użytkowe wykazuje technologia nawęglania próżniowego z następującym po nim szlifowaniem ściernicami borazonowymi.

WPROWADZENIE

Z analizy literaturowej wynika, że nawęglanie jest podstawową obróbką cieplno-chemiczną szeroko stosowaną w przemyśle maszynowym i motoryzacji [L. 1]. Konwencjonalne procesy nawęglania są w ostatnich latach zastępowane nawęglaniem próżniowym [L. 2] – ekologicznie przyjazną technologią, zapewniającą większą wytrzymałość zmęczeniową z jednoczesnym zapewnieniem dużej powtarzalności właściwości warstwy wierzchniej. Dodatkowo elementy nawęglane próżniowo mają tę zaletę w porównaniu do nawęglanych konwencjonalnie, że nie wymagają tak dużych naddatków na szlifowanie. Występują powtarzalne odkształcenia hartownicze i brak utleniania wewnętrznego. W konsekwencji powoduje to znaczne skrócenie czasu oraz obniżenie kosztów końcowej obróbki ubytkowej oraz wpływa korzystnie na stan naprężeń własnych w warstwie wierzchniej [L. 3].

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 zawierającym hartowanie w gazach obojętnych (azocie lub helu) pod wysokim ciśnieniem oraz wprowadzenie do szlifowania ściernic nowej generacji – z regularnego azotku boru. Powszechnie znanych 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 zmęczeniową. W projektowaniu par ciernych pracujących w warunkach zużycia zmęczeniowego bardzo istotną rolę odgrywa poziom naprężeń własnych w warstwie wierzchniej [L. 4]. Wartość naprężeń własnych i ich rozkład decydują w tym przypadku o jego trwałości i niezawodności.

WYKONANIE PRÓBEK I ICH OBRÓBKA

Do badań przygotowano próbki płaskie (120×20×3,5 mm), próbki w postaci wałeczków o wymiarach: długość 90 mm i średnicy 22 mm i 10 mm, przy zachowaniu promienia 20 mm na granicy przejścia mniejszej średnicy w większą oraz próbki walcowe o średnicy 1" i wysokości 6 mm. Próbki wykonane zostały z stali (20NiCrMo2) i poddano je tradycyjnie stosowanej obróbce nawęglania konwencjonalnego oraz obróbce nawęglania próżniowego [L. 5, 6] (tabela 1). Po przeprowadzonej obróbce nawęglania konwencjonalnego elementy poddano hartowaniu i odpuszczaniu oraz szlifowaniu ściernicą elektrokorundową na głębokość 50 μm. Głębokość szlifowania wynikała z faktu, że po nawęglaniu konwencjonalnym i obróbce cieplnej do 40 μm występuje utlenienie i odwęglenie. Nadmienić tu należy, że pomimo dużej wydajności ściernic elektrokorundowych wprowadzają one do warstwy wierzchniej rozciągające naprężenia własne oraz zmiany mikrostruktury i twardości, które to wpływają niekorzystnie na takie właściwości eksploatacyjne, jak wytrzymałość zmęczeniowa. Dlatego też próbki po zabiegu technologicznym nawęglania próżniowego poddano szlifowaniu ściernicą CBN na głębokość 10 μm. Szlifowania ściernicami CBN nie zastosowano do kół nawęglanych konwencjonalnie ze względu na pozostawione znacznie większe naddatki szlifierskie – wynikające z większych odkształceń i zjawiska utleniania wewnętrznego i zewnętrznego powstałego po nawęglaniu i obróbce cieplnej.

Tabela 1. Parametry obróbki elementów do badań wykonanych ze stali 20NiCrMo2

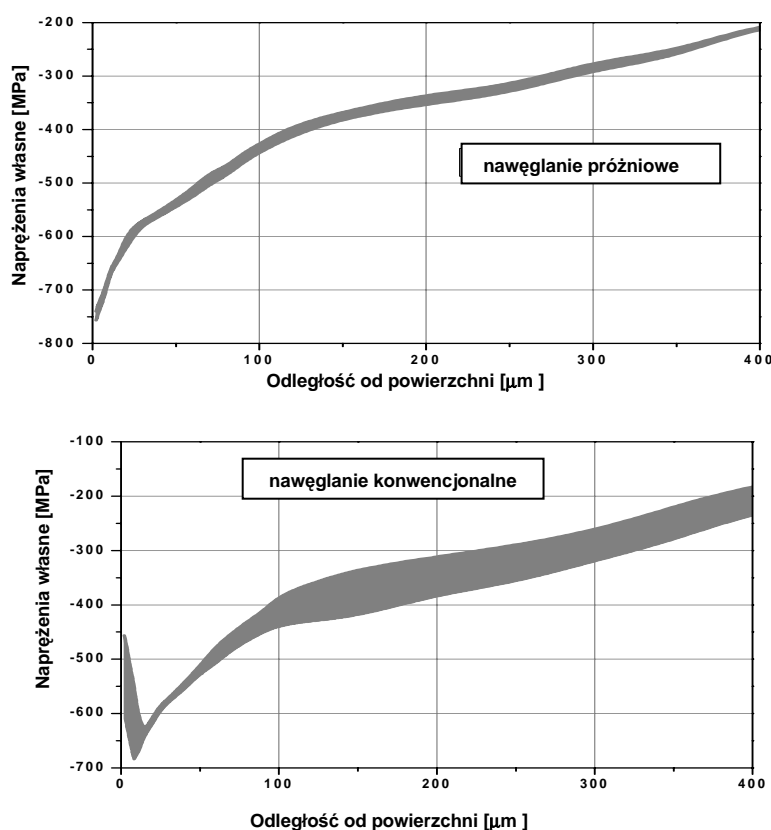
Table 1. Treatment parameters of samples made of 20NiCrMo2 steel

Rodzaj obróbki	Temperatura i czas obróbki			Twardość
	Nawęglanie	Hartowanie	Odpuszczanie	
Nawęglanie konwencjonalne	1203 K – 3 h	1113 K – olej	453 K – 2h	680 HV na powierzchni max 715 HV na głębokości 0,1 mm
Nawęglanie próżniowe	1203 K – 1,5 h	1113 K – azot pod ciśnieniem 1,6 MPa	453 K – 2h	720 HV na powierzchni

Po przeprowadzonych procesach technologicznych na przygotowanych próbkach określono umowną grubość TWW zgodnie z PN-ISO 2639 [L. 7] z użyciem mikrotwardościomierza CLEMEX. Dobrane parametry procesów technologicznych pozwoliły uzyskać grubości warstwy TWW około 1,2 mm.

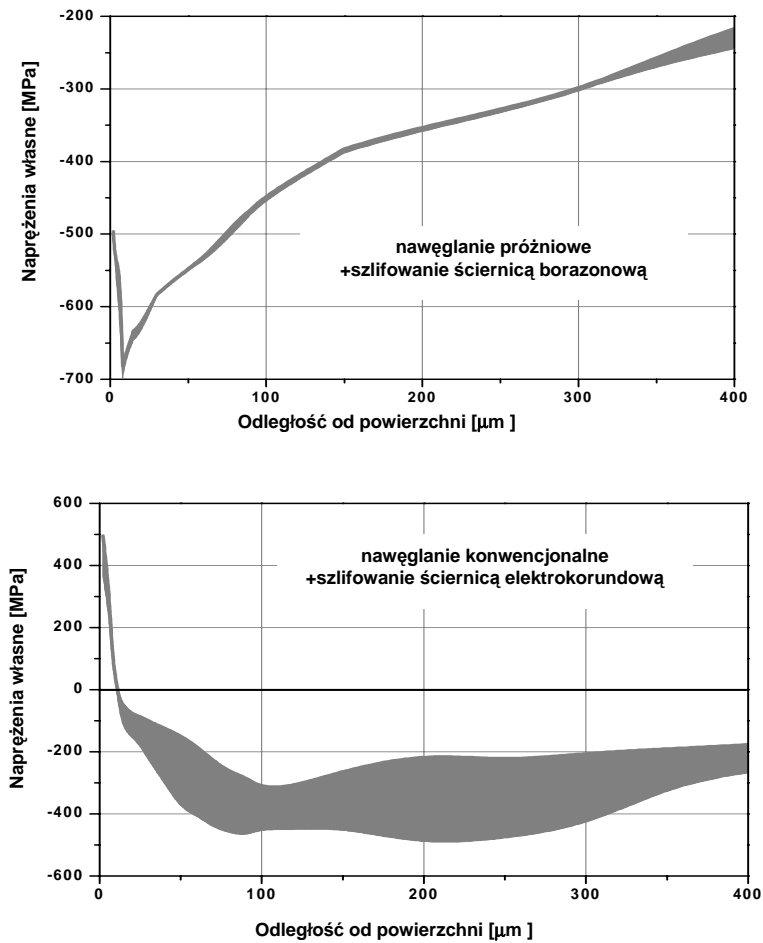
WYNIKI BADAŃ

Rozkład naprężeń własnych mierzony metodą Waissmana-Philipsa [L. 8] w warstwie wierzchniej stali 20NiCrMo2 opracowano dla próbek po nawęglaniu konwencjonalnym i próżniowym oraz hartowaniu i niskim odpuszczaniu (Rys. 1), jak również po późniejszym szlifowaniu (Rys. 2).



Rys. 1. Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej stali 20NiCrMo2 po obróbkach powierzchniowych

Fig. 1. The residual stresses distribution in the surface layer of 20NiCrMo2 steel after the surface treatments



Rys. 2. Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej po nawęglaniu próżniowym, nawęglaniu i szlifowaniu ściernicą CBN oraz nawęglaniu konwencjonalnym i szlifowaniu ściernicą elektrokorundową

Fig. 2. The comparison of residual stress distribution in the surface layer after vacuum carburizing grinding with CBN and conventional carburizing and grinding with aluminum oxide wheel

Przeprowadzono analizę statystyczną i ustalono pasma rozrzutu otrzymanych wartości naprężeń własnych dla wszystkich badanych próbek, w funkcji odległości od powierzchni.

Analiza wyników badań (**Rys. 1**) wskazuje, że rodzaj nawęglania, a tym samym uzyskana mikrostruktura warstwy nawęglonej odgrywają znaczącą rolę w kształtowaniu rozkładu naprężeń własnych w warstwie

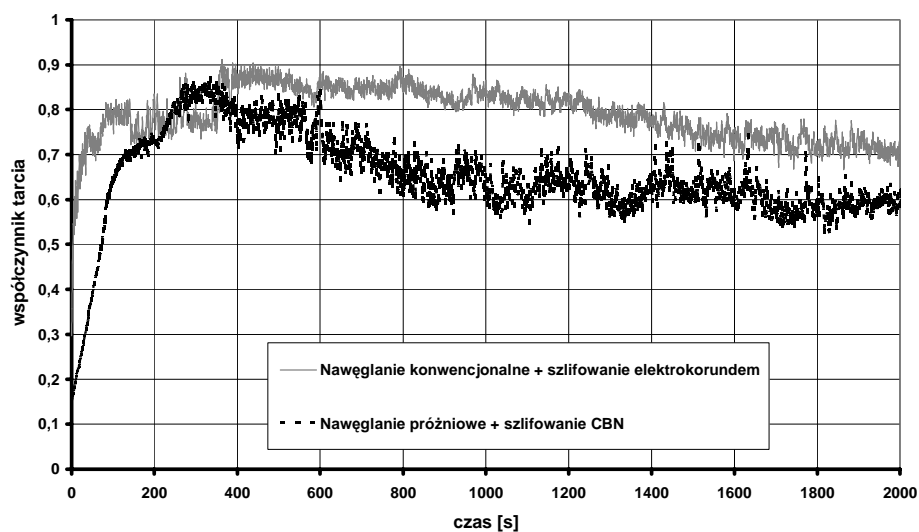
wierzchniej stali 20NiCrMo2. Maksymalne naprężenie ściskające w przypadku nawęglania konwencjonalnego występuje na głębokości 20 μm i wynosi -670 MPa. Na powierzchni wynosi natomiast -450 MPa. Inny charakter ma rozkład naprężeń własnych w przypadku nawęglana próżniowego. W tym przypadku maksymalne naprężenie ściskające występuje na powierzchni i wynosi ono -750 MPa.

Rozkłady naprężeń własnych (**Rys. 2**) uzyskane po nawęglaniu próżniowym i szlifowaniu ściernicą CBN wskazują najbardziej korzystny synergizm właściwości użytkowych (ściskające naprężenia na powierzchni – ok. -500 MPa). Stosowanie ściernic z materiałów supertwardych wymaga starannego doboru warunków szlifowania (a w szczególności naddatków na obróbkę ścierną) dla zapewnienia kryterium ekonomiczności procesu, ze względu na wysokie koszty narzędzi i ich regeneracji.

Analiza naprężeń własnych uzyskanych po procesie nawęglania konwencjonalnego oraz szlifowania ściernicą elektrokorundową wskazuje na bardzo znaczne zróżnicowanie ich poziomu i rozkładu wartości. Po nawęglaniu konwencjonalnym na powierzchni próbki występują naprężenia rozciągające (max. ok. +500 MPa). Ten niekorzystny rozkład naprężeń związany jest z koniecznością zeszlifowania znacznych naddatków kół zębatych ze względu na duże odkształcenie oraz strefę utlenienia wewnętrznego, powstałych podczas nawęglania konwencjonalnego.

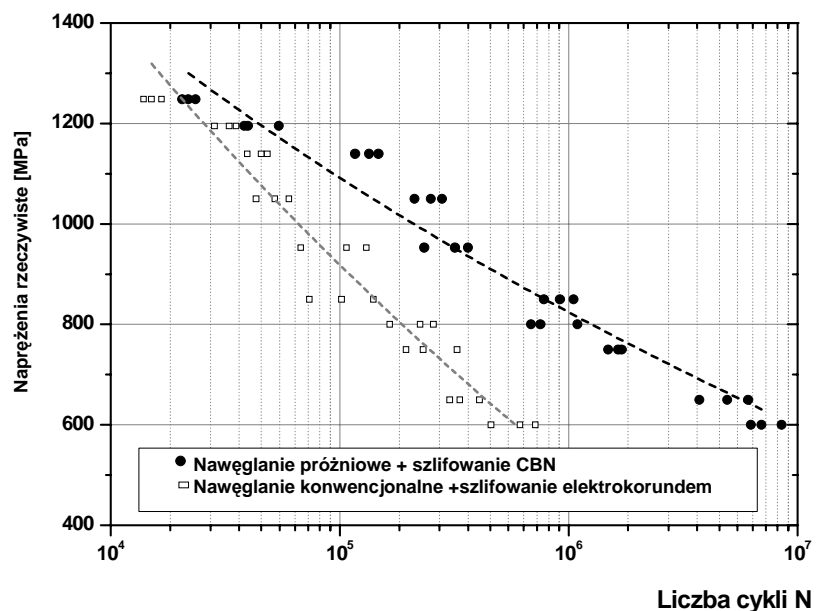
Badania tribologiczne przeprowadzono metodą PIN – ON – DISK testerem T 11 (**Rys. 3**). Analizując przebieg testu tribologicznego, możemy zauważyć, że lepszymi właściwościami przeciwzużyciowymi charakteryzuje się warstwa nawęglana próżniowo i szlifowana CBN. Dzięki synergizmowi takiej kombinacji obróbek technologicznych spadł współczynnik tarcia do wartości 0,6, przy czym dla warstwy nawęglanej konwencjonalnie i szlifowanej elektrokorundem współczynnik tarcia wynosi 0,7.

Badania wytrzymałości zmęczeniowej giętno-obrotowej (**Rys. 4**) przeprowadzono na specjalnie zbudowanym do tego celu urządzeniu. Wartość naprężenia wywołanego w próbce zmieniała się od $\sigma = 1250$ do 600 MPa, przy obrotach próbki 710 obr./min. Podczas badań analizowano zjawiska towarzyszące cyklicznemu obciążeniu i jednocześnie prowadzono obserwację inicjacji pęknięcia zmęczeniowego w obszarze zmiany średnic próbki. Dla usunięcia wątpliwości, że niektóre wyniki pomiarów obarczone są błędem, sprawdzono ich przynależność do populacji metodami statystycznymi. Przyjęto metodę eliminacji polegającą na ocenie końców przedziałów ufności dla pojedynczego rezultatu. Uzyskane wyniki



Rys. 3. Przebieg zmian współczynnika tarcia w czasie

Fig. 3. Coefficient of friction curves versus the time



Rys. 4. Zakres ograniczonej wytrzymałości krzywej Wöhlera w próbie giętno-obrotowej

Fig. 4. The range of limited strength of curve Wöhlera after bending-rotary test

pomiarów były podstawą do określenia pochylenia krzywej Wöhlera metodą najmniejszych kwadratów. Przeprowadzono analizę statystyczną wyników doświadczalnych celem potwierdzenia, czy uzyskane współczynniki kierunkowe prostych dla różnych obróbek technologicznych różnią się na przyjętym poziomie istotności.

Analiza danych wskazuje, że szlifowanie próbek ściernicami z regularnego azotku boru (CBN) poprawia znacznie wytrzymałość zmęczeniową giętno-obrotową w funkcji liczby cykli w porównaniu do szlifowania ściernicami elektrokorundowymi. Przyczyny tak pozytywnego wpływu szlifowania ściernicami CBN upatruje się w dobrych właściwościach cieplnych ściernic CBN (większa przewodność i dyfuzyjność cieplna). Otrzymuje się lepszy podział energii szlifowania. Znacznie mniejszy jest udział energii cieplnej płynącej do przedmiotu w całkowitej energii szlifowania, w stosunku do przedmiotu obrabianego szlifowaniem ściernicami elektrokorundowymi. W konsekwencji otrzymuje się w przypadku szlifowania ściernicami boranozowymi zdecydowanie korzystniejszy rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej (naprężenia ścisiskające). Pomimo pozytywnych efektów uzyskanych przez stosowanie ściernic CBN, zwrócić należy uwagę, że ten pozytywny efekt może być niwelowany w praktyce przemysłowej przez konieczność usuwania znacznie większych naddatków obróbkowych po nawęglaniu konwencjonalnym niż po nawęglaniu próżniowym. Jest to spowodowane znacznie większymi odkształceniami powstającymi po obróbce konwencjonalnej. W efekcie kosztowne ściernice CBN są wówczas nieefektywnie eksploatowane. Większe naddatki obróbkowe wymuszają głębsze nawęglanie, co również powoduje dodatkowe koszty.

WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały, że istnieje możliwość oddziaływania na trwałość zmęczeniową elementów maszyn, wykonanych z tego samego materiału, poprzez konstituowanie TWW przez dobór technologii i warunków obróbki cieplnej i wykończeniowej (szlifowania). Bardzo ważnym czynnikiem kształtującym TWW są naprężenia własne. Spełniają one dużą rolę w przebiegu procesu zużycia warstwy wierzchniej. Naprężenia rozciągające występujące w TWW są szczególnie niebezpieczne – skracają czas do inicjacji pęknięć powierzchniowych. Naprężenia własne ścisiskające prowadzą natomiast do wydłużenia czasu propagacji pęk-

nięć poprzez hamowanie rozwoju szczelin. Superpozycja naprężeń dla próbek nawęglanych konwencjonalnie i szlifowanych elektrokorundem stwarza znacznie dogodniejsze warunki do rozwoju zniszczeń i uszkodzeń w porównaniu z superpozycją dla próbek nawęglanych próżniowo i szlifowanych CBN.

LITERATURA

1. Kula P., Olejnik J.: Nawęglanie próżniowe; Technologia, Ekonomia, Przyszłość. Nowoczesne Trendy w Obróbce Ciepłej. Świebodzin 2001, 1.
2. Kula P.: Inżynieria warstwy wierzchniej. Monografie, Łódź 2000.
3. Gawroński Z., Kruszyński B., Kula P.: Synergistic effects of thermochemical treatment and super abrasive grinding in gears' manufacturing. Journal of Materials Processing Technology, 159, 2005, 249.
4. Gawroński Z.: Technologiczna warstwa wierzchnia w kołach zębatych i mechanizmach krzywkowych. Monografia PŁ, Łódź 2005.
5. Kula P., Olejnik J., Kowalewski J.: New vacuum carburizing technology. Heat Treating Progress. 1. 2001, s. 57–60.
6. Kula P., Olejnik J.: Some technological aspects of vacuum carburizing. Proc. of the 12th International Federation of Heat Treatment and Surface Engineering Congress. Melbourne. 2000. Vol. 3. s. 195–200.
7. PN-ISO 2639. Stal. Określanie umownej grubości warstwy nawęglonej i zahartowanej.
8. Waisman J. W., Phillips A.: Proc. Of the Soc. Experimental stress analysis, vol XI, Number 2, 1952, 102.

Recenzent:
Tomasz BUDZYNOWSKI

Summary

The properties of the surface layers obtained in the conventional and vacuum carburising processes and after grinding with modern grinding wheels are presented in this paper. Service properties of the surface layers were analysed (residual stresses, microhardness and microstructure). The influences of aforementioned parameters on wear resistance and friction coefficient during sliding were determined. Tests revealed that the process of vacuum carburising followed by CDN grinding gives much better service properties.

