

Porównanie właściwości warstwy wierzchniej utwardzonej stali narzędziowej AISI D2 i Vanadis 6

Comparison of surface layer properties of AISI D2 and Vanadis 6 hardened tool steel

DANIEL TOBOŁA
JOLANTA CYBOROŃ
ANETA ŁĘTOCHA
JOLANTA LASZKIEWICZ-ŁUKASIK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.10.126>

English version available on: www.mechanik.media.pl

Przedstawiono wybrane właściwości warstwy wierzchniej (WW) stali narzędziowych AISI D2 i Vanadis 6 o twardości 60 ± 1 HRC po szlifowaniu oraz toczeniu na twardo z późniejszym nagniataniem ślizgowym. Określono wpływ wspomnianych obróbek na strukturę geometryczną powierzchni, mikrostrukturę oraz poziom naprężeń w WW badanych stali.

SŁOWA KLUCZOWE: stal narzędziowa, szlifowanie, nagniatanie ślizgowe, warstwa wierzchnia, struktura geometryczna powierzchni, naprężenia

Selected properties of the surface layer (SL) of AISI D2 and Vanadis 6 tool steels at hardness of 60 ± 1 HRC, after grinding and hard turning with subsequent slide burnishing are presented. The influence of the mentioned mechanical treatments in relation to the geometrical structure, microstructure and stresses level in SL for tested steels were determined.

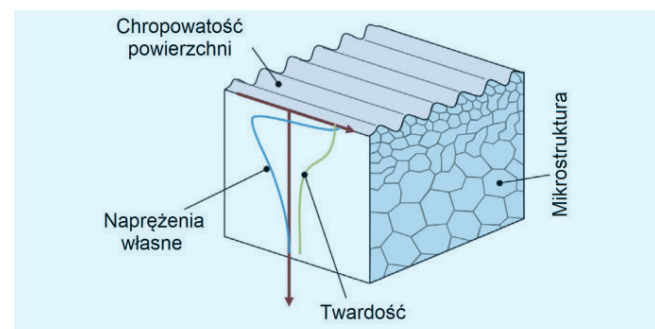
KEYWORDS: tool steel, grinding, slide burnishing, surface layer, surface geometrical structure, stresses

Procesy obróbki mechanicznej powinny być efektywne, niedrogie i przyjazne dla środowiska. W tradycyjnych procesach technologicznych operacją wykończeniową narzędzi i części maszyn, których twardość po ulepszeniu lub hartowaniu przekracza 45 HRC, a nierzadko 60 HRC, jest szlifowanie. Od kilku dziesięcioleci w wielu branżach przemysłu – np. motoryzacyjnej, łożyskowej, produkcji form i matryc – szlifowanie jest sukcesywnie zastępowane przez obróbkę skrawaniem „na twardo” (*hard machining* – HM) [1].

Nie zawsze jednak obróbka HM spełnia wymagania co do oczekiwanej jakości powierzchni. Metodą pozwalającą przezwyciężyć te bariery technologiczne jest nagniatanie, stosowane zarówno do powierzchni toczonej, jak i frezowanych [1]. Proces ten polega na wykorzystaniu miejscowego odkształcenia plastycznego, wytwarzanego w warstwie wierzchniej (WW) przedmiotu wskutek stykowego oddziaływania twardego i gładkiego narzędzia (o kształcie kuli, krążka, wałka lub innym) na powierzchnię obrabianą [2]. Dzięki temu WW przedmiotów obrabianych nadaje się zbiór cech (*surface integrity*), które wpływają korzystnie na właściwości eksploatacyjne produktów (rys. 1) [3, 4].

Stosowanie narzędzi do nagniatania na typowych obrabiarkach skrawających umożliwia wykonanie zabiegów obróbki kształtującej i wykończeniowej na jednym

stanowisku roboczym. W wielu przypadkach zbędna jest wówczas operacja szlifowania na innym stanowisku, co zmniejsza koszty produkcji. W ramach jednego zamocowania wykonuje się kolejne zabiegi toczenia i nagniatania narzędziami zamocowanymi w głowicy narzędziowej obrabiarki. Taki sposób realizacji obróbki wykończeniowej przez nagniatanie jest również korzystny ze względu na dokładność kształtowo-wymiarową [5].



Rys. 1. Wybrane parametry charakteryzujące WW na podstawie [4]

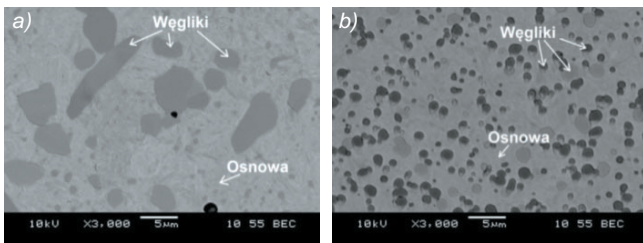
W przypadku narzędzi do obróbki plastycznej na zimno istotne znaczenie ma ich odporność na zużycie tribologiczne, które jest determinowane m.in. właściwościami ich WW. Właściwości te kształtowane są w procesach obróbki mechanicznej, co zazwyczaj jest poprzedzone obróbką cieplną. Należy również pamiętać, że wpływ na zużycie współpracujących elementów ma chropowatość powierzchni oraz twardość ich WW. Istnieje wiele rodzajów mechanicznej obróbki wykończeniowej, które umożliwiają ukształtowanie dowolnie gładkiej powierzchni, choć nie zawsze gwarantują odpowiednie właściwości samej WW.

Zamieszczone w artykule wyniki badań dotyczą porównania właściwości WW dwóch rodzajów stali narzędziowych po szlifowaniu oraz toczeniu na twardo z późniejszym nagniataniem ślizgowym.

Metodyka badań

Do badań wybrano dwa gatunki wysokostopowych stali narzędziowych do pracy na zimno, wytworzone dwoma metodami przez szwedzką hutę Bohler Uddeholm, o składzie chemicznym zamieszczonym w tabl. I. Pręty o średnicy $\varnothing 32$ mm z wybranych materiałów toczone wstępnie, a następnie obrabiano cieplnie (hartowano oraz odpuszczano zgodnie z zaleceniami producenta) do twardości 60 ± 1 HRC. Mikrostrukturę badanych stali, składającą się głównie z osnowy o strukturze martenzytycznej i nierozpuszczonych węglików, przedstawiono na rys. 2.

* Dr inż. Daniel Toboła (daniel.tobola@ios.krakow.pl), mgr inż. Jolanta Cyboron (jolanta.cyboron@ios.krakow.pl), mgr inż. Aneta Łętocha (aneta.letocha@ios.krakow.pl), mgr inż. Jolanta Laszkiewicz-Łukasik (jolanta.laszkiwicz@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania



Rys. 2. Mikrostruktura stali narzędziowych: a) konwencjonalnej – AISI D2 (Sverker 21) oraz b) proszkowej – Vanadis 6.

TABLICA I. Skład chemiczny badanych stali oraz metoda ich otrzymywania

Gatunek stali	Skład chemiczny						Uwagi
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	
AISI D2 (Sverker 21)	1,55	0,3	0,4	11,8	0,8	0,8	*
Vanadis 6	2,1	1,0	0,4	6,8	1,5	5,4	**

* Konwencjonalna technologia metalurgiczna.
** Technologia metalurgii proszków.

Szlifowanie powierzchni walcowych wałków wykonano ściernicą elektrokorundową typu 1-350x50x127 o oznaczeniu 99A60K7VE01-35 na szlifierce RUP 28 z zastosowaniem chłodzenia przez polewanie 2% roztworem koncentratu chłodziwa Synkon PGA w wodzie wodociągowej. Przyjęto następujące parametry szlifowania: prędkość obwodowa ściernicy $v_s = 30$ m/s, prędkość posuwu stołu $v_f = 0,2$ mm/min, głębokość szlifowania $a_e = 0,02$ mm.

Z kolei toczenie poprzedzające proces nagniatania oraz samo nagniatanie wykonano na sterowanym numerycznie centrum tokarskim NL2000 SY firmy Mori Seiki. Parametry operacji zamieszczono w tabl. II i III. Nagniatanie ślizgowe realizowano za pomocą zaprojektowanego i wykonanego w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania narzędzia nagniatającego z elementem roboczym z polikrystalicznego diamentu z ceramiczną fazą wiążącą Ti_3SiC_2 , w kształcie czaszy kulistej o promieniu 1,5 mm, które przedstawiono w pracy [6].

Powierzchnie obu stali narzędziowych po wybranych obróbkach mechanicznych mierzono w układzie 3D na stykowym profilometrze TOPO 01P. Przyrząd był wyposażony w głowicę pomiarową o zakresie 1 mm, z końcówką diamentową o promieniu 2 μ m oraz kącie stożka 90°. Analizę zebranych danych oraz topografię powierzchni opracowano w programie Mountains Map v.7 firmy Digital Surf.

Badania metalograficzne przeprowadzono na skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) typu JSM-6460LV firmy JEOL.

Pomiary dyfrakcyjne przeprowadzono dyfraktometrem rentgenowskim PANalytical Empyrean z wykorzystaniem

TABLICA II. Parametry toczenia powierzchni walcowych badanych stali narzędziowych płytka z PCBN typu NP-DCGW11T-302GA2 MBC020 firmy Mitsubishi

Stal	Prędkość v_c , m/min	Posuw f , mm/obr	Głębokość a_p , mm
AISI D2 (Sverker 21)	100	0,08	0,1
Vanadis 6	150	0,09	

TABLICA III. Parametry nagniatania powierzchni walcowych badanych stali narzędziowych

Stal	Prędkość v , m/min	Siła F , N	Posuw f , mm/obr	Dosuw nagniataka u , mm
AISI D2 (Sverker 21)	40	180	0,02	0,2
Vanadis 6		160		

lampy o anodzie miedzianej ($Cu\alpha K\alpha = 1,5406$ Å) na próbkach odciętych metodą elektroerozyjną z poszczególnych segmentów wałka, co przedstawiono na rys. 3a. Analizę fazową przeprowadzono na podstawie krystalograficznej bazy danych ICDD PDF4+ 2016.

Pomiary naprężeń własnych przeprowadzono na tym samym dyfraktometrze z wykorzystaniem stoika 5-osiowego. Pomiar wykonano w 4 kierunkach. Z uwagi na ograniczenia objętościowe w artykule zaprezentowano wyniki dla 2 kierunków określonych kątem φ : 0°, 135° (rys. 3b). Naprężenia własne w materiale określono na podstawie pomiarów uzyskanych dla odbicia (211) fazy α -Fe: $2\theta = 82,17^\circ$, $d_{hkl} = 1,1721$ Å. Do pomiaru i analizy naprężeń własnych wykorzystano metodę $\sin^2\psi$, w której naprężenia definiwane są przez następujące równania:

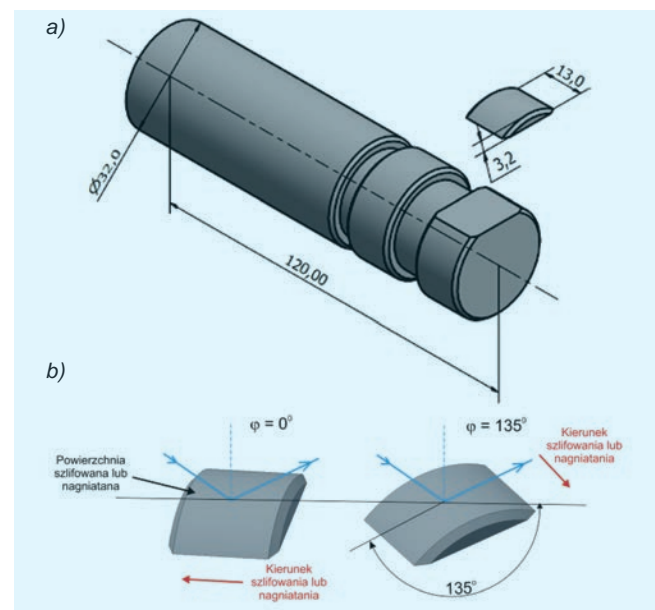
$$\sigma = E \varepsilon$$

$$\varepsilon_1 = 1/E (\sigma_1 - \sigma_2 \nu)$$

$$\varepsilon_2 = 1/E (\sigma_2 - \sigma_1 \nu)$$

gdzie: σ – naprężenia własne, ε – zniekształcenia sieciowe, E – moduł Younga, ν – liczba Poissona.

Do obliczeń użyto wartości modułu Younga i liczby Poissona dla głównej fazy – Fe, dla odbicia (211). W przypadku obu stali przyjęto wartość modułu Younga wynoszącą 211 GPa oraz liczbę Poissona 0,2882 [7].



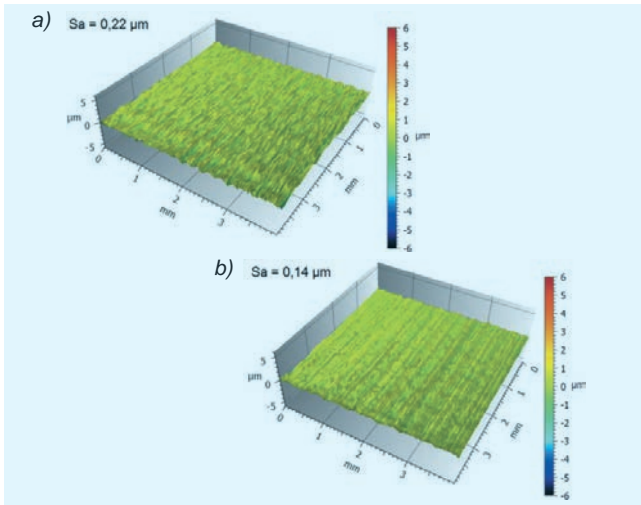
Rys. 3. Wymiary wałków poddanych mechanicznym procesom obróbki wykończeniowej (a) oraz schemat pomiarów naprężeń własnych w dwóch kierunkach określonych kątem φ (b)

Wyniki

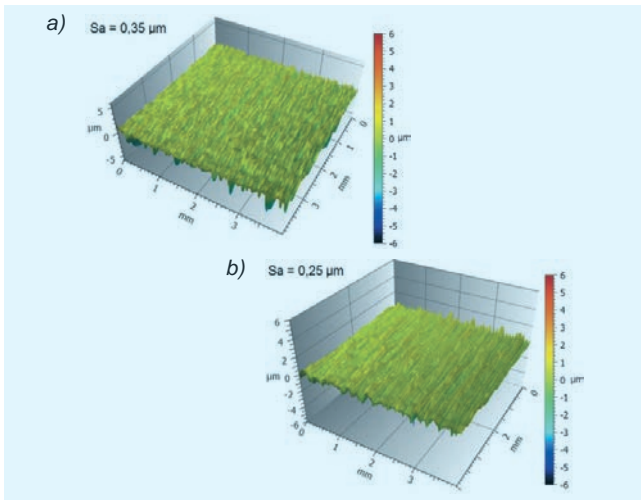
Wyniki pomiarów struktury geometrycznej powierzchni (SGP) po mechanicznych obróbkach wykończeniowych zarówno dla stali Sverker 21, jak i Vanadis 6 zamieszczono na rys. 4 i 5.

Uzyskane wartości parametru S_a dla stali Sverker 21 wyniosły 0,22 μ m i 0,14 μ m – odpowiednio po szlifowaniu oraz toczeniu-nagniataniu. Efektem przeprowadzenia opisanych procesów obróbki powierzchniowej na próbkach ze stali Vanadis 6 było uzyskanie powierzchni, dla której wartość parametru S_a wyniosła 0,35 μ m i 0,25 μ m – odpowiednio po szlifowaniu oraz toczeniu-nagniataniu. W przypadku obu stali narzędziowych wartość parametru S_a po toczeniu poprzedzającym nagniatanie wynosiła ok. 1 μ m.

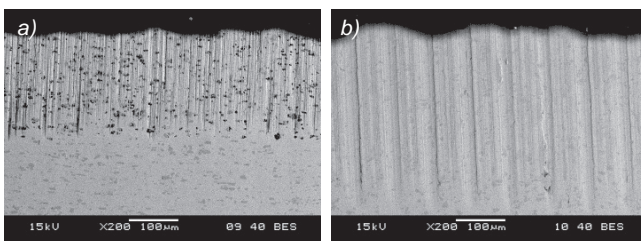
Natomiast na rys. 6 i 7 zamieszczono mikrostruktury WW badanych stali po wybranych mechanicznych procesach obróbki wykończeniowej. W przypadku powierzchni toczonych, a następnie nagniatanych widoczna jest strefa



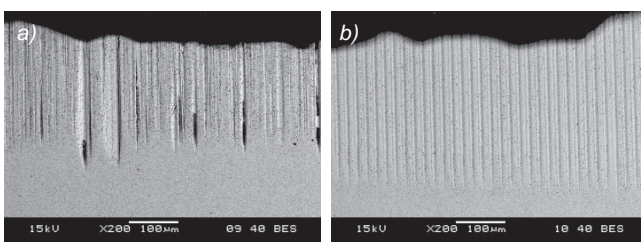
Rys. 4. Widok 3D powierzchni stali Sverker 21 po: a) szlifowaniu oraz b) toczeniu-nagniataniu



Rys. 5. Widok 3D powierzchni stali Vanadis 6 po: a) szlifowaniu oraz b) toczeniu-nagniataniu



Rys. 6. Mikrostruktura WW obserwowana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego na zglądach poprzecznych próbek ze stali Sverker 21 poddanej: a) szlifowaniu oraz b) toczeniu-nagniataniu



Rys. 7. Mikrostruktura WW obserwowana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego na zglądach poprzecznych próbek ze stali Vanadis 6 poddanej: a) szlifowaniu oraz b) toczeniu-nagniataniu

podpowierzchniowa powstała na skutek dużego odkształcenia plastycznego warstwy powierzchniowej.

Z kolei w tabl. IV i V zamieszczono wybrane wyniki pomiarów naprężeń własnych (wyznaczone dla fazy α -Fe w badanych stalach) po mechanicznych procesach obróbki wykończeniowej.

TABLICA IV. Wyniki pomiarów naprężeń po wybranych mechanicznych procesach obróbki powierzchniowej dla stali Sverker 21

Kierunek określony kątem φ	Proces	
	Szlifowanie	Toczenie-nagniatanie
0°	-1930 ± 341	$-2769,3 \pm 397$
135°	$-768,8 \pm 156$	-979 ± 184

TABLICA V. Wyniki pomiarów naprężeń po wybranych mechanicznych procesach obróbki powierzchniowej dla stali Vanadis 6

Kierunek określony kątem φ	Proces	
	Szlifowanie	Toczenie-nagniatanie
0°	$-1751,2 \pm 341$	$-293,3 \pm 215$
135°	$-809,5 \pm 57$	-1481 ± 234

Wyniki uzyskane dla stali Sverker 21 wskazują na wzrost wartości bezwzględnej poziomu naprężeń, który wyniósł od 27% do 43% w zależności od kierunku pomiaru określonego kątem φ na korzyść obróbki sekwencyjnej obejmującej toczenie-nagniatanie.

Dla stali Vanadis 6 pomiar w kierunku $\varphi = 135^\circ$ również wykazał wzrost wartości bezwzględnej poziomu naprężeń, który w tym przypadku wyniósł ok. 83% na korzyść wariantu obejmującego toczenie-nagniatanie. Z kolei pomiar w kierunku $\varphi = 0^\circ$ wykazał zmniejszenie wartości bezwzględnej poziomu naprężeń do ok. -295 MPa.

Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań dotyczą porównania wybranych właściwości WW utwardzonych stali narzędziowych AISI D2 i Vanadis 6 po mechanicznych obróbkach wykończeniowych. Wskazują one na możliwość wykorzystania sekwencyjnego procesu toczenia-nagniatania do kształtowania właściwości WW stali konwencjonalnych oraz otrzymywanych technologią metalurgii proszków.

W aspekcie SGP, mikrostruktury oraz poziomu naprężeń własnych zastosowanie obróbki toczeniem-nagniataniem w porównaniu ze szlifowaniem umożliwia kształtowanie pożądanych właściwości WW obu rodzajów badanych stali narzędziowych.

Badania zrealizowano w ramach projektu nr LIDER/13/0075/L-7/15/NCBR/2016 (programu LIDER VII) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

- Żak K., Grzesik W., Prażmowski M. „Investigation of sequential cryogenic hard turning and ball burnishing processes”. *Metalurgia*. 53, 4 (2014): s. 521–525.
- Przybylski W. „Technologia obróbki nagniataniem”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1987.
- Korzyński M. „Nagniatanie ślizgowe”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2007.
- Chomienne V., Valiorgue F., Rech J., Verdu C. „Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 13 (2016): s. 90–96.
- Przybylski W. „Zintegrowana obróbka toczeniem i nagniataniem”. *Mechanik*. 12 (2011): s. XXXIV–XXXV.
- Toboła D., Brostow W., Czechowski K., Rusek P. „Improvement of wear resistance of some cold working tool steels”. *Wear*. 382–383 (2017): s. 29–39.
- Wawra H. „Kroener-limits of elastic moduli of materials of technical importance. Part II. Elastic moduli of elements as a function of Temperature”. *Z. Metallk.* 69 (1978): s. 518–523. ■