

WYBRANE ASPEKTY ŁĄCZENIA PROCESU NAGNIATANIA Z INNYMI RODZAJAMI OBRÓBEK STOPÓW METALI

SOME ASPECTS OF COMBINING THE BURNISHING PROCESSES OF METAL AND ALLOYS WITH OTHER TREATMENTS

Daniel TOBOŁA¹, Kazimierz CZECHOWSKI¹, Iwona WRONSKA¹, Piotr RUSEK¹

Streszczenie: Przedstawiono w skrócie aktualny stan zagadnienia procesów łączonych obróbki nagniataniem z innymi rodzajami obróbek w celu uzyskania lepszych właściwości warstwy wierzchniej metali i ich stopów przeznaczonych na narzędzia, części maszyn i inne wyroby. Do obróbek tych należą procesy laserowe, kriogeniczne, ultradźwiękowe, wibracyjne, elektro-chemiczne i cieplno-chemiczne. Podano przykłady wpływu różnych obróbek w połączeniu z nagniataniem na właściwości struktury geometrycznej powierzchni i mikrotwardość.

W szczególności omówiono procesy hybrydowe nagniatania wspomaganego laserem (laser assisted burnishing – LAB), polegające na okresowym i lokalnym zmięczeniu warstwy wierzchniej materiału obrabianego wiązką laserową i następującej natychmiast po tym obróbce za pomocą narzędzia nagniatającego. Procesy LAB stosowane były na różnych stopach, m.in. na wielofazowym nadstopie MP35N o twardości początkowej 45 HRC; wykazano, że pozwoliły one na uzyskanie mniejszej chropowatości i wyższej twardości powierzchni niż w przypadku stosowania konwencjonalnego nagniatania, przy podobnym poziomie naprężeń ściskających szczątkowych.

Omówiono także nagniatanie kriogeniczne, w którym stosowano chłodzenie ciekłym azotem, uzyskując na stopie Ti-6Al-4V silnie plastycznie odkształconą (severe plastically deformed – SPD) warstwę o wyższej twardości i występującej na większej głębokości niż w przypadku nagniatania konwencjonalnego z obfitym chłodzeniem cieczą obróbkową lub na sucho.

Zamieszczono wybrane wyniki badań przeprowadzonych w IZTW procesy łączonego obejmującego nagniatanie i azotowanie stali narzędziowych: konwencjonalnej Sverker 21 i proszkowej Vanadis 6. Badania wykazały istotny wzrost zawartości azotu w warstwie wierzchniej i jej twardości.

Na podstawie analiz i wyników stwierdzono synergiczny efekt zastosowania wymienionych wyżej obróbek powierzchniowych w połączeniu z nagniataniem.

Słowa kluczowe: nagniatanie wspomaganie laserem, nagniatanie kriogeniczne, azotowanie, warstwa wierzchnia, struktura geometryczna powierzchni, stop metali

¹ Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, ul. Wrocławska 37a, 30-011 Kraków

Abstract: Recent developments in combined processes of burnishing and other treatments for enhancing surface integrity of metals and alloys for tools, machine parts and other products are presented. These treatments include laser, cryogenic, ultrasonic, vibration, electrochemical and thermal- chemical processes. Some examples of the influence of different treatments, combined with burnishing, on materials surface geometric structure and microhardness are given.

In particular hybrid laser-assisted burnishing (LAB) processes are presented. During LAB, the workpiece surface layer is temporarily and locally softened by a controllable laser beam, and then immediately processed by a burnishing tool. LAB processing and conventional burnishing experiments were conducted on different alloys, including MP35N, a multiphase superalloy, initially of 45 HRC. It is shown by these experiments that LAB can produce much better surface finish, higher surface hardness and similar compressive residual stress compared to the conventional burnishing.

Cryogenic burnishing is also discussed; the application of cryogenic cooling with liquid nitrogen during the burnishing process of the Ti-6Al-4V alloy produced the severe plastically deformed (SPD) layer of increased hardness and depth in comparison to the conventional flood-cooled or dry burnished layer.

Some results of research performed at IAMT are given; they were focused on the combined processes of burnishing and nitriding the conventional Sverker 21 and powder metallurgy (PM) Vanadis 6 tool steel grades. The results indicated that the effect of the burnishing process when applied prior to nitriding was beneficial for the surface layer properties causing an increase of nitrogen contents and hardness.

Basing on the analyses and results of investigations, synergistic effects of the above mentioned combined processes of different surface treatments and burnishing were proved.

Keywords: laser assisted burnishing, cryogenic burnishing, nitriding, surface layer, surface geometric structure, metal alloy

1. WPROWADZENIE

Odporność na zużywanie się, która jest jedną z głównych cech jakości technologicznej części maszyn i narzędzi, determinowana jest właściwościami ich warstwy wierzchniej (WW), m.in. chropowatością powierzchni i twardością. Właściwości WW kształtowane są najczęściej w procesach obróbki mechanicznej, nierzadko poprzedzonej obróbką cieplną, a niekiedy ciepłno-chemiczną. Jednym z rodzajów obróbki mechanicznej jest nagniatanie, które umożliwia otrzymanie WW o szczególnie korzystnych właściwościach użytkowych. Obróbka ta polega na miejscowym odkształcaniu plastycznym na zimno przedmiotu wskutek siłowego oraz kinetycznego współdziałania narzędzia z powierzchnią obrabianą. Naciski powierzchniowe, jakim poddawany jest przedmiot podczas nagniatania, po przekroczeniu wartości naprężenia uplastyczniającego materiał obrabiany, powodują przemieszczenie nierówności i zgniot w WW przedmiotu obrobionego. Nagniatanie najczęściej stosowane jest jako obróbka gładkościowa, której głównym celem jest zmniejszenie nierówności powierzchni po obróbce poprzedzającej (najczęściej wiórowej), a umocnienie WW jest jej dodatkową zaletą. Zwiększenie poprzez nagniatanie dokładności wymiarowo-kształtowej części maszyn może być praktycznie osiągnięte tylko w zakresie odkształceń plastycznych nierówności powierzchni przy stosowaniu sztywnego docisku i zależy w bardzo dużym

stopniu od dokładności obróbki poprzedzającej nagniatanie (toczenia, frezowania lub szlifowania) [1–3].

Rozwojem nagniatania jako obróbki wykończeniowej wyrobów zajmowało się na świecie wiele ośrodków naukowych; jako przykłady firm produkujących i rozwijających narzędzia nagniatające można wymienić m.in.: Ecoroll, Cogsdill, Sugino, Kempf, Yamasa i Bright. W Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (IZTW) zajmowano się zagadnieniami nagniatania i wykonywaniem różnego rodzaju narzędzi nagniatających, przede wszystkim do prowadzenia procesów nagniatania tocznego i ślizgowego. Pomimo wielu zalet nagniatania, w dążeniu do uzyskania jeszcze lepszych właściwości WW części maszyn ze stopów metali lub celem zwiększenia dokładności i wydajności obróbki, poszukiwane były w Instytucie i innych ośrodkach badawczych metody hybrydowe lub sekwencyjne łączące obróbkę nagniataniem z innymi rodzajami obróbek, takimi jak np. laserowa [4–7], kriogeniczna [8–12] i cieplno-chemiczna [13–15] – opisane w artykule, a także rozwijane było wspomaganie nagniatania ultradźwiękami [16] lub wibracyjnie [17], pozwalające na wytworzenie dużych korzystnych naprężeń ściskających (rzędu 1000 MPa) i zgniotu na większej głębokości [1]; oraz łączenie nagniatania z obróbką elektrochemiczną w celu zwiększenia wydajności obróbki i polepszenia gładkości powierzchni [7,18]. Podejmowane były również próby poprawy struktury geometrycznej powierzchni (SGP) i właściwości WW uzyskiwanej po obróbce elektroerozyjnej przez stosowanie po niej procesu nagniatania [19,20].

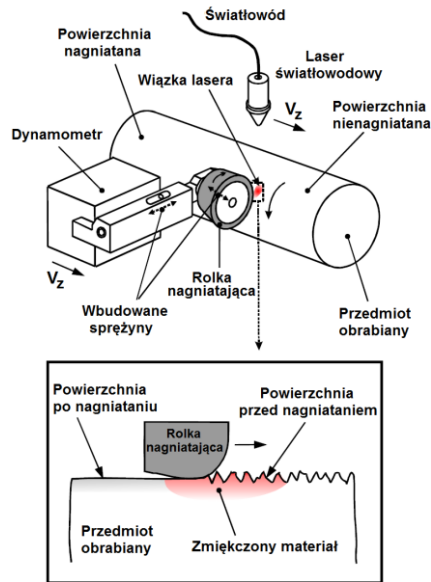
2. NAGNIATANIE WSPOMAGANE OBRÓBKĄ LASEROWĄ

Nagniatanie materiałów twardych może powodować występowanie zbyt wysokich naprężeń ściskających w WW przedmiotu obrabianego ze względu na wysokie naciski niezbędne do jego odkształcenia plastycznego i do wygładzenia jego powierzchni [6]. Mimo opracowania i zastosowania specjalnych narzędzi do nagniatania materiałów twardych, nagniatanie takich materiałów ma ograniczony zakres, głównie ze względu na konieczność stosowania dużych sił nagniatających, powodujących szybkie zużycie narzędzi, duże ugięcie (strzałkę ugięcia) przedmiotu nagniatanego i jego pęknięcie. Celem przewyższenia wspomnianych problemów zostały podjęte badania nad opracowaniem nowego hybrydowego procesu nagniatania ze wspomaganie laserowym (*Laser Assisted Burnishing – LAB*), których wyniki przedstawiono w publikacji [6]. Opracowany proces LAB ma charakter obróbki wykończeniowej, mającej zapewnić wysoką gładkość powierzchni, utwardzenie poprzez zgniot i odpowiedni poziom naprężeń szczytkowych ściskających w przedmiocie poddanym tej obróbce.

W procesie LAB (Rys. 1) do zmiękczenia WW materiału stosowana jest wiązka laserowa, po czym natychmiast następuje proces nagniatania zmiękczonego materiału obrabianego przedmiotu. W badaniach przedstawionych w pracy [6] wykonywano procesy hybrydowe LAB i procesy nagniatania konwencjonalnego na różnych materiałach, w tym na nadstopie MP35N (35% Ni, 35% Co, 20% Cr i 10% Mo) o twardości początkowej 45 HRC. Stop ten odznacza się unikalnym mechanizmem utwardzenia oraz wysoką wytrzymałością i ciągliwością, a także odpornością na korozję. W stanie wyżarzonym stop ten ma strukturę regularną ściennie centrowaną (fcc), która pod wpływem odkształcenia plastycznego przechodzi w strukturę heksagonalną zwartą (hcp), w wyniku czego następuje utwardzenie stopu. Transformacja struktury fcc w hcp zachodzi przy temperaturach poniżej 500°C, zaś

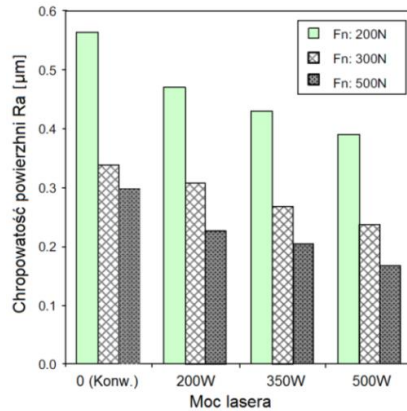
przy 800°C struktura hep przechodzi w strukturę fcc [6]. Dla uzyskania efektu utwardzenia stopu konieczne jest utrzymanie temperatury nagniatania (T_b), zdefiniowanej jako temperatura w strefie kontaktu narzędzie nagniatające-materiał obrabiany, poniżej 500°C. Jednocześnie aby nie nastąpiło trwałe zmiękczenie stopu spełniony musi być warunek ograniczenia temperatury maksymalnej (T_{max}) występującej w centrum wiązki laserowej na powierzchni przedmiotu obrabianego, do wartości 800°C.

Układ doświadczalny do przeprowadzenia procesu LAB zilustrowany na rysunku 1 składa się z lasera Nd:YAG o fali ciągłej i mocy 500 W i tokarki CNC, do głowicy której doprowadzony jest światłowód dostarczający wiązkę laserową na powierzchnię przedmiotu obrabianego. Operacje lasera i tokarki były odpowiednio zsynchronizowane.

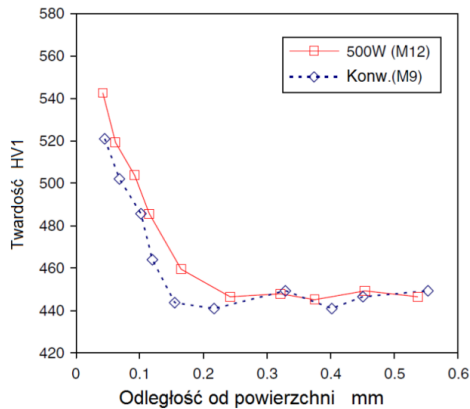


Rys. 1. Schemat układu doświadczalnego hybrydowego procesu nagniatania ze wspomaganie laserowym [6]

Na rysunku 2 przedstawiono wartości parametru chropowości powierzchni R_a uzyskane po nagniataniu konwencjonalnym narzędziem krążkowym z węgla spiekane (model S2302 firmy Elliot Monaghan) przy różnych siłach nacisku oraz po nagniataniu w procesie hybrydowym LAB przy zastosowaniu różnych mocy lasera. Widać, że zastosowanie procesu hybrydowego wpłynęło korzystnie na gładkość powierzchni stopu MP35N w większym stopniu niż nagniatanie konwencjonalne; proces LAB przy mocy lasera 500 W poprawił gładkość powierzchni ocenianą na podstawie parametru R_a o około 30–40%. Zastosowanie procesu LAB umożliwia stosowanie niższych sił w procesie nagniatania oraz wykazuje korzystny wpływ na rozkład twardości w WW stopu MP35N (proces LAB zapewnił nieco wyższe twardości niż nagniatanie konwencjonalne – rys. 3). Stwierdzono, że proces LAB nie wpływał w istotny sposób na poziom naprężeń ściskających w porównaniu z nagniataniem konwencjonalnym [6].



Rys. 2. Zależność chropowatości powierzchni Ra stopu MP35N od mocy lasera oraz wielkości zastosowanej siły nagniatania [6]



Rys. 3. Zmiany twardości w zależności od odległości od powierzchni poddanej nagniataniu dla stopu MP35N [6]

3. NAGNIATANIE WSPOMAGANE OBRÓBKĄ KRIOGENICZNĄ

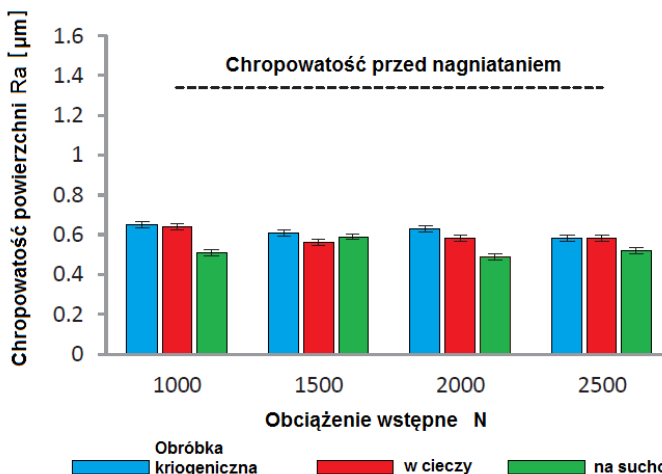
Procesy nagniatania prowadzone z zastosowaniem wysokich sił prowadzą do dużych zmian właściwości WW materiałów – dużego odkształcenia plastycznego, rozdrobnienia ziarna nagniatanego materiału i uzyskania naprężeń szczątkowych ściskających, przy jednoczesnej poprawie struktury geometrycznej powierzchni. Procesy te, określane skrótem SPD (*Severe Plastic Deformation*), powodują również wzrost twardości w WW, jednakże jest on ograniczony ze względu na występujące podczas procesów SPD nagrzanie WW materiału, skutkujące z kolei pewnym zmniejszeniem twardości. Mamy w takich przypadkach do czynienia z występowaniem jednocześnie dwóch mechanizmów, mianowicie z umocnieniem przez zgniot i z termicznym mięknięciem materiału [8]. W pracy [8] przedstawiono wyniki badań nad wpływem kriogenicznego chłodzenia na stan powierzchni i właściwości WW

uzyskiwane w procesie nagniatania SPD stopu tytanu Ti-6Al-4V o twardości 34 HRC. Przedmiotem nagniatania były wałki z powyższego stopu, które poddano nagniataniu w warunkach obróbki na sucho, z chłodzeniem cieczą obróbkową i z chłodzeniem kriogenicznym ciekłym azotem. Nagniatanie realizowano za pomocą narzędzia z częścią roboczą, którą stanowiła rolka z węglika spiekane przy zastosowaniu normalnej siły nagniatania o różnych wartościach z zakresu 1000–2500 N, prędkości posuwu 0,05 mm/obr. I prędkości nagniatania 150 m/min.

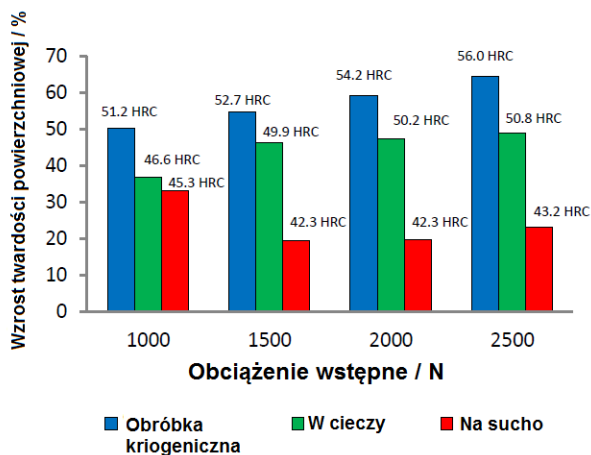
Bezpośrednio po toczeniu parametr chropowatości powierzchni stopu tytanu Ra miał wartość 1,31 μm ; po nagniataniu na sucho, przy chłodzeniu cieczą i przy chłodzeniu kriogenicznym parametr ten ulegał zmniejszeniu o odpowiednio 63,4%, 58,2% i 56,7% (Rys. 4).

Różnice między uzyskanymi parametrami Ra są stosunkowo nieduże, a najkorzystniejsza redukcja Ra podczas nagniatania miała miejsce w przypadku procesu nagniatania na sucho, co wynikało z faktu nagrzewania się w tym procesie powierzchni stopu tytanu, charakteryzującego się bardzo niską przewodnością cieplną. Wpływ wartości normalnej siły nagniatania w przedziale 1000–2500 N na chropowatość powierzchni stopu Ti-6Al-4V był niewielki [8].

Stwierdzono, że sposób chłodzenia i zastosowane siły nagniatania miały duży wpływ na twardość powierzchni i warstwy wierzchniej badanego stopu. Największy wzrost twardości powierzchni uzyskano po nagniataniu w warunkach kriogenicznych (64,2%), średni po nagniataniu z chłodzeniem cieczą (48,9%), a najmniejszy po nagniataniu na sucho (32,8%) (Rys. 5). Wzrost twardości i jego zróżnicowanie uzyskane w wyniku nagniatania w powyższych warunkach jest efektem dwóch konkurencyjnych mechanizmów zachodzących w WW materiału, a mianowicie mięknienia termicznego, największego w przypadku nagniatania na sucho i umocnienia poprzez zgniot. Umocnienie materiału rośnie ze zwiększaniem siły nagniatania wskutek wzrostu gęstości dyslokacji; największy wzrost twardości powierzchni stopu tytanu w zależności od normalnej siły nagniatania miał miejsce w przypadku procesu nagniatania kriogenicznego [8].

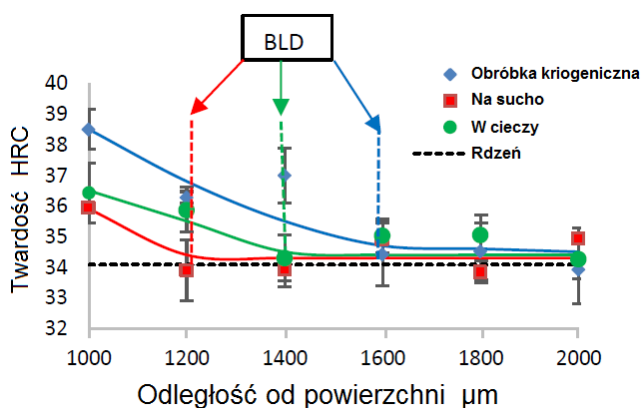


Rys. 4. Porównanie chropowatości powierzchni stopu tytanu po procesach nagniatania w różnych warunkach: na sucho, z chłodzeniem cieczą obróbkową i z chłodzeniem kriogenicznym, przy różnych siłach [8]



Rys. 5. Wzrost twardości powierzchni stopu tytanu po procesach nagniatania w różnych warunkach: na sucho, z chłodzeniem cieczą obróbkową i z chłodzeniem kriogenicznym, przy różnych siłach [8]

Głębokość warstw nagniecionych (*burnished layer depth* – BLD) w stopie Ti-6Al-4V dla różnych wariantów chłodzenia przy sile nagniatania 2500 N zaznaczona jest na rysunku 6; wyznaczono je na podstawie wyników pomiarów mikrotwardości HV 0,1 (przedstawionych na rysunku 6 w jednostkach HRC) wykonanych do głębokości 2 mm pod powierzchnią nagniataną. Za wartość BLD przyjęto tę głębokość warstwy nagniecionej, dla której twardość zbliżała się do twardości materiału w rdzeniu z dokładnością $\pm 1,1$ HRC. Stwierdzono, że nagniatanie przy ww. sile nagniatania metodą kriogeniczną, z chłodzeniem cieczą i na sucho, spowodowało powstanie warstw nagniecionych o różnych głębokościach, odpowiednio: 1,6; 1,4 i 1,2 mm.



Rys. 6. Zmiany mikrotwardości dla stopu tytanu po procesach nagniatania w różnych warunkach z zaznaczeniem głębokości nagniecionej [8]

Uzyskany w badaniach [8] duży wzrost twardości stopu Ti-6Al-4V po nagniataniu kriogenicznym na stosunkowo dużej głębokości pod powierzchnią oraz wyniki badań mikrostruktury wskazują, że zastosowany proces chłodzenia kriogenicznego miał istotny wpływ na dużego proces odkształcenia plastycznego (SPD). W związku z tym planowana jest kontynuacja badań właściwości stopu tytanu po nagniataniu SPD w warunkach kriogenicznych, szczególnie pod kątem zmian mikrostruktury (rozdrobienia ziarna) i naprężeń na różnych głębokościach pod powierzchnią [8].

4. NAGNIATANIE WSPOMAGANE OBRÓBKĄ CIEPLNO-CHEMICZNĄ

Procesy łączone w inżynierii powierzchni obejmujące obróbkę cieplną, deformację plastyczną WW oraz obróbkę cieplno-chemiczną stosowane są m.in. w celu zwiększenia twardości WW czy zmniejszenia współczynnika tarcia, co może wpływać na poprawę właściwości użytkowych narzędzi, zwłaszcza ich odporność na zużycie [21].

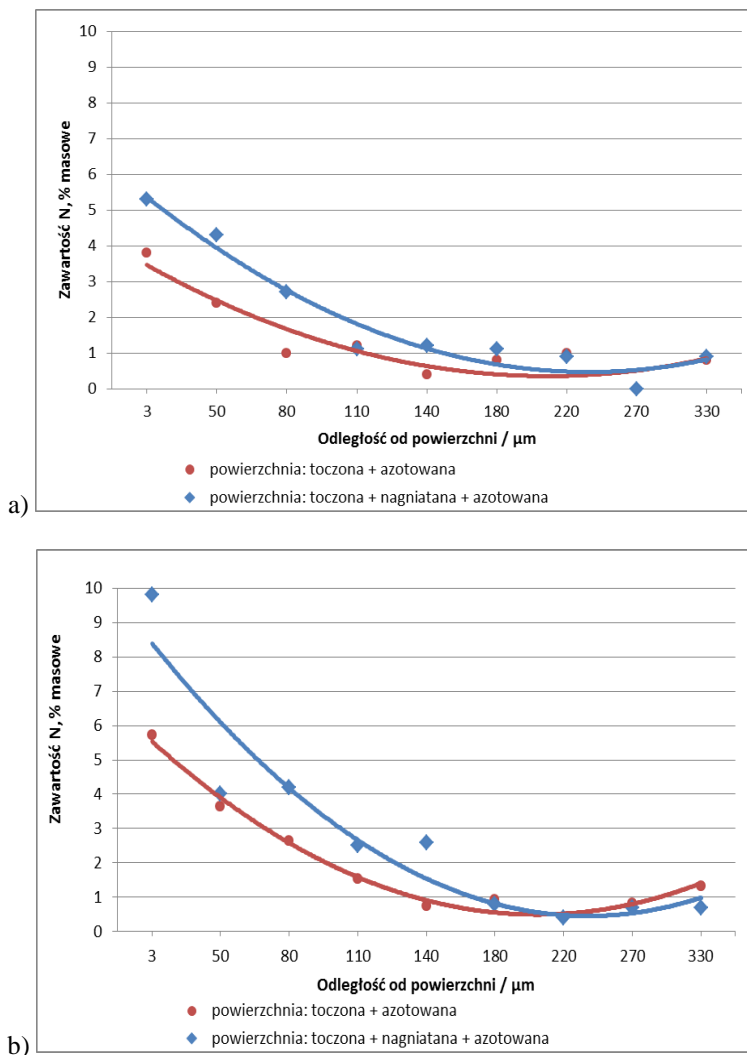
Do badań wybrano dwa gatunki wysokostopowych stali narzędziowych: *X153CrMoV12* (nazwa handlowa Sverker 21) oraz *Vanadis 6*. Oba materiały zostały zakupione bezpośrednio u producenta w Szwedzkiej hucie Böhler Uddeholm oraz dostarczone w postaci wałków. Obróbkę cieplną przeprowadzono zgodnie z zaleceniami producenta [22,23] oraz danymi literaturowymi [24,25], uzyskując twardość 60 ± 1 HRC.

W przypadku toczenia na twardo stosowano płytki z ostrzami z PCBN firmy Mitsubishi oznaczone symbolem NP-SNGA 120412GS2 MB730. Dla obu gatunków stali stosowano stałą głębokość skrawania $a_p = 0,2$ mm, natomiast posuw i prędkość skrawania wynosiły odpowiednio: Sverker 21- $f = 0,16$ mm/obr., $v_c = 100$ m/min., Vanadis 6- $f = 0,17$ mm/obr. $V_c = 150$ m/min.

Warunki procesu nagniatania ślizgowego kompozytem diamentowych z ceramiczną fazą wiążącą Ti_3SiC_2 [26,27], który jest wytwarzany w IZTW dobrano w oparciu o wcześniejsze badania optymalizacyjne [28]. Wyniki tych badań pozwoliły na określenie najkorzystniejszych parametrów wpływających na wygładzenie powierzchni nagniatanej przy posuwie $f = 0,02$ mm/obr. (wyznaczone siły nagniatania dla stali Sverker 21 i Vanadis 6, $F = 180$ N, $F = 160$ N).

W ramach badań przyjęto, że obróbka cieplno – chemiczna (azotowanie) zostanie przeprowadzona metodą NITREG w firmie przemysłowej o bogatym doświadczeniu w tym zakresie. Technologia ta wiąże się z wysoką powtarzalnością uzyskiwanych wyników oraz umożliwia wytwarzanie warstw o określonej budowie fazowej bez konieczności późniejszego szlifowania obrabianych elementów po procesie azotowania [29,30].

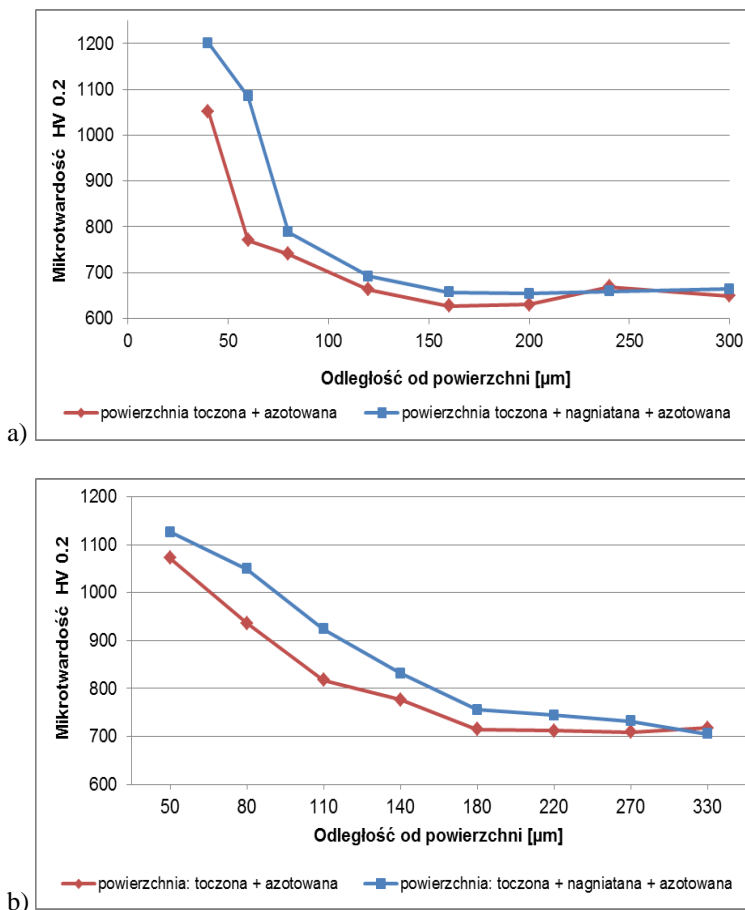
Analizy składu chemicznego w mikroobszarach przeprowadzono przy użyciu spektrometru rentgenowskiego EDS, stanowiącego wyposażenie skaningowego mikroskopu elektronowego typu JSM-6460LV. Analizy wykonywano na przekrojach badanych próbek. W ramach badań wykonano m.in. analizy jakościowe i ilościowe w mikroobszarach. Wyniki badań wykazały wyraźny wzrost zawartości azotu w warstwach wierzchnich próbek poddanych obróbce łączącej (toczenie-nagniatanie-azotowanie) zarówno dla stali Sverker 21 oraz Vanadis 6. Wyniki orientacyjnej zawartości azotu w odległości do ~ 300 μ m pod powierzchnią przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Orientacyjna zawartość azotu określona metodą EDS na zglądzie poprzecznym w zależności od odległości od powierzchni dla dwóch wariantów obróbki powierzchniowej stali: a) Sverker 21, b) Vanadis 6

Wykonano także pomiary mikrotwardości na zglądach poprzecznych za pomocą cyfrowego miernika twardości typu FM-7 firmy Future-Tech Corp. stosując obciążenie 1,962 N. Pomiarów dokonywano w kilku odległościach od powierzchni wałków do $\sim 300 \mu\text{m}$. Zestawione na rysunku 8 wyniki potwierdzają synergiczny efekt obróbki łączącej obejmującej toczenie, nagniatanie i azotowanie gazowe. Dla stali Sverker 21 (Rys. 8a), w odległości do $\sim 100 \mu\text{m}$ pod powierzchnią różnicę wynoszą ponad 150%. Podobny trend widoczny jest również na zamieszczonych na rysunku 8b rozkładach mikrotwardości dla stali

Vanadis 6. Z przedstawionych wyników również można dostrzec wyraźny wpływ obróbki nagniataniem poprzedzającej azotowanie na wzrost twardości WW sięgający na głębokość ~300 μm pod powierzchnią.



Rys. 8. Zmiany mikrotwardości w zależności od odległości od powierzchni określone dla dwóch wariantów obróbki powierzchniowej stali: a) Sverker 21, b) Vanadis 6

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione w artykule wyniki wykazały, że zastosowanie łączonych procesów nagniatania z innymi rodzajami obróbek wpływa na poprawę struktury geometrycznej powierzchni i właściwości WW metali i stopów, w szczególności takich jak mikrotwardość. Uzasadnia to dalsze rozwijanie obróbki nagniataniem jako łączonej z innymi rodzajami obróbek.

LITERATURA

- [1] PRZYBYLSKI W.: *Technologia obróbki nagniataniem*. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1987.
- [2] KORZYŃSKI M.: *Nagniatanie ślizgowe*. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 2007.
- [3] POŁOWSKI W.: *Nagniatanie*. Rozdział w Poradniku inżyniera, konstruktora i mechanika „Obróbka skrawaniem w praktyce” pod redakcją J. Stósa. Wydawnictwo Verlag Dashofer, Warszawa, 2008.
- [4] RADZIEJEWSKA J., KALITA W.: *Surface topography and contact stiffness after laser-mechanical treatment*. Proceedings of the 5th International Conference on ADVANCES IN PRODUCTION ENGINEERING. Warszawa 2010.
- [5] RADZIEJEWSKA J. (2012). *Application of Laser-Burnishing Treatment for Improvement of Surface Layer Properties*, CO2 Laser - Optimisation and Application, Dr. Dan C. Dumitras (Ed.), ISBN: 978-953-51-0351-6, InTech, DOI: 10.5772/38485. Available from: <http://www.intechopen.com/books/co2-laser-optimisation-and-application/application-of-laser-burnishing-treatment-for-improvement-of-surface-layer-properties>
- [6] TIAN Y., SHIN Y.C.: *Laser-assisted burnishing of metals*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 14–22.
- [7] LAUWERS B., KLOCKE F., KLINK A., TEKKAYA A.E., NEUGEBAUER R., MCINTOSH D.: *Hybrid processes in manufacturing*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 63, 2014, 561-583.
- [8] CAUDILL J., HUANG B., ARVIN C., SCHOOP J., MEYER K., JAWAHIR I.S.: *Enhancing the surface integrity of Ti-6Al-4V alloy through cryogenic burnishing*. 2nd CIRP 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI). Procedia CIRP 13 (2014) 243 – 248.
- [9] ŻAK K., GRZESIK W.: *Investigation of technological effects of ball burnishing after cryogenic turning of hard steel*. Advances in Manufacturing Science and Technology, vol. 38, No. 1, 2014.
- [10] JAWAHIR I.S., PU Z., YAN S., ROTELLA G., KAYNAK Y., LU T., DESHPANDE A., UMBRELLO D., DILLON O.W.: *Cryogenic processing of materials for enhanced product life, performance and sustainability*. Proc. of 15th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, Wollongong, Australia, 2012.
- [11] YANG S., PULEO D.A., DILLON O.W. Jr., JAWAHIR I.S.: *Surface layer modification in Co-Cr-Mo biomedical alloy from cryogenic burnishing*. 1st CIRP Conference on Surface Integrity (CSI). Procedia Engineering 19 (2011), 383-388.
- [12] YANG S.: *Cryogenic burnishing of Co-Cr-Mo biomedical alloy for enhanced surface integrity and improved wear performance*. Doctoral Dissertation (2012) University of Kentucky. Theses and Dissertations-Mechanical Engineering. Paper 10. http://uknowledge.uky.edu/me_etds/10
- [13] WRÓBLEWSKI G., SKALSKI K.: *Properties of surface layer generated by new combined process of burnishing and nitriding*. Surface Engineering. Vol. 22, No. 2, 2006, 138-146.
- [14] KIKUCHI S., KOMOTORI J.: *Effect of fine particle peening treatment prior to nitriding on fatigue properties of AISI 4135 steel*. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering. Vol. 2, No. 11, 2008, 1444-1450.
- [15] ŁUPICKA O., WARCHOLIŃSKI B.: *Kształtowanie warstwy wierzchniej w połączonych procesach kulowania i azotowania na przykładzie stali 40HM (42CrMo4)*. Inżynieria Powierzchni 4 – 2011.
- [16] HUUKI J., LAAKSO S. VA : *Integrity of surface finished with ultrasonic burnishing*. Proc IMech Part B: J Engineering Manufacture, 227 (I) 45-53, 2012.
- [17] GRAS G.G., TRAVIESO-RODRIGUEZ J.A., GONZALES-ROJAS H., NAPOLES-ALBERRO A., CARILLO F., DESSEIN G.: *Study of a ball-burnishing vibration-assisted tool*. Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology. Vol.17, No. 1, 2013, ISSN 2303-4009 (on line), pp 49-53.
- [18] EL-TAWHEEL T.A., EBEID S.J.: *Effect of hybrid electrochemical smoothing–roller burnishing process parameters on roundness error and micro-hardness*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 42, Issue 7-8, 2009, pp 643-655.
- [19] NOWICKI B., PODOLAK-LEJTAS P.: *Investigations of the effect with burnishing process on the condition of the surface layer*. Advances in Manufacturing Science and Technology, vol. 32, No. 4, 2008.
- [20] YAN B.H., LIN Y.C., HUANG F.Y.: *Surface modification of Al-Zn-Mg alloy by combined electrical discharge machining with ball burnish machining*. Int. Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 925-934.
- [21] ZEGHNI A.E., HASHMI M.S.J.: *The Effect of coating and nitriding on the wear behaviour of tool steel*. Journal of Materials Processing Technology, 155-156 (2004) 1918 – 1922.
- [22] MATERIAŁY INFORMACYJNE FIRMY UDDEHOLM: *Uddeholm Vanadis® 6 Brochure*, Edition 4, 05.2011, pp. 1-10.
- [23] MATERIAŁY INFORMACYJNE FIRMY UDDEHOLM: *Uddeholm Sverker® 21 Brochure*, Edition 8, 72.2013, pp. 1-12.

- [24] BERKOWSKI L., BOROWSKI L.: *Wpływ struktury na skutki azotowania chromowych stali ledeburytycznych. Część III: Warunki obróbki cieplnej stali NC11LV*. Obróbka Plastyczna Metali, t. XVIII nr 3, 2007.
- [25] JURČI P.: *Structural changes in cr-v ledeburitic steel during austenitizing and quenching*. Materials Engineering, Vol. 17, 2010, No. 1
- [26] JAWORSKA L., STOBIEŃSKI L., TWARDOWSKA A., KRÓLICKA D.: *Preparation of materials based on Ti-Si-C systems using high temperature-high pressure method*. Journal of Materials Processing Technology (162-163) 2005, 184-189.
- [27] JAWORSKA L., SZUTKOWSKA M., MORGIEL J., STOBIEŃSKI L., LIS J.: *Ti₃SiC₂ as a bonding phase in diamond composites*. Journal of Materials Science Letters (20), 2001, 1783-1786.
- [28] TOBOŁA D., RUSEK P., POŁOWSKI W., CZECHOWSKI K.: *Badania nad dobozem warunków gładkościowego nagniatania ślizgowego stali narzędziowych konwencjonalnej i proszkowej*. Obróbka skrawaniem interakcja proces-obrabiarka; Szkoła Obróbki Skrawaniem nr 7, Mierzęcin, 2013, s. 185-192 (dysk CD - Mechanik 2013, R.86, nr 8-9). Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2013.
- [29] MAŁDZIŃSKI L.: *Termodynamiczne, kinetyczne i technologiczne aspekty wytwarzania warstwy azotowanej na żelazie i stalach w procesach azotowania gazowego*. Politechnika Poznańska Rozprawy, nr 373, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2002.
- [30] WENDLAND J.: *Kształtowanie właściwości użytkowych spiekanych materiałów metalowych poprzez regulowane azotowanie gazowe*. Praca doktorska 2014. Politechnika Poznańska.