



Wpływ kulowania na strukturę, mikrotwardość i naprężenia własne stali austenitycznej 1.4539

BARBARA NASIŁOWSKA, ZDZISŁAW BOGDANOWICZ,
MAREK BRZEZIŃSKI¹, GRZEGORZ MOŃKA¹, DARIUSZ ZASADA²

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn,
²Wydział Nowych Technologii i Chemii, Katedra Zaawansowanych Materiałów i Technologii,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2,
nasilowska.barbara@gmail.com, zbogdanowicz@wat.edu.pl, dzasada@wat.edu.pl,
¹Instytut Mechaniki Precyzyjnej, 01-796 Warszawa, ul. Duchnicka 3,
marekbrze@imp.edu.pl, monka@imp.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono wpływ kulowania pneumatycznego (*shot peeningu*) na strukturę, mikrotwardość i naprężenia własne próbek ze stali austenitycznej 1.4539. Badania wykazały umocnienie warstwy wierzchniej i wytworzenie naprężeń własnych ściskających w warstwach podpowierzchniowych kulowanych elementów.

Słowa kluczowe: stal austenityczna 1.4539, naprężenia własne, metoda Waismana-Phillipsa
DOI: 10.5604/12345865.1157224

1. Wstęp

Pod wpływem kulowania (pneumatycznego) zachodzą w materiale zmiany powodujące odpowiednio odkształcenia plastyczne i sprężyste przyczyniające się do powstania zmian w strukturze, mikrotwardości i naprężeniach własnych.

W procesie kulowania następuje umocnienie warstwy wierzchniej obrabianego materiału wywołane zgniotem powierzchniowym i objawiające się przyrostem mikrotwardości.

Badania naprężeń własnych pierwszego rodzaju (σ_1) przeprowadzono metodą Waismana-Phillipsa polegającą na równoczesnym pomiarze zmian strzałki ugięcia próbki i usuwaniu kolejnych warstw materiału metodą trawienia elektrolitycznego.

Wyniki pomiarów strzałki ugięcia próbki w funkcji grubości usuwanych warstw stanowią podstawę do obliczania naprężeń własnych.

Naprężenia własne pierwszego rodzaju to naprężenia równoważące się w obszarach porównywalnych z wymiarami całego ciała [1].

Celem naukowym badań było uzupełnienie obecnego stanu wiedzy dotyczącego struktury i naprężeń własnych kulowanej powierzchni stali austenitycznej 1.4539 [2].

2. Metodyka badań

Kulowanie powierzchni próbek ze stali 1.4539 zostało przeprowadzone w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie, metodą pneumatyczną, na stanowisku do kulowania typu PEEN-IMP, z zastosowaniem śrutu stalowego o średnicy 0,8 mm (twardość 640 HV) przy ciśnieniu powietrza 0,5 MPa. Czas trwania ekspozycji wynosił 6 min. Intensywność kulowania określona przy użyciu płytki Almena typu AI wyniosła $f_A = 0,25$ mm, a pokrycie powierzchni kulowanej stanowiło 100%.

2.1. Metalografia

Zainkludowane próbki poddano szlifowaniu na papierach ściernych o gradacji kolejno: 240, 500, 1000, 1500, 2000 i 4000 oraz wypolerowano za pomocą sukna polerskiego i zawiesiny diamentowej o wielkości ziarna 3, 0,1, 0,025 μm .

Przedstawione w artykule zdjęcia mikrostruktury wykonano z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego marki Quanta 3D FEG firmy FEI.

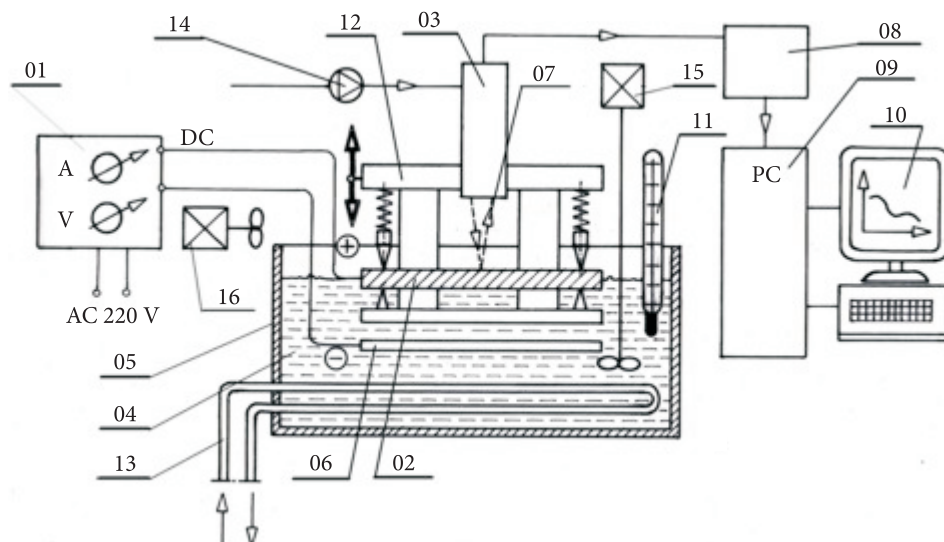
2.2. Pomiary mikrotwardości

Pomiarów mikrotwardości dokonano za pomocą twardościomierza Shimadzu-Dorenst typ „M” zgodnie z normą [N1] przy obciążeniu wgłębnika 50 G (HV 0,05). Badania przeprowadzono na próbkach przygotowanych jak do metalografii.

2.3. Pomiary naprężeń własnych

Do określenia wartości naprężeń własnych zastosowano metodę (Waismana-Phillipsa) usuwania warstw [3, 4], polegającą na pomiarze strzałki ugięcia trawionej próbki o wymiarach $100 \times 10 \times 5$ mm, podpartej na dwóch punktowych podporach w czasie elektrolitycznego trawienia (rys. 1) [5]. Trawieniu elektrolitycznemu podlega powierzchnia próbki, zanurzona w roztworze chemicznym ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O}$) do połowy grubości, natomiast boczne powierzchnie próbki są zabezpieczone przed trawieniem. W wyniku ciągłego trawienia następuje zmiana strzałki ugięcia próbki w funkcji odległości od powierzchni. Odształcanie próbki na długości pomiarowej

mierzone jest laserowym czujnikiem (typu FT 50 RLA-20f-my SENSOPART). Uzyskane wyniki strzałki ugięcia próbki zapisywane są na bieżąco w programie komputerowym, z krokiem pomiaru np. co 10 s, w łącznym czasie usuwania warstw materiału próbki wynoszącym około 18 000 s (5 h).



Rys. 1. Schemat stanowiska do pomiaru naprężeń metodą Waismana-Phillipsa w IMP. Oznaczenia: 01 — stabilizowany zasilacz prądu stałego; 02 — badana próbka (anoda); 03 — laserowy czujnik położenia; 04 — aktywna kąpiel chemiczna; 05 — zbiornik kąpeli; 06 — katoda ze stali kwasoodpornej; 07 — promień lasera; 08 — przetwornik analogowo-cyfrowy; 09 — komputer typu PC ze specjalistycznym oprogramowaniem; 10 — monitor i klawiatura; 11 — miernik temperatury; 12 — mocowanie górne próbki z regulacją położenia pionowego; 13 — układ wodnego chłodzenia kąpeli chemicznej; 14 — pompka powietrza; 15 — mieszadło kąpeli; 16 — wentylator

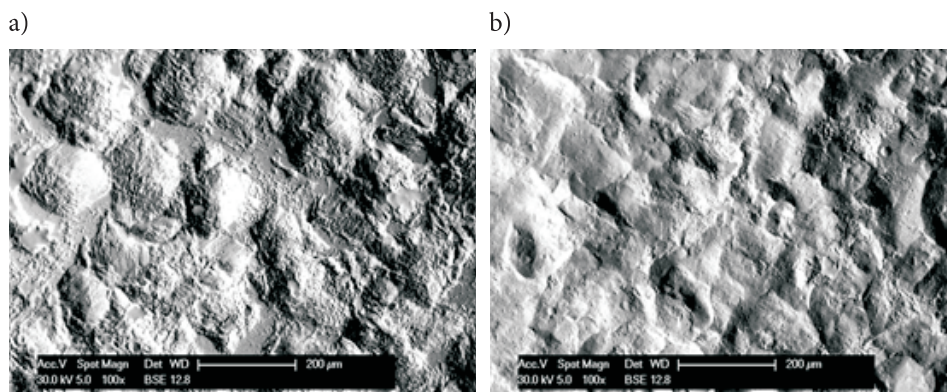
3. Przedmiot badań

Badaniom podlegały próbki ze stali austenicznej 1.4539 (o zaw. proc. Ni 24-26, Cr 19-21, Mo 4-5, Cu 1,2-2,0, Mn \leq 2,0, N \leq 0,15, Si \leq 0,7, P \leq 0,030, S \leq 0,010, C \leq 0,02) o strukturze czysto austenicznej, stosowanej w budownictwie, rafineriach [6], energetyce jądrowej [7] oraz w przemyśle chemicznym. Badane elementy o wymiarach $100 \times 10 \times 5$ mm zostały wycięte metodą *Waterjet*.

4. Wyniki badań

4.1. Struktura i mikrotwardość

W wyniku kulowania badanych elementów topografia powierzchni nie uległa znacznym zmianom (rys. 2a, b), chropowatość powierzchni przed kulowaniem wyniosła $R_a = 3,9 \mu\text{m}$, $R_{y5} = 18,53 \mu\text{m}$, zaś po kulowaniu $R_a = 3,98 \mu\text{m}$ i $R_{y5} = 18,77 \mu\text{m}$.



Rys. 2. Topografia powierzchni stali 1.4539 przed kulowaniem (a) i po kulowaniu (b)

Próbki do badań metalograficznych (SEM) dla materiału w stanie dostawy wykazały deformację ziaren w warstwie wierzchniej do głębokości ok. $150 \mu\text{m}$ powstałą w efekcie walcowania (rys. 3a i 3b). Natomiast badania struktury (SEM) przeprowadzone po kulowaniu wykazały deformację ziaren austenitu wywołaną zgniotem warstwy wierzchniej do głębokości $350 \mu\text{m}$ (rys. 3b i 3c).

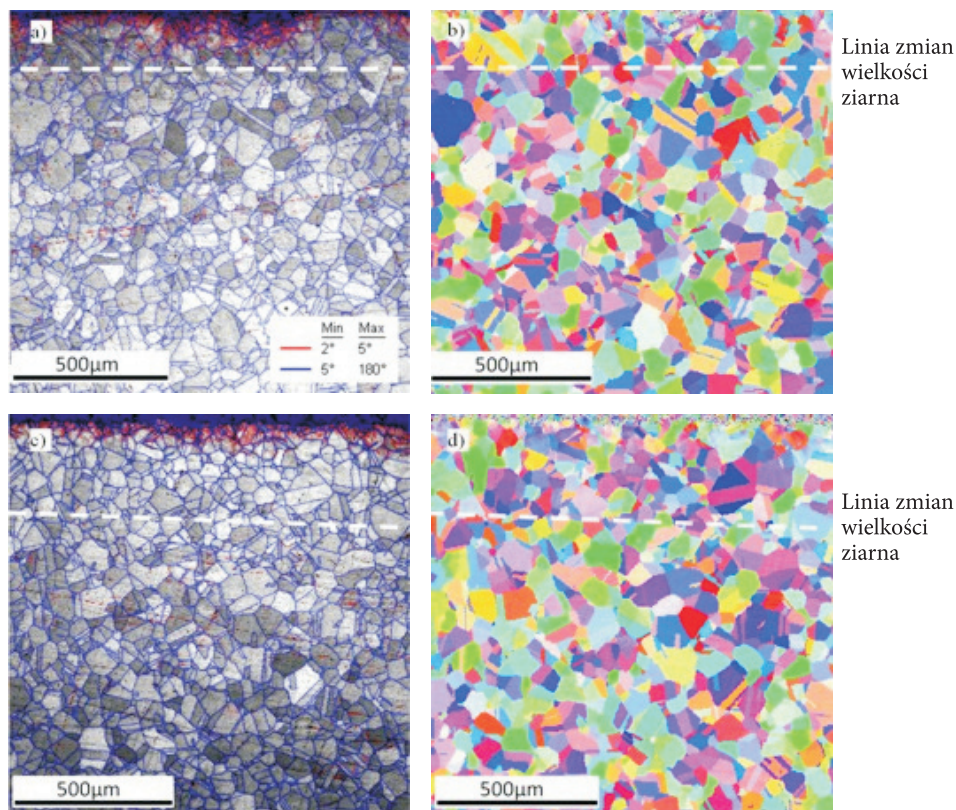
Na rysunkach 3a i 3c zostały przedstawione granice niskokątowe o pośrednim stopniu uporządkowania zaznaczone kolorem czerwonym oraz granice wysokokątowe o bezpośrednim stopniu uporządkowania powyżej 5° , zaznaczone kolorem niebieskim. Badania SEM (*Scanning Electron Microscope*) z wykorzystaniem detektora EBSD (*Electron Backscatter Diffraction*) wykazały czysty austenit (rys. 3b i 3d).

Zmianę mikrotwardości próbek w stanie surowym i po kulowaniu przedstawiono na wykresie (rys. 4). Mikrotwardość wzrasta w kierunku powierzchni co jest spowodowane fabryczną obróbką walcowaniem (w przypadku elementów niekulowanych) i walcowaniem wraz z kulowaniem (w przypadku elementów kulowanych).

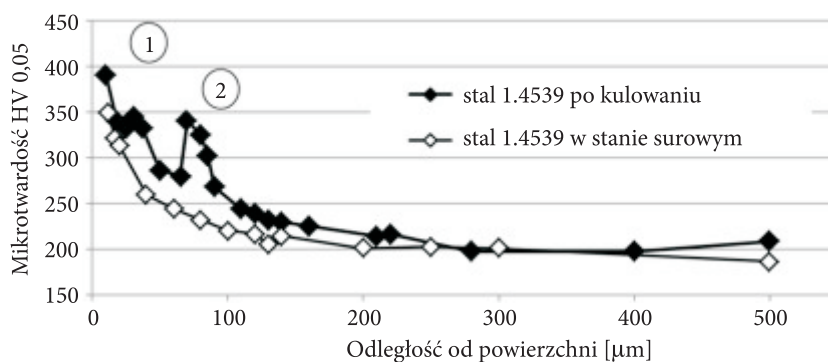
Wzrost mikrotwardości jest wskaźnikiem umocnienia warstwy wierzchniej wywołanym zgniotem powierzchniowym po procesach walcowania oraz kulowania.

W wyniku obróbki plastycznej-walcowania mikrotwardość materiału rodzimego (MR) przed kulowaniem wynosiła ok. 350HV (na głębokości $20 \mu\text{m}$). Natomiast po kulowaniu mikrotwardość ta wzrosła do ok. 400HV . Po kulowaniu uwidaczniają

się na rozkładzie mikrotwardości dwa obszary o największej mikrotwardości, jeden przy powierzchni (1) oraz drugi pod powierzchnią (punkt Bielajewa) (2).



Rys. 3. Mikrostruktura powierzchni zładu poprzecznego stali austenitycznej warstwy wierzchniej przed kulowaniem (a), (b) i po kulowaniu (c), (d)

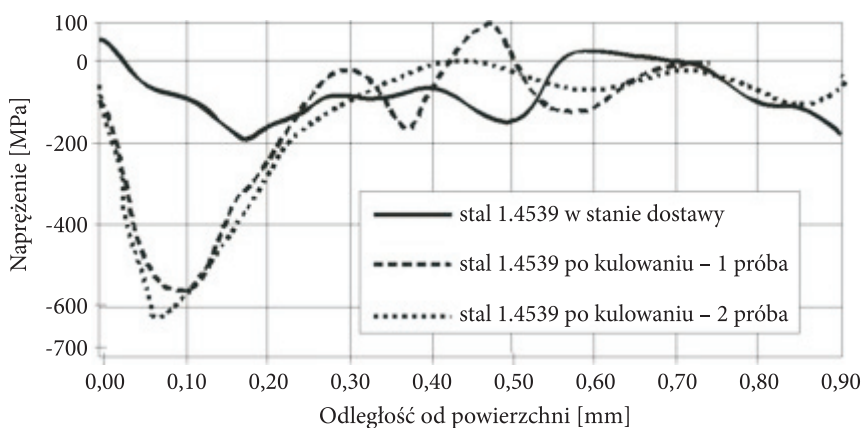


Rys. 4. Mikrotwardość powierzchni zładu poprzecznego przed kulowaniem i po kulowaniu

4.2. Badania naprężeń własnych metodą Waismana-Phillipsa

Podczas kulowania występuje częściowa zamiana energii kinetycznej śrutu na pracę, prowadząca do powstania odkształceń plastycznych oraz sprężystych występujących pod uplastycznioną warstwą. Głębiej położone warstwy metalu nie pozwalają na swobodne i pełne rozprzestrzenienie się odkształceń plastycznych, co w efekcie powoduje powstanie naprężeń ściskających [1].

Przeprowadzone badania wykazały występowanie naprężeń ściskających w warstwach podpowierzchniowych kulowanych elementów (rys. 5).



Rys. 5. Rozkład naprężeń pierwszego rodzaju (σ_1) w warstwie wierzchniej próbek w zależności od głębokości od powierzchni

Maksymalne wartości naprężeń ściskających występowały na głębokości 0,08 mm pod powierzchnią próbki w strefie największego umocnienia (punkt Bielajewa) i wynosiły ok. -600 MPa. Znaczące zmiany w przyroście naprężeń własnych ściskających, kulowanych elementów w stosunku do elementów niekulowanych (stan materiału z dostawy) wystąpiły do głębokości ok. 0,3 mm. Maksymalne naprężenia własne ściskające dla elementów niekulowanych wynosiły -200 MPa w analizowanym obszarze.

5. Wnioski końcowe

Badania struktury stali austenitycznej 1.4539 po kulowaniu wykazały deformację ziaren austenitu wywołaną zgniotem warstwy wierzchniej do głębokości ok. 350 μm . Elementy ze stali 1.4539 warto poddawać procesowi kulowania dzięki czemu uzyskuje się korzystne zmiany naprężeń własnych i mikrotwardości.

W świetle przedstawionych badań można sformułować następujące wnioski:

- a) chropowatość powierzchni uległa nieznacznym zmianom i wynosiła:
 - przed kulowaniem $R_a = 3,9 \mu\text{m}$, $R_{y5} = 18,53 \mu\text{m}$, zaś
 - po kulowaniu $R_a = 3,98 \mu\text{m}$ i $R_{y5} = 18,77 \mu\text{m}$,
- b) zmiana wielkości ziaren w warstwie wierzchniej występowała do głębokości
 - ok. $150 \mu\text{m}$ przed kulowaniem,
 - ok. $350 \mu\text{m}$ po kulowaniu,
- c) mikrotwardość elementów kulowanych na głębokości ok. $20 \mu\text{m}$ od powierzchni próbki wyniosła ok. 400 HV,
- d) powstały naprężenia ściskające do głębokości ok. 0,3 mm, z maksymalną wartością ok. -600 MPa na głębokości ok. 0,08 mm.

Praca wykonana w ramach studiów doktoranckich.

Artykuł wpłynął do redakcji 30.09.2014 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 5.12.2014 r.

LITERATURA

- [1] PIEKARSKI R., *Zastosowanie metod prądów wirowych do pomiaru naprężeń własnych wywołanych wybranymi obróbkami powierzchniowymi*, praca doktorska, WIP PW, Warszawa, 2001.
- [2] BOGDANOWICZ Z., JÓZWIK P., NASIŁOWSKA B., ZASADA D., *Struktura, mikrotwardość i właściwości użytkowe połączeń spawanych wykonanych ze stali austenitycznej 1.4539 metodą TIG i wiązką lasera*, XXV Sympozjum „Zmęczenie i Mechanika Pękania”, 2014.
- [3] WAISMAN J.L., PHILLIPS A., *Simplified measurement of residual stresses*, Experimental Stress Analysis, Proc. SESA, XI (2), 1952, 29-44.
- [4] ARASIMOWICZ A., PIEKARSKI R., *Pomiar naprężeń własnych metodą usuwania warstw w technologicznych warstwach wierzchnich*, Postępy Nauki i Techniki, 6, 2011.
- [5] BRZEZINSKI M., LUTZE R., MOŃKA G., NEJMAN M., ŻULIŃSK P., *Uruchomienie stanowiska do pomiarów naprężeń metodą usuwania warstw „Waisman-Phillips”*, 12.1.01.444 IMP, praca niepublikowana, 2013.
- [6] BURAKOWSKI T., NAPADŁEK W., *Umacnianie udarowe metali*, Inżynieria Materiałowa, vol. 29, nr 6, 2008, 1044-1046.
- [7] FEDORYSZYN A., PIOSIK T., RZADKOSZ S., STASZCZAK L., ZYZAK P., *Efekty obróbki powierzchniowej strumieniem śrutu*, XII Konferencja Odlewnicza Technical, 2010.
- [8] FU P., JIANG CH., *Residual stress relaxation and micro-structural development of the surface layer of 18CrNiMo7-6 steel after shot peening during isothermal annealing*, Materials and Design, 56, 2014, 1034-1038.
- [9] N1. PN-EN ISO 6507-1:2007 — „Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa”.

B. NASIŁOWSKA, Z. BOGDANOWICZ, M. BRZEZIŃSKI,
G. MOŃKA, D. ZASADA

**Shot-peening effect on the structure, microhardness, and compressive stresses
of the austenitic steel 1.4539**

Abstract. This article presents shot-peening effect on the structure, microhardness, and compressive stresses of the austenitic steel 1.4539. The research shows strengthening of the top layer and the formation of compressive stresses in the subsurface layers of the shot-peening elements.

Keyword: austenitic steel 1.4539, residual stresses, Waisman-Phillips's method