

The influence of vibratory shot peening on the selected properties of the surface layer elements made of cast iron

Wpływ nagniatania wibracyjnego elementów żeliwnych na wybrane właściwości warstwy wierzchniej

KAZIMIERZ ZALESKI
AGNIESZKA SKOCZYLAS*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.11.101>

The results of experimental investigations influence of vibratory shot peening on surface roughness and residual stress of spheroidal graphite cast iron objects were presented. The surfaces before vibratory shot peening were milled using different feed. After vibratory shot peening surface roughness $Ra = 0.7 \div 0.9 \mu\text{m}$ was obtained and in surface layer compressive residual stress, with the maximum (absolute) value from 170 MPa to 330 MPa at a depth $0.4 \div 0.7 \text{ mm}$ have been formed. For accepted vibratory shot peening condition it was recommended to use time of about 8 minutes.

KEYWORDS: spheroidal graphite cast iron, vibratory shot peening, surface layer, surface roughness, residual stress

Przedstawiono wyniki badania wpływu czasu nagniatania wibracyjnego elementów z żeliwa sferoidalnego na chropowatość powierzchni i rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej nagniatanych przedmiotów. Powierzchnie przewidziane do nagniatania frezowano z posuwem o różnej wartości. W wyniku nagniatania uzyskano chropowatość powierzchni w granicach $Ra = 0,7 \div 0,9 \mu\text{m}$, a w warstwie wierzchniej ukształtowano ściskające naprężenia własne o maksymalnej (bezwzględnej) wartości od 170 MPa do 330 MPa na głębokości $0,4 \div 0,7 \text{ mm}$. Dla przyjętych warunków nagniatania zalecono stosowanie czasu nagniatania ok. 8 min.

SŁOWA KLUCZOWE: żeliwo sferoidalne, nagniatanie wibracyjne, warstwa wierzchnia, chropowatość powierzchni, naprężenia własne

Wprowadzenie

Żeliwo można zaliczyć do materiałów odlewniczych szeroko stosowanych w budowie maszyn. Dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi i plastycznymi charakteryzuje się żeliwo sferoidalne. Wykonuje się z nich m.in. elementy maszyn – takie jak wałki rozrządu czy koła zębate – narażone w czasie eksploatacji na zmienne obciążenia.

Wytrzymałość zmęczeniowa elementów maszyn w dużym stopniu zależy od stanu ich warstwy wierzchniej, a zwłaszcza od ukształtowanych w tej warstwie naprężeń własnych. Ze względu na wytrzymałość zmęczeniową korzystne są ściskające naprężenia własne, powstające w wyniku obróbki nagniataniem. Kształtowanie ściskających naprężeń własnych jest związane ze wzrostem gęstości defektów struktury krystalicznej w warstwie wierzchniej nagniatanych przedmiotów, co potwierdzają wyniki badań przeprowadzonych technikami anihilacyjnymi na różnych gatunkach stali [10].

Obróbka nagniataniem może być przeprowadzona metodami statycznymi i dynamicznymi [4]. Nagniatanie statyczne żeliwa, realizowane za pomocą nagniataków wyposażonych w elementy toczne (rolki, krążki, kulki), powodowało zmniejszenie chropowatości powierzchni,

zużycia tribologicznego i współczynnika tarcia [2, 5]. Poprawę właściwości warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów uzyskano w wyniku nagniatania żeliwa za pomocą głowic odśrodkowych [1, 5]. Do nagniatania elementów maszyn o złożonym kształcie na ogół stosuje się nagniatanie dynamiczne rozproszone, które może być wykonywane za pomocą strumienia elementów nagniatających, uderzającego w obrabianą powierzchnię (nagniatanie strumieniowe), albo poprzez umieszczenie obrabianych przedmiotów i luźnych kulek nagniatających w drgającej komorze roboczej (nagniatanie wibracyjne). Wzrost wytrzymałości zmęczeniowej i ograniczenie występowania wad odlewniczych żeliwa sferoidalnego wskutek nagniatania strumieniowego potwierdzono w pracy [3]. Dotychczasowe badania własne nad wpływem nagniatania wibracyjnego na właściwości warstwy wierzchniej i trwałość zmęczeniową prowadzono głównie na próbkach stalowych i ze stopu tytanu [7–9]. Wyniki badań wpływu nagniatania wibracyjnego na chropowatość powierzchni i twardość korpusów z żeliwa szarego przedstawiono w pracy [6].

Celem niniejszego artykułu jest omówienie wpływu czasu nagniatania wibracyjnego próbek z żeliwa sferoidalnego na chropowatość powierzchni i rozkład naprężeń własnych.

Metodyka badań

Badania przeprowadzono na próbkach o wymiarach $4 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, wykonanych z żeliwa sferoidalnego EN-GJS-400-15. Przed nagniataniem próbki frezowano za pomocą głowicy o średnicy 100 mm, z ostrzami z węgla spiekane K10. Głębokość skrawania a_p była równa 1 mm, a prędkość skrawania $v_c = 90 \text{ m/min}$. Posuw f_z był parametrem zmiennym i wynosił 0,05; 0,13 i 0,26 mm/ostrze.

W celu przeprowadzenia obróbki nagniataniem próbek mocowano do dna komory roboczej, która była posadowiona na wibratorze kinematycznym, a następnie do komory wsypywano stalowe kulki nagniatające. Podczas pracy wibratora kulki uderzały w powierzchnie próbek, powodując umocnienie warstwy wierzchniej. Parametry nagniatania wibracyjnego były następujące:

- amplituda drgań wibratora $a = 58 \text{ mm}$,
- częstotliwość drgań wibratora $\nu = 7 \text{ Hz}$,
- średnica kulek nagniatających $D = 6 \text{ mm}$,
- czas nagniatania $\tau = 0,5; 2; 8; 24 \text{ min}$.

Badania chropowatości i topografii powierzchni przeprowadzono profilometrem 3D T8000 RC 120-400 firmy Hommel-Etamic. Mierzono średnią rzędną profilu Ra oraz największą wysokość profilu chropowatości Rz . Chropowatość mierzono w kierunku prostopadłym do śladów obróbki po frezowaniu.

* Dr hab. inż. Kazimierz Zaleski, prof. PL, k.zaleski@pollub.pl, <https://orcid.org/0000-0002-3757-3676> – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, Lublin, Polska
Dr inż. Agnieszka Skoczyłas, a.skoczyłas@pollub.pl, <https://orcid.org/0000-0002-7707-3406> – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, Lublin, Polska

Naprężenia własne określano na podstawie odkształceń próbki podczas usuwania kolejnych warstw materiału, w których te naprężenia występują. Warstwy materiału usuwano metodą trawienia chemicznego w 4-procentowym roztworze kwasu azotowego. Sporządzono wykresy obrazujące rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni – na tej podstawie określano bezwzględną wartość maksymalną ściskających naprężeń własnych $|\sigma_{\max}|$ oraz głębokość zalegania naprężeń ściskających g_{σ} . Poszczególne pomiary zostały powtórzone pięciokrotnie. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów obliczano wartości średnie i odchylenie standardowe.

Wyniki badań

Wyniki badań chropowatości powierzchni po frezowaniu ze zmiennym posuwem podano w tabelicy. Zgodnie z przewidywaniami wraz ze wzrostem posuwu f_z rosną wartości parametrów Ra i Rz .

TABLE. Influence of feed f_z on surface roughness (Ra , Rz) after milling

TABLICA. Wpływ posuwu f_z na chropowatość powierzchni (Ra , Rz) po frezowaniu

f_z [mm/ostrze]	0,05	0,13	0,26
Ra [μm]	0,68±0,09	0,95±0,13	1,55±0,14
Rz [μm]	4,08±0,79	5,71±0,89	8,58±0,66

Na rys. 1 przedstawiono wpływ czasu nagniatania wi-bracyjnego próbek frezowanych z różnym posuwem na parametry Ra i Rz chropowatości powierzchni.

Chropowatość powierzchni próbek frezowanych z posuwem $f_z = 0,05$ mm/ostrze po nagniataniu przez 0,5 min wzrosła o 30÷40%. Wydłużenie czasu nagniatania do 2 min spowodowało zmniejszenie chropowatości powierzchni do wartości bliskich chropowatości przed nagniataniem, natomiast dalsze wydłużenie czasu nagniatania nie miało znaczącego wpływu na chropowatość powierzchni (rys. 1a).

W przypadku próbek frezowanych z posuwem $f_z = 0,13$ mm/ostrze wydłużenie czasu nagniatania do 8 min (rys. 1b) spowodowało zmniejszenie zarówno parametru Ra (o 21%), jak i Rz (o 30%). Wyraźniejsze zmiany chropowatości powierzchni dotyczyły nagniatania próbek frezowanych z posuwem $f_z = 0,26$ mm/ostrze (rys. 1c). Po upływie 8 min nagniatania wartość parametru Ra uległa zmniejszeniu o 51%, a parametru Rz – o 55%. Wydłużenie czasu nagniatania do 24 min nie wpłynęło na parametry chropowatości powierzchni.

Topografię powierzchni próbek po frezowaniu i nagniataniu wi-bracyjnym przedstawiono na rys. 2. Na powierzchni frezowanej (rys. 2a) widać regularne ślady kolejnych przejść ostrzy skrawających (mała krzywizna śladów jest związana z dużym promieniem głowicy frezowej). Można też zauważyć niewielkie wykruszenia obrabianego materiału. Po nagniataniu wi-bracyjnym nastąpiło całkowite usunięcie mikronierówności utworzonych w czasie frezowania. Wskutek uderzeń kulek nagniatających na obrobionej powierzchni powstały wgłębienia charakterystyczne dla punktowej kierunkowości struktury geometrycznej (rys. 2b).

Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek po frezowaniu z posuwem $f_z = 0,26$ mm/ostrze i nagniataniu wi-bracyjnym przez 8 min przedstawiono na rys. 3. W warstwie wierzchniej próbek frezowanych zostały ukształtowane niewielkie ściskające naprężenia własne na głębokości ok. 0,1 mm. Nagniatanie wi-bracyjne spowodowało znaczący wzrost wartości bezwzględnej ściskających naprężeń własnych i głębokości ich zalegania.

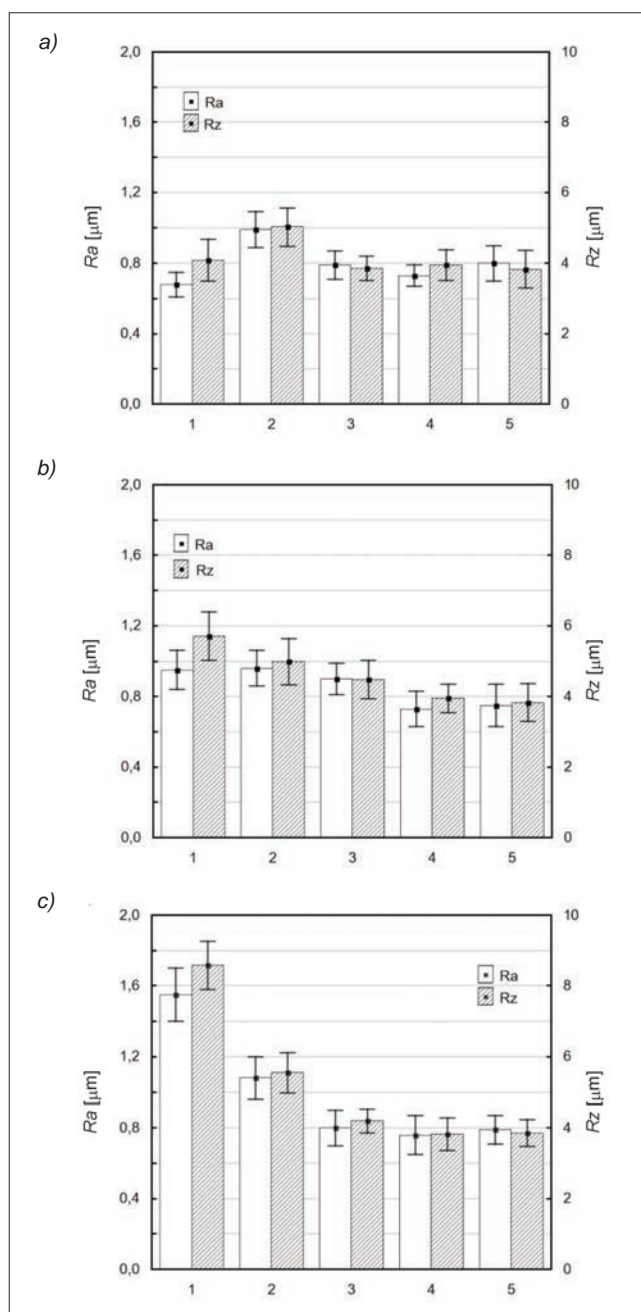


Fig. 1. Influence of vibratory shot peening time on surface roughness of milled samples with feed: a) $f_z = 0,05$ mm/cutting edge, b) $f_z = 0,13$ mm/cutting edge, c) $f_z = 0,26$ mm/cutting edge (designations: 1 – milled samples, 2 – samples after vibratory shot peening during 0,5 min, 3 – samples after vibratory shot peening during 2 min, 4 – samples after vibratory shot peening during 8 min, 5 – samples after vibratory shot peening during 24 min)

Rys. 1. Wpływ czasu nagniatania na chropowatość powierzchni próbek frezowanych z posuwem: a) $f_z = 0,05$ mm/ostrze, b) $f_z = 0,13$ mm/ostrze, c) $f_z = 0,26$ mm/ostrze (oznaczenia: 1 – próbki frezowane, 2 – próbki nagniatane w czasie 0,5 min, 3 – próbki nagniatane w czasie 2 min, 4 – próbki nagniatane w czasie 8 min, 5 – próbki nagniatane w czasie 24 min)

Z wydłużaniem czasu nagniatania następuje wzrost zarówno bezwzględnej wartości maksymalnych ściskających naprężeń własnych $|\sigma_{\max}|$, jak i głębokości ich zalegania g_{σ} . Ten wzrost jest bardziej widoczny w zakresie krótszych czasów nagniatania, np. wydłużenie czasu nagniatania z 0,5 min do 8 min spowodowało wzrost $|\sigma_{\max}|$ o 60%, a wydłużenie tego czasu z 8 min do 24 min – 7-procentowe zwiększenie $|\sigma_{\max}|$, co mieści się w granicach błędów pomiaru. Podobne zależności można zauważyć również dla głębokości zalegania ściskających naprężeń własnych g_{σ} .

Fig. 2. Topography of sample surfaces: a) after milling with feed $f_z = 0.26$ mm/cutting edge, b) after vibration shot peening during 24 min
Rys. 2. Topografia powierzchni próbek: a) po frezowaniu z posuwem $f_z = 0,26$ mm/ostrze, b) po nagniataniu wibracyjnym w czasie 24 min

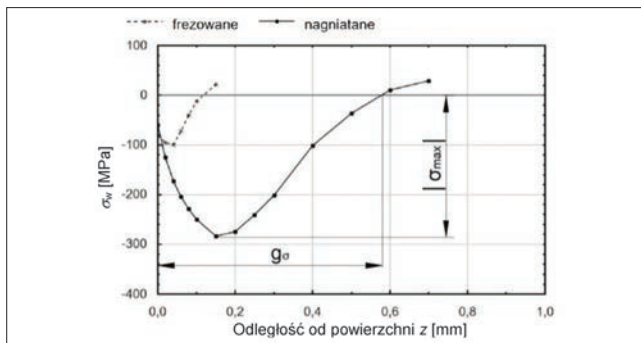
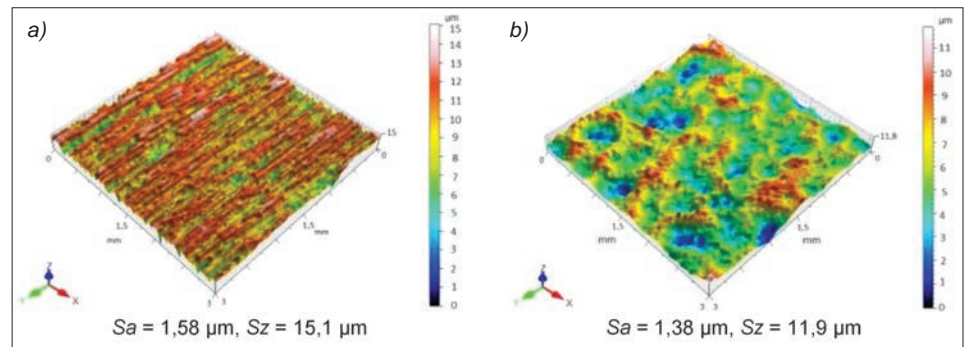


Fig. 3. Distribution of residual stress σ_w in the surface layer of samples after milling with feed $f_z = 0.26$ mm/cutting edge (a) and after vibratory shot peening during 8 min (b)

Rys. 3. Rozkład naprężeń własnych σ_w w warstwie wierzchniej próbek po frezowaniu z posuwem $f_z = 0,26$ mm/ostrze (a) i po nagniataniu wibracyjnym w czasie 8 min (b)

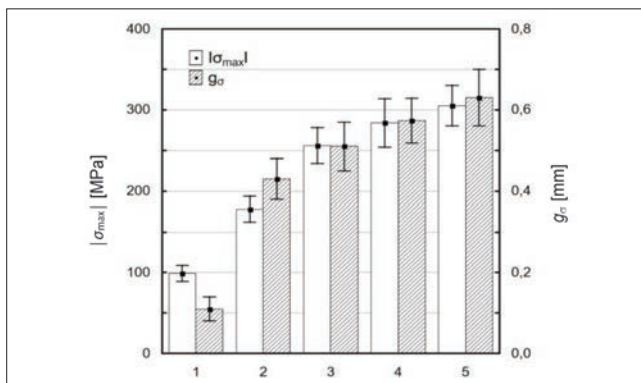


Fig. 4. Impact of vibration shot peening time on the absolute value of maximum compressive residual stresses $|\sigma_{max}|$ and the depth of these stresses g_0 (designations: 1 – milled samples, 2 – samples after vibratory shot peening during 0.5 min, 3 – samples after vibratory shot peening during 2 min, 4 – samples after vibratory shot peening during 8 min, 5 – samples after vibratory shot peening during 24 min)

Rys. 4. Wpływ czasu nagniatania wibracyjnego na wartość bezwzględną maksymalnych ściskających naprężeń własnych $|\sigma_{max}|$ oraz głębokość zalegania tych naprężeń g_0 (oznaczenia: 1 – próbki frezowane, 2 – próbki nagniatane w czasie 0,5 min, 3 – próbki nagniatane w czasie 2 min, 4 – próbki nagniatane w czasie 8 min, 5 – próbki nagniatane w czasie 24 min)

Czas jest jednym z ważnych parametrów obróbki nagniataniem wibracyjnym. Jeśli jest zbyt krótki, wtedy w warstwie wierzchniej nie znajdą (w dostatecznym stopniu) korzystne – ze względu na trwałość eksploatacyjną – przemiany właściwości, a nawet może się pogorszyć chropowatość powierzchni. Nie jest też wskazane nadmierne wydłużanie czasu nagniatania, gdyż niepotrzebnie zwiększa się koszty obróbki, a ponadto można spowodować pogorszenie właściwości warstwy wierzchniej. W świetle przeprowadzonych badań wydaje się, że dla przyjętych pozostałych parametrów technologicznych nagniatania wibracyjnego można zalecać czas nagniatania żeliwa sferoidalnego EN-GJS-400-15 wynoszący ok. 8 min.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań wpływu czasu nagniatania próbek z żeliwa sferoidalnego EN-GJS-400-15, frezowanych z różną wartością posuwu, na chropowatość powierzchni i rozkład naprężeń własnych można sformułować następujące wnioski:

- nagniatanie wibracyjne umożliwiło uzyskanie chropowatości powierzchni wynoszącej ok. $Ra = 0,7 \div 0,9$ μm niezależnie od chropowatości powierzchni przed nagniataniem, która zmieniała się w granicach $Ra = 0,6 \div 1,7$ μm ;
- w warstwie wierzchniej próbek ukształtowano podczas nagniatania wibracyjnego ściskające naprężenia własne, których bezwzględna wartość maksymalna zmieniała się w granicach od 170 MPa do 330 MPa; naprężenia te zalegały na głębokości $0,4 \div 0,7$ mm w zależności od czasu nagniatania;
- wraz z wydłużaniem czasu nagniatania następuje wzrost bezwzględnej wartości ściskających naprężeń własnych i głębokości ich zalegania, przy czym w miarę wydłużania czasu nagniatania dynamika tego wzrostu jest zdecydowanie mniejsza;
- biorąc pod uwagę zmiany właściwości warstwy wierzchniej, zachodzące podczas nagniatania wibracyjnego, a także koszty tego procesu, można uznać, że czas nagniatania wynoszący ok. 8 min jest wystarczający (dla przyjętych pozostałych parametrów nagniatania).

LITERATURA

- [1] Kęsy M. „Problemy kształtowania warstwy wierzchniej żeliwa szarego dynamicznymi metodami nagniatania”. *Inżynieria Materiałowa*. 5 (2005): 755–757.
- [2] Laber S. „Właściwości tribologiczne żeliwa sferoidalnego ferrytycznego EN-GJSF warunkowane stanem technologicznej warstwy wierzchniej”. [W:] Przybylski W.: *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*. T.3. Gdańsk: Politechnika Gdańska, 2011, 257–267.
- [3] Ochi Y., Masaki K., Matsumura K., Sekino T. “Effect of shot peening treatment on high cycle fatigue property of ductile cast iron”. *International Journal of Fatigue*. 23 (2001): 441–448.
- [4] Przybylski W. „Technologia obróbki nagniataniem”. Warszawa: WNT, 1987.
- [5] Tubielewicz K. „Technologia nagniatania żeliwnych części maszynowych”. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2000.
- [6] Wieczorowski K., Legutko S., Matusiak-Szaraniec A., Siecla R. „Nagniatanie wibracyjne odlewanych korpusów żeliwnych”. [W:] Przybylski W. *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*. T.2. Gdańsk: Politechnika Gdańska, 2008, 143–150.
- [7] Zaleski K. „Modelowanie chropowatości powierzchni i stopnia umocnienia warstwy wierzchniej stali 30HGSA po nagniataniu wibracyjnym”. *Mechanik*. 3 (2007): 194–198.
- [8] Zaleski K., Skoczylas A. “Effect of vibration shot peening parameters upon shapes of bearing curves of alloy steel surface”. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 9, 25 (2015): 20–26.
- [9] Zaleski K. “The effect of shot peening on the fatigue life of parts made of titanium alloy”. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 4, 44 (2009): 65–71.
- [10] Zaleski R., Gorgol M., Zaleski K. “Positron annihilation lifetime study of steel surface modification by shot peening”. *Physics Procedia*. 35 (2012): 92–97.