

Dr hab. inż. Kazimierz Zaleski, prof. PL

Department of Production Engineering
Mechanical Engineering Faculty
Lublin University of Technology
Nadbystrzycka str., 20-618 Lublin, Poland
E-mail: k.zaleski@pollub.pl

WPLYW KULKOWANIA WIBRACYJNO – ROTACYJNEGO I ZUZYWANIA STALI NA TRWALOSC ZMĘCZENIOWĄ

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych wpływu zużywania tribologicznego próbek ze stali C45, szlifowanych oraz kulkowanych wibracyjno – rotacyjnie, na trwałość zmęczeniową. Badano też wpływ zużywania na chropowatość powierzchni oraz rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej badanych próbek. Parametrem zmiennym w procesie zużywania był nacisk przeciwpróbkki na próbkę. Trwałość zmęczeniową badano na specjalnym stanowisku, umożliwiającym cykliczne zginanie badanej próbkki. Stwierdzono, że ze wzrostem nacisku przeciwpróbkki następuje pogorszenie chropowatości powierzchni, ukształtowanie mniej korzystnych naprężeń własnych oraz zmniejszenie trwałości zmęczeniowej. Negatywne skutki zużycia tribologicznego bardziej widoczne są dla próbek szlifowanych niż dla kulkowanych wibracyjno – rotacyjnie.

***Słowa kluczowe:** kulkowanie wibracyjno – rotacyjne, zużycie, chropowatość powierzchni, naprężenia własne, trwałość zmęczeniowa*

1. Wprowadzenie

W procesie eksploatacji elementy maszyn mogą być obciążone siłami zmiennymi przy jednoczesnym kontakcie, ślizgowym lub tocznym, z elementami współpracującymi. W takich przypadkach następuje jednocześnie zmęczenie materiału tych elementów oraz zużywanie się ich powierzchni.

Jedną z metod poprawy właściwości eksploatacyjnych elementów maszyn jest kulkowanie, które jest jedną z odmian nagniatania dynamicznego i polega na uderzaniu w obrabianą powierzchnię kulkami stalowymi, szklanymi lub ceramicznymi. W wyniku tych uderzeń następuje umocnienie warstwy wierzchniej oraz ukształtowanie ściskających naprężeń własnych. Wyniki wielu badań wskazują, że wskutek kulkowania następuje znaczący wzrost trwałości zmęczeniowej kulkowanych przedmiotów [2, 4, 16, 19]. Wzrost ten spowodowany jest głównie ukształtowaniem ściskających naprężeń własnych w warstwie wierzchniej kulkowanych przedmiotów. Z badań przeprowadzonych metodą anihilacji pozytonów wynika, że rozkład naprężeń własnych jest związany z ewolucją koncentracji defektów struktury krystalicznej [20]. Efekty kulkowania, podobnie jak nagniatania statycznego, w dużym stopniu zależą od właściwości kulkowanego materiału, kształtu obrabianych przedmiotów, struktury geometrycznej powierzchni przed kulkowaniem, budowy narzędzi oraz parametrów technologicznych [5, 9, 18].

Struktura geometryczna powierzchni oraz fizyczne właściwości warstwy wierzchniej mają wpływ na zużywanie współpracujących ślizgowo albo tocznie przedmiotów [7, 10]. Zużywanie, które określane jest jako proces zmian zachodzących w warstwie wierzchniej oddziałujących na siebie ciał stałych, prowadzących do ubytku masy lub trwałego odkształcenia powierzchni tych ciał, może być spowodowane różnymi czynnikami, a w związku z tym może mieć różny charakter [6, 8, 11].

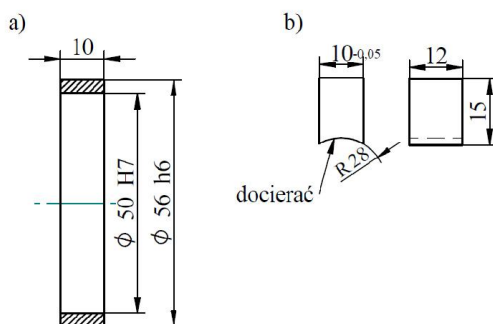
Korzystny ze względu na proces zużywania stan powierzchni można uzyskać poddając je obróbce nagniataniem, zarówno statycznym jak i dynamicznym. Zastosowanie niektórych metod nagniatania umożliwia uzyskanie na powierzchniach współpracujących tarciowo elementów wgłębień, w których utrzymuje się substancja smarująca. Badania odporności na zużycie łożysk ślizgowych wykazały, że wykonanie na powierzchni czopa śrubowego rowka powoduje zmniejszenie zużycia [15]. Wzrost odporności na ścieranie, zmniejszenie współczynnika tarcia oraz zwiększenie odporności na zatarcie można uzyskać stosując nagniatanie oscylacyjne, które umożliwia ukształtowanie odpowiedniego układu mikrorowków smarnych [13]. Obecność na współpracujących powierzchniach zagłębień, w których gromadzi się olej, wpływa na poprawę warunków smarowania, ale jednocześnie powoduje wzrost nacisków jednostkowych. Stwierdzono, że odporność na zatarcie zależy od rozkładu wgłębień smarnych oraz ich kształtu [3]. Podczas kulkowania uderzające w obrabianą powierzchnię kulki powodują powstawanie mikrowgłębień, które mogą pełnić funkcję „zbiorników smarowych”. Ukształtowana podczas kulkowania struktura geometryczna powierzchni może mieć wpływ również na powstawanie „szepień” adhezyjnych [14].

W procesie zużywania następują zmiany właściwości warstwy wierzchniej współpracujących elementów, które mogą mieć wpływ na ich wytrzymałość zmęczeniową. Przykłady węzłów kinematycznych, w których współpracujące elementy narażone są na zużycie tribologiczne, a także na zmęczenie materiału wskutek obciążenia siłami zmiennymi przedstawiono w pracy [17]. Niewiele jest prac, których autorzy badali jednocześnie zużycie oraz wytrzymałość zmęczeniową. W artykule [1] podano wyniki badań zużycia i wytrzymałości zmęczeniowej stopów tytanu stosowanych na implanty biomedyczne, a w pracy [12] badano wpływ różnych metod obróbki cieplnej oraz cieplno – chemicznej na wytrzymałość zmęczeniową i współczynnik tarcia stopu Ti-6Al-4V.

Z analizy literatury wynika, że dotychczasowe badania wpływu kulkowania wibracyjno – rotacyjnego na wytrzymałość zmęczeniową nie uwzględniały zmian właściwości warstwy wierzchniej wskutek zużycia tribologicznego podczas eksploatacji badanych elementów. Celem niniejszej pracy jest ocena łącznego wpływu kulkowania wibracyjno – rotacyjnego oraz zużycia podczas tarcia ślizgowego na trwałość zmęczeniową badanych próbek.

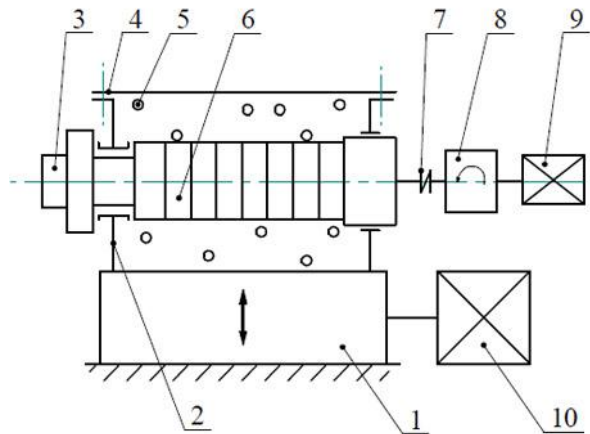
2. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na próbkach w kształcie pierścieni o wymiarach podanych na rys. 1a, wykonanych ze stali C45 w stanie wyżarzonym. Skład chemiczny badanej stali był następujący: węgiel – 0,44%, mangan – 0,57%, krzem – 0,23%, fosfor – 0,02%, siarka – 0,03%, chrom – 0,18%, nikiel – 0,25%, miedź – 0,10%, żelazo – reszta. W celu zapewnienia wymaganej dokładności powierzchnie próbek szlifowano.



Rys. 1. Kształt i wymiary próbki(a) i przeciwpróbki (b)

Powierzchnie zewnętrzne przygotowanych próbek poddano obróbce kulkowaniem wibracyjno – rotacyjnym na stanowisku, którego schemat przedstawiono na rys. 2. Kulkowane próbki 6 mocowane są na trzpieniu obrotowym 3 ułożyskowanym w ściankach komory roboczej 2. Komora robocza wprawiana jest w ruch drgający przez wibrator 1, który otrzymuje napęd od silnika 10. W komorze roboczej 2 znajdują się luźne kulki stalowe 5, które wsypywane są po zdjęciu pokrywy 4. Wskutek drgań komory roboczej kulki 5 zderzają się z powierzchniami zewnętrznymi próbek 6. Równomierność obróbki na całej powierzchni zewnętrznej próbek 6 zapewnia ruch obrotowy trzpienia 3 z zamocowanymi próbkami. Trzpień 3 otrzymuje napęd od silnika 9 poprzez reduktor 8 i sprzęgło elastyczne 7.

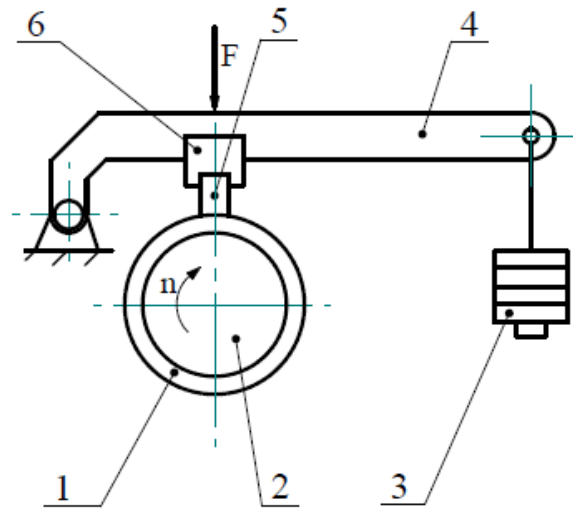


Rys. 2. Schemat stanowiska do kulkowania wibracyjno – rotacyjnego: 1 – wibrator, 2 – komora robocza, 3 – trzpień obrotowy, 4- pokrywa, 5 – kulka, 6 – próbka, 7 – sprzęgło elastyczne, 8 – reduktor, 9 – silnik napędzający trzpień obrotowy, 10 - silnik napędzający wibrator

Parametry technologiczne kulkowania wibracyjno – rotacyjnego były stałe i wynosiły:

- częstotliwość drgań wibratora $\nu = 7$ Hz,
- amplituda drgań wibratora $a = 60$ mm,
- czas kulkowania $t = 20$ min,
- średnica kulek $d_k = 6$ mm,
- prędkość obrotowa kulkowanego przedmiotu $n_k = 1,5$ obr/min.

Próbki kulkowane oraz szlifowane poddawano procesowi zużywania tribologicznego na stanowisku, którego schemat przedstawiono na rys. 3. Próbkę 1 mocowano na wrzecionie 2, które wykonywało ruch obrotowy z prędkością n . Do powierzchni zewnętrznej obracającej się próbki 1 dociskana była przeciwpróbka 5, która była zamocowana w uchwycie 6. Przeciwpróbki, których kształt i wymiary pokazano na rys. 1b, wykonano z żeliwa EN-GJL-HB195. Docisk przeciwpróbki wywierano za pomocą dźwigni 4, obciążonej obciążnikami 3. Wartość siły docisku F zmieniano poprzez zmianę masy obciążników 3.

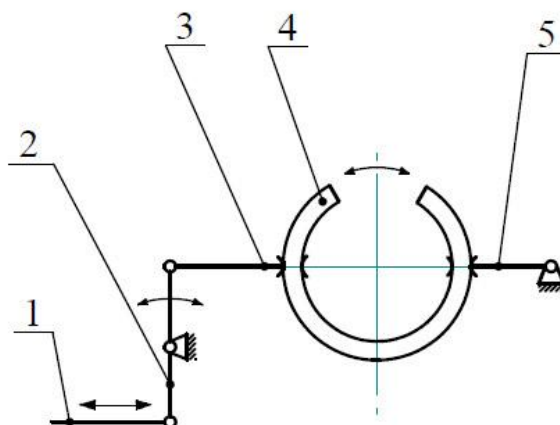


Rys. 3. Schemat urządzenia do badań zużycia tribologicznego: 1 – próbka, 2 – wrzeciono, 3 – obciążniki, 4 – dźwignia, 5 – przeciwpróbka, 6 – uchwyt

Na podstawie badań rozpoznawczych określono warunki prowadzenia badań tribologicznych. Jako parametry stałe przyjęto prędkość obwodową próbki $v = 0,586$ m/s oraz drogę tarcia $s = 10584$ m. Parametrem zmiennym był nacisk przeciwpróbki na próbkę, który wynosił $p_1 = 1,92$ MPa oraz $p_2 = 3,73$ MPa. Do smarowania stosowano olej HIPOL GL4. Przed badaniami zasadniczymi próbka i przeciwpróbka były docierane. Po zużywaniu mierzono ubytek masy próbek (różnica masy próbki przed zużywaniem i po zużywaniu).

Próbki zużywane i nieużywane podzielono na dwie partie. Jedną przeznaczono do badań właściwości warstwy wierzchniej, drugą – do badań porównawczych trwałości zmęczeniowej. Badania warstwy wierzchniej obejmowały chropowatość powierzchni (parametr R_a) oraz rozkład naprężeń własnych. Parametr R_a chropowatości powierzchni mierzono za pomocą profilografometru Surtronic 3+, firmy Taylor Hobson. Przeprowadzono też, na wybranych próbkach, badania topografii 3D, które wykonano za pomocą urządzenia T8000RC 120-140 firmy Hommel – Etamic. Rozkład naprężeń własnych wyznaczano metodą mechaniczną (mierzono odkształcenia próbki po usuwaniu kolejnych warstw materiału), stosując trawienie w roztworze kwasu azotowego.

W kolejnym etapie badań oceniano trwałość zmęczeniową próbek zużywanych oraz nieużywanych, zarówno po kulkowaniu wibracyjno – rotacyjnym jak i po szlifowaniu. Badania trwałości zmęczeniowej przeprowadzono na stanowisku przedstawionym na rys. 4. Przed przystąpieniem do badań próbki przecinano, usuwając część pierścienia stanowiącego próbkę. Tak przygotowaną próbkę mocowano w uchwytach 3 i 5. Ruchy korbowodu 1 poprzez dźwignię 2 powodowały zginanie próbki 4. Badania prowadzono przy stałej amplitudzie odkształceń próbki. Miarą trwałości zmęczeniowej była liczba przebiegów do złamania próbki.



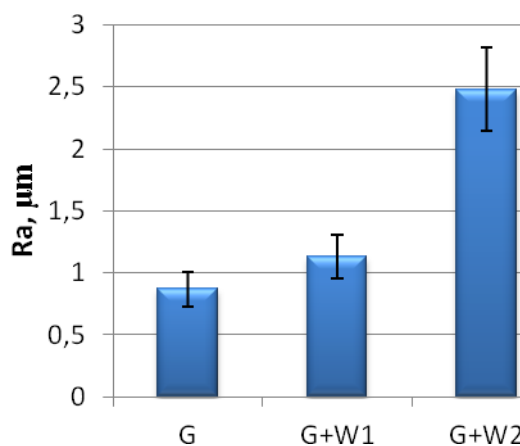
Rys. 4. Schemat urządzenia do badań trwałości zmęczeniowej: 1 – korbówód, 2 – dźwignia, 3 – uchwyt lewy, 4 – próbka, 5 – uchwyt prawy

Poszczególne badania były powtarzane siedmiokrotnie. Na podstawie otrzymanych wyników obliczano wartość średnią oraz odchylenie standardowe.

3. Wyniki badań

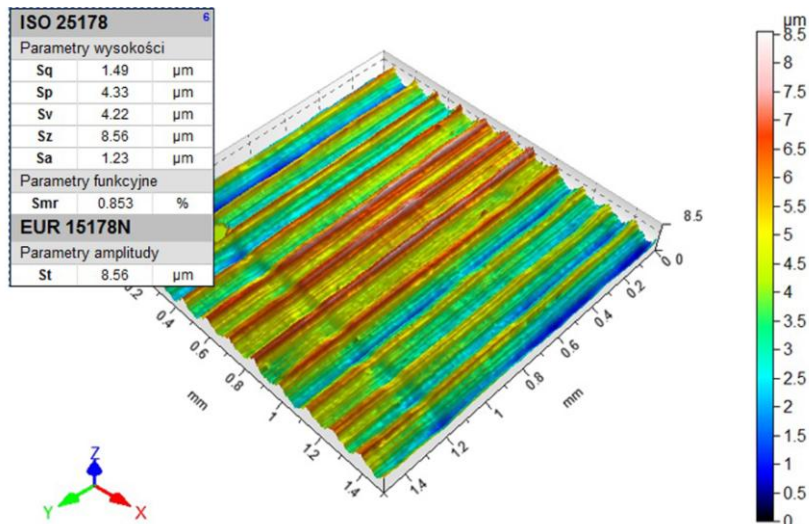
Badaniom chropowatości powierzchni oraz rozkładu naprężeń własnych poddano próbki szlifowane oraz zużywane po szlifowaniu, a także kulcowane wibracyjno – rotacyjnie i zużywane po kulkowaniu.

Wyniki badań parametru Ra chropowatości powierzchni próbek po szlifowaniu oraz po szlifowaniu i zużywaniu przedstawiono na rys. 5. Podano wartości średnie parametru Ra , a słupki błędów charakteryzują odchylenia standardowe. Zużywanie próbek szlifowanych przy nacisku 1,92 MPa spowodowało niewielki wzrost parametru Ra (około 30%), natomiast zużywanie przy nacisku 3,73 MPa prowadziło do znacznego pogorszenia chropowatości powierzchni, wartość parametru Ra wzrosła blisko 3 – krotnie (rys. 5).

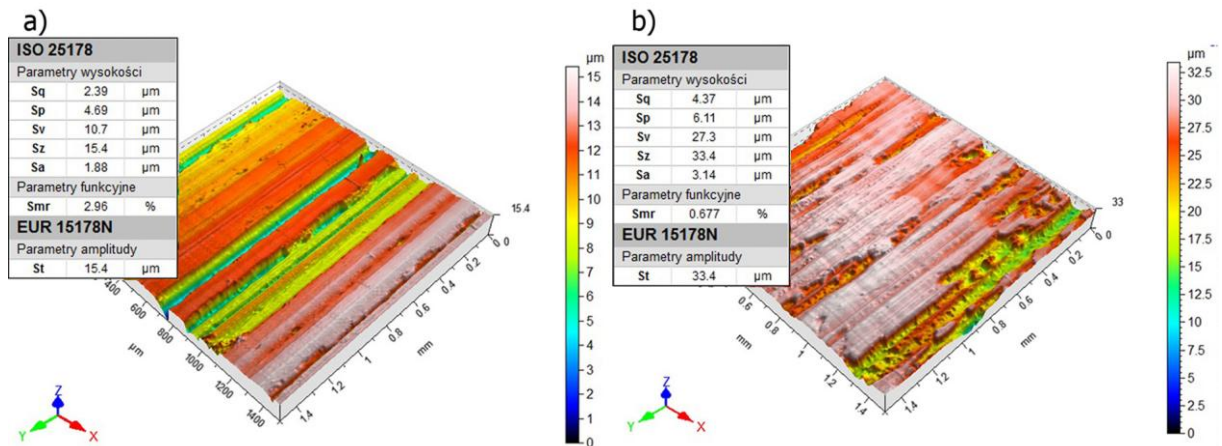


Rys. 5. Parametr Ra chropowatości powierzchni próbek po szlifowaniu (G), szlifowaniu i zużywaniu przy nacisku 1,92 MPa (G+W1) oraz przy nacisku 3,73 MPa (G+W2)

Na rys. 6 przedstawiono topografię powierzchni próbek po szlifowaniu, a na rys. 7 – topografię powierzchni próbek po szlifowaniu i zużywaniu. Widoczne są wyraźne ślady zużycia powierzchni, zwłaszcza po zużywaniu przy nacisku 3,73 MPa.

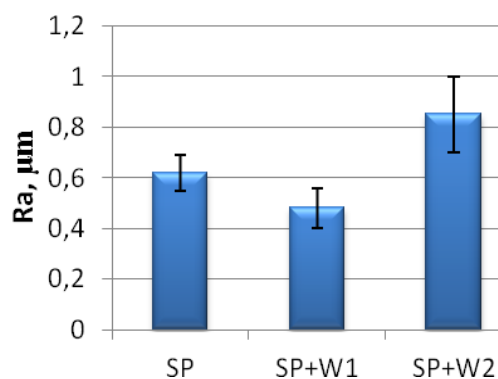


Rys. 6. Topografia powierzchni próbki po szlifowaniu



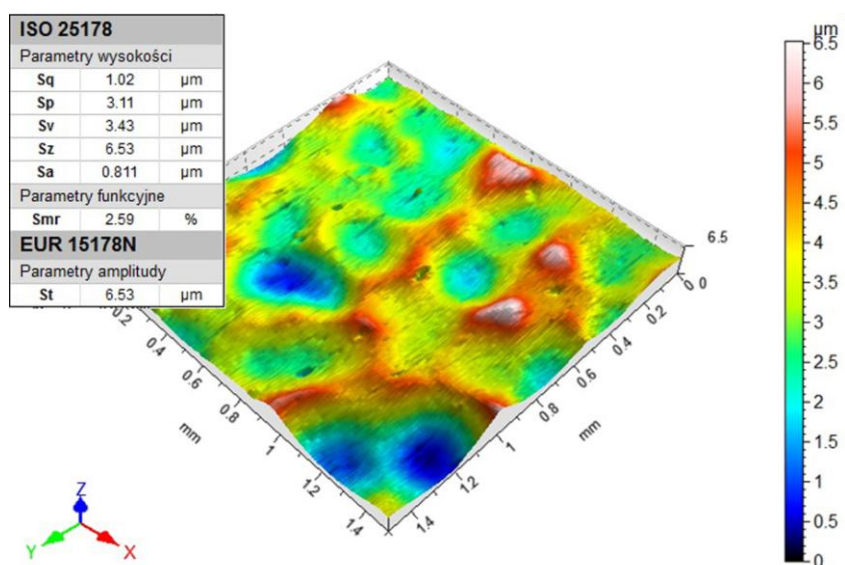
Rys. 7. Topografia powierzchni próbek po szlifowaniu i zużywaniu: a) przy nacisku 1,92 MPa, b) przy nacisku 3,73 MPa

Kulkowanie wibracyjno – rotacyjne powierzchni szlifowanej spowodowało zmniejszenie chropowatości powierzchni o około 30% (rys. 8). Zużywanie powierzchni kulkowanych wpłynęło tylko w niewielkim stopniu na chropowatość powierzchni. Zużywanie przy nacisku 1,92 MPa prowadziło nawet do nieznacznego zmniejszenia chropowatości powierzchni, natomiast zużywanie przy nacisku 3,73 MPa spowodowało niewielki wzrost chropowatości powierzchni, wynoszący 37%.

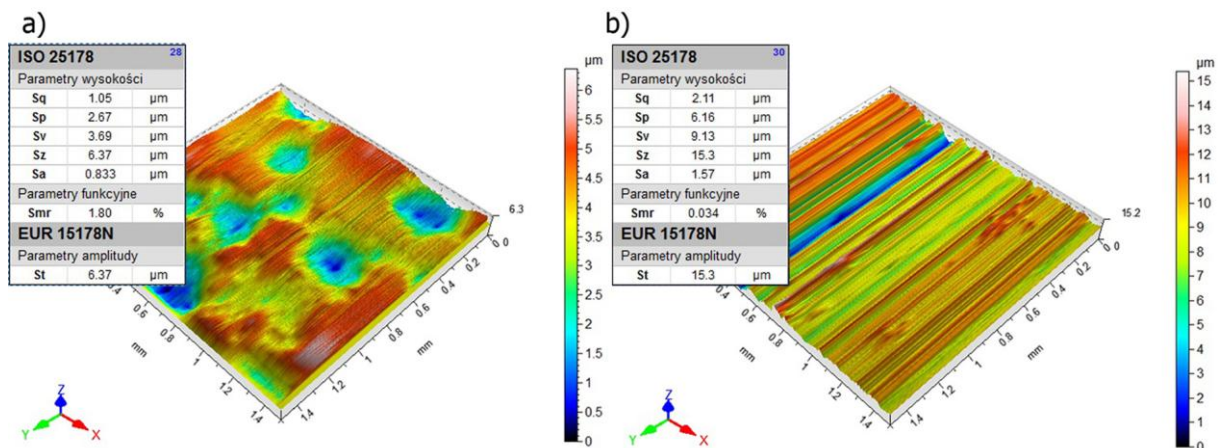


Rys. 8. Parametr R_a chropowatości powierzchni próbek po kulkowaniu (SP), kulkowaniu i zużyciu przy nacisku 1,92 MPa (SP+W1) oraz przy nacisku 3,73 MPa (SP+W2)

Na rys. 9 przedstawiono topografię powierzchni próbek po kulkowaniu, a na rys. 10 – topografię powierzchni próbek po kulkowaniu i zużyciu. Na powierzchni kulkowanej widoczne są mikrowgłębienia, które powstały wskutek uderzeń kulek (rys. 9). Z rys. 10a wynika, że zużywanie przy nacisku 1,92 MPa nie doprowadziło do całkowitego usunięcia mikrowgłębieni po kulkowaniu z powierzchni próbki. Natomiast zużywanie przy nacisku 3,73 MPa spowodowało całkowite usunięcie mikrowgłębieni, a ślady zużycia są bardziej widoczne w porównaniu z powierzchnią po zużyciu przy mniejszym nacisku (rys. 10b).



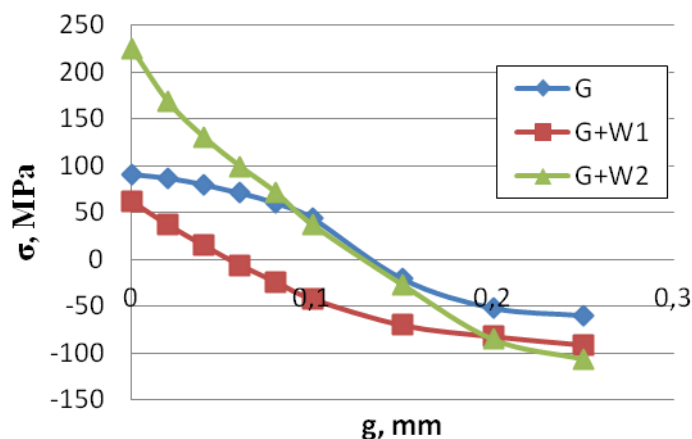
Rys. 9. Topografia powierzchni próbki po kulkowaniu wibracyjno - rotacyjnym



Rys. 10. Topografia powierzchni próbek po kulkowaniu wibracyjno - rotacyjnym i zuzywaniu: a) przy nacisku 1,92 MPa, b) przy nacisku 3,73 MPa

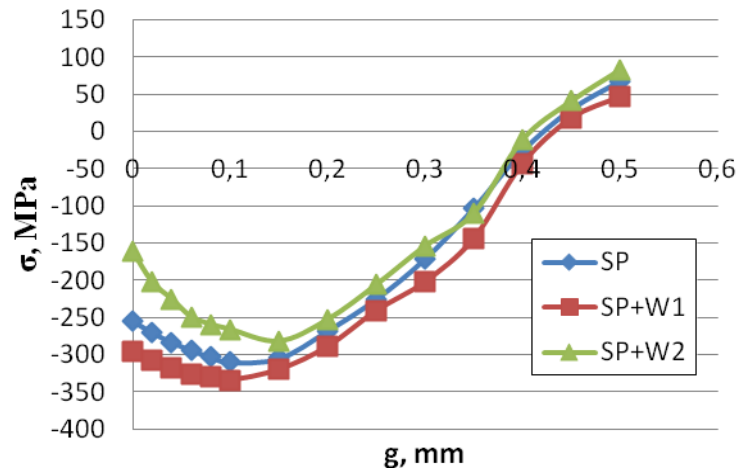
Na podstawie otrzymanych wyników badań można stwierdzić, że uderzające kulki w procesie kulkowania wibracyjno – rotacyjnego wybijają w obrabianej powierzchni mikrowgłębienia, w których podczas zużywania utrzymuje się olej. Obecność oleju powoduje zmniejszenie bezpośredniego oddziaływania przeciwpółki na próbkę, co korzystnie wpływa na chropowatość powierzchni próbki.

Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej badanych próbek zobrazowano na rys. 11 i 12. Po szlifowaniu występowały naprężenia własne rozciągające o wartości maksymalnej około 90 MPa, które na głębokości 0,13 mm przechodziły w naprężenia ściskające. Zużywanie przy nacisku 1,92 MPa próbek szlifowanych prowadziło do zmniejszenia naprężeń własnych rozciągających, zarówno ich wartości jak i głębokości zalegania, natomiast zwiększenie nacisku do 3,73 MPa powodowało ponad 2 – krotny wzrost wartości rozciągających naprężeń własnych (rys. 11).



Rys. 11. Rozkład naprężeń własnych σ na głębokości g w próbkach po szlifowaniu (G), szlifowaniu i zuzywaniu przy nacisku 1,92 MPa (G+W1) oraz przy nacisku 3,73 MPa (G+W2)

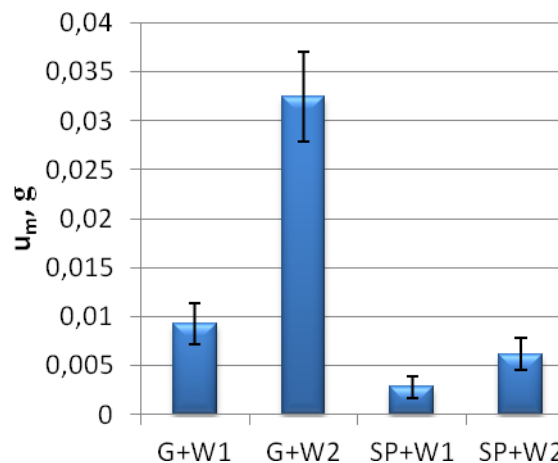
Kulkowanie wibracyjno – rotacyjne wpływało na ukonstytuowanie w warstwie wierzchniej badanych próbek naprężeń własnych ściskających o wartości maksymalnej (bezwzględnej) około 300 MPa, na głębokości około 0,4 mm (rys. 12). Zużywanie próbek kulkowanych przy nacisku 1,92 MPa nie powodowało większych zmian w rozkładzie naprężeń własnych, natomiast w próbkach zużywanych przy nacisku 3,73 MPa zaobserwowano zmniejszenie naprężeń własnych ściskających, zwłaszcza w pobliżu powierzchni.



Rys.12. Rozkład naprężeń własnych σ na głębokości g w próbkach po kulkowaniu (SP), kulkowaniu i zużyciu przy nacisku 1,92 MPa (SP+W1) oraz przy nacisku 3,73 MPa (SP+W2)

Wzrost rozciągających naprężeń własnych w próbkach szlifowanych i zmniejszenie ściskających naprężeń własnych w próbkach kulkowanych wskutek poddania tych próbek zużyciu przy nacisku 3,73 MPa może być związany z większą ilością ciepła wydzielającego się w procesie zużywania przy większych naciskach.

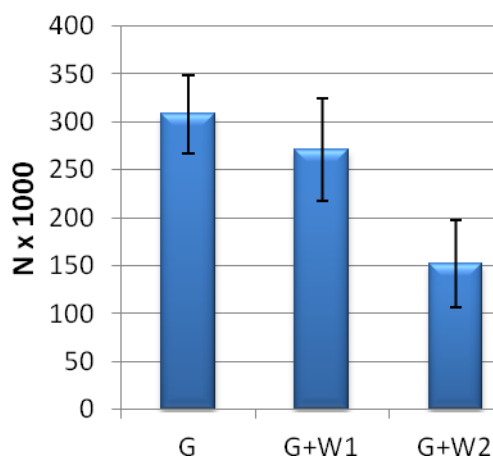
Na rys. 13 przedstawiono ubytek masy wskutek zużycia próbek szlifowanych oraz kulkowanych. Widoczne jest wyraźnie większe zużycie masowe próbek szlifowanych w porównaniu z próbkami kulkowanymi. Można to tłumaczyć lepszymi warunkami smarowania powierzchni po kulkowaniu oraz prawdopodobnym utwardzeniem warstwy wierzchniej wskutek kulkowania. Zużycie próbek zależy też od nacisku wywieranego przez przeciwpróbkę, co jest widoczne szczególnie w przypadku próbek szlifowanych (zwiększenie nacisku z 1,92 MPa do 3,73 MPa powoduje 3 – krotny wzrost zużycia).



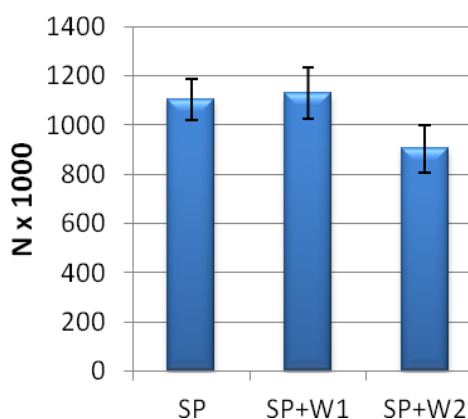
Rys. 13. Ubytek masy u_m próbek po szlifowaniu i zużyciu przy nacisku 1,92 MPa (G+W1) i przy nacisku 3,73 MPa (G+W2) oraz kulkowaniu i zużyciu przy nacisku 1,92 MPa (SP+W1) i przy nacisku 3,73 MPa (SP+W2)

Na rys. 14 i 15 uwidoczniło się wpływ zużywania na trwałość zmęczeniową próbek szlifowanych i kulkowanych. Potwierdzony został korzystny wpływ kulkowania wibracyjno –rotacyjnego na trwałość zmęczeniową (ponad 3,5–krotny wzrost w stosunku do próbek szlifowanych). Zużywanie przy nacisku 1,92 MPa w bardzo małym stopniu wpłynęło na trwałość zmęczeniową (niewielkie

zmniejszenie nastąpiło po zużywaniu próbek szlifowanych), natomiast zwiększenie nacisku przeciwpróbki na próbkę do 3,73 MPa spowodowało znaczne zmniejszenie trwałości zmęczeniowej, które dla próbek szlifowanych wyniosło 51%, a dla próbek kulkowanych – 18%. Zmniejszenie to można tłumaczyć mniej korzystnym rozkładem naprężeń własnych oraz zwiększeniem chropowatości powierzchni. Te niekorzystne zmiany właściwości warstwy wierzchniej w mniejszym stopniu dotyczą próbek po kulkowaniu, co przekłada się na trwałość zmęczeniową.



Rys. 14. Liczba cykli przegięć N do złamania próbek po szlifowaniu (G), szlifowaniu i zużywaniu przy nacisku 1,92 MPa ($G+W1$) oraz przy nacisku 3,73 MPa ($G+W2$)



Rys. 15. Liczba cykli przegięć N do złamania próbek po kulkowaniu (SP), kulkowaniu i zużywaniu przy nacisku 1,92 MPa ($SP+W1$) oraz przy nacisku 3,73 MPa ($SP+W2$)

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania eksperymentalne pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zużywanie tribologiczne próbek ze stali C45 wskutek ślizgowego oddziaływania przeciwpróbek żeliwnych z naciskiem wynoszącym 3,73 MPa powoduje niekorzystne zmiany właściwości warstwy wierzchniej, co przekłada się na zmniejszenie trwałości zmęczeniowej tych próbek.

2. Pogorszenie właściwości warstwy wierzchniej oraz zmniejszenie trwałości zmęczeniowej jest bardziej widoczne w przypadku próbek zużywanych po szlifowaniu niż po kulkowaniu wibracyjno – rotacyjnym.
3. W przypadku próbek zużywanych przy nacisku przeciwpróbki równym 1,92 MPa nastąpiło niewielkie zmniejszenie trwałości zmęczeniowej próbek szlifowanych, natomiast zużywanie próbek kulkowanych nie wpłynęło znacząco na ich trwałość zmęczeniową.
4. Kulkowanie wibracyjno - rotacyjne powoduje zwiększenie trwałości zmęczeniowej nie tylko przedmiotów nie narażonych na zużycie tribologiczne, ale również, nawet w większym stopniu, przedmiotów poddanych procesowi zużycia.
5. Kulkowanie wibracyjno – rotacyjne poprawia też odporność na zużycie tribologiczne kulkowanych przedmiotów. Następujące pod wpływem uderzeń kulek zmiany struktury geometrycznej powierzchni ułatwiają utrzymywanie oleju między powierzchniami współpracujących elementów, co wpływa na zmniejszenie ubytku masy tych elementów.

Analizowana problematyka ma duże znaczenie praktyczne z tego względu, że w budowie maszyn występują liczne elementy narażone w czasie ich eksploatacji jednocześnie na zmęczenie materiału i zużycie tribologiczne. Wprowadzenie w procesie wytwarzania takich elementów operacji kulkowania wibracyjno - rotacyjnego, która powoduje utworzenie na obrabianej powierzchni mikrowgłębi poprawiających warunki smarowania, a także ukształtowanie ściskających naprężeń własnych, wpływa korzystnie na trwałość eksploatacyjną tych elementów.

Literatura

1. Boehlert C.J, Cowen C.J, Quast J.P, Akahori T, Niinomi M. Fatigue and wear evaluation of Ti-Al-Nb alloys for biomedical applications. *Material Science and Engineering C* 2008; 28: 323-330.
2. Carvalho A.L.M, Voorwald H.J.C. Influence of shot peening and hard chromium electroplating on the fatigue strength of 7050-T4751 aluminum alloy. *International Journal of Fatigue* 2007; 29: 1282-1291
3. Galda L, Dzierwa A, Sep J, Pawlus P. The effect of oil pockets shape and distribution on seizure resistance in lubricated sliding. *Tribol Lett* 2010; 37: 301-311.
4. Korzynski M, Dzierwa A, Pacana A, Cwanek J. Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with ball peening. *Surface & Coatings Technology* 2009 Dec; 204(5): 615-620.
- 5 Kulakowska A, Kukielka L, Kukielka K, Malag L, Patyk R, Bohdal L. Possibility of steering of products surface layer properties in burnishing rolling process. *Applied Mechanics and Materials* 2014; 474: 442-447.
6. Lawrowski Z. *Tribologia. Tarcie, zużywanie i smarowanie*. Warszawa: PWN, 1993.
7. Leśniewski T, Krawiec S. Wpływ twardości stalowych materiałów ślizgowych na ich zużycie. *Tribologia* 2004; 3: 237-245.

8. Maruda R.W, Feldshtein E.E, Legutko S, Królczyk G.M. Improving the efficiency of running-in for a bronze-stainless steel friction pair. *Journal of Friction and Wear* 2015 Nov; 36(6): 548-553.
9. Matuszak J, Zaleski K. Edge states after wire burnishing of magnesium alloys. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal* 2014; 86(4): 328-335.
10. Matuszewski M, Styp-Rekowski M. Wpływ kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni na intensywność zużycia par ciernych. *Tribologia* 2007; 2: 469-477.
11. Michalczewski R, Piekoszewski W, Szczerek M, Tuszynski W. The lubricant-coating interaction in rolling and sliding contacts. *Tribology International* 2009; 42: 554-560.
12. Morita T, Keita A, Chuji K. Effect of combination treatment on wear resistance and strength of Ti-6Al-4V alloy. *Material Science & Engineering A* 2014; 618: 438-446.
13. Przybylski W, Hochschulz R. Technologia wytwarzania mikrorowków na powierzchni tarcia łożysk ślizgowych przez nagniatanie oscylacyjne. *Tribologia* 1999; 5: 625-638.
14. Rudawska A. Selected aspects of the effect of mechanical treatment on surface roughness and adhesive joint strength of steel sheets. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2014; 50: 235-243.
15. Sep J, Pawlus P, Galda L. The effect of helical groove geometry on journal abrasive wear. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2013; 13: 150-157.
16. Sledz M, Bak L, Stachowicz F, Zielecki W. Analysis of the effect of shot peening on mechanical properties of steel sheets used as screener sieve materials. *International Symposium on Dynamic Deformation and Fracture of Advanced Materials (D2FAM2013)*. *Journal of Physics Conference Series*; 2013 Sep (451) Loughborough Univ.
17. Sosnovskiy L.A, Bogdanovich A.V, Yelovoy O.M, Tyurin S.A, Komissarov V.V, Sherbakov S.S. Methods and main results of tribo-fatigue tests. *International Journal of Fatigue* 2014; 66:207-219.
18. Zaleski K, Blawucki S. Evaluation of the effectiveness of the shot peening process for thin-walled parts based on the diameter of impressions produced by the impact of shot media. *Advances in Science and Technology. Research Journal* 2015; 9(26): 77-82.
19. Zaleski K. The effect of shot peening on the fatigue life of parts made of titanium alloy. *Eksploatacja i Niezawodność Maintenance and Reliability* 2009; 4(44): 65-71.
20. Zaleski R, Zaleski K, Gogol M, Wiertel M. Positron annihilation study of aluminum, titanium and iron alloys surface after shot peening. *Applied Physics A* 2015; 120: 551-559.

