



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ
BUDOWY MASZYN
I LOTNICTWA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

AUTOREFERAT

Załącznik nr 4

dr inż. Sławomir Świrad

Rzeszów 2023

I. Imię i nazwisko.

Sławomir Świrad

II. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

13.02.2008	Uzyskanie stopnia doktora nauk technicznych w zakresie dyscypliny: Budowa i eksploatacja maszyn – inżynieria powierzchni Uchwała Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej Tytuł rozprawy doktorskiej: Nagniatanie ślizgowe elementami walcowymi z kompozytu diamentowego Promotor: prof. dr hab. inż. Mieczysław Korzyński (Politechnika Rzeszowska) Recenzenci: prof. dr hab. inż. Volodymyr Liubimov (Politechnika Rzeszowska) prof. dr hab. inż. Jan Burcan (Politechnika Łódzka)
30.09.2005	Ukończenie studiów doktoranckich na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej
31.05.2000	Uzyskanie tytułu magistra inżyniera na kierunku: Mechanika i budowa maszyn Specjalności: Organizacja i zarządzanie w przemyśle na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej

III. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

01.04.2008 - obecnie	adiunkt w Katedrze Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej
01.10.2001 - 31.03.2008	asystent w Katedrze Technologii Maszyn i Organizacji Produkcji

IV. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

Osiągnięciami naukowymi, stanowiącymi znaczny wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria mechaniczna, według art. 219 ust. 1 pkt 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, jest:

- cykl powiązanych tematycznie 10 artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt 2b Ustawy

Wykaz prac naukowych stanowiących osiągnięcie naukowe:

- [A1] Swirad, S. Changes in Areal Surface Textures Due to Ball Burnishing. *Materials* 2023, 16, 5904. <https://doi.org/10.3390/ma16175904>
140 pkt. wg punktacji MNISW w 2023, IF: **3,4** za 2022 r.
- [A2] Swirad, S. Influence of ball burnishing on lubricated fretting of the titanium alloy Ti6Al4V. *Lubricants* 2023, 11, 341. <https://doi.org/10.3390/lubricants11080341>
70 pkt. wg punktacji MNISW w 2023, IF: **3,5** za 2023 r.
- [A3] Swirad, S., Gradzik, A., Ochał, K., P. Pawlus. Effects of the surface layer of steel samples after ball burnishing on friction and wear in dry reciprocating sliding. *Scientific Reports* 13, 11315 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38534-7>,
140 pkt. wg punktacji MNISW w 2023, IF: **4,996** za 2021 r.
- [A4] Swirad, S.; Pawlus, P. The Effect of Ball Burnishing on Tribological Performance of 42CrMo4 Steel under Dry Sliding Conditions. *Materials* 2020, 13, 2127. <https://doi.org/10.3390/ma13092127>
140 pkt. wg punktacji MNISW w 2020, IF: **3,748** za 2021 r.
- [A5] Swirad, S.; Pawlus, P. The Effect of Ball Burnishing on Dry Fretting. *Materials* 2021, 14, 7073. <https://doi.org/10.3390/ma14227073>
140 t. wg punktacji MNISW w 2020, IF: **3,748** za 2021 r.
- [A6] Swirad, S.; Pawlus, P. The Influence of Ball Burnishing on Friction in Lubricated Sliding. *Materials* 2020, 13, 5027. <https://doi.org/10.3390/ma13215027>
140 pkt. wg punktacji MNISW w 2020, IF: **3,623** za 2020 r.
- [A7] Swirad, S. Surface Texture Analysis after Hydrostatic Burnishing on X38CrMoV5-1 Steel. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 32, 91 (2019). <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0407-x>
70 pkt. wg punktacji MNISW w 2020, IF: **2,185** za 2019 r.
- [A8] S. Świrad, D. Wydrzynski, P. Nieslony, G.M. Krolczyk, Influence of hydrostatic burnishing strategy on the surface topography of martensitic steel, *Measurement*, Volume 138, 2019, p. 590-601, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.081>.
200 pkt. wg punktacji MNISW w 2020, IF: **3,364** za 2019 r.

[A9] S. Swirad, Improvement of the fretting wear resistance of Ti6Al4V by application of hydrostatic ball burnishing. 2019 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 521 012016, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/521/1/012016>

5 pkt. wg punktacji MNISW w 2019, IF:-

[A10] S. Swirad, R. Wdowik, Determining the effect of ball burnishing parameters on surface roughness using the Taguchi method, *Procedia Manufacturing*, Volume 34, 2019, Pages 287-292, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.152>

40 pkt. wg punktacji MNISW w 2019, IF:-

IV-1. Uzasadnienie wyboru obszaru badawczego

Omówienie celu i osiągniętych wyników prac naukowych oraz sposobu ich wykorzystania

Przedstawiony do oceny cykl publikacji stanowiący podstawę do wszczęcia przewodu habilitacyjnego jest wynikiem prac badawczych mających na celu analizę zmian warstwy wierzchniej po obróbce nagniataniem z wykorzystaniem narzędzi hydrostatycznych (kulka dogniatająca jest zawieszona hydrostatycznie w gnieździe narzędzia). Analiza ta dotyczyła przede wszystkim stanu po obróbce, czyli struktury geometrycznej powierzchni, mikrotwardości, naprężeń własnych oraz ich wpływu na właściwości tribologiczne (współczynnik tarcia, odporność na zużycie). W większości przypadków technicznych niszczenie układu postępuje od strony powierzchni materiału, stanowiącego element konstrukcyjny. Natomiast najczęściej awarii maszyn i urządzeń następuje poprzez niewłaściwe wykonanie warstwy wierzchniej. Odpowiednio zaprojektowana i wykonana warstwa powierzchniowa może również prowadzić do obniżenia zużycia energii, która jest potrzebna do pokonania oporów tarcia.

Badania prowadzone były przede wszystkim z użyciem stali ogólnie wykorzystywanych w przemyśle (stal do ulepszania cieplnego, stal narzędziowa, stopowa do pracy na gorąco) jak również stopu tytanu Ti6Al4V (szeroko stosowanego w przemyśle lotniczym, medycznym, morskim i chemicznym). Badania prowadzono również pod kątem wskazania możliwości zastosowania omawianej technologii jako obróbki alternatywnej (w niektórych przypadkach) w stosunku do szlifowania, dogładzania, polerowania oraz jako procesu łączonego z innymi klasycznymi metodami obróbki, na przykład toczenie + dogniatanie, frezowanie + dogniatanie.

Zakres tematyczny zawarty w przedstawionym do oceny cyklu publikacji obejmuje następujące zagadnienia:

- analiza wpływu parametrów nagniatania na strukturę geometryczną powierzchni z wykorzystaniem planów badawczych,
- analiza wpływu strategii obróbki nagniataniem na topografię powierzchni,

- wpływ obróbki poprzedzającej obróbkę gładkościową, na strukturę geometryczną powierzchni nagniatanej,
- badanie wpływu obróbki nagniataniem na tribologiczne właściwości warstwy wierzchniej w warunkach tarcia technicznie suchego,
- badanie wpływu obróbki nagniataniem na tribologiczne właściwości warstwy wierzchniej w warunkach tarcia ze smarowaniem.

Technologia obróbki nagniataniem znana jest już od kilkudziesięciu lat. Pierwsze próby zastosowania procesu nagniatania miały miejsce w latach 30-tych ubiegłego wieku w (USA) samochodach Ford T. Obróbce poddawano osie podwozia w celu uzyskania umocnienia powierzchni. Kolejne zastosowanie (1930 r.) dotyczyło osi wagonów kolejowych. Niektórzy autorzy podają jednak, że obróbka nagniataniem najpierw pojawiła się w Niemczech i (byłym) ZSRR a dopiero później w USA.

Proces nagniatania został opatentowany po raz pierwszy przez Davida A. Wallace w 1940 roku w USA. Patent ten związany jest z obróbką tulei prowadnic zaworów poprzez dociskanie kulki ze stali hartowanej. Kolejnym nowatorskim rozwiązaniem było opatentowanie obrotowego narzędzia do nagniatania. Narzędzie to pozwalało zwiększyć żywotność wałów, czopów, sworzni lub innych elementów obrotowych. W kolejnych latach pojawiały się nowe rozwiązania dotyczące obróbki nagniataniem otworów oraz powierzchni obrotowych zewnętrznych z wykorzystaniem kilku elementów nagniatających. Dalszy rozwój konstrukcji narzędzi skupił się na rozwiązaniach zapewniających jak największą elastyczność zastosowania oraz możliwość regulacji siły docisku. W roku 2012 udzielono patentu na narzędzie z wbudowanym czujnikiem do pomiaru siły docisku. W roku 2013 P. Prevey opatentował nowatorskie narzędzie do nagniatania, w którym element dogniatający (kulka o bardzo dużej twardości) zawieszony jest hydrostatycznie w sprężonej cieczy. Ciśnienie to wytwarza siłę dogniatającą pomiędzy obracającą się kulką a powierzchnią obrabianej części. Dzięki zjawisku łożyskowania hydrostatycznego, pomiędzy kulką a jej oprawką utrzymywana jest cienka warstwa filmu olejowego, niezależnie od odległości pomiędzy narzędziem a obrabianym detalem.

Badania dotyczące obróbki powierzchni w zastosowaniach przemysłowych coraz bardziej skupiały się na analizie zmian warstwy wierzchniej. Stosowane metody tj. kulkowanie, kulkowanie ultradźwiękowe, śrutowanie, śrutowanie ultradźwiękowe i nagniatanie, pozwalały uzyskać największe naprężenia ściskające na dużej głębokości.

Nagniatanie jako proces bezwiórowy przejawia wiele korzyści środowiskowych, poprzez zmniejszenie ilości odpadów oraz zużycia energii w porównaniu do tradycyjnych (konwencjonalnych) metod obróbki. Jednak korzyści dla środowiska wynikające z nagniatania mogą zależeć od konkretnego kontekstu i stosowanych materiałów, dlatego ważne jest, aby rozważyć pełny cykl życia produktu.

Ze względu na cel obróbki nagniatanie może być stosowane jako umacniające lub gładkościowe. W przypadku obróbki umacniającej uzyskane odkształcenie plastyczne warstwy wierzchniej wpływa na poprawę właściwości użytkowych (wytrzymałość

zmęczeniowa, odporność na zużycie tribologiczne i inne) nagniecionych elementów. Miarą tego umocnienia jest wartość odkształceń oraz ich głębokość. W drugim przypadku występuje obróbka gładkościowa, w której poprzez wygładzenie wierzchołków nierówności obrabianej powierzchni uzyskuje się żądaną niską wysokość chropowatości. W obu wariantach obróbki element nagniatający jest dociskany do powierzchni obrabianego materiału, co powoduje uplastycznienie jego warstwy wierzchniej. W punkcie styku siła dogniatająca wywołuje naprężenia kontaktowe. W momencie przekroczenia granicy plastyczności, materiał w pobliżu powierzchni zaczyna płynąć. W miarę przemieszczania się elementu nagniatającego po obrabianej powierzchni, część warstwy odkształconej sprężystości oddziałuje na część warstwy odkształconej plastycznie powodując jej ściskanie i przemieszczenie. W wyniku odkształcenia plastycznego warstwy wierzchniej materiału obrabianego, zarówno w przypadkach obróbki gładkościowej i umacniającej, uzyskuje się niską wysokość chropowatości powierzchni. Wierzchołki materiału wciskane są prawie pionowo w głąb powierzchni, a materiał wypełnia przestrzeń (doliny) pomiędzy wierzchołkami. Uzyskana gładka powierzchnia jest wynikiem odkształcenia plastycznego materiału na powierzchni i przemieszczania się go, powodując zmniejszenie wysokości nierówności.

Analiza wpływu parametrów nagniatania na strukturę geometryczną powierzchni z wykorzystaniem planów badawczych

W technologii maszyn badania najczęściej dotyczą procesów wytwarzania, mogą też występować badania kontrolne lub próby eksploatacyjne wytwarzanych wyrobów. Do uzyskania maksimum informacji dąży się tylko w badaniach podstawowych, w odniesieniu do słabo znanych obiektów. W większości badań wystarczy uzyskanie informacji selektywnych istotnych dla rozpatrywanego problemu. Najczęściej spotykane w technologii maszyn, a wymagające przeprowadzenia badań eksperymentalnych są badania związane z doбором optymalnych (ze względu na określone kryterium) warunków procesu.

Celem zapewnienia jak najlepszych efektów obróbki nagniataniem, konieczne jest określenie optymalnych warunków procesu.

Parametry te należy dobierać indywidualnie do materiału o danych właściwościach, a także do celu obróbki (gładkościowej lub umacniającej). Stąd w pierwszej kolejności przeprowadziłem cykl badań eksperymentalnych mających na celu wyznaczenie parametrów procesu nagniatania zapewniających pożądaną jakość struktury geometrycznej powierzchni. Jako materiał do badań wybrałem stal X37CrMoV5 ze względu na jej szeroki zakres stosowania w procesach i technologii, w której można również stosować obróbkę nagniataniem jako jedną z operacji technologicznych. Bazując na wcześniejszych własnych badaniach jako parametry procesu rozpatrywałem trzy parametry na trzech różnych poziomach tj.

- ciśnienie nagniatania p : 10; 15; 20 MPa,
- prędkość nagniatania v : 1000; 2000; 3000 mm/min,
- skok wierszowania a : 0,04; 0,06; 0,08 mm (odległość pomiędzy kolejnymi ścieżkami narzędzia).

Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawiłem w pracy [A10].

Zastosowałem w niej plan badawczy ortogonalny (L9), zwany również metodą Taguchiego. W metodzie tej funkcja strat jest używana do obliczenia odchylenia między wartością eksperymentalną a wartością pożądaną. Funkcja strat jest następnie przekształcana w stosunek sygnału do szumu (S/N). Istnieje kilka współczynników S/N w zależności od typu charakterystyki; „niższy tym lepszy” (LB), „nominalny tym lepszy” (NB) i „wyższy tym lepszy” (HB).

Jako kryterium oceny współczynnika S/N (signal factor to noise factor) przyjąłem $\eta = S/N$ - „niższy tym lepszy” ze względu na minimalizację wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni.

Wartość współczynnika S/N oblicza była wg wzoru (1), gdzie: Y- wartość mierzonej cechy; n-liczba doświadczeń.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{\sum(Y^2)}{n} \right) \quad (1)$$

W trakcie realizacji planu wykonano 27 doświadczeń (9 eksperymentów z trzema powtórzeniami).

Na podstawie badań, wyznaczyłem dla każdego parametru wejściowego poziom, dla którego uzyskano największą wartość S/N oraz wartość delta, która oznacza różnicę między najwyższą i najniższą średnią wartością odpowiedzi dla każdego parametru.

Zgodnie z tym dla parametru Sa (średnia arytmetyczna wysokości nierówności) zostały określone:

- siła nagniatania (poziom 1 - 10 MPa), S/N - 21,16, delta-3,89, pozycja-1),
- prędkość nagniatania (poziom 1 – 1000 mm/min, S/N - 19,03, delta-0,2, pozycja-3),
- skok nagniatania (poziom 1 – 0.04 mm, S/N - 19,39, delta-0,85, pozycja-2).

Analizując otrzymane wyniki S/N można zauważyć, że przy zmianie ciśnienia nagniatania z 10 MPa do 20 MPa wartości parametrów amplitudowych struktury powierzchni gwałtownie rosną. Wraz ze wzrostem siły nagniatania głębokość nagniatania jest większa a co za tym idzie strefa deformacji nierówności zwiększa się. Kiedy siła nagniatania przekroczy graniczną wartość, kolejne przejścia narzędzia powodują pogorszenie struktury geometrycznej powierzchni. Niska siła nagniatania nie jest w stanie całkowicie zniwelować nierówności powierzchni po obróbce poprzedzającej. Badania wykazały również, że prędkość oraz skok nagniatania (w badanym obszarze) miały mniejsze znaczenie niż siła nagniatania.

Analizując prędkość nagniatania wykazałem, że nie ma ona znaczącego wpływu na chropowatość powierzchni. Przy dużej prędkości nagniatania, głównie ze względu na skrócony czas kontaktu narzędzia z nierównościami, obserwuje się nieznaczny wzrost wysokości chropowatości powierzchni. W przypadku małej wartości skoku wierszowania 0,04 mm, odległość między kolejnymi śladami narzędzia do nagniatania jest mała, kulka ma więcej czasu na wyrównanie szczytów i krawędzi poprzednich śladów obróbki. Przy

najwyższej wartości skoku wierszowania 0,08 mm, wysokość nierówności powierzchni wzrasta, szczególnie dotyczy to maksymalnej wysokości nierówności Sz.

W dalszej części badań dotyczących wpływu parametrów procesu na strukturę geometryczną powierzchni analizowałem możliwość wyznaczenia modelu matematycznego opisującego wpływ parametrów nagniatania na wybrane parametry chropowatości. Wyniki tych badań przedstawiłem w pracy **[A7]**. W analizie zastosowałem plan trójpoziomowy, zbudowany na hipersześcianie PS/DS.-PHA_k na trzech równo odległych od siebie poziomach zmienności czynników wejściowych. Do opisu procesu przyjąłem postać wielomianu algebraicznego stopnia drugiego, zawierającego interakcje pomiędzy parametrami procesu:

$$y = b_0 + \sum b_k x_k + \sum b_{kk} x_k^2 + \sum b_{kj} x_k x_j \quad (2)$$

gdzie b – współczynnik regresji, x – czynniki wejściowe.

Ocenę istotności współczynników równania regresji przeprowadziłem poprzez porównanie ich wartości z wartością krytyczną wyznaczoną ze wzoru:

$$b_{kr} = t_{(\alpha, f)} \sqrt{\frac{S^2(y)}{Nr}} \quad (3)$$

gdzie: $t_{(\alpha, t)} = t_{kr}$ jest testową wartością współczynnika t określaną z tablic rozkładu t-Studenta, r jest liczbą powtórzeń, a N jest liczbą doświadczeń.

Do oceny adekwatności równania regresji z wynikami badań wykorzystałem test Fishera-Snedecora. Na pierwszym etapie analizy wyznaczyłem wariancję adekwatności:

$$S_{ad}^2 = \frac{r \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \bar{\bar{y}})^2}{N-k-1} \quad (4)$$

gdzie: \bar{y}_i – wartość średnia wyników pomiarów w i-tym doświadczeniu, $\bar{\bar{y}}$ – wartość obliczona z równania regresji dla poziomów czynników wejściowych i wyjściowych i-tego doświadczenia, k – liczba wyrazów równania regresji (bez wyrazu wolnego) po odrzuceniu wyrazów nieistotnych, r – liczba powtórzeń, N – całkowita liczba doświadczeń.

Następnie wyznaczoną wartość współczynnika testowego F:

$$F = \frac{S_{ad}^2(y)}{S^2(y)} \quad (5)$$

porównałem z wartością krytyczną określoną z tablic rozkładu Fishera-Snedecora uzyskując adekwatne równania regresji opisujące wpływ parametrów nagniatania na wybrane parametry chropowatości powierzchni.

Otrzymane równania regresji wskazują na nieliniowy charakter zależności pomiędzy parametrami wejściowymi procesu a parametrami chropowatości powierzchni. Wartości

wielomianu drugiego stopnia pokazują, że istnieją ekstrema funkcji regresji w zakresie zmienności parametrów procesu.

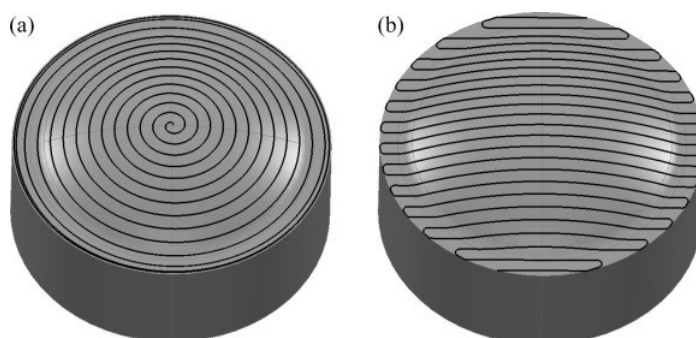
Analiza wpływu strategii obróbki nagniataniem na strukturę geometryczną powierzchni

Technologia obróbki nagniataniem z wykorzystaniem narzędzi hydrostatycznych jest kinematycznie podobna do obróbki frezowaniem. W narzędziu kulka nagniatająca umieszczona jest w gnieździe, do którego pod ciśnieniem pompowana jest ciecz (emulsja), która tworzy cienki film pomiędzy kulką a oprawką narzędzia. Pozwala to utrzymywać ciśnienie na stałym poziomie oraz na swobodne obracanie się kulki, która jest dociskana do powierzchni materiału obrabianego. Ciśnienie wytwarza siłę dogniatającą pomiędzy obracającą się kulką, a powierzchnią obrabianego detalu.

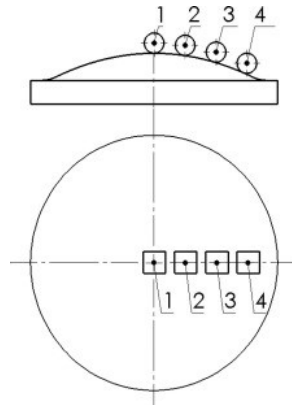
W większości badań dotyczących procesu nagniatania analizowany był wpływ parametrów procesu na właściwości warstwy wierzchniej (chropowatość, mikrotwardość, stan naprężeń itp.), dodatkowo elementem obrabianym był najczęściej element obrotowy (wałek). Autorzy nielicznych publikacji analizowali wpływ strategii obróbki nagniataniem (podobnej do strategii frezowania), a wyniki tych analiz sprowadzały się tylko do jednego lub dwóch parametrów amplitudowych chropowatości powierzchni (najczęściej były to Ra, Rz, Sa, Sz). Aby wypełnić tę lukę przeprowadziłem badania dotyczące strategii nagniatania, ich wyniki przedstawiłem w pracy [A8].

Materiałem na próbki była stal X37CrMoV51, o twardości 38 HRC.

Proces został przeprowadzony przy użyciu dwóch różnych strategii: strategii typu raster i spirala. Dodatkowo aby uzyskać więcej informacji na temat zmian topografii powierzchni, zastosowałem próbki o kształcie nieregularnym, a pomiar wykonywany był w czterech miejscach. Sposób obróbki oraz miejsca pomiaru przedstawiłem na rysunkach 1 oraz 2.

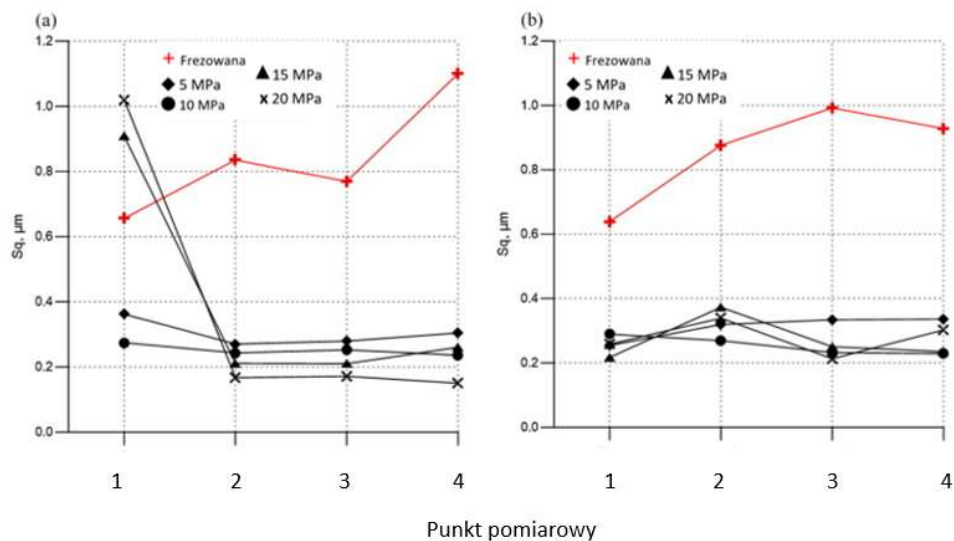


Rysunek 1. Strategie obróbki nagniataniem (a) spirala i (b) raster.



Rysunek 2. Punkty pomiarowe.

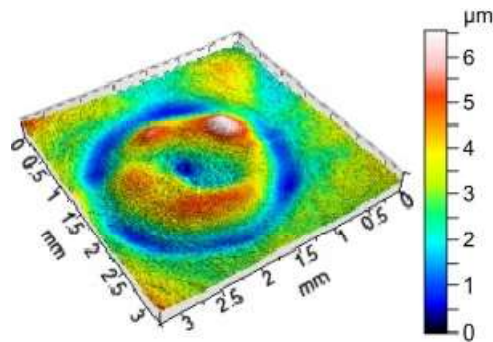
W celu przeprowadzenia podstawowej analizy struktury geometrycznej powierzchni wybrałem parametr S_q (średnia kwadratowa wysokość nierówności), jest on obok parametru S_a jednym z najczęściej wybieranych parametrów do oceny powierzchni, ze względu na znaczenie statystyczne. Jednak charakteryzuje się on większą czułością na zmiany amplitudy nierówności. Wyniki pomiaru parametru przedstawia rysunek 3.

Rysunek 3. Zmiany parametru S_q dla strategii spirala (a) i raster (b) dla różnych punktów pomiarowych.

Na podstawie analizy wykazałem, że strategia frezowania nie ma znaczącego wpływu na wartość parametru S_q . Dla najbardziej charakterystycznego punktu pomiarowego 1, gdzie wpływ strategii był największy w kształtowaniu powierzchni, wartości S_q są najniższe i niemal identyczne. Dla strategii spirala uzyskano wartość $0,656 \mu\text{m}$ podczas gdy dla strategii raster było to $0,639 \mu\text{m}$. Jednak w obu przypadkach, zmiany parametru S_q wahały się w granicach $0,64\text{-}1,1 \mu\text{m}$ w zależności od punktu pomiaru.

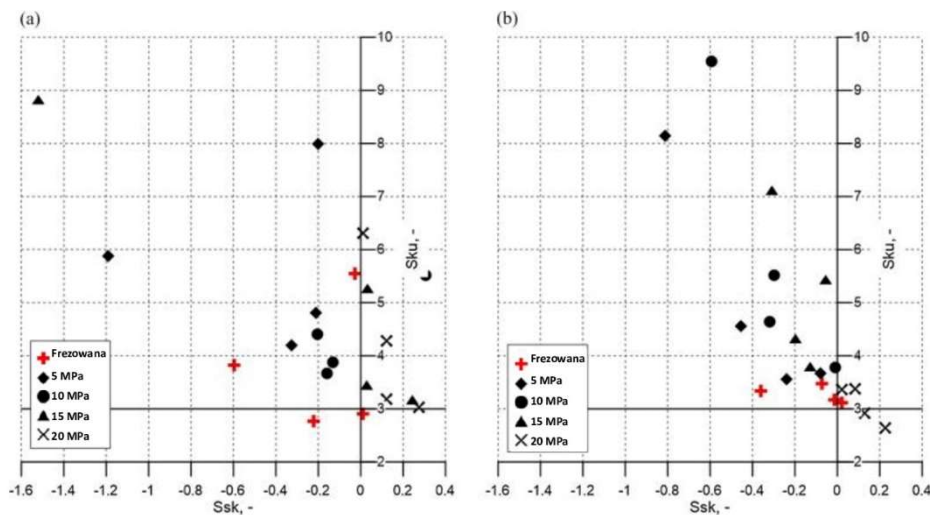
Stosując strategię raster, niezależnie od ciśnienia nagniatania, wartość parametru S_q zmniejszyła się do wartości średniej $0,3 \mu\text{m}$ niezależnie od obszaru, w którym wykonano pomiar chropowatości. Można wywnioskować, że strategia ta nie ma znaczącego wpływu na zmiany parametru S_q .

Parametr S_q zmienił się znacząco po nagniataniu ze strategią spirala. Ze względu na ścieżkę narzędzia, po obróbce zaobserwowano znaczne pogorszenie jakości powierzchni, szczególnie dla wyższych wartości ciśnienia (15, 20 MPa) dla obszaru 1. Można to również zauważyć na obrazie topografii powierzchni w tym obszarze (rys.4), gdzie zaobserwowano wyraźny rowek na powierzchni. Dla pozostałych miejsc pomiaru chropowatości, wartości S_q dla strategii spiralnej i rastrowej są porównywalne.



Rysunek 4. Widok izometryczny struktury geometrycznej powierzchni dla pomiaru w punkcie 1 dla strategii spirala i ciśnienia 20 MPa.

Ze względu na właściwości funkcjonalne, istotne jest określenie wpływu nagniatania na kształt struktury geometrycznej powierzchni, którego ocenę można przeprowadzić na podstawie mapy Ssk-Sku (S_{sk} – współczynnik skośności, S_{ku} - kurtoza). Wykresy dla obu przypadków strategii przedstawiłem na rys. 5.



Rysunek 5. Wartości parametrów S_{sk} – S_{ku} po obróbce nagniataniem dla strategii spirala (a) i raster (b) dla wszystkich punktów pomiarowych.

Dla obu strategii wykazałem, że kurtoza S_{ku} powierzchni ma wartość większą od 3, co oznacza, że powierzchnia charakteryzuje się obecnością wierzchołków. Jest to interesujące, ponieważ można by oczekiwać zmniejszenia wysokości tych wierzchołków podczas nagniatania. Jednak dla obydwóch strategii współczynnik skośności powierzchni S_{sk} dla większości przypadków przyjmuje wartości ujemne. Dla strategii spirala S_{sk} osiąga -1,5,

podczas gdy dla strategii raster minimalna wartość jest prawie o połowę wyższa i wynosi - 0,8. Ujemne wartości Ssk pojawiają się w górnej części punktów pomiarowych. Wykres Ssk-Sku może również świadczyć o efekcie wciskania i wypychania wierzchołków nagniatanej powierzchni, co było również zaobserwowane na widokach topografii powierzchni. Proces ten, w połączeniu ze ścieżką obróbki po frezowaniu, może prowadzić do lokalnej dominacji wierzchołków i tworzenia charakterystycznych wzniesień, o czym świadczą znaczne wartości Sku > 3.

Wartości Sku bliskie 3 dla strategii raster dowodzą, że może ona być stosowana do obróbki dla wyższych wartości ciśnienia. Można również zauważyć, że tylko dla strategii spirala skośność i kurtoza, dla $p = 5$ MPa, znacząco różnią się od innych wyników. Przy zastosowaniu strategii raster, wraz ze wzrostem ciśnienia nagniatania, można uzyskać znacznie bardziej stabilną jakość powierzchni w aspekcie zależności Ssk-Sku.

Obróbka nagniataniem stosowana jest bardzo często jako obróbka wykończeniowa, której celem jest uzyskanie dobrej jakości powierzchni tj. zmniejszenie wartości parametrów amplitudowych, a także zmiany krzywej udziału materiału. Istotna jest tutaj ocena parametrów Spk - zredukowana wysokość wierzchołka oraz Svk - zredukowana głębokość doliny. Najbardziej niekorzystne wartości Spk i Svk uzyskano dla strategii spirala w obszarze pomiarowym 1. Potwierdza to wcześniejsze obserwacje, że ta strategia nie jest zalecana do obróbki powierzchni w obszarze punktu początkowego nagniatania, tj. gdzie ścieżka narzędzia ma najmniejszy promień roboczy. Im dalej od punktu początkowego w strategii spirala uzyskane niższe wartości Spk i Svk były spowodowane wzrostem ciśnienia nagniatania.

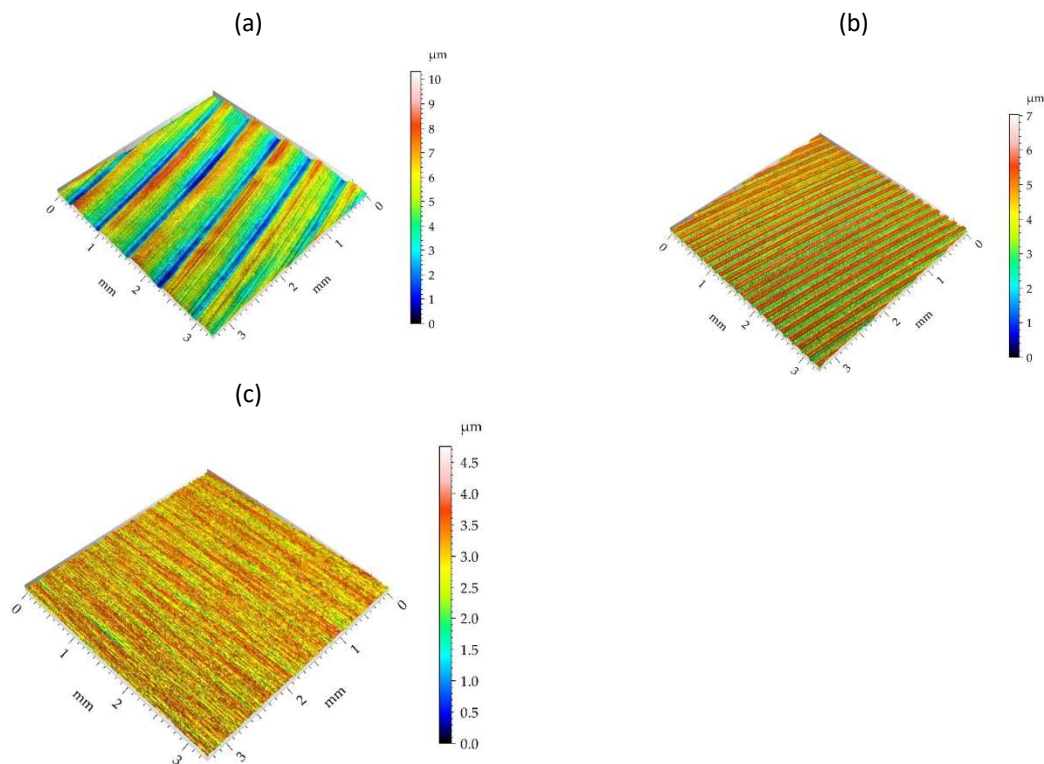
Powierzchnia po obróbce nagniataniem charakteryzuje się wyższymi wartościami parametru Svk dla $p = 5$ MPa, zarówno dla strategii spirala, jak i raster. Jednak to strategia raster charakteryzuje się korzystniejszymi wartościami parametrów Spk i Svk, szczególnie dla $p = 5-10$ MPa.

Otrzymywanie niskich wartości Spk i wysokich wartości Svk, jest korzystne z punktu widzenia konkretnego zastosowania w przemyśle. Wyższe wartości Svk wpływają na możliwość lepszego zbierania medium smarującego, co przy minimalizacji Spk zapewnia dobre właściwości funkcjonalne warstwy powierzchniowej. Można zatem przyjąć, że ze względu na Spk - Svk racjonalne jest stosowanie strategii rastrowej przy w nagniataniu z ciśnieniem w zakresie $p = 5-10$ MPa.

Wpływ obróbki poprzedzającej obróbkę gładkościową, na strukturę geometryczną powierzchni nagniatanej

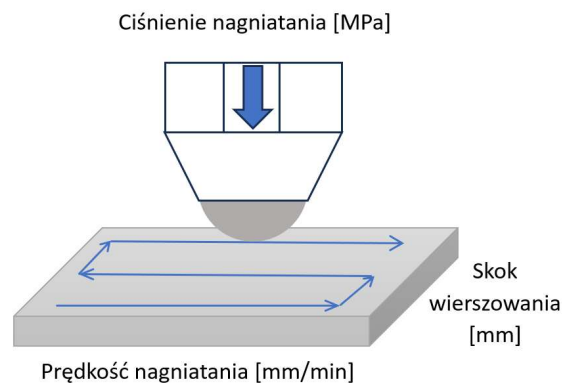
Nagniatanie gładkościowe stosuje się w odniesieniu do powierzchni po różnych rodzajach obróbek poprzedzających. Celowe jest ustalenie, jak obróbka poprzedzająca wpływa na strukturę geometryczną powierzchni nagniatanej. Wyniki badań w tym zakresie opublikowałem w pracy **[A1]**. Powierzchniami wyjściowymi były próbki ze stali X37CrMoV5 o zróżnicowanej strukturze geometrycznej powierzchni, dwie po frezowaniu oraz jedna po

szlifowaniu. Powierzchnie frezowane F1 i F2 charakteryzowały się zróżnicowaną wysokością nierówności oraz długością fali, charakteryzowaną przez długość korelacji λ_c . Były to powierzchnie okresowe z niewielkim udziałem składowej losowej (szumu). Losowa powierzchnia szlifowana S1 cechowała się najmniejszą wysokością nierówności spośród powierzchni po obróbce poprzedzającej. Wszystkie powierzchnie wejściowe miały strukturę anizotropową jednokierunkową. Rysunek 6 pokazuje mapy warstwiczne powierzchni po frezowaniu F1 i F2 oraz po szlifowaniu S1.



Rysunek 6. Mapy warstwiczne powierzchni F1 (a), F2 (b) i S1 (c)

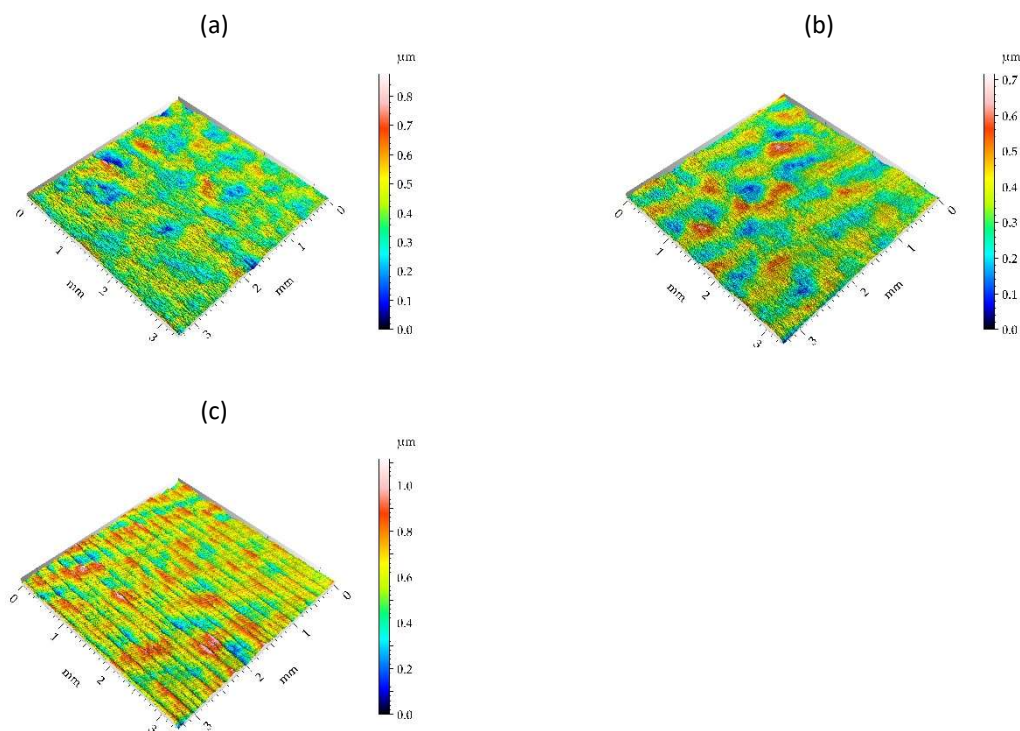
Zastosowałem w obróbce nagniataniem strategię raster (rysunek 7). Wykorzystałem cztery ciśnienia nagniatania p o wartościach 5, 15, 25 i 35 MPa. Dla każdego ciśnienia nagniatania zastosowałem trzy skoki wierszowania: 0,01, 0,05 i 0,1 mm. Prędkość nagniatania była stała i wynosiła 400 mm/min.



Rysunek 7. Schemat strategii nagniatania raster

Przeprowadziłem badania wpływu obróbki poprzedzającej na wartości kilkunastu parametrów stereometrii powierzchni. Przedmiotem analizy były nie tylko parametry wysokościowe, powszechnie stosowane, lecz również parametry hybrydowe, przestrzenne, funkcjonalne i wybrane parametry cech. Jest to istotne, ponieważ nie tylko wysokość nierówności wpływa na właściwości funkcjonalne elementów maszyn.

Nagniatanie doprowadziło do zmniejszenia wysokości nierówności powierzchni obrabianej. Największe zmniejszenie amplitudy powierzchni na podstawie zmiany wartości parametru S_q wynosi 94%. Zmiany względne były większe dla powierzchni wejściowej o największej wysokości nierówności. Zmniejszenie wysokości chropowatości wskutek nagniatania doprowadziło do zmniejszenia wartości parametrów hybrydowych. Natomiast charakter zmian parametrów przestrzennych zależał od rodzaju powierzchni wejściowej. Wzrost ciśnienia nagniatania spowodował większe zmiany parametrów przestrzennych prowadzących do zmian kształtu powierzchni. Nagniatanie doprowadziło do powstania powierzchni o wysokości charakteryzowanej przez parametr S_q między 0,1 and 0,2 μm , długości korelacji S_{al} pomiędzy 0,1 and 0,2 mm oraz wskaźnika tekstury S_{tr} pomiędzy 0,45 i 0,6. Parametr S_{tr} zbliżony do 0 świadczy o anizotropowym, zaś zbliżony do 1 o izotropowym charakterze powierzchni. Powierzchnie te miały charakter losowy lub losowo-okresowy, o czym świadczą wartości parametru S_{ku} powyżej 3. Podczas obróbki nagniataniem powierzchnie anizotropowe jednokierunkowe zmieniały się w powierzchnie mieszane. Spośród powierzchni frezowanych większa długość fali powierzchni wejściowej $F1$ charakteryzowana długością korelacji S_{al} doprowadziła do większego zmniejszenia amplitudy nierówności na skutek nagniatania. W tym przypadku wzrost ciśnienia nagniatania do 35 MPa doprowadził do zmniejszenia wysokości chropowatości. W przypadkach dwóch pozostałych powierzchni wejściowych najmniejsze wysokości nierówności osiągnięto dla ciśnień o wartościach 15-25 MPa. Dalszy wzrost ciśnienia p doprowadził do niekorzystnego zwiększenia wysokości nierówności powierzchni nagniatanej. Stwierdzono, że stosowanie skoku wierszowania a równego 0,1 mm prowadzi do mniejszych zmian kształtu powierzchni obrabianych w porównaniu do mniejszych skoków. Wynika to prawdopodobnie z faktu, że ten skok był zbyt duży do pokrycia śladów obróbki poprzedzającej. Stosowanie go jest często powiązane z występowaniem zakłóceń wysokoczęstotliwościowych. Dlatego nie powinien być stosowany. Rysunek 8 przedstawia przykładowe widoki izometryczne powierzchni $M1$ poddanej nagniataniu przy użyciu różnych skoków wierszowania a . Stosowanie największego skoku prowadziło do innego kształtu powierzchni w porównaniu do stosowania skoków mniejszych.



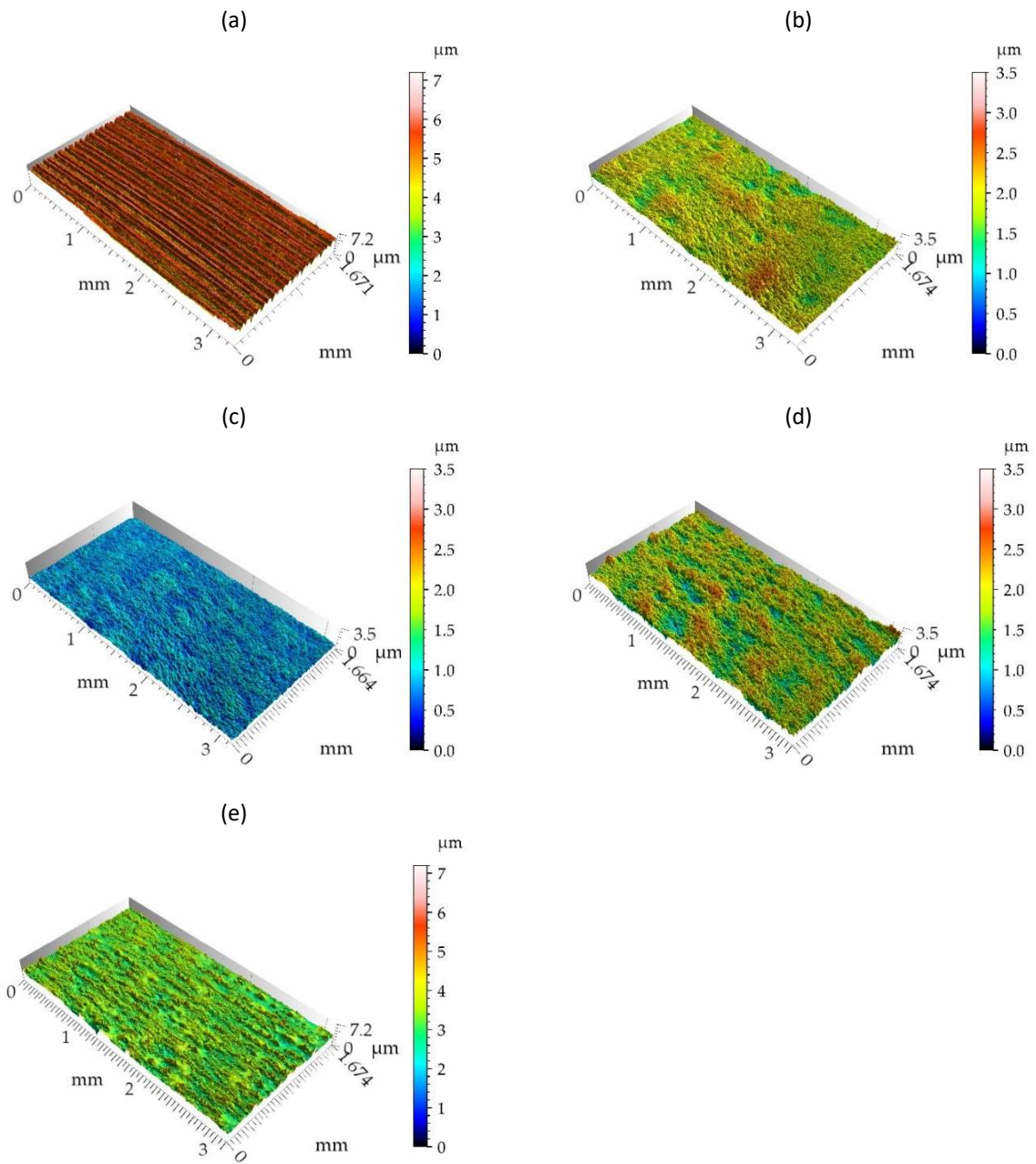
Rysunek 8. Widoki izometryczne powierzchni F1 poddanej nagniataniu przy ciśnieniu $p = 35$ MPa i skokach wierszowania 0,01 mm (a), 0,05 mm (b) i 0,1 mm (c)

Określenie wpływu obróbki nagniataniem na tribologiczne właściwości warstwy wierzchniej w warunkach tarcia technicznie suchego

Przeprowadziłem analizę wpływu nagniatania na tarcie i zużycie węzłów ślizgowych w różnych warunkach. Praca [A4] dotyczy badań w warunkach tarcia suchego przy ślizganiu w ruchu jednokierunkowym w konfiguracji kulka-tarcza.

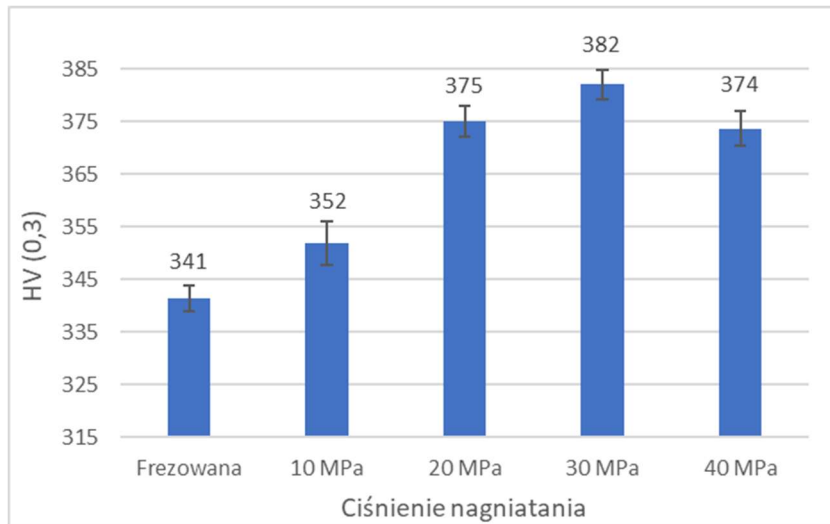
Nagniałem powierzchnie tarcz ze stali 42CrMo4. Początkowa powierzchnia była frezowana. Zastosowałem nagniatanie typu spirala, prędkość nagniatania wynosiła 500 m/min, zaś skok wierszowania 0,01 mm. W badaniach zmieniałem ciśnienie nagniatania, które obejmowało możliwy zakres i wynosiło 10, 20, 30 i 40 MPa.

Nagniatanie doprowadziło do zmniejszenia wysokości nierówności oraz parametrów hybrydowych oraz do zwiększenia wartości parametrów przestrzennych S_{al} i S_{tr} . Stosowanie ciśnień o wartościach 10 i 20 MPa doprowadziło do zmniejszenia wysokości nierówności, natomiast dalszy wzrost ciśnienia skutkowało zwiększeniem amplitudy nierówności. Maksymalne zmniejszenie wartości parametru S_q w stosunku do próbki frezowanej wynosiło 82%. Najbardziej niekorzystną strukturę geometryczną powierzchni uzyskano po zastosowaniu największego ciśnienia nagniatania (dodatnie wartości parametru S_{sk} , niewielka gęstość wierzchołków S_{pd}). Rysunek 9 przedstawia widoki izometryczne powierzchni próbek stalowych po frezowaniu i nagniataniu.



Rysunek 9. Widoki izometryczne próbek stalowych po frezowaniu (a) i następnym nagniataniu przy stosowaniu ciśnień 10 MPa (b), 20 MPa (c), 30 MPa (d) 40 MPa (e).

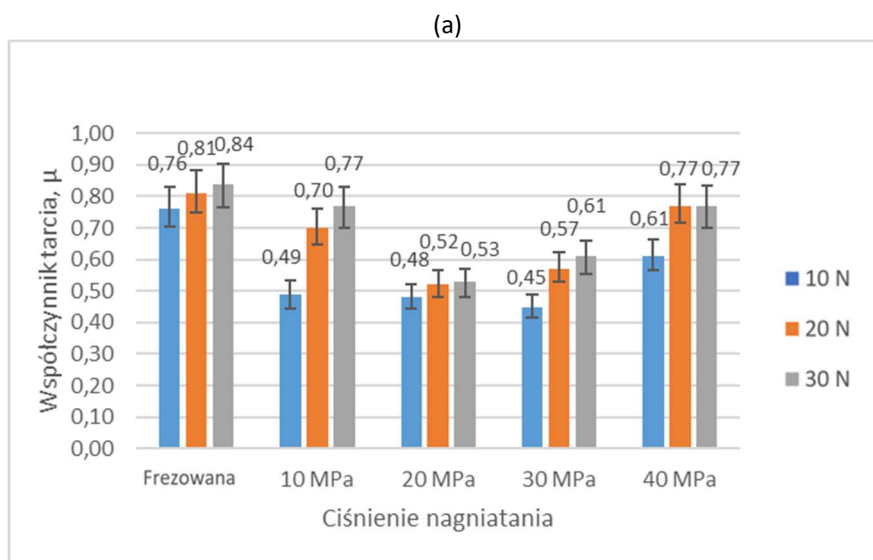
Przeprowadziłem również pomiary mikrotwardości próbek stalowych. Nagniatanie doprowadziło do zwiększenia mikrotwardości próbek, wzrost był największy dla ciśnienia nagniatania 30 MPa (rysunek 10).

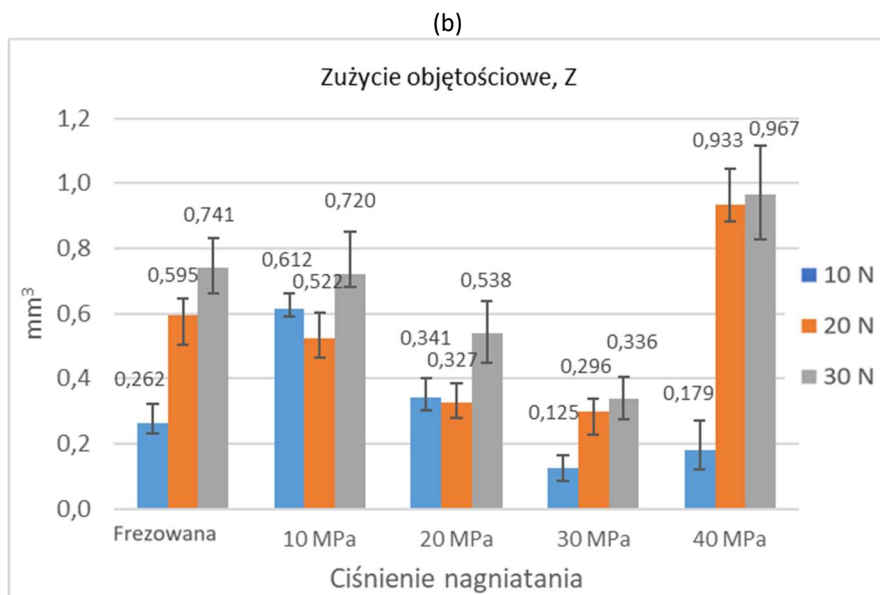


Rysunek 10. Wyniki pomiarów mikrotwardości próbek ze stali 42CrMo4

W trakcie badań tribologicznych tarcze stalowe współpracowały z kulkami ze stali 100Cr6 o większej twardości w warunkach ruchu obrotowego tarczy. Badania przeprowadziłem w temperaturze otoczenia (20–22°C) przy wilgotności względnej 40-50%. Prędkość ślizgania wynosiła 0,36 m/s, zaś czas badań wynosił 10 minut. Badania prowadziłem przy siłach normalnych równych 10, 20 i 30 N. Podczas badań była rejestrowana siła tarcia. Zużycie elementów trących określiłem na podstawie pomiarów topografii powierzchni z wykorzystaniem interferometru światła białego.

Rysunek 11 przedstawia wyniki badań tribologicznych.





Rysunek 11. Wyniki pomiarów współczynnika tarcia (a) i zużycia objętościowego tarczy (b)

Odmienne wyniki badań tribologicznych otrzymałem po zastosowaniu obciążenia normalnego 10 N i większych. W przypadku najmniejszego obciążenia nagniatanie doprowadziło do zmniejszenia oporów tarcia. Największe zmiany otrzymałem dla ciśnień nagniatania 10, 20 i 30 MPa, mniejszą redukcję zaobserwowałem dla największego ciśnienia. W przypadkach większych obciążeń normalnych nagniatanie doprowadziło do zmniejszenia tarcia tylko przy ciśnieniach 20 i 30 MPa. Stosowanie nagniatania doprowadziło nie tylko do zmian oporów tarcia, lecz również do zmian zużycia objętościowego próbek w porównaniu do tarczy frezowanej. W przypadku najmniejszego obciążenia normalnego zużycie wzrosło w przypadku stosowania ciśnień nagniatania $p = 10$ i 20 MPa, zaś zmalało dla $p = 30$ i 40 MPa. W przypadku stosowania większych obciążeń normalnych zużycie objętościowe zwiększyło się dla $p = 10$ i 40 MPa i zmalało dla $p = 20$ i 30 MPa.

Najmniejsze wartości tarcia i zużycia uzyskałem dla ciśnień nagniatania 20 i 30 MPa. Najbardziej niekorzystne właściwości tribologiczne otrzymałem dla największego ciśnienia nagniatania. Próbka nagniatania cechowała się wtedy niekorzystną topografią powierzchni (dodatnie wartości parametru S_{sk} , mała gęstość wierzchołków Sp_d). Zazwyczaj małym wartościom siły tarcia odpowiadały niewielkie wartości zużycia tarczy. Stosowanie nagniatania doprowadziło do zmniejszenia współczynnika tarcia do 42%, zaś zużycia do 55%. Z powodu różnicy twardości kulek i tarcz zużycie kulek było pomijalnie małe.

Przeprowadziłem również badania tribologiczne w warunkach ruchu posuwisto-zwrotnego. Wyniki badań opublikowałem w pracy [A3]. Ponownie nagniatąłem powierzchnię tarczy ze stali 42CrMo4 po frezowaniu. Zastosowałem nagniatanie typu spirala, prędkość nagniatania wynosiła 650 m/min, zaś skok wierszowania 0,01 mm. Ciśnienie nagniatania wynosiło ponownie 10, 20, 30 i 40 MPa. Tabela 1 przedstawia wyniki pomiarów stereometrii powierzchni badanych tarcz.

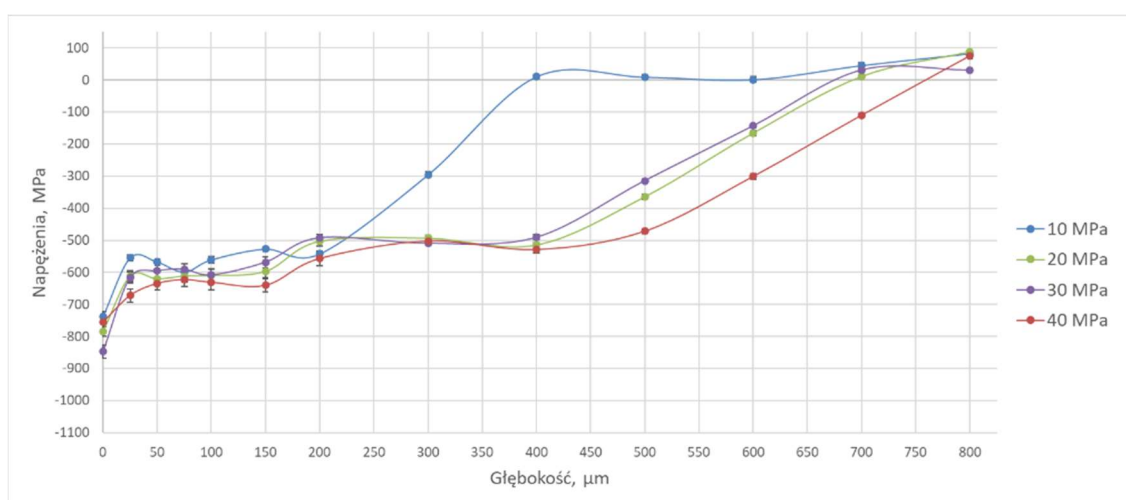
Tabela 1. Wartości wybranych parametrów stereometrii powierzchni po frezowaniu i następnie nagniataniu.

Parametry		Nagniatana				
		Frezowana	10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa
Sq	μm	0,871	0,326	0,257	0,138	0,202
Ssk		0,425	-0,254	-0,029	-0,013	-0,002
Sku		2,151	3,365	2,983	2,547	3,071
Sz	μm	4,699	2,289	1,574	0,6519	0,9698
Sal	mm	0,043	0,129	0,195	0,144	0,162
Str		0,032	0,412	0,175	0,741	0,180
Sdq		0,064	0,037	0,007	0,01	0,009
Spd	1/mm ²	234,7	602,5	516,5	296,8	111,81

Powierzchnia frezowana była powierzchnią anizotropową jednokierunkową (wartość parametru Str była bliska zeru) okresową, o czym świadczy kurtoza Sku znacznie mniejsza od 3. Nagniatanie zmieniło powierzchnię w kierunku izotropowej (wzrost wartości parametru Str) oraz losowej (wzrost wartości kurtozy Sku). W wyniku nagniatania zmniejszyły się wartości parametrów amplitudowych oraz średniokwadratowego pochylenia Sdq. Wraz ze zwiększaniem ciśnienia p zmniejszała się wysokość nierówności, która jednak zwiększyła się po zastosowaniu ciśnienia 40 MPa. Powierzchnia nagniatania otrzymana przy ciśnieniu 40 MPa była powierzchnią niejednorodną o najmniejszej wartości gęstości wierzchołków Spd, co może skutkować pogorszeniem właściwości tribologicznych skojarzenia ciernego. Największe zmniejszenie wartości parametru Sq wynosiło 85%.

Wzrost ciśnienia nagniatania doprowadził do wzrostu mikrotwardości. Największe zwiększenie mikrotwardości wynoszące 20% wystąpiło dla największego ciśnienia p. Niewielki wzrost mikrotwardości wystąpił przy najmniejszym ciśnieniu nagniatania.

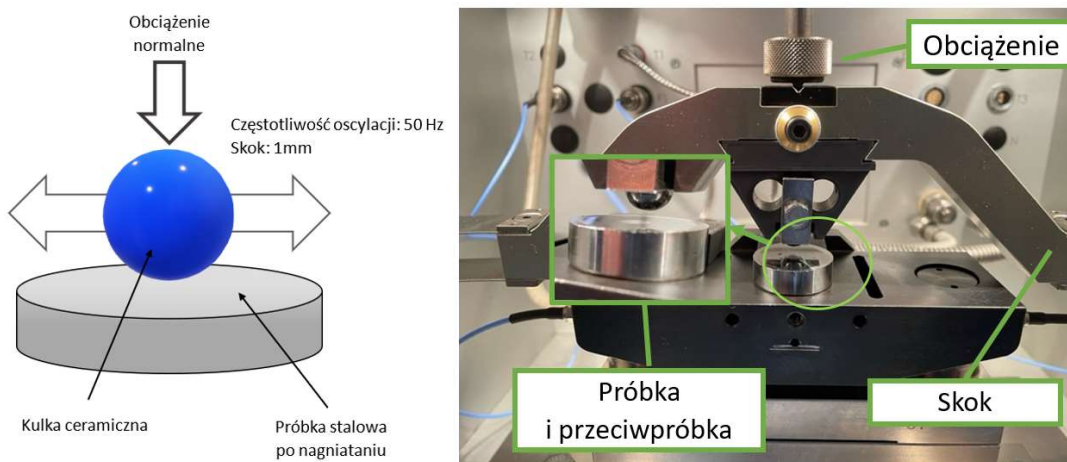
Przeprowadzono również pomiary naprężeń własnych próbek obrabianych (rysunek 12).



Rysunek 12. Rozkład naprężeń próbek nagniatanych w stosunku do głębokości

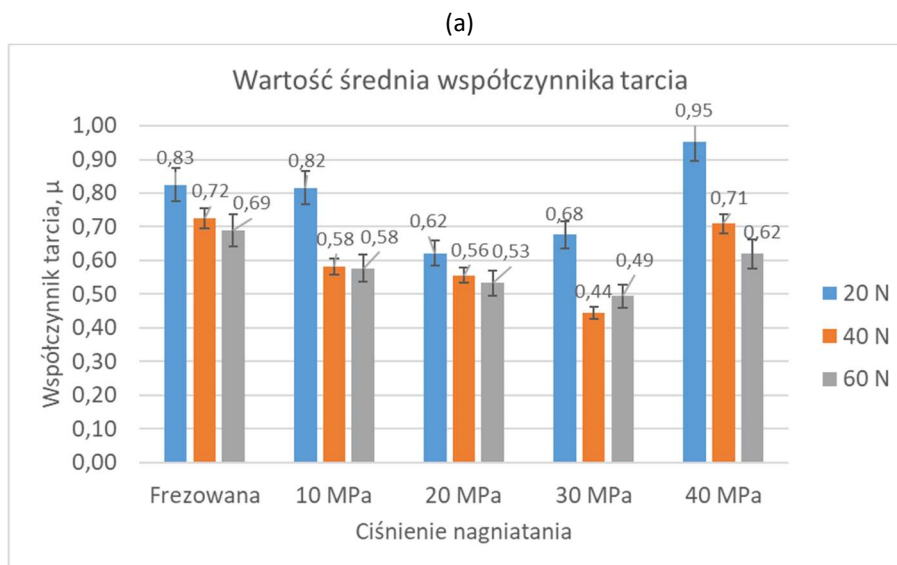
Naprężenia własne na powierzchni próbki frezowanej wynosiły 383 ± 13 MPa. Nagniatanie przekształciło naprężenia rozciągające (po frezowaniu) w ściskające. Najmniejsze wartości naprężeń i głębokości ich zalegania (0,4 mm) otrzymano dla najmniejszego ciśnienia nagniatania 10 MPa. W pozostałych przypadkach naprężenia ściskające występowały na głębokości 0,8 mm, największe wartości otrzymano dla największego ciśnienia nagniatania.

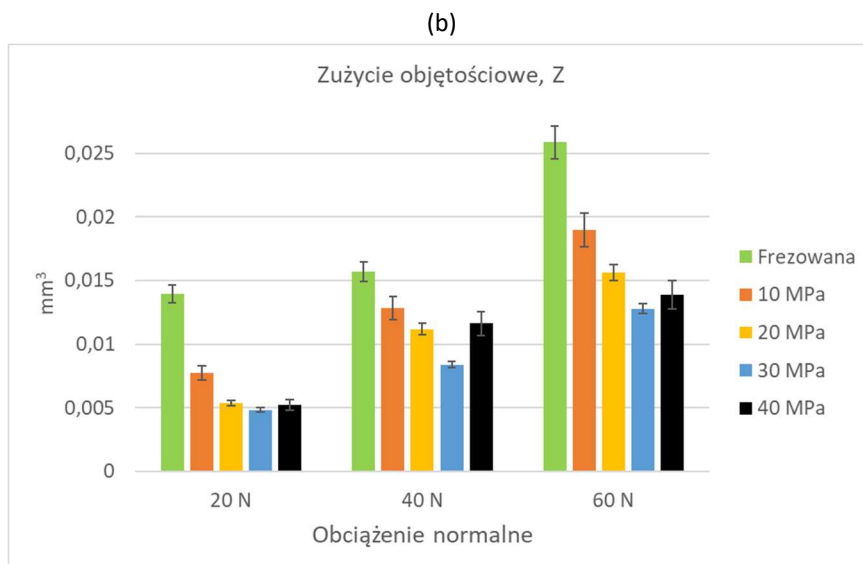
Badania tarcia i zużycia przeprowadziłem w ruchu posuwisto-zwrotnym w warunkach tarcia technicznie suchego (rysunek 13) z wykorzystaniem testera tribologicznego Optimol SRV5. Tarcze stalowe po frezowaniu i nagniataniu współpracowały z kulką ceramiczną z materiału WC. Skok wynosił 1 mm, częstotliwość oscylacji wynosiła 50 Hz, liczba cykli wynosił 45000. Zastosowano obciążenia normalne równe 20, 40 i 60 N.



Rysunek 13. Schemat badań tribologicznych z wykorzystaniem testera Optimol SRV5

Rysunek 14 przedstawia wyniki badań.





Rysunek 14. Wyniki pomiaru współczynnika tarcia (a) i zużycia objętościowego tarcz stalowych (b)

Najmniejsze wartości współczynnika tarcia przy najmniejszym obciążeniu normalnym uzyskałem dla ciśnień nagniatania 20 i 30 MPa, podobne wartości współczynnika tarcia otrzymałem dla par ciernych zawierających tarcze frezowane i nagniatane z wykorzystaniem najmniejszego ciśnienia, natomiast stosowanie największego ciśnienia nagniatania doprowadziło do wzrostu współczynnika tarcia w porównaniu ze skojarzeniem ciernym zawierającym tarczę frezowaną. W przypadku stosowania większych obciążeń normalnych nagniatanie doprowadziło do zmniejszenia oporów tarcia, najmniejsze opory tarcia otrzymano dla ciśnienia nagniatania 30 MPa, następnie 10 i 20 MPa, zaś stosowanie ciśnienia 40 MPa doprowadziło do otrzymania największych oporów ruchów spośród par ciernych zawierających tarcze nagniatane. Zwiększanie obciążenia normalnego spowodowało zmniejszenie współczynnika tarcia, co świadczy o poprawie dopasowania powierzchni tarcz i kulek. Generalnie najmniejsze opory tarcia osiągnąłem dla tarcz o najmniejszej wysokości nierówności otrzymanej dla ciśnienia nagniatania 30 MPa, zaś duże dla powierzchni nagniatanej przy ciśnieniu 10 MPa o stosunkowo dużej wysokości nierówności oraz nagniatanej przy największym ciśnieniu 40 MPa, będącej powierzchnią niejednorodną, o najmniejszej gęstości szczytów.

Stosowanie nagniatania we wszystkich analizowanych przypadkach wpłynęło na zmniejszenie zużycia tarcz. Największą zmianę względną osiągnięto dla najmniejszego obciążenia normalnego. Najmniejsze zmniejszenie zużycia objętościowego zaobserwowano po zastosowaniu najmniejszego ciśnienia nagniatania, przy którym otrzymano niewielki wzrost mikrotwardości, niewielkie naprężenia ściskające i stosunkowo wysoką chropowatość powierzchni. Stosowanie ciśnienia nagniatania 30 MPa, skutkującego najmniejszą wysokością nierówności i znacznym wzrostem mikrotwardości doprowadziło do największego zmniejszenia zużycia objętościowego tarczy. Stosunkowo niewielkie zużycie tarczy po zastosowaniu ciśnienia nagniatania 40 MPa, zwłaszcza przy największej sile normalnej jest prawdopodobnie spowodowane znacznym wzrostem mikrotwardości tarczy i występowaniem dużych naprężeń ściskających. Zużycie kulek ceramicznych było niewielkie.

Ogólnie, stosowanie nagniatania doprowadziło do zmniejszenia współczynnika tarcia i zużycia objętościowego tarczy odpowiednio o 29 i 85%.

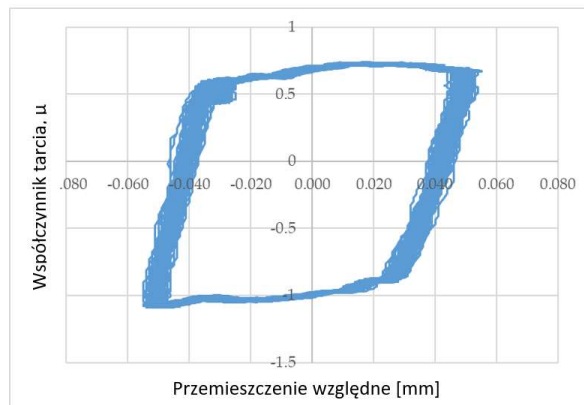
Fretting jest złożonym procesem zużywania warstwy wierzchniej kontaktujących ciał. Jest to zjawisko niszczenia warstw wierzchnich spowodowane przez oscylacyjny, styczny ruch względny, o małej amplitudzie poślizgu. Problemy związane z zużyciem frettingowym są przedmiotem wzrastającej uwagi oraz wielu badań naukowych. Spowodowane jest to głównie negatywnymi skutkami procesu, które mogą powodować stany awaryjne maszyn i urządzeń. Chociaż pierwotnie uważano fretting za rodzaj korozji, ze względu na utlenione produkty zużycia, stało się jasne, że fretting jest znacznie bardziej skomplikowanym procesem, który obok korozji, może obejmować procesy adhezyjne, ścierania i zmęczeniowe. W zależności od warunków obciążenia, takich jak siła normalna oraz amplituda przemieszczenia, fretting może spowodować uszkodzenie powierzchni przez zmęczenie i/lub zużycie. Przy niewielkich przemieszczeniach względnych, fretting występuje w warunkach częściowego poślizgu. Zużycie jest wtedy niewielkie, występują pęknięcia zmęczeniowe. W warunkach całkowitego poślizgu zużycie rośnie ze wzrostem amplitudy przemieszczeń.

W publikacji **[A9]** przeanalizowałem wpływ parametrów nagniatania na tarcie i zużycie w warunkach frettingu bez smarowania. Kulka ze stopu 100Cr6 współpracowała z tarczą ze stopu tytanu Ti6Al4V. Badania przeprowadziłem z wykorzystaniem testera tribologicznego Optimol SRV5. Do optymalizacji parametrów nagniatania zastosowałem metodę Taguchi. Stosowanie kombinacji skoku wierszowania i ciśnienia doprowadziło do zmniejszenia zużycia. Prędkość nagniatania miała wpływ na współczynnik tarcia.

Przeprowadziłem również badania wpływu nagniatania na tarcie i zużycie z wykorzystaniem ponownie testera tribologicznego Optimol SRV5 w warunkach frettingu bez smarowania **[A5]**. Nagniatano tarcze wykonane ze stali 42CrMo4 przy zastosowaniu następujących parametrów: prędkość 500 mm/min, skok wierszowania 0,01 mm. Parametrem zmiennym było ciśnienie nagniatania, które wynosiło ponownie 10, 20, 30 i 40 MPa. Powierzchnią wejściową była powierzchnia po frezowaniu, charakteryzowana parametrami $S_q = 0,58 \mu\text{m}$, $S_{sk} = 0,31$, $S_{ku} = 2,2$, $S_{tr} = 0,14$. Wartości tych parametrów świadczą o tym, że powierzchnia była powierzchnią okresową anizotropową. Nagniatanie doprowadziło do zmniejszenia wysokości nierówności. W przypadku stosowania ciśnień 10 i 20 MPa otrzymałem wysokość nierówności $S_q = 0,14 \mu\text{m}$, wzrost ciśnienia do 30 MPa doprowadził do dalszego zmniejszenia wysokości nierówności ($S_q = 0,11 \mu\text{m}$). Dalszy wzrost ciśnienia nagniatania do 40 MPa spowodował wzrost wysokości nierówności ($S_q = 0,26 \mu\text{m}$). W tym przypadku otrzymałem powierzchnię niejednorodną, o niewielkiej gęstości wierzchołków. Nagniatanie wpłynęło na zmniejszenie pochyleń średniokwadratowego S_{dq} oraz wzrost długości korelacji. Powierzchnie nagniatane miały charakter losowy, o czym świadczą wartości parametru S_{ku} większe od 3. Miały one charakter izotropowy lub mieszany, wartości parametru S_{tr} zawierały się w zakresie: 0,34-0,68.

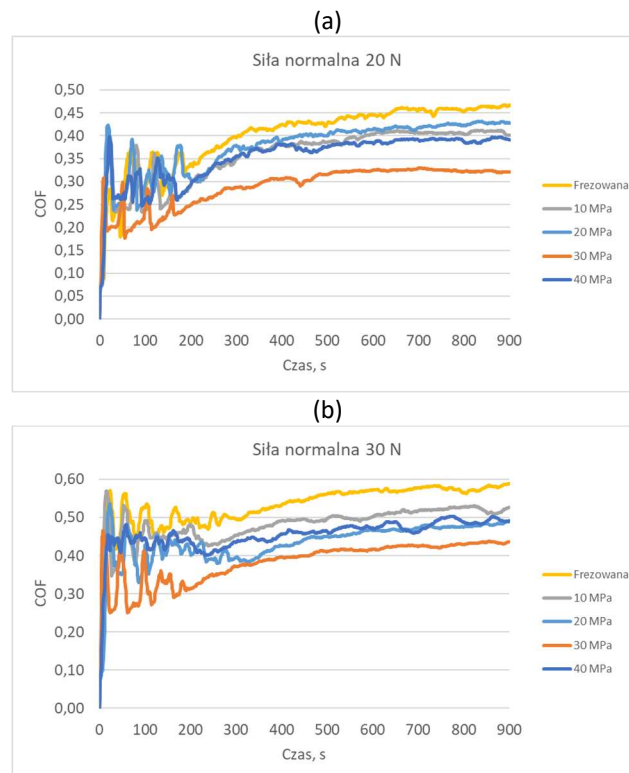
Po zastosowaniu ciśnienia nagniatania 10 MPa mikrotwardość zwiększyła się nieznacznie. W pozostałych przypadkach otrzymałem wzrost mikrotwardości o około 10%.

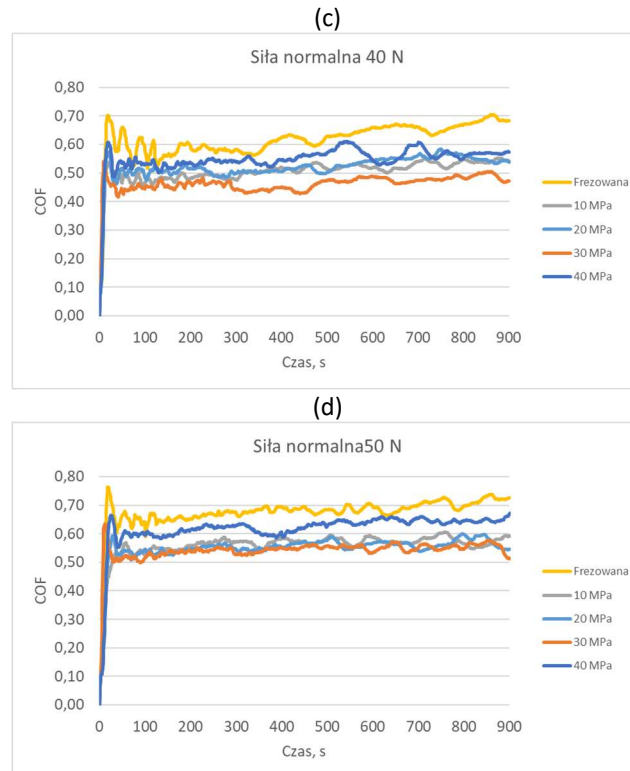
Podczas badań tribologicznych tarcza stalowa współpracowała z kulką ceramiczną z materiału WC. Częstotliwość oscylacji wynosiła 50 Hz, zaś skok 0,1 mm, liczba cykli wynosiła 45000. Badania przeprowadzono przy wilgotności względnej 35-45% i temperaturze 30°C. Obciążenie normalne wynosiło 20, 30 40 i 50 N. Dla każdego obciążenia normalnego, średnica kontaktu sprężystego była większa od skoku, co świadczy o występowaniu frettingu. O istnieniu frettingu dowodzi również kształt pętli frettingowych, których przykład pokazano na rysunku 15.



Rysunek 15. Pętla frettingowa otrzymana dla tarczy po zastosowaniu ciśnienia nagniatania $p = 30$ MPa podczas pracy przy sile normalnej 20 N.

Rysunek 16 przedstawia przykładowe przebiegi współczynnika tarcia w czasie.





Rysunek 16. Przebiegi współczynnika tarcia w czasie badań w warunkach frettingu przy obciążeniach normalnych 20 (a), 30 (b), 40 (c) i 50 N (d)

Przebiegi współczynnika tarcia w czasie badań są podobne: po początkowym nagłym wzroście współczynnik tarcia stabilizuje się i łagodnie rośnie. Czas stabilizacji jest najkrótszy przy największym obciążeniu normalnym oraz obciążeniu 40 N. Współczynnik tarcia wzrasta przy zwiększeniu obciążenia normalnego, co świadczy o małym zużyciu kulki i utrzymaniu styku skoncentrowanego: płaszczyzna płaska-kulka. Niezależnie od obciążenia normalnego największe wartości współczynnika tarcia otrzymano dla skojarzenia zawierającego tarczę frezowaną, o największej wysokości chropowatości, zaś najmniejsze dla pary tarcia z tarczą nagniataną przy ciśnieniu 30 MPa; w tym przypadku wysokość nierówności była najmniejsza. Spośród pozostałych par ciernych zawierających tarcze nagniatane, stosowanie ciśnienia 40 MPa doprowadziło do największych współczynników tarcia dla dużych obciążeń normalnych 40 i 50 N. Tarcza ta miała najbardziej niekorzystną strukturę geometryczną powierzchni (wysoka chropowatość, mała gęstość wierzchołków, struktura niejednorodna) spośród próbek nagniatanych.

W przypadku frettingu oblicza się sumaryczne zużycia objętościowe kulki i tarczy z uwzględnieniem możliwości przenoszenia materiału i odkształcenia plastycznego. Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości zużycia objętościowego tarczy Z_{tarcza} , kulki Z_{kulka} oraz układu tribologicznego Z

Rodzaj obróbki	Obciążenie, N	Z_{tarcza} , μm^3	Z_{kulka} , μm^3	Z, μm^3
Frezowanie	20	105,396	50,140	155,536
	30	430,411	144,959	575,370
	40	849,299	200,362	1049,661

	50	1263,317	275,712	1539,029
Nagniatanie, $p = 10$ MPa	20	93,585	29,066	122,650
	30	210,423	86,378	296,801
	40	505,780	139,739	645,518
	50	1001,992	240,320	1242,312
Nagniatanie, $p = 20$ MPa	20	66,295	24,066	90,361
	30	307,287	85,615	392,902
	40	539,396	125,088	664,483
	50	910,172	159,008	1069,180
Nagniatanie, $p = 30$ MPa	20	45,116	42,675	87,791
	30	250,890	77,478	328,368
	40	493,898	69,223	563,120
	50	746,124	174,991	921,114
Nagniatanie, $p = 40$ MPa	20	74,638	35,157	109,794
	30	302,186	59,039	361,225
	40	601,640	144,338	745,977
	50	994,493	149,121	1143,614

Zużycie kulek było znacznie mniejsze, niż zużycie tarcz. Największe wartości zużycia układu tribologicznego otrzymano dla pary trącej zawierającej tarczę frezowaną. W większości przypadków stosowanie ciśnienie nagniatania 30 MPa doprowadziło do najmniejszych wartości zużycia. Podobne wyniki otrzymano w stosunku do oporów tarcia. Zużycie tarcz miało charakter ścierny z obecnością deformacji plastycznej.

Ogólnie, stosowanie nagniatania doprowadziło do zmniejszenia oporów tarcia i zużycia do 45% w warunkach frettingu całkowitego bez smarowania.

Przedstawiono powyżej badania tribologiczne w warunkach tarcia technicznie suchego. Powierzchnie nagniatanie o niewielkiej wysokości powierzchni mogą mieć również zastosowanie w warunkach smarowania. Smarowanie jest procesem wprowadzania substancji smarującej między współpracujące powierzchnie. Główną funkcją smarowania jest zmniejszenie tarcia i ścierania powierzchni współpracujących elementów maszyn. Ważnym zadaniem smarowania jest zabezpieczenie przed zacieraniem. Ponadto oleje i smary mają chronić powierzchnie narażone na korozję, jak również uszczelniać miejsca szczególnie narażone na działanie wilgoci, kurzu i innych zanieczyszczeń.

Badanie wpływu obróbki nagniataniem na tribologiczne właściwości warstwy wierzchniej w warunkach tarcia ze smarowaniem

Wyniki badań skojarzeń ciernych zawierających próbki nagniatane przedstawiłem w publikacji [A6]. Nagniatanie przeprowadzono w odniesieniu do tarcz uprzednio frezowanych. Prędkość nagniatania wynosiła 500 mm/min, zaś skok wierszowania wynosił 0,01 mm. Zastosowałem ciśnienia nagniatania 10, 20, 30 i 40 MPa. Tabela 3 przedstawia wyniki badań stereometrii powierzchni.

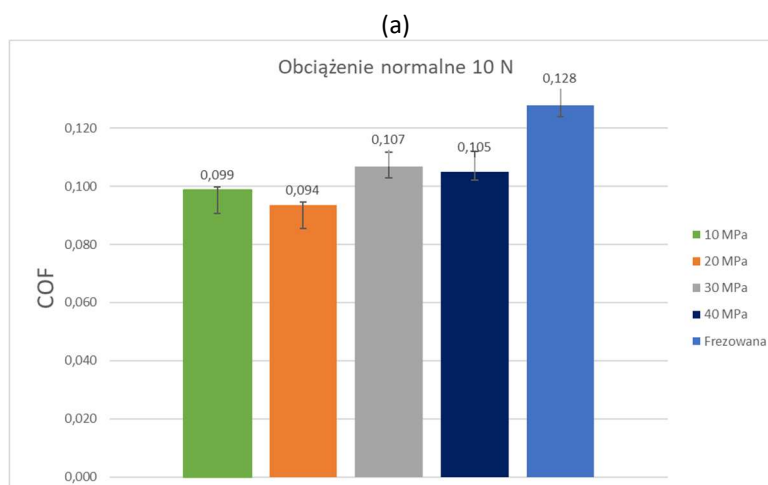
Tabela 3. Wyniki pomiarów stereometrii powierzchni tarcz stalowych stosowanych w badaniach tribologicznych w warunkach smarowania.

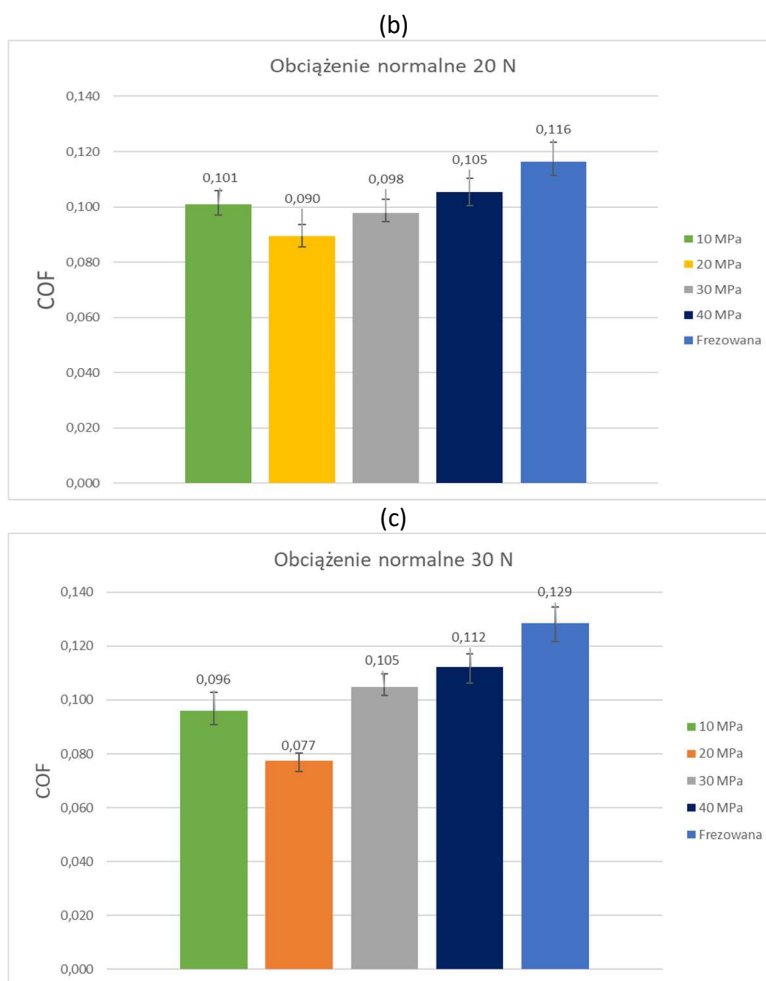
Tarcza		Nagniatane				
		10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	Frezowane
Parametry	Jednostka					
Sq	μm	0,25	0,16	0,57	0,81	0,87
Ssk		-0,23	-0,21	0,12	0,12	0,41
Sku		3,01	4,28	2,92	3,2	2,28
Sz	μm	1,9	1,85	4,08	5,82	4,69
Sal	mm	0,19	0,09	0,29	0,38	0,05
Sdq		0,024	0,014	0,059	0,052	0,072
Spd	1/mm ²	392	122	770	280	462

Powierzchnia frezowana była powierzchnią anizotropową okresową. Powierzchnie nagniatane były powierzchniami izotropowymi lub mieszanymi losowymi lub losowo-okresowymi. Proces nagniatania doprowadził do zmniejszenia wysokości nierówności, pochylenia i do zwiększenia długości korelacji. Stosowanie ciśnień nagniatania 10 i 20 MPa doprowadziło do zmniejszenia wysokości nierówności, natomiast dalsze wzrosty ciśnienia spowodowały zwiększenie amplitudy chropowatości. Przy stosowaniu największego ciśnienia nagniatania parametry amplitudowe były niewiele mniejsze od parametrów powierzchni frezowanej.

Przeprowadziłem badania tribologiczne podczas ruchu jednokierunkowego obrotowego tarczy ze stali 42CrMo4 współpracującej z kulką ze stali 100Cr6 o większej twardości. Prędkość ślizgania wynosiła 0,36 m/s, czas badań wynosił 10 minut. Zastosowałem obciążenia normalne równe 10, 20 i 30 N. Przed każdą próbą wprowadziłem 0,5 ml oleju mineralnego L-AN-46 do obszaru styku kulki z tarczą. Olej ten zawiera niewiele dodatków smarnościowych. Podczas prób tribologicznych nie dostarczano dodatkowo oleju.

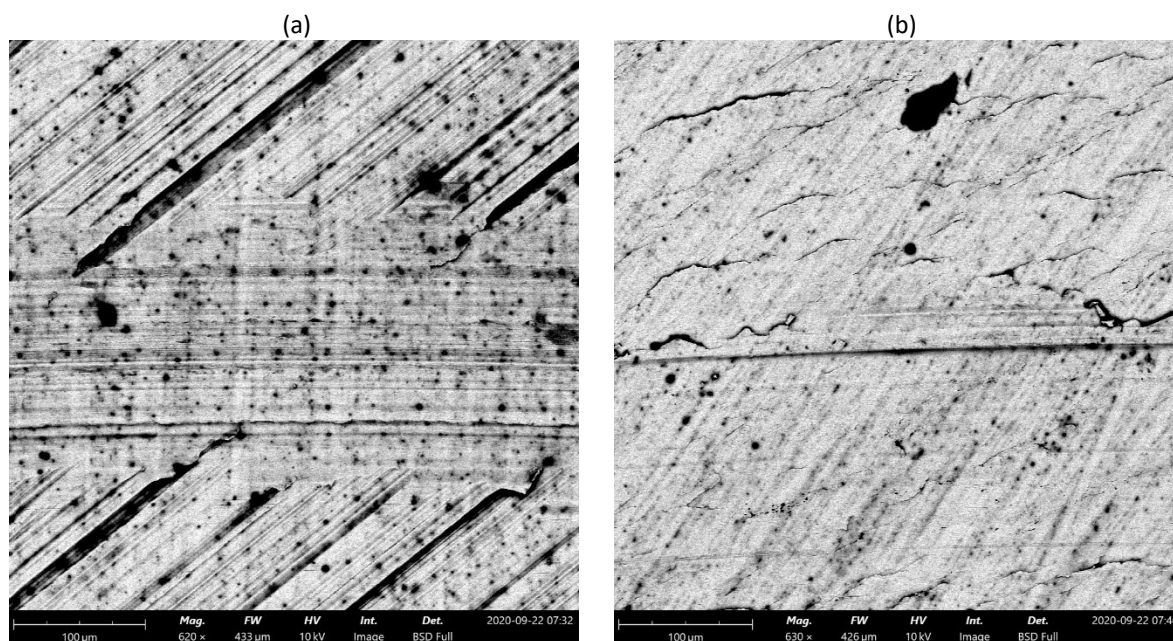
Rysunek 17 przedstawia wyniki badań tribologicznych.





Rysunek 17. Wartości średnie współczynnika tarcia dla badanych par ciernych przy obciążeniu normalnym 10 (a), 20 (b) i 30 N (c)

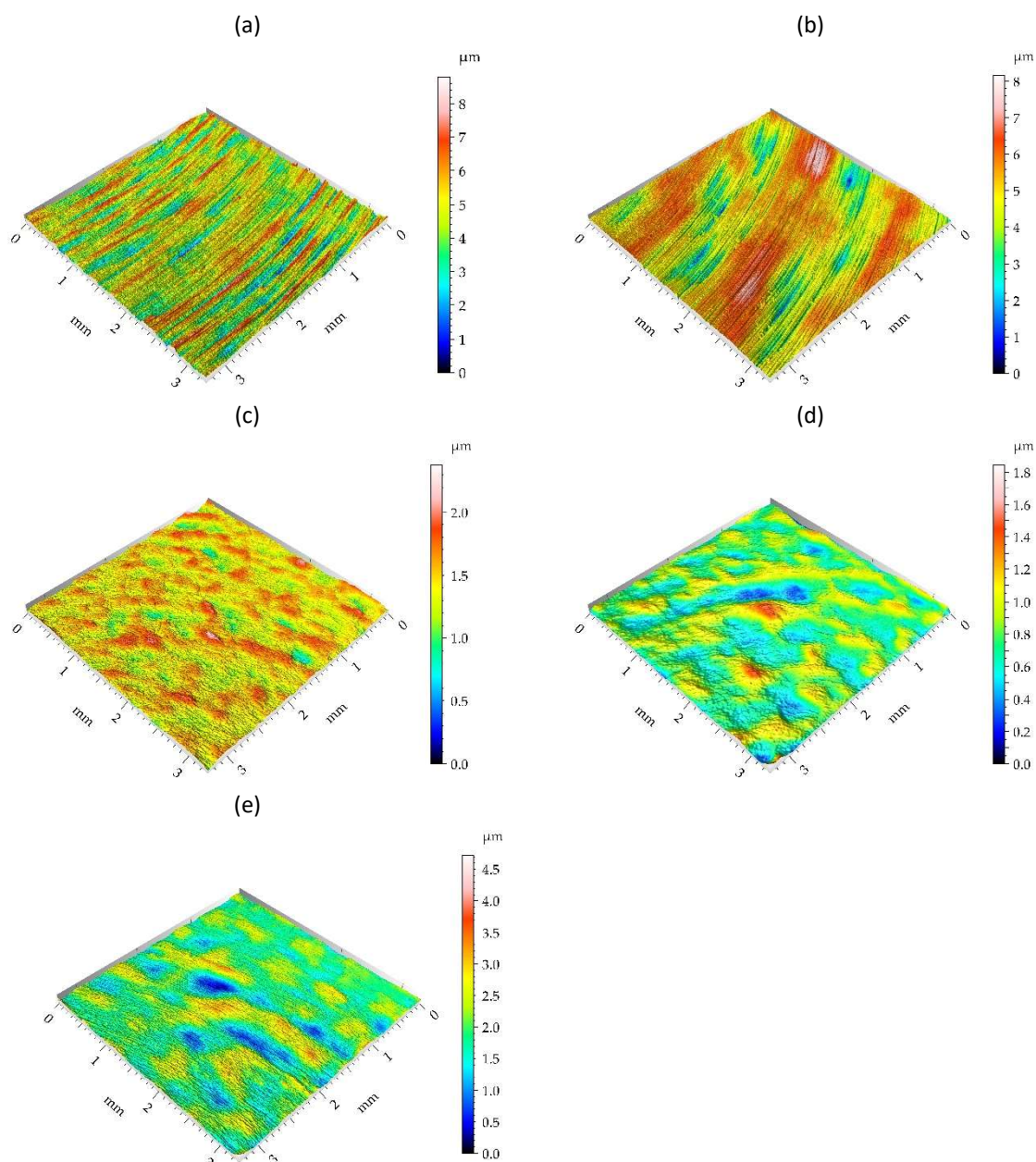
Niezależnie od obciążeń normalnych największe wartości współczynnika tarcia otrzymano dla par ciernych zawierających tarczę frezowaną o największej wysokości nierówności. Najmniejsze opory tarcia powodowała para cierna zawierająca tarczę nagniataną przy ciśnieniu 20 MPa o najmniejszej wysokości nierówności powierzchni. Spośród tarcz nagniatanych największa wysokość nierówności otrzymana przy ciśnieniu nagniatani 40 MPa skutkowała największymi oporami tarcia przy obciążeniu normalnym 20 i 30 N. Największe różnice pomiędzy współczynnikami tarcia dla poszczególnych skojarzeń trących otrzymano dla największego obciążenia normalnego. Wówczas nagniatanie doprowadziło do zmniejszenia współczynnika tarcia o 42% w stosunku do pary cierniej zawierającej tarczę frezowaną. Zużycie tarcz o charakterze ściernym było niemierzalne. Ślady zużycia były bardziej widoczne dla większych obciążeń normalnych oraz dla tarcz odpowiadających większym oporom tarcia (rysunek 18).



Rysunek 18. Obrazy uzyskane za pomocą mikroskopu SEM powierzchni po próbach tribologicznych przy obciążeniu normalnym 30 N: tarczy frezowanej (a), tarczy nagniatanej przy ciśnieniu $p = 20$ MPa (b)

Obecność smarowania może być jednym ze sposobów zapobiegania uszkodzeniom frettingowym. Smary o konsystencji stałej są najbardziej skuteczne w warunkach częściowego poślizgu, podczas gdy oleje są odpowiednie w warunkach poślizgu całkowitego. Występowanie frettingu w warunkach smarowania zależy głównie od parametrów wpływających na zdolność smaru do przenikania do obszaru styku oraz ochrony powierzchni kontaktujących ciał (substancja smarująca może wyeliminować obecność tlenu z powierzchni styku). W warunkach frettingu przenikalność substancji smarującej do powierzchni styku jest niska, ze względu na bardzo małe przemieszczenia. Mała lepkość olejów jest bardziej skuteczna do zmniejszenia tarcia i zużycia, niż użycie smarów o wysokiej lepkości, ze względu na łatwiejszą przenikalność substancji smarującej w głąb powierzchni styku. W procesie frettingu w warunkach smarowania, chropowate powierzchnie styku pomagają utrzymywać olej, co wpływa na zmniejszenie tarcia i zużycia. Istnieją również prace świadczące o korzystniejszych właściwościach tribologicznych powierzchni gładkich w warunkach frettingu smarowanego. Ponieważ wyniki eksperymentów są niejednoznaczne, przeprowadziłem badania, których wyniki przedstawiono w artykule [A2].

Nagniataniu podlegały tarcze ze stopu tytanu Ti6Al4V po uprzednim toczeniu. Zastosowałem strategię spirala. Prędkość nagniatania wynosiła 400 mm/min, ciśnienia nagniatania wynosiły 10, 20 30 i 40 MPa a skok wierszowania 0,01 mm. Rysunek 19 przedstawia widoki izometryczne powierzchni badanych tarcz.

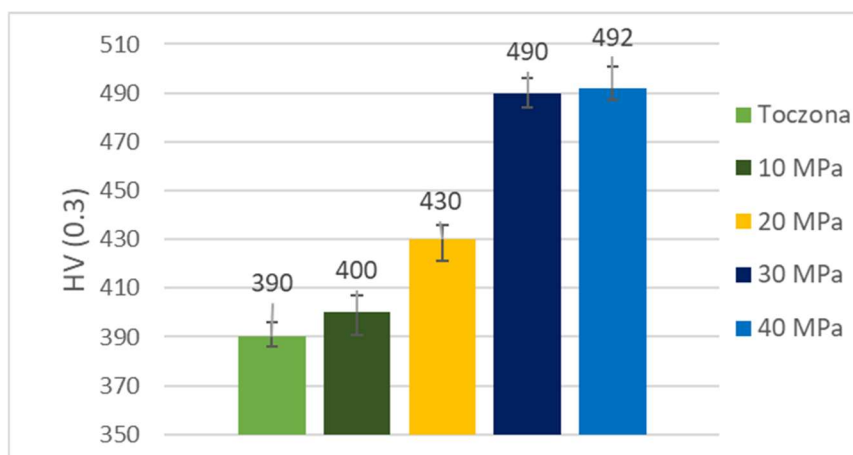


Rysunek 19. Widoki izometryczne tarcz po toczeniu (a),
po nagniataniu przy ciśnieniu 10 (b), 20 (c), 30 (d) i 40 MPa (e)

Powierzchnia po toczeniu była powierzchnią anizotropową okresową z udziałem zakłóceń losowych. Zmieniła się ona nieznacznie po nagniataniu z zastosowaniem najmniejszego ciśnienia. Zwiększenie ciśnienia nagniatania do 20 i 30 MPa doprowadziło do zmniejszenia wysokości nierówności, największa zmiana wynosiła 84%. Dalsze zwiększenie ciśnienia nagniatania spowodowało wzrost wysokości nierówności. Powierzchnie nagniatane przy użyciu ciśnień 20, 30 i 40 MPa cechowały się ponadto zmniejszeniem parametrów hybrydowych i wzrostem parametrów przestrzennych w stosunku do powierzchni toczonej. Były to powierzchnie o strukturze mieszanej, wartości parametru Str były zbliżone do 0,5.

Rysunek 20 przedstawia wyniki pomiarów mikrotwardości badanych tarcz. Przy stosowaniu ciśnienia nagniatania 10 MPa zaobserwowano niewielki wzrost mikrotwardości w stosunku

do próbki toczonej. Największy wzrost mikrotwardości (do 26%) osiągnięto po zastosowaniu ciśnienia nagniatania 30 i 40 MPa.

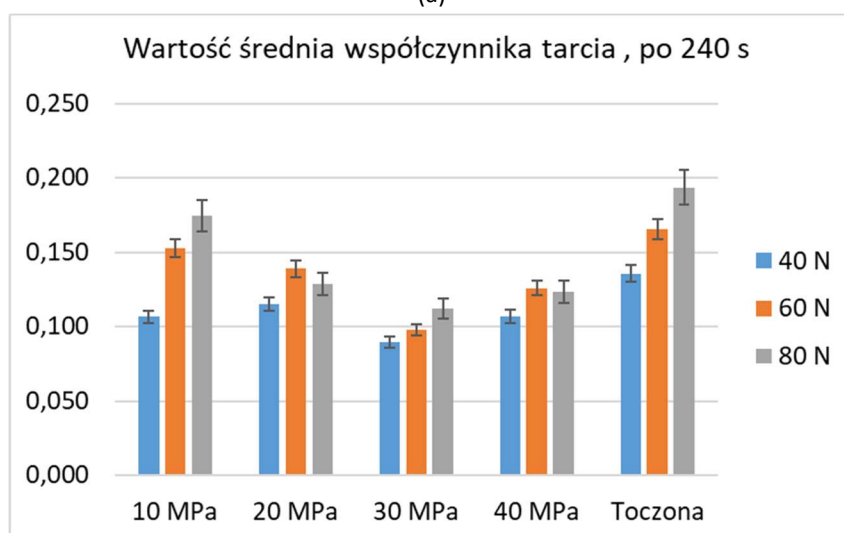


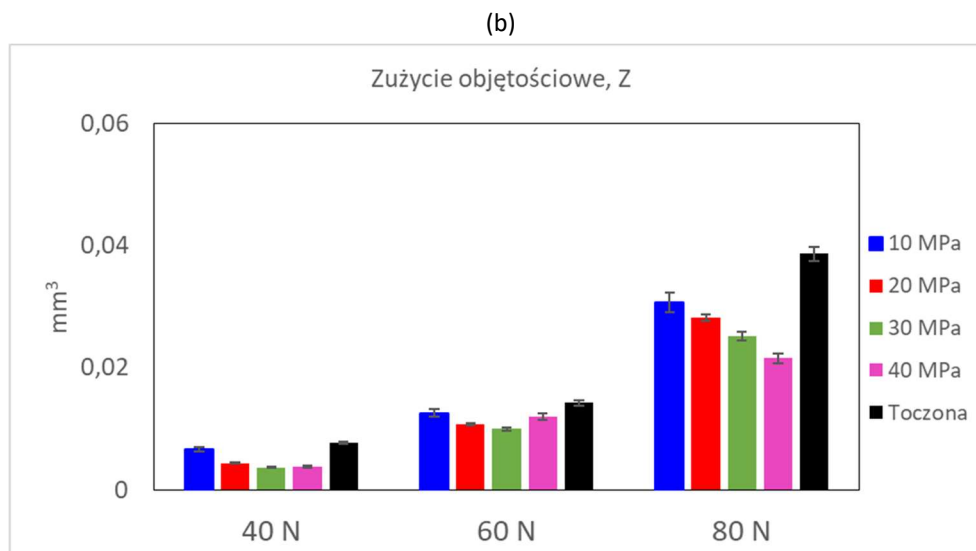
Rysunek 20. Wyniki badań mikrotwardości próbek ze stopu Ti6Al4V

Badania tribologiczne przeprowadziłem przy wykorzystaniu urządzenia Optimol SRV5. Kulka ceramiczna z materiału WC współpracowała z tarczą ze stopu Ti6Al4V. Przed próbą tarcia dostarczyłem jedną kroplę oleju L-AN-46 (0,07 ml) między współpracujące powierzchnie. Częstotliwość oscylacji wynosiła 50 Hz, liczba cykli wynosiła 45000, skok wynosił 0,1 mm. Badania przeprowadzono w temperaturze 30°C. Obciążenie normalne wynosiło 40, 60 i 80 N.

Rysunek 21 przedstawia wyniki badań tribologicznych. Przedstawiono wartości średnie i odchylenia standardowe współczynnika tarcia po stabilizacji (pominąłem początkowe 240 sekund) oraz zużycia objętościowego tarcz. Zużycie kulek było pomijalnie małe.

(a)





Rysunek 21. Wartości średnie i odchylenia standardowe współczynnika tarcia (a) i zużycia objętościowego tarcz ze stopu tytanu podczas badań w warunkach frettingu smarowanego (b)

We wszystkich badanych przypadkach nagniatanie doprowadziło do zmniejszenia oporów tarcia w porównaniu do skojarzenia zawierającego tarcze toczone. Najmniejsze wartości współczynnika tarcia otrzymałem dla par ciernych zawierających tarcze nagniatane z wykorzystaniem ciśnienia 30 MPa, tarcze te cechowały się najmniejszą wysokością nierówności. Spośród pozostałych próbek nagniatanych, ciśnienie 40 MPa doprowadziło do największych oporów tarcia przy najmniejszym obciążeniu normalnym, zaś ciśnienie 10 MPa przy pozostałych ciśnieniach. Tarcze uzyskane po stosowaniu ciśnień nagniatania 10 i 40 MPa cechowały się stosunkowo wysoką chropowatością powierzchni. Wystąpił wzrost współczynnika tarcia ze wzrostem obciążenia normalnego, co świadczy o badaniach w warunkach styku skoncentrowanego (małe zużycie kulek).

Zastosowanie nagniatania doprowadziło we wszystkich przypadkach do zmniejszenia zużycia objętościowego tarcz. W przypadku stosowania obciążeń normalnych 40 i 60 N najmniejsze wartości zużycia tarcz otrzymałem dla ciśnienia nagniatania 30, zaś największe dla ciśnień 10 i 40 MPa. Wyniki te dobrze korespondują z rezultatami pomiaru współczynnika tarcia. Natomiast w przypadku stosowania największego obciążenia normalnego zużycie tarcz było mniejsze dla większych ciśnień nagniatana. Wyniki te były przypuszczalnie uzależnione od mikrotwardości tarczy, która rosła przy zwiększaniu ciśnień nagniatania. Zużycie tarcz miało charakter ścierny, większym wartościom zużycia towarzyszyło występowanie rozwarstwień.

Ogólnie, stosowanie nagniatania doprowadziło do zmniejszenia oporów tarcia do 45%, oraz do zmniejszenia zużycia tarcz do 50% w warunkach frettingu ze smarowaniem, w porównaniu do pary cierniej zawierającej tarczę toczoną.

Podczas badań tribologicznych opisanych w pracach [A2-A6, A9] stwierdziłem, że stosowanie nagniatania w różnych warunkach badań i dla różnych materiałów zazwyczaj prowadziło do zmniejszenia tarcia i zużycia. Najkorzystniejsze wyniki dotyczące oporów tarcia osiągnięto dla najmniejszej wysokości chropowatości tarczy. W przypadku zużycia oprócz wysokości

nierówności powierzchni istotne były mikrotwardość i naprężenia wewnętrzne warstwy wierzchniej tarczy.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć zaprezentowanych we wskazanym cyklu publikacji należy zaliczyć:

- określenie wpływu nagniatania na strukturę geometryczną powierzchni, z wykorzystaniem metod badań eksperymentalnych,
- określenie wpływu strategii nagniatania na topografię powierzchni,
- porównanie struktur geometrycznych powierzchni nagniatanej po różnych rodzajach obróbki poprzedzającej,
- określenie wpływu ciśnienia nagniatania na topografię powierzchni, mikrotwardość i naprężenia wewnętrzne warstwy wierzchniej,
- określenie wpływu nagniatania na tarcie i zużycie układu: tarcza-kulka w warunkach tarcia technicznie suchego przy ruchu obrotowym tarczy,
- określenie wpływu obróbki nagniataniem na właściwości tribologiczne elementów trących w warunkach ruchu posuwisto-zwrotnego przy tarcia technicznie suchym,
- określenie wpływu nagniatania na tarcie układu tarcza-kulka podczas ruchu obrotowego w warunkach smarowania,
- określenie wpływu obróbki nagniataniem na tarcie i zużycie układu tarcza-kulka w warunkach frettingu całkowitego bez i ze smarowaniem.

V. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

W roku 2019 w ramach współpracy z ośrodkiem naukowym Politechniki Opolskiej (prof. dr hab. Grzegorz Królczyk, dr hab. inż. Piotr Niesłony) realizowałem badania naukowe z zakresu strategii obróbkowych. Zagadnienia dotyczyły wpływu strategii obróbki frezowaniem i nagniataniem na strukturę geometryczną powierzchni. Nasze wspólne analizy oraz badania przyczyniły się do powstania pracy która została opublikowana pod tytułem „Influence of hydrostatic burnishing strategy on the surface topography of martensitic steel” w czasopiśmie Measurement, Volume 138, 2019, p. 590-601. Publikacja ta ukazała się w ramach grantu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki - „Modelowanie dynamicznych i wytrzymałościowych zagadnień w procesie precyzyjnego frezowania przy zastosowaniu precyzyjnych frezów kulistych (2017/25/B/ST8/00962) realizowanego na Politechnice Opolskiej.

W roku 2019 w trakcie konferencji 47th NAMRI/SME North American Manufacturing Research Conference (NAMRC) oraz ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC) w dniach 10.06-14.06.2023 uczestniczyłem w panelu dyskusyjnym pt. “NSF Proposal Writing Workshop”. Celem tego spotkania było określenie podstawowej wiedzy i badań niezbędnych do przygotowania wniosków badawczych, w szczególności wniosków skierowanych do National Science Foundation (NSF). Podczas panelu przedstawione były potencjalne możliwości złożenia wniosku, warunki niezbędne do uzyskania finansowania, formułowanie celów i zadań badawczych, zrozumienie wartości intelektualnej oraz szerszego wpływu, formułowanie zadań i celów. Ośrodki naukowe ze Stanów Zjednoczonych (a w szczególności Penn State University, University of Virginia, Arizona State University, University of Michigan) wykazały bardzo duże zainteresowanie uczestnictwem w projekcie z ośrodkami z Europy. Dalsza współpraca rozwinęła się w tematyce konkretnego projektu pt. „Broadening future manufacturing networks through cyber manufacturing education and workforce development”. Projekt pod tym tytułem został złożony do National Science Foundation pod koniec roku 2020, Politechnika Rzeszowska ma pełnić rolę wykonawcy. Jednak ze względu pandemię termin jego oceny został przesunięty i nadal nie został oceniony.

W dniach 26.06-24.07.2023 r. odbyłem staż naukowy na Politechnice Opolskiej w Katedrze Technologii Maszyn i Materiałoznawstwa (Laboratorium Technologicznej Warstwy Wierzchniej oraz Laboratorium Metrologii Powierzchni), głównym celem stażu była kontynuacja współpracy rozpoczętej w roku 2019. W trakcie stażu realizowałem badania związane z oceną wpływu obróbki gładkościowo-umacniającej na właściwości tribologiczne stali oraz stopu tytanu. Pomiary obejmowały ocenę struktury geometrycznej powierzchni z wykorzystaniem profilometru optycznego S neox 3D firmy Sensofar oraz trzech metod pomiarowych konfokalną, interferometryczną oraz Focus Variation. Wykonałem pomiary mikro i nano twardości z wykorzystaniem urządzenia Fisher PICODENTOR HM500. Dodatkowo opracowałem metodykę pomiaru naprężeń metodą trepanacyjną dla stopu

tytanu. Na podstawie otrzymanych wyników badań opracowywany jest wspólny artykuł naukowy.

Staż naukowy odbyłem również na Université Polytechnique Hauts-de-France (UPHF), Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs en Informatique, Automatique, Mécanique, Energétique et Electronique (ENSIAME) – 4-8.09.2023 r.

Staż ten związany był z realizacją badań struktury geometryczną powierzchni zaawansowanymi metodami pomiarowymi takimi jak interferometria, pomiary czujnikami konfokalnymi oraz mikroskopem sił atomowych (AFM).

W trakcie stażu wspólnie z zespołem ENSIAME realizowałem pierwszy etap projektu pt. „A multiscale analysis of catenary wear using 3D interferometry”. Projekt ten dotyczył pomiaru struktury geometrycznej powierzchni oraz analizy zużycia przewodów trakcyjnych. Projekt realizowany jest na zlecenie SNCF (francuski państwowy przewoźnik kolejowy). W pierwszym etapie projektu wykonałem pomiary (wcześniej wymienionymi metodami) zużytych powierzchni przewodów oraz przeprowadziłem analizę struktury geometrycznej powierzchni. Wynik tych analiz będą podstawą do dalszych badań które są przewidziane w ramach realizacji projektu.

VI. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

W ramach działalności popularyzującej naukę wygłaszałem referaty, prezentowałem plakaty, uczestniczyłem w dyskusji i przygotowywałem materiały do zaprezentowania na wielu krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych, w tym wygłosiłem 16 referatów sesyjnych, zaprezentowałem 4 plakaty. Wyniki badań prezentowane były na 7 konferencjach krajowych i 13 międzynarodowych. W trakcie konferencji ICMMM 2018, 13-15.10.2018, Orlando, USA, przewodniczyłem sesji 1 - Mechanical Engineering and Automation.

W roku 2019 w trakcie konferencji NAMRC47 brałem udział w panelu dyskusyjnym “NSF Proposal Writing Workshop” dotyczącego współpracy pomiędzy uczelniami z USA i Europy.

Brałem i biorę aktywny udział w 3 programach europejskich, w tym jako koordynator programu w ramach projektu SAP University Alliance Europe, jako nauczyciel akademicki w ramach programu Erasmus+ dla studentów z zagranicy studiujących na Politechnice Rzeszowskiej oraz realizując staże pracownika naukowego związane z transferem wiedzy w ramach projektu „NAUKA – STAŻ – GOSPODARKA – edycja II” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego i Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego.

Poza artykułami przedstawionymi do osiągnięć naukowych stanowiących cykl publikacji opublikowałem 20 artykułów naukowych w wydawnictwach krajowych i zagranicznych.

Jestem członkiem 2 towarzystw naukowych: Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją oraz Polskiego Towarzystwa Tribologicznego.

Aktualnie pełnię funkcję edytora w specjalnym wydaniu czasopisma Crystals (ISSN 2073-4352) IF – 2.7; 70 pkt., "Improving the Tribological Behaviour of Co-Acting Materials by Surface Layer Modification".

Wykonałem 42 recenzji artykułów naukowych, w tym 37 recenzji prac publikowanych w renomowanych czasopismach międzynarodowych oraz 5 recenzji prac publikowanych w krajowych czasopismach tematycznych.

Biorę aktywny udział w pracach zespołu badawczego, tj. Zespół Technologii Maszyn działającego od 2006 roku w Katedrze Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej.

W ramach współpracy z otoczeniem gospodarczym w 2007 odbyłem 6-miesięczny staż w Zelnar Zakład Narzędziowy Sp. z o.o. w Rzeszowie, gdzie zajmowałem się opracowaniem zaleceń oraz wdrożeniem technologii obróbki High Speed Machining do produkcji form wtryskowych. W roku 2010 brałem udział w projekcie 3P Event dotyczącym optymalizacji procesu produkcji dla firmy Hamilton Sundstrand Poland.

W roku 2014 odbyłem 4-miesięczny staż w firmie Zelnar Sp. z o.o. w Tajęcinie w ramach projektu „Nauka-Staż-Gospodarka” umowa 2/PNCS/NSGII/2014, gdzie zajmowałem się zastosowaniem obróbki gładkościowej w produkcji form wtryskowych. W ramach programu „Nauka-Staż-Gospodarka”, w roku 2014 byłem opiekunem merytorycznym stażu pracownika firmy SEGER Cutting Tools na Politechnice Rzeszowskiej.

W roku 2022 odbyłem 6-miesięczny staż w firmie ZPU Mirosław Pogoda – w ramach projektu „Prace B+R dotyczące innowacyjnej pompy wtryskowej dedykowanej silnikom ciężkich pojazdów i sprzętów o przeznaczeniu specjalnym” RPPK.01.02.00-18-0029/19 – Oś priorytetowa nr I „Konkurencyjna i innowacyjna gospodarka”.

W latach 2014-2018 byłem koordynatorem współpracy pomiędzy Politechniką Rzeszowską a firmami: 34 Wojskowym Oddziałem Gospodarczym w Rzeszowie, BorgWarner Rzeszów Sp. z o.o., TRIMEX Sp. z o.o., B4 - Cztery Strony Biznesu.

W roku 2022 w ramach programu europejskiego „Konkurencyjna i innowacyjna gospodarka” odbyłem 6-miesięczny staż w firmie ZPU Mirosław Pogoda gdzie zajmowałem się oceną struktury geometrycznej powierzchni elementów pompy wtryskowej.

W latach 2009 – 2012 brałem udział w pracach B+R dotyczących wdrożenia nowych technologii w zakresie „Inwestycja w innowacyjną technologię produkcji form wtryskowych” oraz - „Opracowanie i wdrożenie innowacyjnej technologii produkcji form wtryskowych”. Obydwa projekty były finansowane w ramach programów europejskich. W obydwóch projektach występowałem jako kierownik zespołu badawczego.

W latach 2005-2007 realizowałem projekt badawczy nr 4T07C 046 29 (grant promotorski).

W roku 2007 byłem laureatem konkursu na dofinansowanie wyjazdów na konferencje zagraniczne finansowane przez Fundację Nauki Polskiej, natomiast w roku 2010 otrzymałem stypendium w ramach programu „Stypendia Konferencyjne dla Młodych Pracowników Naukowych” Towarzystwa Naukowego Warszawskiego.

W latach 2012-2023 byłem wykonawcą lub współwykonawcą 30 raportów, ekspertyz, opinii dla instytucji publicznych lub przedsiębiorców.

Brałem udział w zespole konkursowym Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją o/Rzeszów.

Prowadzę zajęcia na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej na studiach pierwszego i drugiego stopnia oraz dla studentów z programu Erasmus.

Jako promotor sprawowałem opiekę naukową nad 135 studentami, w tym pełniłem funkcję promotora prac inżynierskich 89 prac i 46 prac magisterskich (w tym dwie jako Diploma Thesis w języku angielskim dla studentów programu Erasmus). Wykonałem 65 recenzji prac dyplomowych.

Od roku 2007 do 2018 pełniłem funkcję Pełnomocnika Kierownika Katedry (ds. Dokumentacji Elektronicznej a od roku 2009 do 2019 byłem odpowiedzialny za wprowadzanie do bazy uczelni dorobku naukowego pracowników.

W roku 2013 otrzymałem zespołową nagrodę Rektora za uruchomienie laboratorium „Komputerowych systemów wspomagających zarządzanie produkcją”.

Od roku 2015 jestem opiekunem koła naukowego „Nowoczesne Systemy Komputerowe w Inżynierii Produkcji”. Studenci koła pod moim kierunkiem brali udział w międzynarodowych zawodach The Fresh Connection (4 miejsce w Europie) oraz SAP ERPSim (8 miejsce w Europie) – (innovacyjna symulacja ”web-based business” angażująca uczestników w podejmowanie strategicznych decyzji w procesie zarządzania przedsiębiorstwem). Studenci pod moim kierunkiem w ramach pracy koła naukowego opublikowali 4 recenzowane artykuły.

W ramach akcji rekrutacyjnych w szkołach średnich reprezentowałem WBMiL jako przyszłe miejsce studiów absolwentów szkół ponadpodstawowych. Brałem również czynny udział w prezentacjach wydziału w trakcie dni otwartych wydziału.

W latach 2012-2013 uczestniczyłem w programach europejskich Program Operacyjny Kapitał Ludzki – celem tego było przeprowadzenie szkoleń dla studentów WBMiL

Byłem również promotorem pomocniczym w jednym przewodzie doktorskim (Politechnika Lubelska, doktorantka mgr Katarzyna Korzyńska „Badania wpływu procesu pneumokulowania na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych – promotor dr hab. inż. Władysław Zielecki).

Jestem członkiem Wydziałowej Komisji Dydaktycznej. Pracuję również jako członek komisji egzaminacyjnych prac dyplomowych.

W celu systematycznego podnoszenia swoich kwalifikacji zawodowych biorę udział w licznych szkoleniach z tematyki dydaktyki. Do najważniejszych mogę zaliczyć szkolenia certyfikowane wg. standard APICS (American Production and Inventory Control Society) - CPIM (Certified in Production and Inventory Management) - 5 modułów oraz szkolenia w ramach programu SAP University Alliance w zakresie zastosowania systemu SAP ERP w dydaktyce.

Uczestniczyłem również w szkoleniach związanych z badaniami naukowymi. Szkolenia te przede wszystkim dotyczyły obszarów pomiarów struktury geometrycznej powierzchni, realizacji badań tribologicznych oraz pomiarów z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego.

VII. Inne informacje niewymienione w pkt. I – VI

Sumaryczny Impact Factor czasopism, w których zostały opublikowane artykuły, w których jestem autorem lub współautorem wynosi 28.946.

Cytowania artykułów, których jestem autorem lub współautorem na dzień 10.09.2023 r. wynoszą:

<i>Web of Science: wszystkie/bez autocytowań</i>	166/148
<i>Scopus: wszystkie/bez autocytowań</i>	208/180
Index Hirscha	
<i>Web of Science</i>	7
<i>Scopus</i>	8

.....

(podpis wnioskodawcy)