

Chropowatość równowagowa powierzchni roboczych jako kryterium jakości naprawy węzłów tarciovych

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono koncepcję metody kształtowania właściwości użytkowych, powierzchni roboczych współpracujących tarciovo, ze szczególnym uwzględnieniem warunków eksploatacji w technice rolniczej. Opisano możliwe do uzyskania korzyści wynikające z zastosowania proponowanej metody, w procesie naprawy czopów wałów korbowych silników spalinowych stosowanych w ciągnikach i samojezdnych maszynach rolniczych.

Słowa kluczowe: powierzchnie robocze, węzły krytyczne, stan początkowy, chropowatość równowagowa, naprawa, warstwa wierzchnia

Wprowadzenie

Jednym z ważniejszych parametrów oceny jakości przystosowania obiektów technicznych do użytkowania jest podatność eksploatacyjna, stanowiąca zbiór takich cech maszyn jak: podatność użytkowa, podatność diagnostyczna oraz podatność obsługowo-naprawcza. W przypadku maszyn i urządzeń rolniczych szczególną rolę przypisuje się wymaganiom związanym z procesem użytkowania, natomiast często zaniedbuje się aspekty dotyczące możliwości odtworzenia potencjału eksploatacyjnego [Woropay 1996]. Znajduje to odzwierciedlenie w dominującej obecnie strategii eksploatacji według efektywności, zorientowanej na wzrost wydajności pracy przy jednoczesnym minimalizowaniu nakładów. W myśl tej strategii o przydatności eksploatacyjnej maszyn rolniczych decyduje przede wszystkim rachunek ekonomiczny. W przypadku spadku wydajności pracy bądź pojawiającej się możliwości wdrożenia nowej bardziej efektywnej technologii, dalsze wykorzystanie użytkowanych obiektów technicznych

uznaje się za ekonomicznie nieuzasadnione.

Często w praktyce eksploatacyjnej, procesowi starzenia ekonomicznego obiektów technicznych nie odpowiada równie szybko postępujące starzenie fizyczne. W realiach polskiego rolnictwa sytuację taką można uznać za typową, co wynika z powszechności wieloletniego użytkowania maszyn i dużego zróżnicowania potrzeb użytkowników (zależne m.in. od profilu produkcji i wielkości uprawianego areału) utrwalającego ten stan rzeczy. W takich warunkach realizacja procesu eksploatacji wg strategii efektywności może prowadzić do nieuzasadnionych strat materiałowych i energetycznych. W związku z tym, uzasadnione jest takie planowanie cyklu życia obiektów technicznych, który podporządkowany będzie pełniejszemu wykorzystaniu trwałości konstrukcyjnej maszyn. Realizację tego postulatu można osiągnąć dzięki kontynuacji procesu użytkowania, maszyn uznanych przez jednego użytkownika za nieefektywne, u użytkownika mniej wymagającego.

W pracy własnej za interesujący uznano wariant wykorzystania potencjału eksploatacyjnego maszyn i urządzeń rolniczych, poprzez modyfikacje właściwości użytkowych powierzchni roboczych w procesie naprawy - z możliwością adaptacji naprawianych maszyn do zmieniających się zadań, na zasadzie naprawy i recykulacji. Podjęcie decyzji o wtórnym zastosowaniu maszyn technologicznie przestarzałych, a o niewyczerpanym zapasie trwałości eksploatacyjnej, powinno być poprzedzone oceną stanu technicznego z uwzględnieniem aktualnych normom bezpieczeństwa środowiska naturalnego i ludzi.

Sformułowanie problematyki badawczej

Czas eksploatacji obiektów technicznych do chwili utraty zdolności użytkowej, uzależniony jest głównie od intensywności procesów zużyciowych w obszarach współpracujących powierzchni roboczych węzłów tarciovych. Od chwili rozpoczęcia fazy użytkowania do momentu osiągnięcia zużycia kwalifikującego do naprawy, przebieg procesów zużyciowych w funkcji czasu przyjmuje różny poziom intensywności zależny od warunków pracy i poziomu wymuszeń eksploatacyjnych.

W przypadku maszyn i urządzeń rolniczych charakterystyczne dla procesu użytkowania: długie okresy przestoju, zróżnicowane warunki pracy (atmosferyczne i glebowe), przeciążenia mechaniczne itp.

przyczyniają się do występowania efektu powtarzającego się docierania (ustawicznego) węzłów ruchowych. Wtórne okresy adaptacji strukturalnej skutkują intensyfikacją procesów zużyciowych i dużą awaryjnością. Szczególnie narażone na zużycie tribologiczne - ze względu na częste zmiany prędkości względnej współpracujących elementów i efekt ustawicznego docierania - są powierzchnie współpracujące ślizgowo. W związku z tym, celowe jest poszukiwanie rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych, ukierunkowanych na poprawę właściwości użytkowych powierzchni roboczych par ślizgowych.

Ze względów na określoną specyfikę pracy maszyn rolniczych, poszukuje się takich metod wytwarzania, naprawy i regeneracji, których efektem będzie uzyskanie stanu pełnej gotowości obiektu do przyjęcia pełnego zakresu wymuszeń eksploatacyjnych od momentu rozpoczęcia fazy użytkowania. Wynika stąd potrzeba przeniesienia fazy docierania, z okresu eksploatacji do procesu technologicznego kształtowania właściwości użytkowych powierzchni roboczych. Dzięki temu można osiągnąć **standaryzację stanu początkowego węzłów tarciovych**. Stwarza to możliwość uniknięcia charakterystycznych dla okresu docierania patologicznych form niszczenia współpracujących powierzchni oraz wyeliminowania typowych błędów wynikających z niewłaściwego realizowania procesu docierania przez użytkowników (np. przez zaniedbanie czynności obsługowo-technicznych, przeciążenia eksploatacyjne).

W pracy własnej przyjęto, że zmiany intensywności procesów destrukcyjnych w obszarze współpracujących powierzchni ślizgowych, zachodzące przy dostosowywaniu mikrogeometrii i właściwości fizykochemicznych warstw wierzchnich (WW) do wymuszeń eksploatacyjnych, mogą być korygowane w procesie naprawy. Uznano, że *kryterium oceny jakości naprawy, może stanowić uzyskanie takiego stanu mikrogeometrii współpracujących powierzchniach, który odpowiadałby bądź byłby zbliżony do stanu równowagowego* tj. uznanego za optymalny dla danych warunków pracy i charakteryzującego dotarte powierzchnie robocze [Burakowski, Marczak, 2000].

Materiały i metody

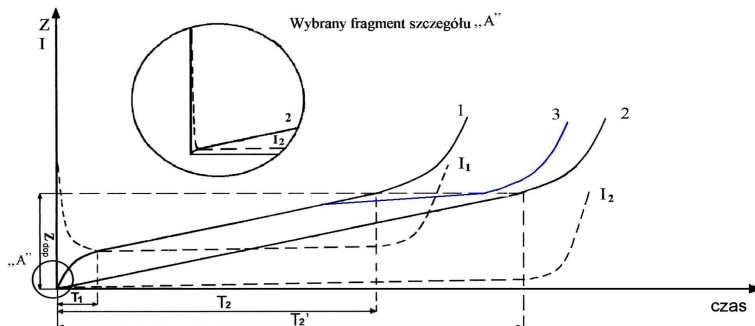
Po przeanalizowaniu napraw maszyn i urządzeń rolniczych uznano, że największe korzyści można osiągnąć w przypadku dopracowania obróbki węzłów ślizgowych, dla których założono konstrukcyjnie

odpowiedni zapas trwałości, przewidziany na kilkakrotną naprawę. Efektem kolejnych napraw, najczęściej realizowanych przez obróbkę szlifowaniem, jest postępująca zmiana wymiarów liniowych współpracujących części i zanikanie odporności WW na zużywanie tarciove. Pogorszenie właściwości użytkowych WW oraz ustawiczne docierania współpracujących części, skutkuje wyczerpaniem zapasu materiału przewidzianego na obróbkę naprawczą, przy utrzymaniu odporności na zużycie zmęczeniowe. Niewyczerpany zapas trwałości zmęczeniowej stanowi o potrzebie dopracowania procesu obsługowo-naprawczego maszyn rolniczych, z uwzględnieniem kryterium minimalizacji zużycia. Spełnienie tego postulatu wyznacza kierunek prac badawczych, zorientowanych na ograniczenie destrukcyjnych oddziaływań w obszarze współpracujących powierzchni roboczych, w powtarzających się okresach docierania.

Jako przedmiot badań wybrano łożyska ślizgowe wałów korbowych, dla których przewidziana jest obróbka czopów na wymiary naprawcze. Wały korbowe są częściami o decydującym wpływie na niezawodność i trwałość silników spalinowych. W związku z tym, już na etapie projektowania, ustala się odpowiedni zapas ich trwałości w celu umożliwienia obróbki na kolejne podwymiary naprawcze. Jak wynika z własnych obserwacji, w przypadku wałów korbowych ciągników rolniczych i kombajnów, założeniom konstrukcyjnym często nie odpowiada praktyka eksploatacyjna. Duża awaryjność i niejednokrotnie wartości zużycia przekraczające dwu, a nawet trzykrotnie, przewidziany naddatek materiału do obróbki na kolejny podwymiar naprawczy, wskazują na potrzebę dopracowania procedury naprawy węzłów łożyskowych.

Luzy w rozpatrywanych łożyskach ślizgowych, zmniejsza się poprzez wykonywanie napraw polegających na obróbce części droższej na wymiary naprawcze (czopy wałów) i wymianę panewek. O ile warstwa wierzchnia panewki może być odpowiednio przygotowana w procesie wytwarzania, to powierzchnia czopa uzyskuje w procesie naprawy określone wartości parametrów chropowatości, wynikające z zastosowanej metody obróbki (najczęściej szlifowanie wykańczające). Od stanu mikrogeometrycznego powierzchni roboczych, uzależniony jest czas trwania adaptacji strukturalnej oraz intensywność procesów zużyciowych w początkowym okresie współpracy. Na podstawie obrazu graficznego (Rys. 1) typowej funkcji zużycia węzła ślizgowego (krzywa 1) przyjęto, że intensyfikacja procesów zużyciowych w okresie docierania elementów węzła, jest wynikiem szybkiego pogarszania właściwości użytkowych panewek i przystosowywania mikrogeometrii warstw wierzchnich czopów do wymuszeń eksploatacyjnych. Proces

ten trwa do momentu ukonstytuowania chropowatości równowagowej na powierzchniach roboczych czopów. **Równowagowy stan mikrogeometrii utrzymuje się w okresie zużycia normalnego** tj. w okresie stałej intensywności zużywania w funkcji czasu pracy (liniowy przebieg charakterystyki zużycia). W związku z tym **uznano, że w czasie odpowiadającym zużyciu normalnemu można wyznaczyć wartości parametrów chropowatości równowagowej** powierzchni roboczych czopów.



Rys.1. Przebieg procesów zużycia w ślizgowym węźle tarcia: 1 – przypadek ogólny, 2 – przebieg przewidywany, I_1 – intensywność zużycia dla przypadku ogólnego, I_2 – intensywność zużycia dla przypadku przewidywanego, T_1 – czas docierania, T_2, T_2' – czas pracy do osiągnięcia zużycia dopuszczalnego, Z_{dop} – zużycie dopuszczalne (opracowanie własne)

Fig. 1. Course of processes of wear in the slippery kinematic pair of friction: 1 – general case, 2 – predicted course, I_1 – intensity of wear for the general case, I_2 – intensity of wear for predicted case, T_1 – grinding-in time, T_2, T_2' – work time to reaching of allowable wear, Z_{dop} – allowable wear (own elaboration)

Przyjęto, że uzyskane w opisany sposób dane mogą stanowić kryterium oceny jakości naprawy, spełniające postulat poprawy właściwości użytkowych WW czopów. Spełnienie tego kryterium oznacza konieczność uzyskania w procesie naprawy, chropowatości technologicznej zbliżonej do równowagowej. W efekcie można skrócić czas przystosowania warstw wierzchnich do wymuszeń eksploatacyjnych, ograniczyć zużycie w obszarze współpracy, a tym samym wydłużyć czas pracy węzła do momentu osiągnięcia zużycia dopuszczalnego (krzywa 2). Ponadto, można uzyskać *standaryzację stanu początkowego* węzła, co ułatwi planowanie terminów obsługi technicznej i naprawczej maszyn. Wariant udoskonalenia metody stanowi idea odtworzenia zapasu trwałości zespołów rzeczywistych w trakcie czynności obsługowych, w czasie których wykonuje się zabieg molekularnego wzmocnienia warstw wierzchnich. Możliwe do uzyskania korzyści wynikające z realizacji tak zdefiniowanego procesu przedstawiono na wykresie (krzywa 3).

Założono, że w procesie naprawy można uzyskać pożądaną zmianę charakterystyki tribologicznej elementów roboczych w węzłach ślizgowych, dzięki wykorzystaniu substancji płynnych zastosowanych w operacji modyfikowania właściwości użytkowych WW. Przyjęto, że dzięki dodatkowej obróbce kończącej proces technologiczny naprawy, uzyska się WW o założonych z góry parametrach mikrogeometrycznych, odpowiadających parametrom równowagowym kształtującym się podczas eksploatacji. Założenie to jest ukierunkowane na wykorzystanie typowych operacji obróbkowych - obróbka wykańczająca powierzchni, docieranie adaptacyjne części w węzle kinematycznym, trening zespołów i węzłów rzeczywistych - oraz towarzyszących im efektów energetycznych.

W dotychczasowych badaniach wykazano [Stawicki 2001, Wanke 1998], że modyfikacja strefy przypowierzchniowej może być przeprowadzona w trakcie krótkotrwałego i sterowanego procesu obróbki tarciowej, w atmosferze aktywnego chemicznie medium obróbkowego (baza olejowa + komponent przeciwzatarciowy). Wykazano, że zależnie od zastosowanych wartości parametrów technologicznych procesu modyfikacji (prędkości ślizgania i obciążenia) można uzyskać różny poziom wygładzenia powierzchni. W związku z tym, można wnioskować o możliwości konstituowania równowagowych wartości parametrów chropowatości w procesie naprawy.

Warunkiem koniecznym do realizacji postulatu poprawy właściwości tribologicznych węzłów ślizgowych jest znajomość rzeczywistych wartości parametrów mikrostruktury warstw wierzchnich (WW), kształtujących się w trakcie procesu długotrwałej eksploatacji. W związku z tym, podjęto badania zmierzające do ustalenia zakresu wartości parametrów chropowatości równowagowej powierzchni roboczej czopów, wałów korbowych stosowanych w silnikach wybranych maszyn rolniczych.

Wyniki

W celu wyznaczenia wartości parametrów chropowatości równowagowej, analizowano stan mikrogeometrii części oddanych do naprawy. Skompletowano wyposażenie stanowiska badawczego, w którym program komputerowy TURBO DATAWIN NT współpracuje z profilografometrem (urządzenie pomiarowe HOMMELWERKE T-1000). Aparatura pomiarowa umożliwia kompleksową analizę wymiarową i statystyczną parametrów mikrogeometrycznych oraz wizualizację

struktury stereometrycznej mierzonych powierzchni. Kwalifikowanie wałów do pomiarów, poprzedzone było wykonaniem czynności weryfikacyjnych (oględzin i pomiarów). Celem pomiarów było określenie stopnia zużycia części – ustalenie czy zużycie nie przekracza wartości dopuszczalnych (Rys. 1). Oględziny wykonano w celu stwierdzenia, czy na powierzchniach roboczych czopów nie ma widocznych śladów świadczących o rozwoju patologicznych form niszczenia powierzchni, co wykluczałoby możliwość wiarygodnego wyznaczenia parametrów chropowatości równowagowej.

Do realizacji postulatów badawczych wytypowano parametry najpowszechniej i najczęściej stosowane do opisu nierówności powierzchni roboczych:

- średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości od linii średniej (R_a),
- wysokość chropowatości (R_z),
- liniowy udział nośny profilu chropowatości t_p .

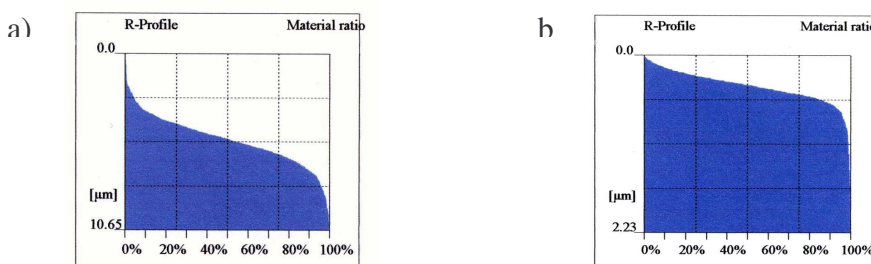
Program badań obejmował pomiary stanu mikrogeometrii czopów przed i po szlifowaniu wykańczającym, wałów korbowych stosowanych w silnikach samojedznych maszynach rolniczych (m.in. ciągniki rolnicze i kombajny zbożowe). W tabeli 1 zamieszczono zestawienie statystyczne, uzyskiwanych wartości parametrów R_a i R_z , stanowiące przykład uznany za reprezentatywny dla części objętych programem badań. Z przedstawionych danych wynika, że wartości parametrów R_a i R_z po szlifowaniu wykańczającym, mieszczą się w zakresie 7 i 8 klasy chropowatości wg PN – 87/M - 04251. W przypadku powierzchni dotartych, oszacowane wartości średnie parametrów R_a i R_z sytuują się w klasie 9. W skrajnym przypadku, różnica między stanem mikrogeometrii powierzchni szlifowanej ($R_a = 1,15 \mu\text{m}$) i dotartej ($R_a = 0,15 \mu\text{m}$) wynosi 3 klasy chropowatości. Aby uwidocznić tak duże różnice w zakresie gładkości powierzchni, dokonano porównania uzyskanych przebiegów krzywej liniowego udziału nośnego (Rys. 2), dla przytoczonego przykładu. Powierzchnia po obróbce szlifowaniem wykańczającym odznacza się dużym zróżnicowaniem wysokości mikronierówności i stromym przebiegiem krzywej liniowego udziału nośnego. Taki stan mikrogeometrii stwarza niebezpieczeństwo inicjowania zacierania, szczególnie w okresie docierania adaptacyjnego, gdy przenoszone obciążenia rozkładają się na stosunkowo niewielkiej powierzchni rzeczywistego pola styku.

Tab. 1 Wartości parametrów R_a i R_z mikrogeometrii czopów wałów korbowych ciągnika URSUS 1204

Tab. 1. Values of parameters R_a and R_z of micro-geometry of crankshafts' pins of the URSUS 1204 tractor

Czopy	Parametr	Wartości Średnie [μm]	Rozstęp R [μm]	X_{\min} [μm]	X_{\max} [μm]	Odchylenie standardowe S [μm]
Główne szlifowane	R_a	0,74	0,68	0,47	1,15	0,14
	R_z	4,86	4,62	3,02	7,64	0,89
Główne dotarte	R_a	0,28	0,28	0,15	0,43	0,08
	R_z	2,50	2,29	1,53	3,82	0,59
Korbowe szlifowane	R_a	0,89	0,54	0,71	1,05	0,14
	R_z	5,54	2,80	4,46	7,26	0,74
Korbowe dotarte	R_a	0,22	0,20	0,13	0,33	0,05
	R_z	1,81	1,54	1,00	2,54	0,37

Szczególnie interesująco ze względów użytkowych, przedstawia się porównanie średnich wartości parametrów chropowatości, uzyskanych z pomiarów czopów głównych i korbodowych wałów dotartych (tab. 1). Mimo teoretycznie korzystniejszych warunków pracy, na czopach głównych zaobserwowano większe schropowacenia i częstsze niż w przypadku czopów korbodowych, objawy zużycia ściernego (głębokie rysy). Podobną prawidłowość stwierdzono w przypadku wałów korbodowych stosowanych w innych maszynach rolniczych (tabela 2).



Rys.2. Liniowy udział nośny profilu chropowatości: a. czopa szlifowanego $R_a = 1,15 \mu\text{m}$, b. czopa dotartego $R_a = 0,15 \mu\text{m}$

Fig. 2. Linear bearing surface of the profile of surface roughness: a) grinded pin $R_a = 1,15 \mu\text{m}$, b) grinded-in pin $R_a = 0,15 \mu\text{m}$.

Tab. 2 Porównanie wartości średnich R_a , z pomiarów czopów wałów korbodowych przekazanych do naprawy

Tab. 2. Comparison of means R_a from measurements of crankshafts' pins destined to repair.

Wartości oszacowane na czopach	URSUS C – 385 R_a [μm]	URSUS C – 360 R_a [μm]	Kombajn zbożowy BIZON R_a [μm]
Głównych	0,22	0,27	0,26
Korbodowych	0,19	0,21	0,16

Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników badań laboratoryjnych, zebranych informacji o stanach awaryjnych oraz danych z czynności weryfikacyjnych, można wnioskować:

1. O potrzebie wprowadzenia dodatkowej obróbki kończącej proces technologiczny naprawy wałów korbowych i możliwości zastosowania parametrów chropowatości równowagowej, jako kryterium oceny jej jakości. Oszacowane średnie wartości parametrów R_a i R_z , utrzymujące się w okresie zużycia normalnego, są o rząd wielkości mniejsze niż po starannym szlifowaniu wykańczającym. Stanowi to o możliwości zastosowania przyjętego kryterium oceny jakości naprawy, do opracowania procedury modyfikowania właściwości użytkowych powierzchni roboczych czopów wałów korbowych.
2. O szczególnej potrzebie dopracowania procesu technologicznego wygładzania powierzchni roboczej czopów głównych. Główne łożyskowania ślizgowe można uznać za węzeł krytyczny (słabe ogniwo) rozpatrywanej klasy części. W związku z tym, przede wszystkim od uzyskanych w procesie naprawy właściwości użytkowych czopów głównych, uzależniona jest trwałość i niezawodność całej części, a w konsekwencji podatność obsługowo-naprawcza silników maszyn rolniczych.

Dotychczasowe badania stanowią potwierdzenie możliwości zastosowania postulowanego kryterium oceny jakości naprawy. Kolejny etap badań obejmuje opracowanie metody modyfikowania właściwości użytkowych powierzchni roboczych czopów, możliwej do zastosowania w warunkach zakładu naprawczego. Trwają prace nad projektem przyrządu do konstytuowania równowagowych parametrów mikrogeometrii węzłów rzeczywistych.

Bibliografia

Pod redakcją Macieja Woropay'a. 1996. Podstawy racjonalnej eksploatacji maszyn. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Bydgoszcz-Radom.

Burakowski T., Marczał R. 2000. Badania eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. Tribologia i tribotechnika. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom.

Stawicki T. 2001. Badania możliwości optymalizacji trwałości krytycznych węzłów tarcia maszyn rolniczych. Praca magisterska. Akademia Rolnicza w Szczecinie, Szczecin.

Wanke P. 1998. Badania wpływu obróbki tarciowej na właściwości warstwy wierzchniej wybranych elementów węzłów krytycznych. Rozprawa doktorska. Szczecin.
PN – 87/M-04251. Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Wartości liczbowe parametrów.

Equilibrium roughness of working surfaces as a criterion of quality for the estimation of the quality frictional pairs repair

A conception of method of a forming utility properties of working surfaces co-operating frictionally, with particular consideration of operating conditions in agricultural technique. Possible advantages resulting from application of the proposed method in the process of fixing pins of crankshafts of combustion engines used in tractors and self-propelled agricultural machines were described.

Key words: working surfaces, critical knots, equilibrium roughness, repair, surface lager