

**3 KONFERENCJA PROBLEMY NIEKONWENCJONALNYCH UKŁADÓW ŁOŻYSKOWYCH  
Łódź, 15-16 maja 1997 r.**

Piotr Wanke, Edward Dreszczyk  
Akademia Rolnicza w Szczecinie

**WYTWARZANIE WIELOSTREFOWYCH WARSTW TRIBOLOGICZNYCH  
NA CZOPACH**

**Słowa kluczowe:** tarcie, łożyska ślizgowe, zużycie, smarowanie, docieranie, eksploatacja, naprawa, wytwarzanie, warstwa wierzchnia

**Streszczenie:** Na podstawie wieloletnich badań wypracowano metodę obróbki powierzchniowej, o szczególnej przydatności w naprawie maszyn i pojazdów rolniczych. W metodzie wykorzystuje się pracę tarcia jako pozytywne oddziaływanie energetyczne do obróbki czopów wałów i osi. W efekcie uzyskuje się skuteczne zabezpieczenie przed zacieraniem i złagodzenie ubocznych skutków docierania adaptacyjnego węzłów tarcia.

## **1. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU**

W eksploatacji maszyn roboczych i pojazdów w rolnictwie ujawniają się nowe zagadnienia mające ścisły związek z inżynierią powierzchni elementów współpracujących tarciowo w węzłach kinematycznych. Mimo stosowania nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych i smarowych oraz starannej obsługi, zużycia osiągają wartości przekraczające dopuszczalne o wiele wcześniej aniżeli to wynika z założeń - nawet w węzłach dotychczas uważanych za wystarczająco trwałe. Odkształceniom ulegają części bazowe, takie jak osadzenia łożysk, ramy, korpusy i głowice. Dotyczy to zarówno obiektów nowych jak i po naprawie. Występuje groźne zjawisko zacierania węzłów lub zbyt intensywnego wzrostu luzów, a nawet zwiększa się wysokość mikronierówności powierzchni w odniesieniu do stanu początkowego [9]. Świadczy to o wydłużeniu się okresu docierania węzłów, trudnym do kontrolowania zwiększaniu się luzów w skojarzeniach, a w konsekwencji zmniejszaniu trwałości całych obiektów.

W celu zobrazowania skali problemu przeanalizowano przykład silników spalinowych w ciągnikach rolniczych, które są głównym źródłem energii w produkcji rolniczej. Na podstawie danych statystycznych liczba ciągników przekracza 1,3 mln sztuk. Przy stabilizacji wykorzystania ciągników na poziomie 600÷900 mth rocznie oraz rzeczywistych przebiegach międzynaprawczych silników ciągnikowych wynoszących 2000÷2400 mth, liczba napraw silników przekroczyła 250

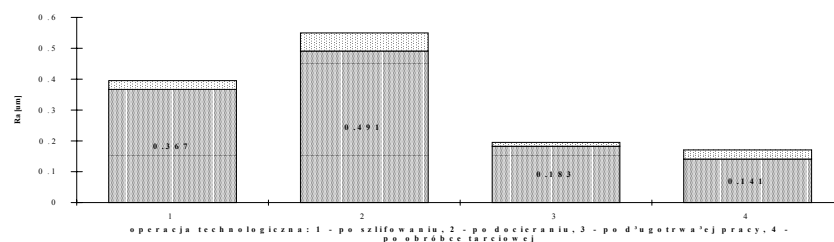
tys. sztuk rocznie [2]. Naprawione silniki spalinowe zużywają 50÷100 % więcej oleju i 5÷10 % więcej paliwa, przy zmniejszeniu wydajności napędzanych maszyn i pojazdów o 15÷20 % [9]. Ponadto z badań własnych wynika, że zwiększa się liczba uszkodzeń awaryjnych na skutek zacierania we wstępnym okresie pracy po naprawie [1]. Producenci materiałów i wkładów panewkowych przewidują, że starannie dobrana "... część warstwy ślizgowej przenosi się na czop lub powierzchnię oporową i wypełniając nierówności tworzy gładką powierzchnię o niskim współczynniku tarcia i mało zużywającej się" [8,10,11]. W rzeczywistości stwierdza się inną sytuację. Zakres tolerancji wymiarów czopów i wkładów panewkowych nie zabezpiecza optymalnej współpracy, a nawet optymalnych luzów początkowych.

Sformułowano założenia, że strefa powierzchniowa czopów powinna być tak obrabiona aby nastąpiło wygładzenie bez niszczenia warstwy ślizgowej panewki. Powinno się to osiągać albo w specjalnej operacji obróbczej wykonywanej bezpośrednio przed montażem węzła, albo we wstępnym okresie docierania, które z niesterowalnego procesu należy przekształcić w dopracowaną fazę treningu.

## 2. BADANIA WSTĘPNE I USTALENIE KIERUNKÓW WDROŻEŃ

Obserwowane tendencje w technologiach wytwarzania prowadzą do ograniczenia zastosowań staliwa i żeliwa, i zastępowania ich stalami stopowymi do nawęglania, azotowania, hartowania i ulepszania cieplnego. Metody obróbki dyfuzyjnej są wspomagane metodami spawania, napawania i natryskiwania cieplnego oraz nanoszenia proszkowego i chemicznego. Poszukiwanie kompromisu między wytrzymałością doraźną i zmęczeniową, a naciskami, prowadzi do zwiększenia twardości do granic obrabialności. Obróbka twardych powierzchni (powyżej 60 HRC), jak i ich wygładzanie do poziomu zbliżonego do wartości równowagowych ( $R_a \approx 0,1 \div 0,18 \mu\text{m}$ ) to trudny problem techniczny [4,5].

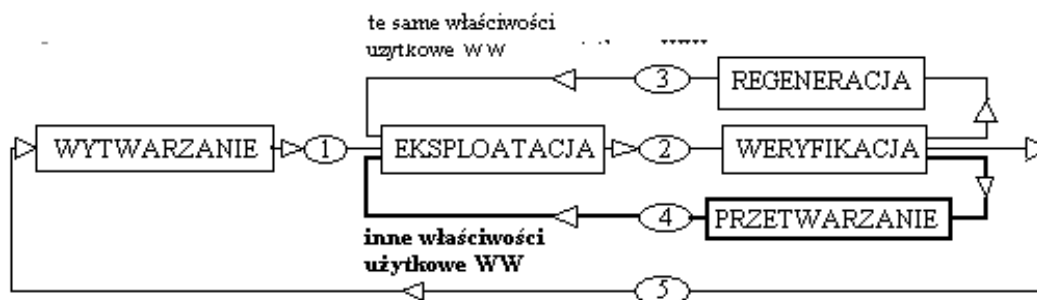
W praktyce czop jest zbyt twardy, a jego chropowatość zbyt daleka od równowagowej i wygładzenie kosztem miękkich mikrowarstewek powierzchniowych panewki nie następuje w okresie uznanym tradycyjnie za dopuszczalny czas docierania 5÷50 mth. Odślonięta warstwa stopu łożyskowego ulega utlenieniu i utwardzeniu. Jest to szczególnie niebezpieczne gdy wysokość nierówności powierzchni czopa mierzona parametrem  $R_a$ , mająca zakres optymalny  $R_a = (0,17 \div 20) \mu\text{m}$ , ma w rzeczywistości  $R_a = (0,8 \div 1,5) \mu\text{m}$ . Przy kruchych i utlenionych powłokach oznacza to, że zużywający się szybciej materiał panewek działa jak ścierniwo, inicjujące rozwój procesów zatarciowych oraz intensyfikuje zwiększanie luzów w skojarzeniu.



Rys. 1. Zmiany parametrów chropowatości na czopach wałów korbowych badanych silników

Badania własne autorów na czopach wałów korbowych silników S 4001 oraz silników AD3.152 i AD3.152 UR potwierdziły brak stabilizacji procesu wygładzenia czopów w fazie docierania (rys. 1) w przewidywanym przez producentów czasie pracy (50 mth). Bardzo wyraźnie wzrasta chropowatość elementów stalowych w węzłach tarcia mimo starannie wykonanej obróbki ( $R_a$  do  $0,30 \mu\text{m}$  po szlifowaniu wykończeniowym czopów). W obszarze łożyskowań ślizgowych występują zarysowania panewek z jednoczesnym głębokim wyrywaniem. Proces intensywnego zużycia stabi-

lizuje się dopiero po 150÷300 godzinach pracy [11]. Wprowadzenie operacji obróbki czopów specjalnym narzędziem (płytką, kilka płytek, kulka, rolka) lub współpracy tarciowej elementów w środowisku aktywnym chemicznie powinno być skuteczne.



Rys. 2. Schemat blokowy modelowego rozwiązania idealizowanego

W celu zrealizowania hipotetycznego założenia o możliwości obróbki czopów w krótkotrwałej operacji, podjęto badania rozpoznawcze. W proponowanym zabiegu obróbkowym zakłada się oprócz wygładzenia (rys. 1), uzyskanie przebudowy powierzchniowej strefy warstwy wierzchniej tak, aby zwiększyć jej sorbcyjność w odniesieniu do cząstek czynnika smarnego lub wręcz wytworzyć warstewkę silnie przywierającego smaru, który nie zakłóci współpracy z czynnikiem smarnym używanym w eksploatacji. Założenie, że taki proces jest możliwy potwierdzono w badaniach na elementach rzeczywistych i próbkach (rys. 2) (tab. 1). Elementami rzeczywistymi przeznaczonymi do badań były przeguby krzyżakowe wałów napędowych samochodów ciężarowych i przekładnie kierownicze samochodów dostawczych.

Tabela 1. Luzy kątowe przegubów krzyżakowych wałów napędowych

		wał 1	wał 2
Luz kątowy przed próbą	A	0,01/60	0,01/60
	B	0,02/60	0,01/60
Luz kątowy po próbie	A	0,08/60	0,11/60
	B	0,11/60	0,17/60

A - przegub z modyfikacją

B - przegub standardowy

Wyniki z badań wstępnych potwierdziły słuszność założeń o utworzeniu się na powierzchni warstewki sorbcyjnej. Aktywowany smar ŁT4 S3 przepracował na stanowisku badawczym 400 godz., co jest równoważne trwałości dla przebiegu  $(400\div 500)\cdot 10^3$  km. Uzyskano uzasadnienie do dopracowania modelowego procesu obróbki powierzchni czopów (ewentualnie innych elementów na bazie stopów żelaza).

### 3. ROZWIĄZANIE MODELOWE

Jako szczególnie ważne potraktowano zmniejszenie lub wyeliminowanie zagrożenia zacieraniem węzłów we wstępnej fazie pracy oraz uzyskanie chropowatości zbliżonej do równowagowej, przy jednoczesnym podwyższeniu właściwości sorbcyjnych warstw przypowierzchniowych w odniesieniu do aktywnych składników smaru.

Założono, że doprowadzając do wymuszonego tarcia styku mieszaniny proszkowej, z dominującą zawartością siarki, w reakcji bezpośredniej dochodzi do wytwarzania na powierzchni czopów siarczku FeS. Reakcja taka zachodzi z wydzielaniem znacznej ilości ciepła ( $Fe+S = FeS+23 \text{ kcal}$ ). W zetknięciu z tlenem w stanie wilgotnym siarczek ten łatwo utlenia się do  $FeSO_4$  i dlatego należy ograniczyć tę reakcję na wykorzystanie nienasyconych wiązań kwasów tłuszczowych pochodzenia organicznego.

W przyrodzie FeS występuje zawsze z nadmiarem siarki i dlatego jego skład wyraża się wzorami od  $Fe_7S_8$  do  $Fe_8S_9$ . Związki te mają strukturę heksagonalną podobną do FeS z tą tylko różnicą, że niektóre węzły sieci przestrzennej, w których powinny znajdować się atomy żelaza, pozostają nieobsadzone. Swoistą rekompensatę stanowi obecność jonów żelaza nie na drugim lecz trzecim stopniu utlenienia (sieć przestrzenna pozostaje elektrycznie obojętna). Tę specyfikę można prawdopodobnie wykorzystać do zainicjowania procesu obróbki, w którym powstaną wiązania, które mogą spożytkować wydzieloną przy tworzeniu FeS energię. Najkorzystniej byłoby uzyskać wiązania  $FeS_{(1,2)}$  i powstający nadmiar siarki związać z nienasyconymi wiązaniami kwasów tłuszczowych. Taki efekt może być korzystny zarówno dla powierzchni czopa jak i panewki zawierającej miedź. Wiadomo, że pożądanym byłoby uzyskanie pasywnych struktur  $CuS_2$  stabilizujących i utrwalających strukturę mechaniczną powierzchni [6].

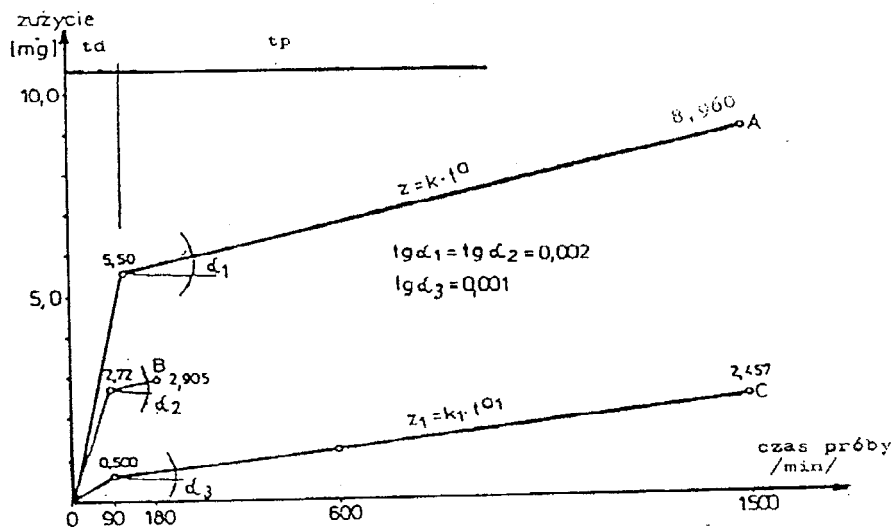
Strefa przypowierzchniowa WW na czopach wałów i osi jest najczęściej efektem indywidualnej historii technologicznej zakończonej prawie zawsze obróbką szlifowaniem. Na podstawie pierwszych badań własnych [4] stwierdzono efektywność nasiarczania na skutek działania specjalnych chłodziw (rys.3). Ze względu na agresywne działanie chłodziwa na obrabiarkę zrezygnowano z tego rozwiązania ale pomysł rozwinięto w szerszym aspekcie tworzenia warstw wierzchnich. W procesach wytwórczych i naprawczych założono, że charakterystyka strefy powierzchniowej konstytuowanej w obszarze węzłów tarcia powinna być zbliżona do stanu uzyskiwanego po zakończeniu docierania, w długotrwałej eksploatacji (rys.1,3) (ustabilizowanie zużycia  $Z_{(t)}=const$ ). Argumentem dodatkowym za wyborem nasiarczania była możliwość zwiększenia odporności na ściskanie i ułatwienie poślizgi (zmniejszenie odporności na ścinanie) - już przy minimalnych głębokościach nasiarczania porównywalnych z parametrem  $R_z$  lub jego nieznacznym przekroczeniem, następuje zwiększenie odporności na szepianie adhezyjne ( $v \leq 0,8 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$  i  $p \approx 10 \text{ MPa}$ )(Tab. 2)[13].

Modelowe rozwiązanie obróbki powierzchniowej, bazującej na wykorzystaniu pracy tarcia (szczególnie ślizgowego w styku skoncentrowanym) polega na zainicjowaniu reakcji tworzenia w obszarze występów nierówności związków grupy  $FeS_{1,2}$ . W przypadku wykorzystania aktywatora sypkiego oczekuje się, że w czasie dalszej współpracy części w węzle będą przyłączone cząstki kwasów tłuszczowych (nienasycone wiązania, rozerwane łańcuchy węglowodorowe itp.) Oznacza to, że modelowy proces obróbki zawiera dwie zasadnicze fazy: (1) reakcję chemiczną oraz (2) reakcję sorbcyjną. Faza druga może być zrealizowana w czasie normalnej współpracy tarciowej w otoczeniu dobranego czynnika smarnego.

Tabela 2. Zestawienie wyników skuteczności obróbki tarciowej

Nr	Wariant narzędzia	Aktywator	Parametry obróbki		Czas do zatarcia [s]
			$v_p$ [m/s]	p [MPa]	
0	-	-	-	5	7
1	rolka	A	0.5	10	70
2		B	0.5	10	50
3		C	0.5	10	45

4			0.5	10	60
5	plyta	A	0.5	20	90
6			0.5	30	120
7			0.5	10	260
8	plyta	B	0.5	20	25
9			0.5	30	30
10			0.5	10	145
11	plyta	C	0.5	20	150
12			0.5	30	450
13	obejma		0.5	0.6	15
14			0.5	0.6	13
15			0.5	0.6	17

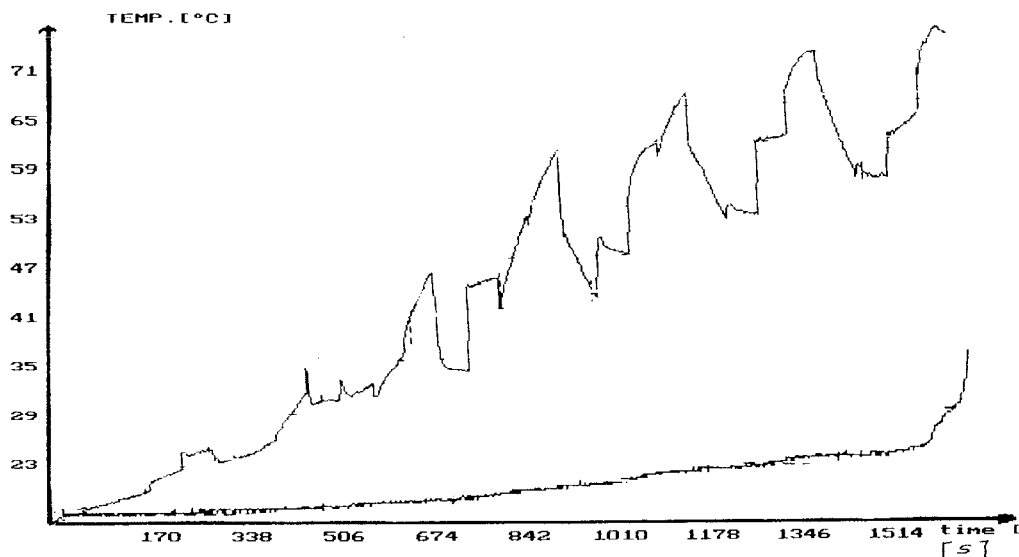


Rys. 3. Przebieg zużycia próbek klasy trzpień - tarcza: A-hartowanych, B-hartowanych i szlifowanych z udziałem chłodziwa, C-hartowanych, szlifowanych, a następnie obrabianych elektrolitycznie w aktywnym chemicznie elektrolicie

Prostą konsekwencją dobróbki wg projektowanego wariantu może być również inny jej przebieg polegający na spreparowaniu (wytworzeniu) czynnika smarnego w którym wiązania nienasycone będą podstawione siarką (różny stopień wysycenia). Oczekuje się, że skuteczniejszym wariantem obróbki będzie taki, w którym tylko część zostanie wysycona siarką. Pozostałe mogą poprzez wykorzystanie ciepła reakcji tworzenia związku  $FeS_{1,2}$  oraz ciepła tarcia adsorbować inne nienasycone wiązania i tworzyć silnie przywierający film smarny.

Z przedstawionego uzasadnienia wynika, że są realne różne warianty obróbki: specjalna obróbka w układzie narzędzie-obrabiarka (obrotnik); operacja docierania eksploatacyjnego lub bardziej uzasadniona operacja docierania technologicznego o intensywniejszych i kontrolowanych parametrach wymuszeń (nazwana treningiem technologicznym) - przynależna do procesu technologicznego wytwarzania lub naprawy.

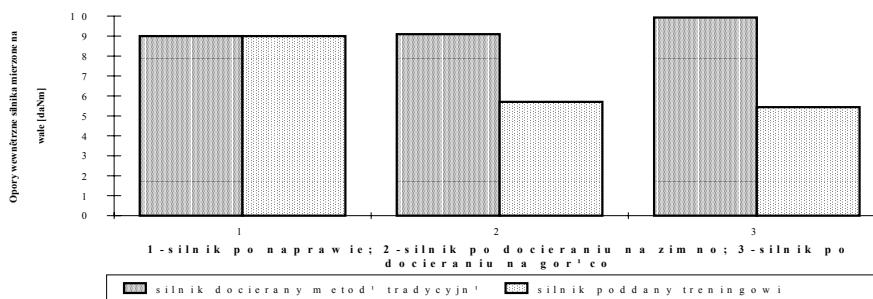
Oczekiwano, że przy zasadności rozumowania powinno się uzyskać inny efekt cieplny procesu obróbki przy aktywatorze pełniej wysyconym siarką (efekt nagrzewania się obszaru tarcia) oraz brak efektu nagrzewania lub efekt opóźniony w przypadku mniejszej zawartości przyłączonej siarki. W celu uzyskania dowodu wykorzystano trybometr typu T 05 (dzięki uprzejmości prof. T. Otmianowskiego) i uzyskano wyniki potwierdzające założenia (rys. 4). Na tej podstawie uznano, że jest zasadne rozwijanie badań poznawczych i próbnych aplikacji.



Rys. 4. Przebieg zmian temperatury oleju użytego do smarowania w czasie próby na trybometrze: **górną krzywą** - dla oleju standardowego, **dolną krzywą** - dla oleju aktywowanego specjalnym dodatkiem z minimalną zawartością siarki

**Uwaga:** Przebieg krzywej zmian temperatury dla oleju pełniej aktywowanego siarką ma podobny charakter jak dla oleju standardowego i nie został przedstawiony na rysunku w celu zachowania przejrzystości

W celu potwierdzenia przyjętych założeń przeprowadzono przykładowy eksperyment porównawczy dla dwóch silników wysokoprężnych o podobnym stanie (po naprawie). Jeden z silników poddano docieraniu konwencjonalnemu, a drugi treningowi. Uzyskany efekt ilustruje rys. 5.



Rys. 5. Zmiany oporów wewnętrznych silników: a-poddanych standardowemu docieraniu w czasie prób regulacyjnych, b-poddanych treningowi na aktywowanym oleju

#### 4. INTERPRETACJA UZYSKANYCH REZULTATÓW I WNIOSKI

1. Przedstawione techniki umacniania powierzchniowego wywodzą się z praktyki naprawczej. Proponowane do aplikacji technologie umacniania powierzchni roboczych przyspieszają stabilizację chropowatości równowagowej i eliminują zagrożenie występowania zatarć w początkowej fazie użytkowania.
2. Wykorzystanie proponowanych technologii daje możliwość przeniesienia docierania na etap końcowy wytwarzania lub naprawy oraz pełnego wykorzystania potencjału eksploatacyjnego obiektu technicznego. Wyeliminowanie docierania eksploatacyjnego usunie wiele niejednoznaczności z nim związanych, a także błędów spowodowanych nieodpowiednim poziomem ob-

sługi realizowanym przez użytkownika. Może to istotnie wpłynąć na trwałość i niezawodność obiektów technicznych.

Ponadto, wprowadzenie w końcowej fazie procesu wytwarzania lub naprawy zespołu operacji (nazywanej przez autorów treningiem), w której wykonuje się pracę odpowiadającą granicznym parametrom eksploatacyjnym, stwarza możliwość uprzedzającego przygotowania WW do pracy w ekstremalnych warunkach.

## LITERATURA

1. Dreszczyk E.: Kształtowanie warstw wierzchnich w procesach regeneracji części maszyn. W monografii: Wybrane problemy tribologii, Warszawa 1990, s.437-445
2. Dreszczyk E. i in.: Nowa technologia obróbki powierzchniowej. Materiały Konferencji AGROTECH 96, Kielce 1996.
3. Dreszczyk E., Nosal S.: O możliwości podwyższenia trwałości węzłów ślizgowych w procesie naprawy. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, z. 3(95) 1993, s.323-339
4. Dreszczyk E. i in.: Wzmacnianie powierzchniowe części w naprawach. Problemy Inżynierii Rolniczej, z.4(10) 1995, s.103-110
5. Dreszczyk E. i in.: Umacnianie powierzchni roboczych węzłów kinematycznych ze szczególnym uwzględnieniem fazy docierania. Przyjęte do druku (po recenzjach) w Inżynierii Łożyskowania.
6. Józefowicz E.: Chemia nieorganiczna. PWN, Warszawa 1980, 862 s.
7. Leszek W. i in.:Fizykochemiczne strefy kontaktu w węzłach kinematycznych maszyn. Temat realizowany w ramach CPBP 02.05 w latach 1986-90, Instytut Maszyn Roboczych, Politechnika Poznańska.
8. Materiały reklamowe firmy BIMET.
9. Piekarski W.: Wybrane problemy diagnostyki ciągników rolniczych w aspekcie doskonalenia ich eksploatacji. Wyd. AR w Lublinie, Lublin 1994.
10. Senatorski J.: Empiryczna ocena materiałów na ślizgowe węzły trące. Rozprawa habilitacyjna, IMP Warszawa 1994.
11. Śliwiński W.: Proces docierania metalowych par trących. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej Mechanika z.71, Kraków 1990.
12. Wanke P.: Obróbka wzmacniająca części wymiennych sprzętu rolniczego. Materiały Konferencji "Regeneracja 95, Bydgoszcz 1995, s.185-190
13. Wanke P. i in.: Konstytuowanie samoregenerującej się warstwy wierzchniej na elementach współpracujących tarciowo przy zastosowaniu aktywatorów sypkich i ciekłych. III Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna POLTRIB '95, Warszawa - Jachranka 24-26 maja 1995, s. IV-(64-74)
14. Zwierzycki i in.: Wybrane zagadnienia zużywania się materiałów w ślizgowych węzłach maszyn. PWN, Warszawa - Poznań 1990.

### CREATION OF MULTIZONE TRIBOLOGICAL LAYERS AT JOURNALS

**Abstract:** The problem of multiple strengthening of surface layers in kinematic pairs was investigated. The aim was to work out some technological variants useful in eliminating failure forms of wear - especially during the phase of wearing-in. The methods useful in machining single critical joints are presented. Moreover, there in also presented the possibility - initially confirmed - of moving the running-in phase to the range of manufacturing and repair through introducing the training operation.

**Recenzent: Prof. dr hab. Jan Burcan**