

Piotr ADAMIEC

Maciej KRZEWSKI

MODELOWE BADANIE MECHANIZMÓW ŻUŻYCIA WYSTĘPUJĄCYCH PRZY WSPÓLPRACY KÓŁ ZĘBATYCH

Streszczenie. Przeprowadzono modelowe badania zużycia warstwy wierzchniej typowego dla współpracy kół zębatach.

Stwierdzono, że zatarcie następuje w efekcie ścierania i następnego zużycia adhezyjnego, natomiast dla pittingu są charakterystyczne mechanizmy pęknięcia zmęczeniowego, tzn. lokalne odkształcenia, inicjowanie mikro-pęknięć i ich łączenie się w procesie tworzenia dziury pittingowej.

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ИЗНОСА ВЫСТУПАЮЩИХ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Резюме. Проведено модельное исследование износа поверхностных слоев характерного для совместной работы зубчатых колес.

Обнаружено, что заедание происходит в результате истирания и последующего адгезионного износа. Для пittingа характерными являются механизмы усталостного трещинообразования, то значит местные деформации, иницирование микротрещин и их объединение в процессе возникновения пittingовой дыры.

MODEL INVESTIGATIONS OF THE WEAR MECHANICS IN THE WORKING GEARS

Summary. There were realised the model investigations of the surface layer which were typical in the working gears.

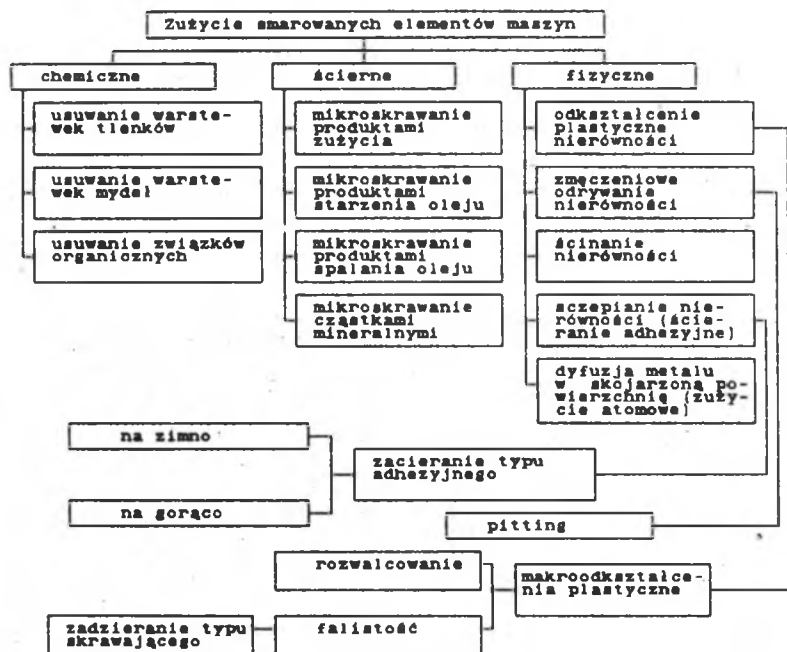
There was confirmed that scuffing occurs as an abrasion effect and following adhesive wearing, but in the case of pitting there are seen the characteristic fatigue crack mechanics, i.e. the local deformations, mikro-fracture initiations which join together in the creating process of the pitting hole.

1. WPROWADZENIE

Analiza uszkodzeń pojazdów samochodowych, a w szczególności grupy samochodów osobowych, ciężarowych oraz autobusów na poziomie zespołów, wskazuje na zespół przeniesienia napędu jako słabe ogniwo decydujące o trwałości pojazdu. O zużyciu eksploatacyjnym elementów tego zespołu, a w szczególności kół zębatach decydują m.in. warunki obciążenia i otoczenia oraz w dużym stopniu własności warstwy wierzchniej zębów przekładni zębatach.

Proces zużycia w tym przypadku jest skomplikowany [1], gdyż punkty powierzchni zębów pracują zarówno przy tarciu ślizgowym, jak i tocznym. Tarcie toczne występuje w obszarze średnicy podziałowej, natomiast dla

pozostałej powierzchni zębów charakterystyczne będzie tarcie ślizgowe wynikające z obecności poślizgów. W pracy [1] stwierdza się, że o zużyciu przekładni decyduje ścieranie i adhezja, przy czym przeważają procesy adhezyjne. W przekładniach obserwuje się również procesy zużycia zmęczeniowego, np. łuszczenie się lub pitting. W pracy [2] zwraca się uwagę na procesy zatarcia, które decydują o wielkości dopuszczalnego obciążenia kół zębatych. Procesy zużycia zębów nie prowadzą do lawinowego wzrostu sił dynamicznych, a zmiany tych sił wraz z upływem czasu nie posiadają charakteru monotonicznego [3].



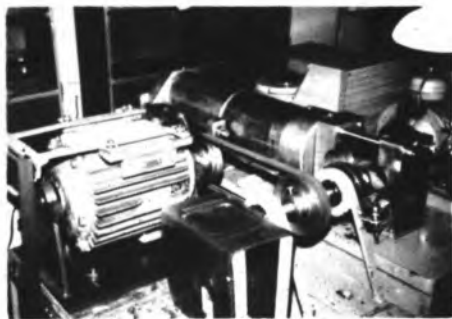
Rys. 1. Klasyfikacja rodzajów zużycia smarowanych elementów maszyn
 Fig. 1. Wear classification of labricated machine elements

W pracy [4] proponuje się klasyfikację Rozenberga, który dzieli zużycie na makro i mikro, a występujące procesy na fizyczne, chemiczne i ścierne (rys.1). Ocena wpływu czynników eksploatacyjnych np.: prędkości poślizgu, nacisku, temperatury jest na ogół skomplikowana, przy czym w pracy [1] podano zależności uzyskane w prowadzonych pracach badawczych, które są różne dla różnych warunków eksploatacji.

Celem przeprowadzonych badań była ocena mikromechanizmów, typowych dla zużycia kół zębatach w procesie zacierania i zużycia pittingowego. Do badań wykorzystano urządzenia rolkowe modelujące obciążenia występujące przy współpracy kół zębatach. Badania porównawcze kół zębatach i rolek, przy zachowaniu warunków podobieństwa kinematycznego i dynamicznego, wskazują na możliwość prowadzenia badań symulacyjnych na urządzeniach rolkowych, które są znacznie tańsze i krótsze [2]. Do analizy zatarcia wykorzystano również próbki uzyskane po zatarciu metodą Timkena. Wykonano również trwałościowe badania kół zębatach na stanowisku FZG [2].

2. PRZEPROWADZENIE BADAŃ

Przeprowadzono próby modelowania zużycia kół zębatach za pomocą pary rolek napędzanych i pracujących w warunkach tarcia toczonego z poślizgiem. Stanowisko (rys.2) umożliwiało uzyskanie prędkości liniowych do 22 m/s, prędkości poślizgów do 12 m/s oraz docisków do 4.5 kN. W badaniach zastosowano rolki ze stali 34HNM, hartowane i odpuszczane do twardości 45 HRC oraz ze stali St5. Rolka napędzająca posiadała obroty 1529 obr/min, a rolka hamująca 1010 obr/min (prędkość poślizgu 2,5 m/s), a obciążenie wynosiło 500 N.



Rys.2. Stanowisko rolkowe do modelowania współpracy kół zębatach
Fig.2. Roll stand for the mitting modelling of the wheel

Przeprowadzono również próby zacierania na urządzeniach Timkena w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej. Przy próbie zacierania zastosowano rolkę ze stali 100Cr6 obracającą się z prędkością obrotową 800 obr/min po próbce płaskiej 12.5x25 mm ze stali 18H2N2 nawęglanej i odpuszczanej do twardości 55 HRC, w obecności oleju przekładniowego Hipol 15. Obciążenie próbki wynosiło 400 N. Modelowe próby zużycia pittingowego przeprowadzono na maszynie firmy Amsler. W próbie wykorzystano rolki ze stali 40H, hartowane i odpuszczane do twardości 45HRC, obciążone siłą 2kN i poruszające się z prędkością obrotową 400 obr/min, przy prędkości poślizgu 0.1m/s (10%). Zastosowano olej przekładniowy Hipol 15 o temperaturze 40°C. Przeprowadzono również próby trwałościowe współpracy kół zębatach na stanowisku FZG. Wykorzystano koła zębata, $m = 4$, $z = 20$ ze stali 18H2N2 nawęglane i hartowane. Badania przeprowadzono przez 60 h, dokonując co 2 h obserwacji powierzchni współpracujących.

Do oceny mechanizmów zużycia wybrano próbki po różnych czasach współpracy, które wykorzystano do oględzin zewnętrznych oraz do badań metalograficznych, które przeprowadzono na zgiądach wzdłużnych i poprzecznych.

3. WYNIKI BADAN

Wyniki oględzin zewnętrznych dla poszczególnych prób zestawiono w tabelicy 1, w której podano rodzaj próbek, czas próby oraz widoczne efekty zewnętrzne. Wybrane próbki wykorzystano do wykonania zgiądów metalograficznych, które wycinano mechanicznie, szlifowano oraz polerowano. Polerowane, a częściowo również zgiady trawione 2% nitaliem, obserwowano pod mikroskopem Reichert przy powiększeniach od 50 do 300 razy. Wyniki obserwacji przedstawiono na kolejnych rys. 3-18.

Tablica 1

Wyniki oględzin zewnętrznych próbek zużytych

Poz.	Rodzaj próbki	Czas trwania próby	Obserwowane efekty zużycia
Próba zacierania na stanowisku rolkowym			
1.	St5 + St5 500 N, 180HB bez poślizgów	300 s	wybiśzczenie próbek, okresowo pojawiające się efekty dogniatania w postaci pasm odkształceń plastycznych na powierzchni próbki
2.	St5 + St5 500 N, 180HB bez poślizgu poślizg 2,5 m/s 550 N 600 N	300 s	wybiśzczenie próbek
		330 s	zmatowienie próbki, widoczne efekty ścierania na około 50% powierzchni
		360 s	zmatowienie próbki, widoczne efekty ścierania na około 80% powierzchni
		390 s	zatarcie, gwałtowny wzrost momentu hamującego i zadziałanie wyłącznika automatycznego, widoczne efekty zużycia adhezyjnego
3.	St5 + 34HNM 180HB + 55HRC 500 N, bez poślizgu poślizg 2,5 m/s	300 s	wybiśzczenie próbek
		330 s	zmatowienie próbek przesuwane się z jednej strony do drugiej, zatarcie próbki, zużycie adhezyjne przesuwane się podobnie jak zmatowienie, materiał próbki St5 naniesiony na próbkę 34HNM
Próba zużycia metodą Timken			
4.	pierścień KH15+ klocek 18H2N2 po nawęglaniu i ulepszaniu 45 HRC, Q=400 N Hipol 15	120 s	brak widocznych śladów zużycia
		240 s	nieznaczne ślady wytarcia
		360 s	widoczne ślady zatarcia
		480 s	wyraźne ślady zatarcia i spadek obrotów
		600 s	widoczne bruzdy w wyniku zatarcia oraz ślady zużycia adhezyjnego
Próba zużycia pittingowego			
5.	próbki 40H po ulepszaniu cieplnym, 45HRC Hipol 15 Q = 2 kN	60 min	widoczne nieregularne zmatowienie próbki
		90 min	widoczne bruzdy w wyniku zatarcia
		120 min	pojawiają się nieliczne dziury pittingowe
		150 min	widoczne dziury pittingowe
		180 min	widoczne wyrwy i pęknięcia powierzchniowe
6.	koła zębate m = 4, z = 20, 18H2N2 po nawęglaniu i ulepszaniu, 45HRC	600 min	widoczne zużycie na grubości
		1800 min	widoczne pierwsze dziury pittingowe
		3600 min	zniszczenie koła



Rys. 3. Próbką Timkena po 60s zacierania. Traw. nital, pow. 100x. Widoczne efekty odkształcenia

Fig. 3. Timken's test piece after 60s. seizing. Etch. nital, magn. 100x. Visible deformation effect



Rys. 4. Próbką Timkena po 120s zacierania. Pow. 100x. Widoczne rysy

Fig. 4. Timken's test piece after 120s. seizing. Magn. 100x. Visible the scratches



Rys.5. Próbką Timkena po 240s zacierania. Traw. nital, pow. 100x. Widoczne rysy i fragmentaryzacja bruzd

Fig.5. Timken's test piece after 120s. seizing. Etch. nital, magn. 100x. Visible scratches and groove fragmentation



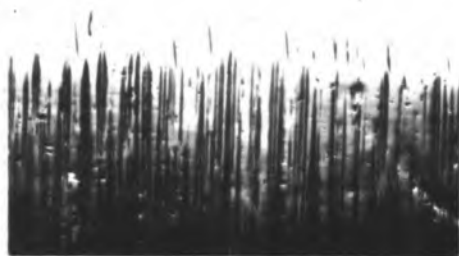
Rys.6. Próbką Timkena po 240s zacierania. Pow.100x. Widoczne miejsca po wyrwanym cząsteczkach

Fig.6. Timken's test piece after 240s. seizing. Magn.100x. Visible the dimples



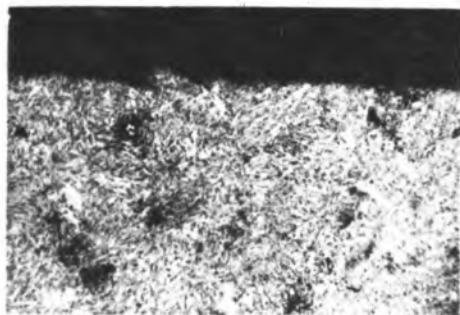
Rys. 7. Próbka Timkena po 600s zacierania. Pow. 100x. Widoczne rozmazania jako efekty zatarcia

Fig. 7. Timken's test piece after 600s. seizing. Magn. 100x Visible the smears as seizing effect



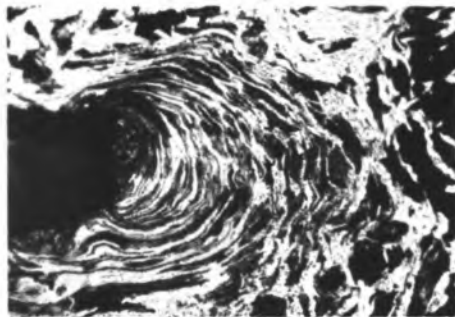
Rys. 8. Próbka rolkowa St5 po 300s. Pow. 100x. Widoczne efekty zużycia ściernego

Fig. 8. Roll test piece St5 after 300s. Magn. 100x. Visible seizing effects



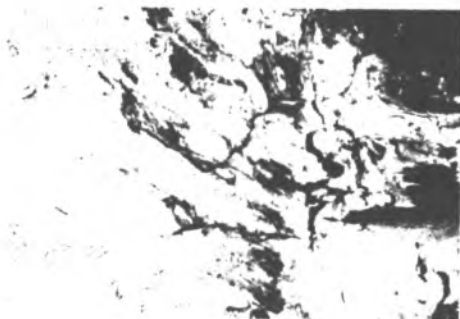
Rys. 9. Próbkę rolkowa St5 po 390s. Pow.100x. Widoczne efekty ścierania i miejsca po wyrwanych cząstkach

Fig. 9. Roll test piece St5 after 390s. Magn.100x. Visible seizing effects and dimples



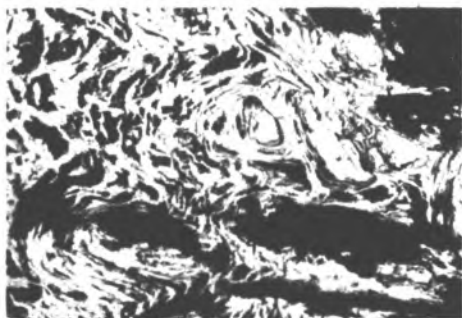
Rys. 10. Próbkę rolkowa St5 po 390s. Traw. nital. Pow.100x. Widoczne bardzo duże odkształcenia obszarów wokół wyrwanej cząstki

Fig. 10. Roll test piece St5 after 390s. Etch. nital, magn.100x. Visible veery large deformation round the dimples



Rys.11. Próbką rolkowa 34HNM po 360s. Traw. nitałem. Pow. 100x. Widoczne mikropęknięcia będące przyczyną wrywania cząsteczek

Fig.11. Roll test piece 34HNM after 360s. Etch. nital. magn.100x. Visible the microcracks



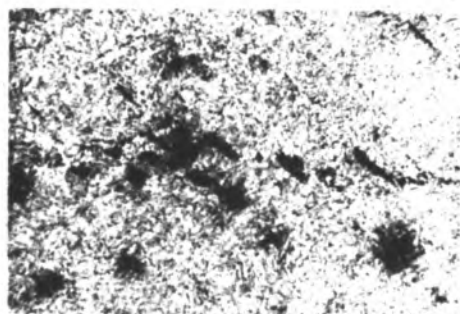
Rys.12. Próbką rolkowa St5 po 390s. Traw. nitałem. Pow.100x. Widoczne bardzo duże odkształcenia plastyczne towarzyszące zużyciu adhezyjnemu

Fig.12. Roll test piece St5 after 390s. Etch. nital. magn.100x. Visible very large plastic deformation at the adhesive wearing



Rys.13. Próbką rolkowa 34HNM po 360s. Traw. nitałem. Pow. 100x. Widoczne cząstki stali St5 na powierzchni próbki

Fig.13. Roll test piece 34HNM after 360s. Etch. nital, magn.100x. Visible the particles St5 steels on the piece surface



Rys.14. Próbką rolkowa 40H po 90 min. Traw. nitałem. Pow. 100x. Widoczne efekty odkształcenia pod warstwą wierzchnią

Fig.14. Roll test piece 40H after 90min. Etch. nital, magn.100x. Visible deformations effect under the piece surface



Rys.15. Próbką rolkowa 40H po 90 min. Traw nitałem. Pow. 100x. Widoczne efekty odkształcenia na powierzchni warstwy wierzchniej

Fig.15. Roll test piece 40H after 90min. Etch.nital. magn.100x. Visible deformations effect on the piece surface



Rys.16. Próbką rolkowa 40H po 90 min. Pow.100x. Widoczne mikropęknięcia pod powierzchnią warstwy wierzchniej

Fig.16. Roll test piece 40H after 90min. Magn.100x. Visible the microcraks under the piece surface



Rys.17. Próbką rolkowa 40H po 150 min. Pow.100x. Widoczne dziury pittingowe będące efektem łączenia się mikropełnięć

Fig.17. Roll test piece 40H after 150min. Magn.100x. Visible pitting holes as the effect of the microcracks joining



Rys.18. Próbką rolkowa 40H po 180 min. Pow.100x. Widoczna typowa dziura pittingowa

Fig.18. Roll test piece 40H after 180min. Magn.100x. Visible typical pitting hole

4. ANALIZA WYNIKÓW

Przedstawione wyniki umożliwiają wstępną, jakościową analizę mechanizmów zużycia przez tzw. zatarcie oraz zużycie pittingowe. Zacieranie (scaring) jest rodzajem zużycia powierzchni trącej, spowodowanego lokalnym zgrzewaniem i zacieranem mikronierówności tej powierzchni, występującym po przerwaniu filmu olejowego i dostrzegalnym nieuzbrojonym okiem. Ww. definicja, zgodna z projektem normy PN-85/C-04 [5], wskazuje na adhezyjny mechanizm zużycia. Obserwacje metalograficzne próbek zacieranych metodą Timkena wskazują na bardziej złożony mechanizm zużywania się. Mechanizm zapoczątkowany jest odkształceniem warstwy wierzchniej, efekty tego odkształcenia widoczne są dopiero po wytrawieniu powierzchni zatartej (rys.3). Następnie są widoczne efekty bruzdowania (rys.4) w postaci drobnych rys. W miarę narastania procesu ilość i głębokość rys rośnie oraz pojawiają się mikropęknięcia poprzeczne do kierunku zacierania (rys.5), które prowadzą do wrywania cząsteczek (rys.6) i rozmazywania ich (rys.7). Podobne efekty obserwowano przy zacieraniu się rolek. W początkowym etapie widoczne jest ścieranie (rys.8), któremu następnie towarzyszy wrywanie cząsteczek (rys.9). Dalej następuje wyraźne odkształcenie struktury (rys.10) w przypadku materiałów miękkich (stal St5, 180 HB) lub mikropęknięcia (rys.11) w przypadku materiałów twardych (34HNM, 45HRC).

Przy dużych obciążeniach, powyżej 600 N, widoczne są efekty rozmazywania i bardzo dużych odkształceń (rys.12), które świadczą o podwyższeniu temperatury styku powierzchni. W przypadku współpracy materiałów twardych i miękkich obserwuje się nalepianie bardzo odkształconego materiału miękkiego na twardy (rys.13). Nieco inny mechanizm występuje przy zużyciu pittingowym. W początkowym etapie obserwuje się efekt odkształcenia pod powierzchnią (rys.14) i na powierzchni próbki (rys.15). Następnie powstają mikropęknięcia (rys.16), często na wtrąceniach niemetalicznych. W miarę upływu czasu następuje łączenie się mikropęknięć, wrywanie cząstek (rys.17) oraz powstają dziury pittingowe (rys.18). W tym przypadku proces zużywania się jest procesem typowo zmęczeniowym, opisywanym w podręcznikach o zmęczeniu metali [6].

5. WNIOSKI

5.1. W przypadku zacierania, w początkowym etapie wiodący jest mechanizm ścierania. Następnie obserwuje się fragmentalizację bruzd i wrywanie cząsteczek w efekcie lokalnego zgrzewania się powierzchni. Dominuje mechanizm adhezyjny.

- 5.2. Przy zacieraniu się miękkich materiałów obserwuje się wyrywanie cząstek w obecności bardzo dużych odkształceń plastycznych, natomiast zacieraniu twardych materiałów towarzyszy wyrywanie cząstek w efekcie obecności dużej ilości mikropełnięć.
- 5.3. Przy współpracy twardych i miękkich materiałów występuje bardzo duże odkształcenie miękkiego materiału i jego namazywanie się na powierzchnię twardego materiału.
- 5.4. O zużyciu pittingowym kół zębatach decydują procesy zmęczeniowe, prowadzące do mikropełnięć, często na wtrąceniach niemetalicznych, które łącząc się tworzą dziury pittingowe.

LITERATURA

- [1] Janecki J., Gołąbek S.: Zużycie części, WKŁ, Warszawa 1984.
- [2] Müller L.: Przekładnie zębate. Badania. WNT, Warszawa 1984.
- [3] Müller L. i in.: Praca badawcza GR-711/RT/90. Instytut Transportu Politechniki Śląskiej, Katowice.
- [4] Luczak A., Mazur T.: Fizyczne starzenie elementów maszyn. WNT, Warszawa 1981.
- [5] Projekt normy PN-85/C-04. Badania własności smarnych olejów i smarów metodą Timkena. Gr.kat.0229.
- [6] Kocańda S.: Zmęczeniowe pęknięcie metali. WNT, Warszawa 1985.

Recenzent: Doc.dr hab.inż. Władysław Śliwiński

Wpłynęło do Redakcji 28.11.1991r.

A b s t r a c t

There were estimated the mechanisms which are typical for the gear wear in the scuffing and pitting processes. The roller plant was used in these investigations to simulate the loads which exist in gear work. The comparative investigations of gears and rollers show that there are possible the simulating investigations by means of the roller plants when the kinematic and dynamic similarity occurs and it is evidently cheaper and quick [2]. To make the scuffing analysis there were used also the test pieces obtained in the scuffing in the Timken method.

The effects of these investigations make possible to obtain the preliminary qualitative analysis of the gear wear mechanisms when they are scuffed and pitted. This scuffing is a kind of the wear of friction surface caused by

the local welding and scuffing of the micro-roughness of this surface and it occurs when the oil-film has been broken and it is visible by the unaided human eye. This definition indicates that there occurs an adhesive mechanism of the wear process. The metallographic observations of the scuffed test pieces indicate also that the wear mechanism is more complicated. The wear is then initiated by the surface layer deformation (Fig.3), and afterwards are visible the effects of grooving (Fig.4) as formed the small scratches. When the wearing process rises, the amount and deepness of these scratches are greater and there appear the micro-cracks crosswise to the scuffing direction (Fig.5) and it causes the tearing-off of the micro-parts (Fig.6) and also their blurring (Fig.7). Furthermore occurs the distinct deformation of the structure (Fig.10) in the soft materials (Steel St5, 180HB) or the micro-cracks (Fig.11) in the hard ones (34HNM, 45HRC).

When the load is great, there are visible the effects of the blurring and very great deformations (Fig.12) and that indicate that the temperature on the contact surface is rising. In the case of the hard and soft materials working together one can observe that the very deformed soft ones are glued to the hard one (Fig.13). Quite another mechanism occurs in the pitting wear. In the initial period one can observe the effect of the deformation of the surface layer (Fig.14,15). Then there occur the micro-cracks (Fig.16), often in the non-metallic inclusions. Then the time follows, these micro-cracks join together, the parts are broken out (Fig.17) and there occur the pitting holes (Fig.18). In this case the wearing process is typical a fatigue one.