

CHARAKTERYSTYKA ZUŻYCIA HARTOWANYCH INDUKCYJNIE KRZYWEK WAŁKA ROZRZĄDU Z ŻELIWA SFEROIDALNEGO

Dr inż. Jacek MICHALSKI

W artykule przedstawiono charakter i wartości zużycia powierzchni bocznej krzywek wałka rozrządu silnika CE o zapłonie iskrowym, pojemności 1,6 l, po przebiegu samochodu 2000 km. Wałek rozrządu wykonany został z żeliwa sferoidalnego perlitycznego. Krzywki miały odmienną głębokość warstwy utwardzonej, o zbliżonej twardości $52\div 55$ HRC, uzyskanej metodą hartowania indukcyjnego. Rodzaj zużycia powierzchni krzywek dla części wznoszącej, wierzchołka oraz opadającej był zbliżony, lecz o znacznie odmiennej intensywności. Silnie zużyta powierzchnia krzywek, o dużej głębokości utwardzenia, miała liczne pęknięcia metalu warstwy powierzchniowej przebiegające prostopadle do płaszczyzny obrotu wałka oraz zużycie wywołane przez scuffing. Najbardziej zużyty był wierzchołek tych krzywek z licznymi wgłębieniami po wykruszonym metalu (spalling). Zwiększoną intensywność zużycia krzywki interpretowano dodatnią wartością naprężeń własnych, zwiększoną ilością austenitu szczątkowego i brakiem ruchu obrotowego współpracujących popychaczy.

1. WSTĘP

Do czynników istotnie wpływających na zużycie pary kinematycznej krzywka-popychacz, należą cechy materiałowe elementów, dynamika współpracującej pary, temperatura, właściwości oleju oraz czynniki eksploatacyjne. Taka para kinematyczna pracuje w złożonych warunkach obciążeń mechanicznych zmęczeniowych objętościowych, zmęczeniowych stykowych oraz narażona jest na zużycie przez tarcie. Często formą zużycia tej pary jest zużycie ściernie, łącznie występujące zużycie ściernie i adhezyjne (scuffing) oraz zużycie zmęczeniowe (spalling). Występujące awarie wynikają także z faktu znacznej zmiany lepkości oleju i jego grubości w obszarze styku krzywka-popychacz.

Światowi producenci silników spalinowych stosują na wałki krzywkowe w większości przypadków żeliwo szare utwardzone pierwotnie w procesie odlewania. Jego udział oceniono się na około $32\div 55\%$. Aktualną tendencją jest stosowanie rur stalowych odkształconych ciśnieniem cieczy (ang. hydroforming) z utwardzoną powierzchnią zewnętrzną (nawęglaną i hartowaną). Mniej liczne są wałki krzywkowe ze stali kutej, żeliwa szarego, żeliwa sferoidalnego oraz żeliwa ciągliwego, mających hartowane indukcyjne powierzchnie. Spotyka się także wałki krzywkowe z przetopioną warstwą za pomocą skoncentrowanej energii. Prowadzone są także prace dotyczące zastosowania ceramiki technicznej, metalowych spieków twardych i kompozytów. Stwierdzono również duży wpływ sposobu obróbki wykończeniowej krzywek wałka i czoła popychaczy na wartość zużycia współpracujących elementów.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Krzywka wałka rozrządu wykonana z żeliwa sferoidalnego, o twardości 570 HV_{0,3}, współpracująca z popychaczem z żeliwa wysokochromowego, o twardości 780 HV_{0,3} uległa zużyciu zmęczeniowemu poprzez wykruszenie materiału [2]. Dlatego w silniku TU3 zastosowano monitorowanie zużycia krzywek wałka rozrządu czujnikiem elektrostatycznym. System dobrze diagnozuje wartości zużycia złożenia krzywka-popychacz, zarówno poprzez scuffing, odkształcenie plastyczne jak i zużycie poprzez wykruszenie. Poprawność monitorowania systemu zużycia mechanizmu rozrządu, przeprowadzono z zastosowaniem oleju o złych właściwościach smarnych. Interpretowano uzyskane wartości zużycia krzywki wałka rozrządu wpływem bardzo dużej zmiany grubości filmu olejowego na obwodzie krzywki i dynamiczną zmienną wartością siły normalnej. Grubość filmu jest bowiem bardzo mała za wierzchołku krzywki, jak i zdecydowanie mniejsza dla małej lepkości oleju. Z kolei siła normalna ma zwykle największą wartość za wierzchołku krzywki, co wynika z silnego obciążenia sprężynami śrubowymi. Siła normalna może także osiągać bardzo duże wartości dynamiczne, w części wznoszącej i opadającej krzywki. W obszarze tym ma miejsce duży przyrost przyspieszenia napędzanego popychacza z zaworem. Wartość zużycia powierzchni

krzywki jak i popychacza jest także zmienna wzdłuż ich tworzących. Zużycie ma dużą wartość w części środkowej tych elementów.

Mechanizm zużycia poprzez scuffing został przedstawiony w pracy [1]. Wynika on z wielokrotnego kontaktu tych samych obszarów krzywki z popychaczem. Wraz ze wzrostem drogi tarcia ulega zwiększeniu wysokość pierwotnej chropowatości powierzchni. Początkowy kontakt sprężysty ulega zamianie na odkształcenie plastyczne, co wynika z wartości wskaźnika plastyczności stykających się nierówności powierzchni. Ma miejsce także zmniejszenie ciśnienia hydrodynamicznego oleju oraz zwiększenia obciążenia mechanicznego kontaktujących się powierzchni.

Odporność na zużycie ściernie, w tarciu suchym o ruchu obrotowym, żeliwa sferoidalnego niestopowego odlewane w formie piaskowej jest większa po utwardzeniu w procesie przetapiania plazmą łuku elektrycznego (GTWA) aniżeli po utwardzeniu metodą krystalizacji pierwotnej tj. odlewania z ochładzalnikami, jak i utwardzania metodą hartowania cieplnego [15]. Uzyskano w wyniku przetapiania plazmą łuku elektrycznego i szybkiej krystalizacji korzystną mikrostrukturę, zwłaszcza w atmosferze ochronnej argonu, tj. ledeburyt przemieniony, cementyt, martenzyt i austenit szcążkowy. Intensywność zużycia tribologicznego masowego względnego, w stosunku do żeliwa sferoidalnego, uległa zmniejszeniu: 3,8 krotnie po hartowaniu cieplnym (40 HRC), 9,8 krotnie po utwardzeniu pierwotnym (44 HRC), 32,3 po GTWA (60÷65 HRC) w atmosferze helu oraz 60,9 krotnie po GTWA (60÷65 HRC) w atmosferze argonu. Przeciwnie, do badań laboratoryjnych, wykonano także z żeliwa sferoidalnego o strukturze ledeburyt przemieniony, cementyt, perlit i grafit sferoidalny (60 HRC). Ze zwiększeniem prędkości ruchu obrotowego od 1,6 m/s do 3,2 m/s i obciążenia od 100 N do 300 N stwierdzono, zbliżone prawie liniowe, zwiększenie intensywności zużycia. Jego wartość zwiększyła się aż 26,1 razy.

Proces równoczesnego zużycia ściernego i adhezyjnego przebiega znacznie szybciej w ruchu posuwisto-zwrotnym w porównaniu do ruchu obrotowego jednokierunkowego [4].

Mechanizmu rozrządu z hydraulicznymi kasownikami luzu, z wałkiem krzywkowym wykonanym z żeliwa szarego o strukturze ledeburyt przemieniony, uzyskanej w procesie krystalizacji pierwotnej, ma korzystne właściwości tribologiczne [5]. Stwierdzono mniejszy współczynnik tarcia i szybkość zużycia takiego rozwiązania w porównaniu ze wałkiem rozrządu utwardzonym metoda hartowania i innymi procesami obróbki cieplnej.

Potwierdzają to także wyniki badań bezpośredniego mechanizmu rozrządu silnika wysokoprężnego zamieszczone pracy [11]. Wałek rozrządu był z żeliwa szarego o krzywkach utwardzonych pierwotnie w procesie odlewania (59 HRC) a płytki regulacyjne ze stali 40H ulepszonej cieplnie i hartowanej powierzchniowo. Krzywki w strefie przypowierzchniowej miały strukturę ledeburyt przemieniony, cementyt i perlit. Popychacze zaworowe były o twardość 57÷59 HRC (681÷734 HV_{0,05}). Struktura metalograficzna popychaczy to martenzyt.

Uzyskano także, dla powyższego mechanizmu rozrządu z hydraulicznym kasownikiem luzu, zbliżone zużycie tribologiczne wałka rozrządu z płytką regulacyjną ze stali łożyskowej zahartowanej ŁH15 (EN 100Cr6, 62 HRC). Większe zużycie krzywki oraz płytki regulacyjnej wystąpiło, gdy kasownik hydrauliczny wykonany był z żeliwa sferoidalnego o strukturze bainityczno-martenzytycznej (52 HRC), uzyskanej metoda hartowania izotermicznego, oraz żeliwa sferoidalnego o strukturze zawierającej ferryt, perlit i grafit sferoidalny (40 HRC) [12].

Charakterystykę mechaniczną i metalograficzną wałków rozrządu z krzywkami z żeliwa szarego utwardzonego pierwotnie w procesie odlewania przedstawił także Kumruoglu [10].

Charakter obciążenia krzywki wałka rozrządu powodował szczególnie duże wartości zużycia tribologicznego wierzchołka krzywki i nierównomierne zużycie powierzchni popychacza [8].

Zużycie zmęczeniowe powierzchni krzywki i popychacza wynika z przekraczania granicy plastyczności materiału [14]. Zużycie poprzez spalling i scuffing jest minimalizowane poprzez zmniejszenie współczynnika tarcia oraz poprawę wytrzymałość na ściskanie materiałów.

Niekiedy w eksploatacji, już po małym przebiegu samochodu (347 km) ulegają silnemu zużyciu zmęczeniowemu, poprzez spalling, popychacze silnika wysokoprężnego [16]. Wykonane zostały, bowiem z żeliwa sferoidalnego stopowego Cr-Mo-Cu. Po ulepszeniu cieplnym i

hartowaniu miały strukturę martenzytyczną. Autorzy uznali, iż zaistniała awaria wynikała ze zbyt małej głębokości utwardzenia, twardości mniejszej niż 58÷63 HRC oraz mniejszej niż 40% ilości objętościowej węglików M_3C .

Badano materiały systemu rozrządu ślizgowego na stawisku typu trzpień-tarcza, w warunkach zmieniających się od tarcia płynnego, poprzez tarcie mieszane, suche i zacieranie [17]. Porównywano właściwości tribologiczne trzpieni z żeliwa sferoidalnego o twardości 51 HRC odpowiednio ze stalą szybko tnącą HSS i M3/2, kompozytem proszkowym M3/2 z 5% wagowo TiC (aby zmniejszyć zużycie), kompozytem proszkowym M3/2 z 5% wagowo MnS (aby zminimalizować tarcie) i kompozytem proszkowym M3/2 z TiC i MnS. Tarcza wykona była z żeliwa sferoidalnego o twardości 50 HRC. W warunkach zacierania, trwałość trzpieni ze stali szybko tnącej była 1,5÷3 razy większa niż w przypadku jej kompozytów i 10 razy większa niż trzpieni z żeliwa sferoidalnego. We wszystkich testach tribologicznych stal szybko tnąca i jej kompozyty przewyższały znacznie żeliwno sferoidalne. Istnieją jednak różnice wartości współczynnika tarcia, zużycia jak i nośności dla stali szybko tnących HSS, M3/2 i badanych kompozytów. Nośność stali szybko tnącej jak i jej kompozytów, zwłaszcza z zawartością TiC, jest pięć do siedmiu razy większa niż dla żeliwa. W okresie tarcia hydrodynamicznego węglík TiC zmniejsza zużycie, z kolei miękki składnik MnS zmniejsza współczynnik tarcia. Wartość zużycia tarczy została zmniejszona 20÷60 razy poprzez zastosowanie MnS lub/ oraz TiC. Współpracowała ona z kompozytowym trzpieniem ze stali szybko tnącej [17]. Jednak tarcza ma najmniejsze zużycie tribologiczne przy współpracy z trzpieniem z żeliwa sferoidalnego.

Intensywność zużycie złożenia krzywka-popychacz może ulegać zwiększeniu lub zmniejszeniu, z upływem czasu użytkowania silnika. Wynika to z oddziaływania wzajemnego sadzy, powstałej ze spalania paliwa z dodatkami do oleju silnikowego. Dotyczy to zwłaszcza oddziaływania pomiędzy związkami siarki, fosforu i dialkilditiofosforanu cynku (ZDDP) a metalem [6].

Struktura chemiczna dodatków smarnych ZDDP w oleju bazowym, ma silny wpływ na tarcie i zużycie krzywki wałka rozrządu z popychaczem [7]. Stwierdzono to dla bezpośredniego mechanizm rozrządu z wałkiem rozrządu o krzywkach wykonanych z żeliwa szarego i utwardzonych pierwotnie w procesie odlewania. Materiał krzywek miał strukturę ledeburyt przemieniony. Popychacz szklankowy zaopatrzone z kolei w płytkę stalową o powłóce diamentowej DLC. Zmniejszenie strat tarcia takiego rozwiązania potwierdzają także wyniki obliczeń i badań silnika sportowego wysokoobrotowego Lamborghini [3].

Dla zbliżonego rozwiązania rozrządu, szczególne małe opory ruch występują w wyniku wprowadzenia estru do oleju. Współczynnik tarcia uległ wówczas zmniejszeniu o 45% dla prędkości obrotowej 2000 obr/min [9].

Opracowano obecnie sposób wyeliminowania krzywek oraz wałków rozrządu za pomocą bezkrzywkowego zaworowego rozrządu. Wyniki badań symulacyjnych sterowania pracą silnika spalinowego, poprzez system elektrohydrauliczny, dla 4-suwowego silnika ZI YARIS 1,3 l, wykazały znaczący wzrost momentu obrotowego, umniejszenie emisji szkodliwych składników spalin i zwiększenie sprawności ogólnej silnika [13]. Systemy elektrohydrauliczne, magnetoelektryczne jak i elektromagnetyczne napędzania zaworów są bardziej skomplikowane oraz bardziej kosztowne od konwencjonalnego układu rozrządu. Wymagają także hamowania zaworu podczas osiadania w gnieździe, ponieważ występuje gwałtowne zderzenie się dwóch części. Mają także szereg korzystnych właściwości [18].

3. METODYKA BADAŃ

Badania dotyczyły krzywek wałka rozrządu z żeliwa sferoidalnego mającego zarys profilu syntetyczny, które współpracowały z hydraulicznymi popychaczami w silniku CE o zapłonie iskrowym mającym pojemności 1,6 l (rys. 1a). Zostały one uszkodzone i nadmiernie zużyte po przebiegu samochodu 2000 km. Popychacze wykonane były z żeliwa szarego o powierzchni czołowej utwardzonej pierwotnie w procesie odlewania na płycie. Miały one strukturę ledeburyt przemieniony o twardości 60 HRC.

Skład chemiczny wałka rozrządu wyznaczono spektrometrem emisyjnym ze wzbudzeniem jarzeniowym LECO GDS 850. Strukturę metalograficzną określono na zglądach poprzecznych przygotowanych przez cięcie, szlifowanie i polerowanie w mikroskopie świetlnym metalograficznym NIKON typ ECLIPSE L300. Mikrostrukturę żeliwa ujawniano przez trawienie powierzchni zglądu odczynnikami Nital.

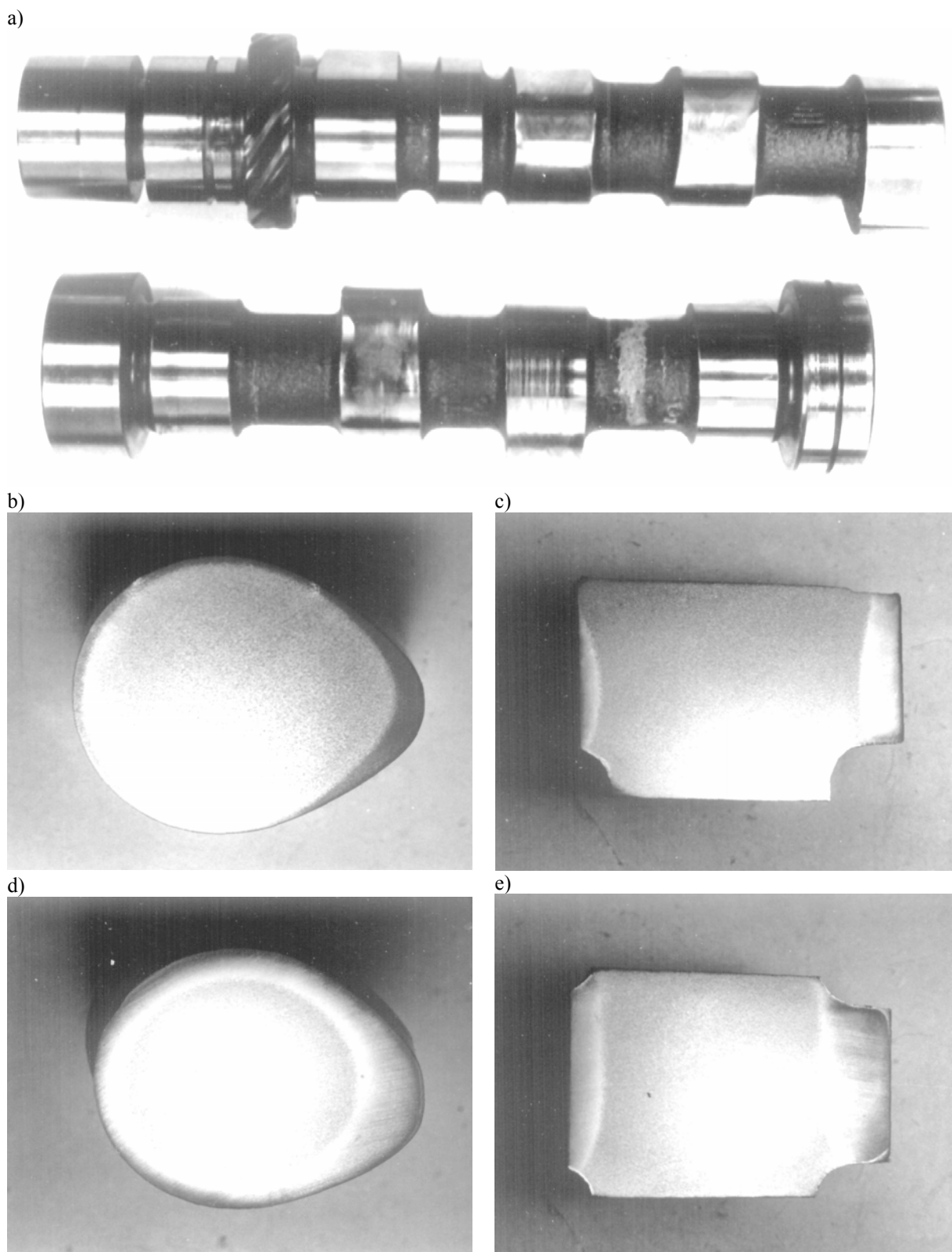
Według danych konstrukcyjnych twardość krzywki powinna wynosić min 45 HRC, twardość rdzenia 240÷300 HB a głębokość utwardzenia 3 mm, na całym obwodzie. Z kolei popychacz powinien mieć twardość min 54 HRC i głębokość utwardzenia 3 mm. Krzywka wałka ma tworzącą prostoliniową, czoło popychacza jest kuliste o promienia 1 m, oraz płaszczyzna symetrii krzywki jest przesunięta o 1 mm w stosunku do osi popychacza.

Zużycie krzywek określono na podstawie różnicy wzniosu zarysu. Pomiar przeprowadzono współrzędnościową maszyną pomiarową FN-1106 Mitutoyo, kulistą końcówką trzpienia o średnicy 1 mm. Wysokość popychaczy mierzono także na współrzędnościowej maszynie pomiarowej oraz na optymetrze pionowym. Naprężenia własne krzywek oraz objętość austenitu szczątkowego określono metodą rentgenowską. Warstwę materiału trawiono metodą elektrolityczną. Naprężenia mierzono w kierunku prostopadłym do osi wałka rozrządu metodą $\sin^2\Psi$. Badania fraktograficzne przeprowadzono na mikroskopie skaningowym Novascan 30.

4. WYNIKI BADAŃ

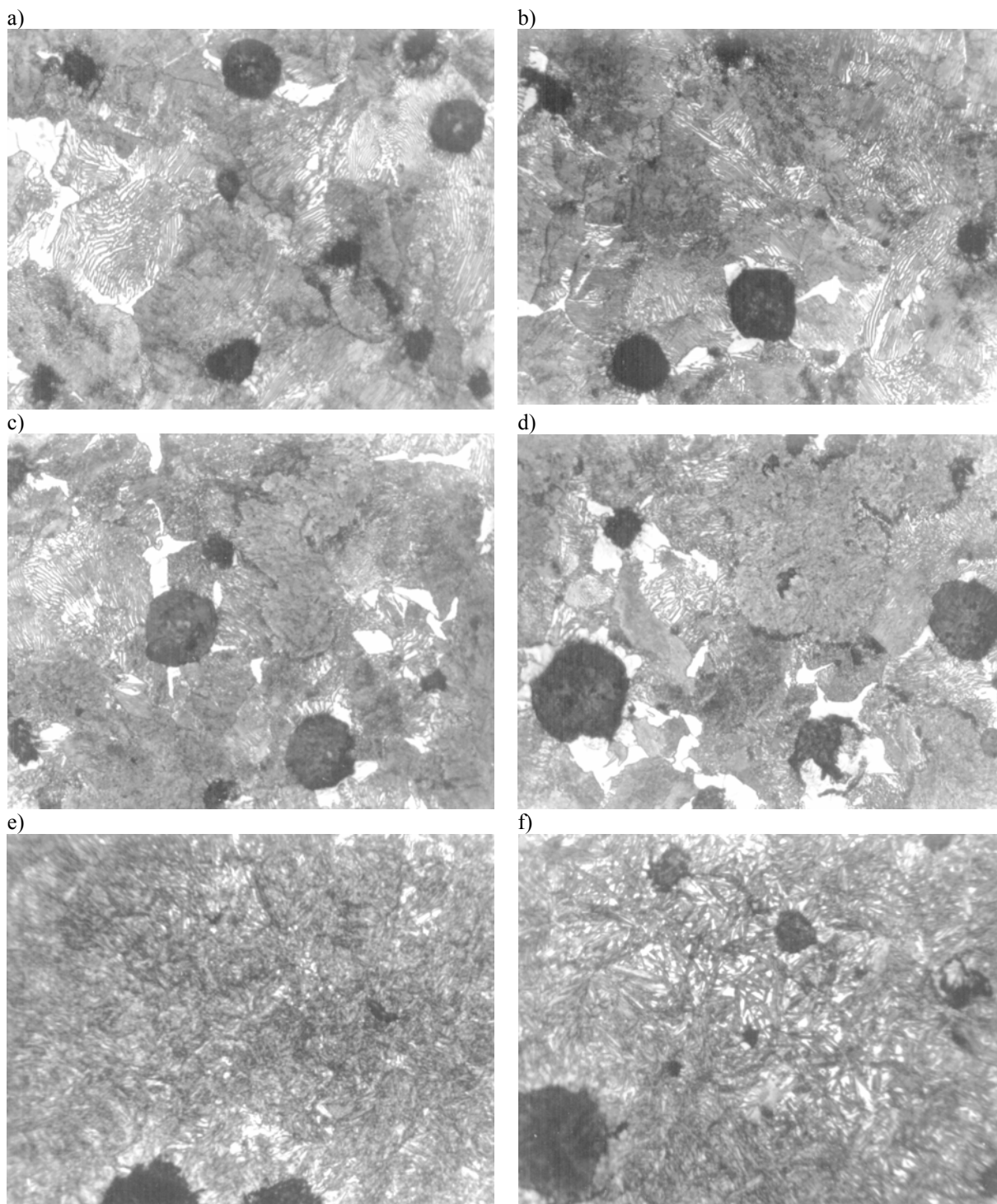
Krzywki wałka rozrządu, o dużej głębokości utwardzenia na wierzchołku ~ 13 mm, miały bardzo duże wartości zużycia (tabela 1), w porównaniu z krzywkami o poprawnej głębokości utwardzenia, ~5 mm za wierzchołku. Warstwa zahartowana była o zmiennej głębokości (rys. 1). Nierównomierna głębokość zahartowania, wzdłuż tworzącej krzywek wynika z małej precyzji ustawienia induktora. Nie miała ona jednak znaczącego wpływu na wartość zużycia. Z kolei zmienna głębokość zahartowanej warstwy na obwodzie krzywki wynika z typowego charakteru wnikania natężenia pola magnetycznego i rozkładu temperatury.

Mikrostrukturę krzywek badano w rdzeniu, strefie przejściowej i warstwie zahartowanej, możliwie blisko powierzchni zewnętrznej (rys. 2). Wałek rozrządu został odlany z żeliwa sferoidalnego, perlitycznego. Skład chemiczny żeliwa sferoidalnego wałka rozrządu zawierał oraz popychacza zamieszczono w tabeli 2. Perlit w osnowie miał budowę drobnopłytkową, poprawną. Ponadto w metalicznej osnowie występują nieliczne, drobne ziarna wolnego ferrytu. Powierzchnie wszystkich krzywek zostały zahartowane metodą indukcyjną i miały typową dla tego rodzaju materiału twardość 52÷55 HRC. Stwierdzona twardość, metodą Vickersa, jest większa o ~10 jednostek dla krzywek zaworu wydechowego (rys. 3c). Jednak warstwy zahartowane na krzywkach wałka rozrządu różnią się znacznie. Krzywki zaworów ssących mają warstwę zahartowaną płytką, zwiększającą swoją głębokość w części wierzchołkowej do ~5 mm. Mikrostruktura tej warstwy to martenzyt drobnoigłasty z grafitem kulkowym. W warstwie przejściowej, martenzyt przechodzi w bainit. Warstwa ta nie



Rys. 1. Makrofotografia dwu przeciętych części wałka rozrządu a). Makrofotografia przekroju poprzecznego krzywek b), d) oraz przekroju wzdłużnego krzywek c), e) z warstwą zahartowaną. Krzywka o głębokości zahartowania na wierzchołku ~5 mm b), c) oraz ~ 13 mm d, e

jest jednak położona równomiernie na całej powierzchni krzywki, wskutek niedokładnego ustawienia krzywki w induktorze. Krawędź w części walcowej jest niezahartowana (rys. 1). Krzywki zaworów wydechowych mają warstwę zahartowaną głębszą, przegrzaną, o głębo-



Rys. 2. Mikrostruktura rdzenia a), b). Mikrostruktura strefy przejściowej c), d). Mikrostruktura warstwy powierzchniowej e), f). Osnowa - perlit, sferoidalny grafit z nielicznymi drobnymi ziarnami wolnego ferrytu a), b). Osnowa - perlit i bainit z drobnymi ziarnami wolnego ferrytu c), d). Osnowa - iglasty martenzyt, sferoidalny grafit e), f). Głębokość zahartowania na wierzchołku krzywek ~5 mm a), c), e). Głębokość zahartowania na wierzchołku krzywek ~13 mm b), d), f). Powiększenie 500x a), b), c), d). Powiększenie 1000x e), f)

kości na wierzchołku ~13 mm. Ich sytuktura składa się z iglastego martenzytu z grafitem kulkowym. Stwierdzono także występnie zwiększonej ilości austenitu szczątkowego, do 13%. Naprężenia wewnętrzne są ściskające w strefie przypowierzchniowej (-480 MPa) i przechodzą do naprężeń rozciągających (510 MPa), na głębokości ~0,1 mm. Z kolei krzywki zaworów ssących

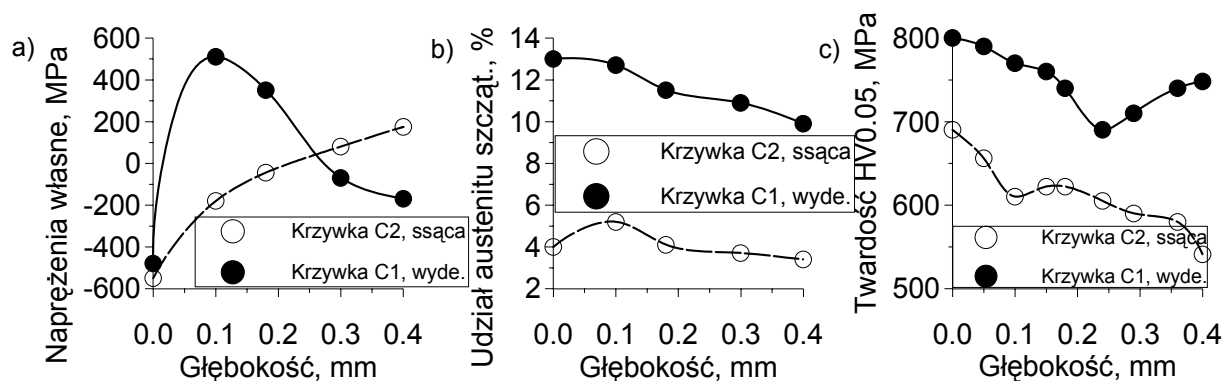
mają do 5,2% austenitu szczątkowego. W warstwie wierzchniej są naprężenia ujemne (-550 MPa), przechodzące na głębokości ~0,4 mm w naprężenia dodatnie o niedużej wartości 175 MPa. Zmierzone zarysy krzywki zaworu wydechowego C1 i ssącego zamieszczono C2 na rysunku 4. Badania faktograficzne powierzchni krzywek wydechowych C1, zniszczonych,

Tabela. 1. Charakterystyka zużycia krzywek i popychaczy oraz wartości naprężeń własnych. Krzywka C2 (głębokości zahartowania na wierzchołku ~5 mm). Krzywka C1 (głębokości zahartowania na wierzchołku ~13 mm)

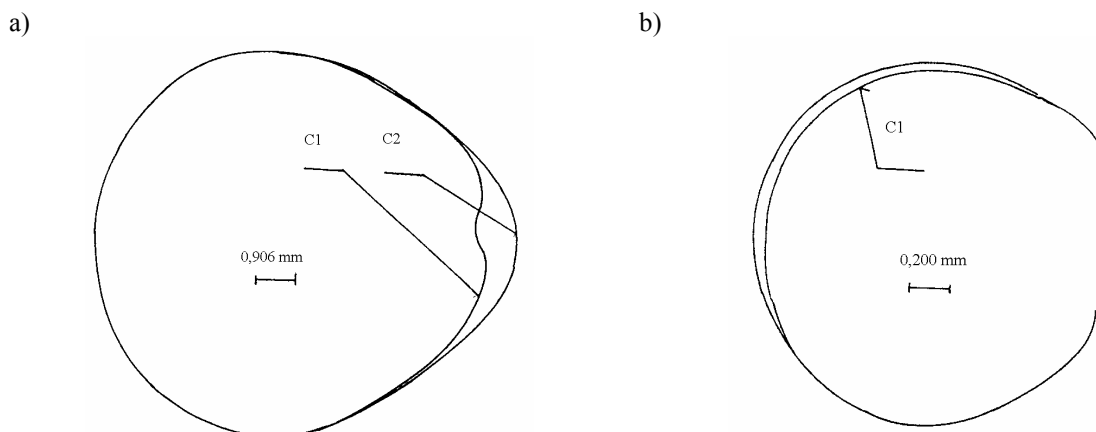
Krzywka	Wartości naprężeń własnych. Przedział zmienności	Wartość zużycia maksymalnego popychacza. Przedział zmienności	Wartość zużycia maksymalnego wierzchołka krzywki. Przedział zmienności	Wartość zużycia maksymalnego boku krzywki. Przedział zmienności
	MPa	mm	mm	mm
C1 (wydechowa)	-480÷510	0,134÷0,212	0,712÷1,301	0,015÷0,024
C2 (ssąca)	-550÷175	0,015÷0,016	0,017÷0,028	0,013÷0,021

Tabela. 2. Skład chemiczny wałka rozrządu i popychacza

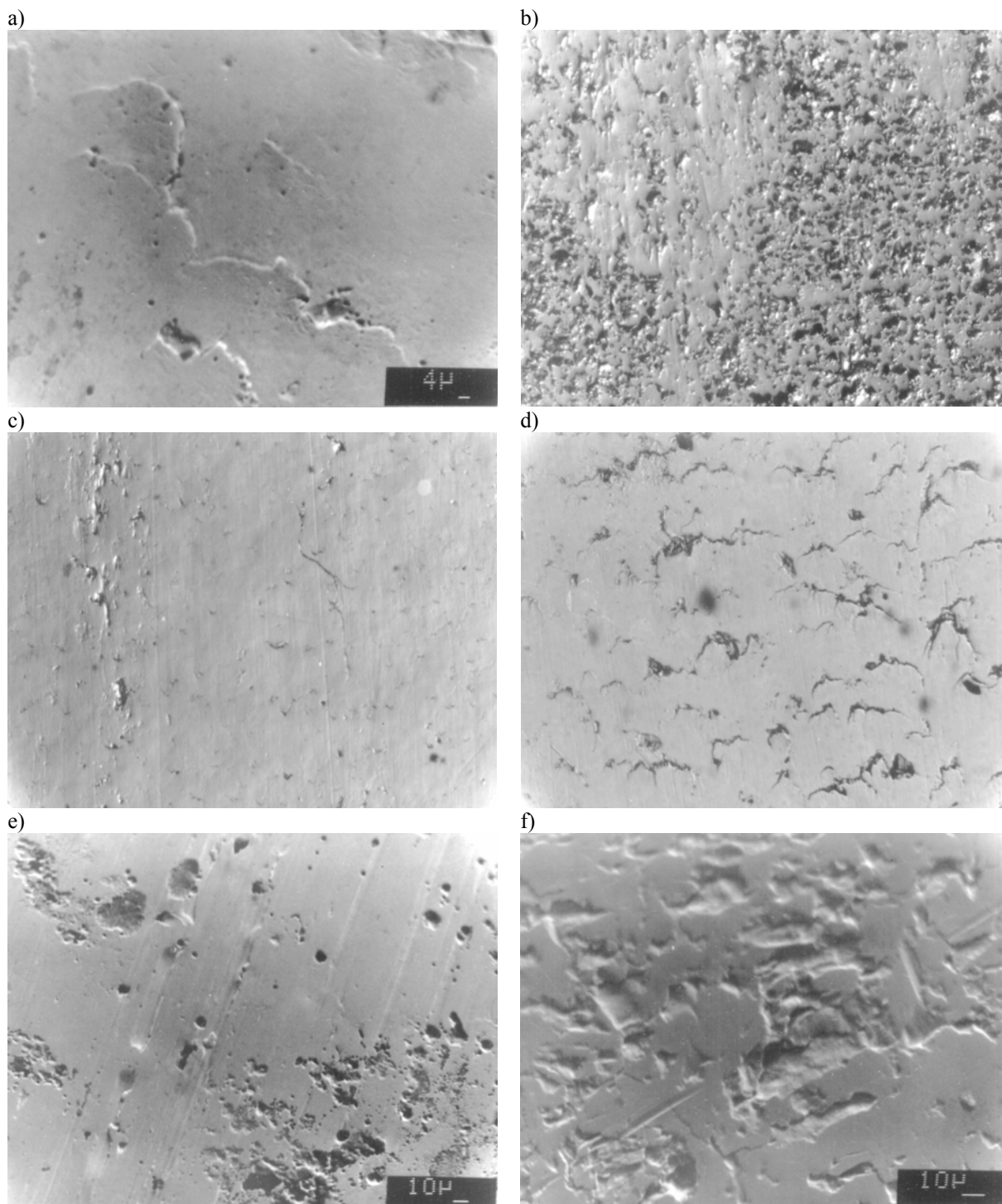
Część	Skład chemiczny, % wag										
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo	Cr	Mg	Cu	Fe
Wałek	3,43	2,21	0,63	0,010	0,053	0,25	0,18	0,82	0,06	-	92,357
Popychacz	3,59	2,60	0,59	0,010	0,040	0,69	0,51	1,02	-	0,77	90,18



Rys. 3. Zmiana naprężeń własnych a), udziału austenitu szczątkowego b), twardości c) w funkcji odległości od powierzchni krzywki. Krzywki zaworu ssącego C2 (głębokości zahartowania na wierzchołku ~5 mm). Krzywki zaworu wydechowego C1 (głębokości zahartowania na wierzchołku ~13 mm)



Rys. 4. Profile krzywek badanych: a) krzywka zaworu wydechowego C1 i zaworu ssącego C2, b) część wznosząca krzywki C1 zaworu wydechowego. Krzywki C2 (głębokości zahartowania na wierzchołku ~5 mm). Krzywki C1 (głębokości zahartowania na wierzchołku ~13 mm)



Rys. 5. Fraktografia powierzchni boku wznoszącego krzywki a) i wierzchołka b). Fraktografia powierzchni boku wznoszącego krzywki c), d). Fraktografia wierzchołka krzywki e), f). Głębokości zahartowania na wierzchołku krzywek C2 ~5 mm c), e). Głębokości zahartowania na wierzchołku krzywek C1 ~13 mm a), b), d), f). Powiększenie 650x a), Powiększenie 60x b), c), d). Powiększenie 500x e), f)

wykazują liczne pęknięcia metalu warstwy powierzchniowej, przebiegające w przybliżeniu prostopadle do płaszczyzny obrotu wałka rozrządu (rys. 5c, 5d). Występują obszary zużycia poprzez scuffing (rys. 5a, 5b).

W części najbardziej zużytej powierzchnia ma bardzo liczne wgłębienia po wykruszonym metalu (zużycie poprzez spalling, rys. 5e, 5f). Ich zużycie maksymalne na wierzchołku wynosi $0,712 \div 1,301$ mm. Zużycie krzywek jest niesymetryczne, większe na części wznoszącej (rys. 1).

Wartość zużycia promieniowego krzywek (o głębokości zaharowania na wierzchołku ~5 mm) ma względnie małą wartość, wynoszącą na wierzchołku $0,017 \div 0,028$ mm. Jednak analiza faktograficzna mikroskopem skaningowym, w tych samych miejscach, w których krzywki wydechowe są zużyte najsilniej, wykazuje również podobne rodzaje zużycia. Występuje szereg pęknięć powierzchni metalu, rozciągających się pasmami prostopadłymi do kierunku ruchu obrotowego wałka. Powierzchnia wierzchołka krzywek jest wykruszona. Nasilenie tych zjawisk, jak i scuffingu jest jednak mniejsze (rys. 5). Przyczyn takiego zużycia krzywek upatrywano także w niewłaściwej pracy popychaczy zaworów. Stwierdzono bowiem brak ruchu obrotowego popychaczy, podczas ruchu posuwowo-zwrotnego wzdłuż własnej osi. Wystąpił bowiem brak, za wszystkich popychaczach, charakterystycznej obwodowej topografii powierzchni czołowej. Mogło wystąpić także zwiększenie nacisków popychaczy na powierzchnie krzywek, zwłaszcza przy przechodzeniu przez wierzchołek, wynikające z niewłaściwego działania hydraulicznych kasowników luzu.

5. WNIOSKI

Badany wałek rozrządu wykonany został z żeliwa sferoidalnego perlitycznego poprawnie. Powierzchnia krzywek została zahartowana indukcyjnie. Wszystkie krzywki miały twardość również poprawną, wynoszącą $52 \div 55$ HRC. Twardość krzywek zaworu wydechowego HV0,05 jest nieco większa dla krzywek współpracujących z zaworami ssącymi. Te krzywki mają warstwę zahartowaną zbyt grubą, przegrzaną, o głębokości na wierzchołku ~13 mm. Krzywki współpracujące z zaworami ssącymi mają warstwę zahartowaną nieco przesuniętą, o maksymalnej głębokości na wierzchołku ~5 mm. Mankamenty te nie mogą być jednak przyjęte za przyczynę przyspieszonego zużycia powierzchni krzywek zaworów wydechowych.

Nadmierne zużycie krzywek zaworów wydechowych nastąpiło, nie na skutek ścierania metalu, lecz przez pęknięcie powierzchniowe i łuszczenie się. Występuje także równoczesne zużycie ściernie i adhezyjne (scuffing). W części najbardziej zużytej powierzchnia ma bardzo liczne wgłębienia po wykruszonym metalu (zużycie poprzez spalling). Zużycie krzywek jest niesymetryczne, większe na części wznoszącej. Podobny, choć znacznie mniej intensywny mechanizm zużycia wykazują krzywki zaworów ssących.

Jako przyczynę nadmiernego zużycia krzywek współpracujących z zaworami wydechowymi, z dużym prawdopodobieństwem można podać zwiększoną ilość austenitu szczątkowego, niekorzystny rozkład naprężeń własnych. Wszystkie popychacze wykazywały brak ruchu obrotowego przy współpracy z krzywkami wałka rozrządu.

LITERATURA

- [1] Bell J.C., Willemsse P.J.: Mid-life scuffing failure in automotive cam-follower contacts. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, Vol. 212 (4), s. 259-269, 1997.
- [2] Booth J.E., Harvey T.J., Wood R.J.K., Powrie H.E.G.: Scuffing detection of TU3 cam-follower contacts by electrostatic charge condition monitoring. Tribology International, Vol. 43 (1-2), s. 113-128, 2010.
- [3] Calabretta M., Cacciatore D., Carden P.: Valvetrain friction - modeling, analysis and easurement of a high performance engine alvetrain system. SAE International Journal of Engines, Vol. 3 (2), s. 72-84, 2010.
- [4] Cho D.H., Lee Y.Z.: Comparison of scuffing life between unidirectional and reciprocating sliding motion. Wear, Vol. 271 (9-10), s. 1637-1641, 2011.
- [5] Ferreira J.C.: A study of cast chilled iron processing technology and wear evaluation of hardened gray iron for automotive application. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 121 (1), s. 94-101, 2002.

- [6] Gautam M., Chitoor K., Durbha M., Summers J.C.: Effect of diesel soot contaminated oil on engine wear - Investigation of novel oil formulations. *Tribology International*, Vol. 32 (12), s. 687-699, 1999.
- [7] Haque T., Morina A., Neville A.: Tribological performance evaluation of a hydrogenated diamond-like carbon coating in sliding/rolling contact - Effect of lubricant additives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* Vol. 225 (6), s. 393-405, 2011.
- [8] Hugnell A.B.-J., Björklund S., Andersson S.: Simulation of the mild wear in a cam-follower contact with follower rotation. *Wear*, Vol. 199 (2), 202-210, 1996.
- [9] Kano M.: Super low friction of DLC applied to engine cam follower lubricated with ester-containing oil. *Tribology International*, Vol. 39 (12), s. 1682-1685, 2006.
- [10] Kumruoglu L.C.: Mechanical and microstructure properties of chilled cast iron camshaft: Experimental and computer aided evaluation. *Materials and Design*, 30 (4), s. 927-938, 2009.
- [11] Lejda K., Michalski J.: Badania zużycia pary kinematycznej krzywka wałka rozrządu-popychacz zaworowy silnika wysokoprężnego DX-03/2000.1. *Mat. Konferencji Naukowo-Technicznej EXPO-DIESEL '98. Utrzymanie silników o zapłonie samoczynnym w ruchu*. Wyższa Szkoła Morska, Zespół Techniki Morskiej, Sekcja Technicznych Środków Transportu Komitetu Transportu Polskiej Akademii Nauk. Szczecin-Kopenhaga, 1998, s. 125-132.
- [12] Michalski J., Orłowicz W., Opiekun Z.: Metalograficzna analiza współpracującej krzywki wałka rozrządu - płytka regulacyjna. *Przegląd Mechaniczny*, Nr 4, s. 5-9, 1988.
- [13] Mitianiec W., Bac G.: Bezkrzywkowy hydrauliczny system sterowania zaworów w silnikach spalinowych. *Silniki Spalinowe*, Nr 3 (146), s. 28-37, 2011, (2011-SS3-304).
- [14] Nayak N., Lakshminarayanan P.A., Babu M.K.G., Dani A.D.: Predictions of cam follower wear in diesel engines. *Wear*, Vol. 260 (1-2), s. 181-192, 2006.
- [15] Orłowicz A.W., Trytek A.: Effect of rapid solidification on sliding wear of iron castings. *Wear*, Vol. 254, s. 154-163, 2003.
- [16] Xu X., Yu Z., Guo X.: Wear failure of truck diesel engine tappets. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 18, s. 1134-1139, 2011.
- [17] Zalisz Z., Watts A., Mitchell S.C., Wronski A.S.: Friction and wear of lubricated M3 Class 2 sintered high speed steel with and without TiC and MnS additives. *Wear*, Vol. 258 (5-6), 701-711, 2005.
- [18] Zbierski K.: Bezkrzywkowy magnetoelektryczny rozrząd czterosuwowego silnika spalinowego. *Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej*, Łódź 2007.

WEAR CHARACTERISTICS OF INDUCTION HARDENED CAMSHAFT MADE OF DUCTILE IRON

The paper presents the nature and value of wear of the cam side surface of 1.6-liter spark ignition CE engine camshaft after 2000 km of a car run. The camshaft is made of pearlitic ductile iron. Cam has a different depth of hardened layer, a similar hardness of 52-55 HRC, which is obtained by induction hardening. The nature of surface wear for rising, top, and return cam face was similar, but with significantly different intensities. Strong worn cam surface, a high depth of cure, had many cracks in the metal surface layer extending perpendicular to the plane of rotation of the shaft and wear induced by scuffing. The most used was the tip of the cams with a number of pits as a result of spalling. Increased intensity of cam wear was interpreted due to positive value stresses, an increased amount of retained austenite and a lack of co-rotation of cam followers.