

METALOGRAFICZNA CHARAKTERYSTYKA KRZYWEK WAŁÓW ROZRZĄDU I  
HYDRAULICZNYCH POPYCHACZY SZKLANKOWYCH SILNIKA WYSOKOOBROTOWEGO

MICHALSKI Jacek, Dr inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska

МЕТАЛОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА КУЛАЧКІВ РОЗПОДІЛЬНИХ ВАЛІВ І  
ГІДРАВЛІЧНИХ ШТОВХАЧІВ ВИСОКООБОРОТНОГО ДВИГУНА

МІХАЛЬСЬКІ Яцек, Доктор інженер, Жешовська Політехніка, Жешув, Польща

METALLURGICAL CHARACTERISTICS CAMS CAMSHAFTS AND HYDRAULIC TAPPETS  
SURFACE BELLEVILLE ENGINE HIGH SPEED

MICHALSKI Jacek, PhD., Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland

**Wstęp.** Do czynników istotnie wpływających na właściwości użytkowe pary kinematycznej krzywka-popychacz, należą: profil zarysu, dynamika współpracującej pary, cechy materiałowe elementów, właściwości oleju i warunki smarowania oraz czynniki eksploatacyjne [21, 22, 23, 27, 30, 32, 36]. Przyczyną nadmiernego zużycia krzywki i popychacza może wynikać z niewłaściwego profilu krzywki [8, 35]. We wspomaganie konstrukcji krzywki w przemyśle samochodowym, metodą elementów skończonych, zastosowanie znalazły makra systemu COSMOS/M [8] oraz Pro/ENGINEER [35] - asocjatywny i w pełni parametryczny zintegrowany system CAD\CAM\CAE\PDM\PLM. Droższymi, lecz o większych możliwościach, są systemy: Autodesk Inventor, Ansys, I-deas, Catia, Unigraphics NX, SolidWorks i inne.

W silnikach wysokoobrotowych dąży się do zmniejszenia masy elementów mechanizmu rozrządu [13, 20, 36]. Dzięki zwiększeniu powierzchni przylegania wielu zaworów do głowicy - w stosunku do zaworów pojedynczych o tej samej powierzchni przepływu - poprawia się odprowadzanie ciepła z zaworów. Wadą tego rozwiązania jest możliwość rozsynchronizowania wałów wskutek pęknięcia paska rozrządu, czego konsekwencją może być zniszczenie głowicy silnika. Faktem jest także skomplikowanie napędu rozrządu i większe opory wynikające z napędu dwóch wałów. Ponadto często obserwuje się zwiększone zużycie oleju silnikowego, zwłaszcza przy dużych przebiegach. Rozrząd zaworowy pracuje w złożonych warunkach obciążeń mechanicznych, zmęczeniowych objętościowych, zmęczeniowych stykowych oraz narażona jest na zużycie przez tarcie. Częstą formą zużycia tej pary jest zużycie ścierne, łącznie występujące zużycie ścierne i adhezyjne (scuffing) oraz zużycie zmęczeniowe (pitting, spalling). Występujące awarie wynikają także z faktu znacznej zmiany lepkości oleju, z temperaturą i ciśnieniem, oraz jego grubości w obszarze styku krzywka-popychacz [15, 37].

**Przegląd literatury.** Światowi producenci silników spalinowych stosują na wały rozrządu w większości przypadków żeliwo szare utwardzone pierwotnie w procesie odlewania. Jego udział oceniona się na około 32-55%. Aktualną tendencją jest stosowanie rur stalowych ukształtowanych za pomocą ciśnienia cieczy (ang. hydroforming) z utwardzoną powierzchnią zewnętrzną (nawęglaną i hartowaną). Mniej liczne są wały rozrządu ze stali kutej, żeliwa szarego, żeliwa sferoidalnego oraz żeliwa ciągliwego, mających powierzchnie hartowane indukcyjne. Spotyka się także wały rozrządu 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 wału i popychaczy na wartość zużycia współpracujących elementów.

Kształt profilu krzywek wału rozrządu wpływa na ich zużycie. Siła sprężyn zaworowych nie ma dużego wpływu na zużycie krzywki i płytki regulacyjnej bezpośredniego mechanizmu rozrządu [23]. Istnieje duża zgodność wartości zużycia tej pary z charakterem zmian grubości warstwy smaru w tarciu elastohydrodynamicznym. Wyjaśnienie wartości zużycia krzywki i popychacza opiera się na nacisku jednostkowym z teorii Hertza, jak również na występowaniu naprężeń rozciągających w kontakcie ślizgowym [27]. Zwiększenie prędkości obrotowej wału rozrządu prowadzi do zmniejszenia zużycia. Towarzyszy temu zwiększone obciążenie wypadkową siłą osiową, z równoczesnym zmniejszeniem momentu obrotowego potrzebnego do napędu wału i zwiększenie temperatury oleju. Najwłaściwszym materiałem dla wałów rozrządu jest żeliwo szare zabilone bez grafitu i cementytu w strefie przypowierzchniowej o strukturze ledeburytu przemiennej. Płytki regulacyjne mechanicznych popychaczy

szklankowych mogą być również wykonane z żeliwa szarego zabilonego o zwiększonej zawartości Ni, Cr, Mo i V. Dodatkowe azotowanie zabilonego wału rozrządu znacznie zwiększa jego odporność na zużycie. Dla prawidłowo dobranej pary materiałowej: krzywka - płytka regulacyjna występuje zużycie przez scuffing z przewagą zużycia ściernego. Krzywka zużywa się najczęściej równomiernie wzdłuż obu boków. Większe zużycia pojawiają się na stronie wznoszącej, szczególnie dla krzywek wylotowych z żeliwa sferoidalnego, badanego silnika 115DB.6A.0000.76 [24]. Największe zużycie krzywki występuje w okolicy jej wierzchołka. Płytki zużywają się najczęściej równomiernie na całej ich powierzchni [23-27].

Z przeprowadzonych badań wałów rozrządu: stalowych, żeliwnych z zabilonymi krzywkami, żeliwnych azotowanych jonowo oraz płytek regulacyjnych: stalowych, żeliwnych zabilonych z żeliwa szarego i sferoidalnego, na stanowisku laboratoryjnym z głowicą silnika, wynikają następujące wnioski o charakterze praktycznym [25]. Ze stalowym wałem rozrządu wykonanym ze stali 12HN3A z hartowanymi powierzchniowo krzywkami najlepiej współpracowały płytki regulacyjne z żeliwa białego o strukturze cementytu i perlitu mające twardość około 52 HRC. Niewłaściwie współpracowały ze sobą pary: stalowy wał rozrządu - hartowane izotermicznie płytki z żeliwa szarego lub nawęglone i obrobione cieplnie płytki stalowe. Duża wartość zużycia krzywek (ponad 30  $\mu\text{m}$ ) eliminuje te pary. Żeliwny wał z zabilanymi krzywkami najlepiej współpracował z płytkami regulacyjnymi o strukturze żeliwa białego. W układzie tym, mimo tych samych struktur i podobnej twardości lecz odmiennego składu chemicznego, rejestrowano najmniejsze zużycie. Niekorzystnie współpracowały ze sobą: żeliwny wał o zabilonych krzywkach z nawęglonymi i obrobionymi cieplnie płytkami stalowymi lub z płytkami z żeliwa szarego hartowanego izotermicznie. Krzywki żeliwnego wału ulepszonego cieplnie i azotowanego jonowo współpracowały najkorzystniej z płytkami z żeliwa sferoidalnego hartowanymi izotermicznie z temperatury zakresu przemiany A1.

Krzywki z żeliwa sferoidalnego o strukturze martenzyt z bainitem, o zróżnicowanej ilości austenitu, pokazują podobny mechanizm zużycia, znaczne różnice w jego intensywności i różne wartości oporu tarcia o popychacze [24, 26, 27]. Typowe kształty tych krzywek po zużyciu wykazują, że strona wznosząca zużywa się więcej niż od strony opadającej. Krzywka przegrzana podczas hartowania indukcyjnego żeliwa sferoidalnego, o większej grubości i twardości zahartowanej warstwy, ilości austenitu, większych naprężeniach własnych ma większe zużycie tribologiczne. Krzywki wykazują wówczas liczne duże i głębokie pęknięcia metalu warstwy powierzchniowej. Biegają one mniej więcej prostopadle do kierunku ślizgania z powierzchnią popychaczy. Powierzchnie współpracujących popychaczy pokazują wówczas liczne wykruszenia, zużycie poprzez odkształcenie plastyczne. Płytki cementytu są pólamane w strefie podpowierzchniowej. Utworzenie warstwy azotowanej na krzywce, na twardej strukturze martenzyt i bainit, zapewnia jej małe promieniowe zużycie. Azotowania krzywek żeliwnych, o struktury perlit z ferrytem, jest rozwiązaniem niepoprawnym. Zastosowanie azotonasiarczania krzywek jest niewłaściwe, pomimo dalszego zmniejszenia siły tarcia. Powoduje, bowiem stan małych naprężeń ściskających, co jest niekorzystne biorąc pod uwagę wytrzymałość na rozciąganie powierzchni krzywek [23, 27]. Korzystnymi cechami charakteryzują się wały rozrządu wykonane z żeliwa szarego perlitycznego zawierające w składzie chemicznym Cr i Ni, które utwardzono pierwotnie w procesie odlewania z zastosowaniem ochładzalników. Współpracując z popychaczami, wykonanym ze stali o powierzchni hartowanej i azotowanej jonowo, zapewniają niewielki opór tarcia i małe zużycie ścieranie. Ta para materiałowa jest zalecana [27]. W celu przeciwdziałania zjawisku przyspieszonego zużycia krzywek, zalecono zwiększenie twardości ich powierzchni roboczych [8].

Odporność na zużycie ściernie próbki wykonanej z 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 ochładzalnikiem, jak i utwardzania metodą hartowania cieplnego [33]. Przeciwpóbkę, do badań laboratoryjnych, wykonano także z żeliwa sferoidalnego o strukturze ledeburyt przemieniony, cementyt, perlit i grafit sferoidalny (60 HRC). Badania prowadzono w warunkach tarcia suchym w ruchu obrotowym próbki obciążonej przeciwpóbką w postaci trzpienia płaskiego. Uzyskano w wyniku przetapiania plazmą łuku elektrycznego i szybkiej krystalizacji korzystną mikrostrukturę próbki, zwłaszcza w atmosferze ochronnej argonu, tj. ledeburyt przemieniony, cementyt, martenzyt i austenit szczątkowy. 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. 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.

Zmniejszenia grubości filmu olejowego pomiędzy powierzchniami mechanizmów silnika spalinowego, spowodowało, iż ich trwałość i niezawodność w dużym stopniu zależy od topografii powierzchni [34]. Sposób obróbki wykończeniowej powierzchni krzywek wału rozrządu przez gładzenie oraz płytek regulacyjnych przez docieranie i polerowanie wywiera duży wpływ na wartość zużycia tej pary kinematycznej [23]. Zastosowanie centrum tokarsko-frezarskiego M40 i szlifierki do wałów rozrządu CN320 zapewnia poprawę dokładności, jakości powierzchni, wydajności, elastyczności i skraca czas cyklu produkcji [19].

W pracy [28] zalecono, ze względu na dynamikę pracy, przeprowadzenie badań zużycia, nie na testerze typu rolka-płytką tylko na testerze z krzywka-popychacz. Zamieszczono badania tarcia z zużycia krzywki z żeliwa chromowego z popychaczem ze stali 15H mającego warstwę diamentową DLC. W pracy [39] badano materiały mechanizmu rozrządu ślizgowego na stawisku typu trzpień-tarcza, w warunkach zmieniających się tarcia; od płynnego, poprzez tarcie mieszane, suche i zacieranie. Porównywano właściwości tribologiczne trzpieni z żeliwa sferoidalnego o twardości 51 HRC odpowiednio ze stałą szybkością 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 szybkościowej 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 szybkościowa i jej kompozyty były znacznie korzystniejsze niż żeliwno sferoidalne. Istnieją jednak różnice wartości współczynnika tarcia, zużycia jak i nośności dla stali szybkościowych HSS, M3/2 i badanych kompozytów. Nośność stali szybkościowej jak i jej kompozytów, zwłaszcza z zawartością TiC, jest pięć do siedmiu razy większa niż dla żeliwa. W okresie tarcia hydrodynamicznego węgiel 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 szybkościowej [39]. Jednak tarcza ma najmniejsze zużycie tribologiczne przy współpracy z trzpieniem z żeliwa sferoidalnego. Przeprowadzono badania intensywność zużycia próbek materiałów krzywka/popychacz testerem laboratoryjnym T-01M. Badano także wpływ oleju smarującego i siły obciążającej [3].

Proces równoczesnego zużycia ściernego i adhezyjnego przebiega znacznie szybciej w ruchu posuwisto-zwrotnym w porównaniu do ruchu obrotowego jednokierunkowego [5]. Intensywność zużycie złożenia krzywka-popychacz może ulegać zwiększeniu lub zmniejszeniu, z wpływem 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 dialkiloditiofosforanu cynku (ZDDP) a metalem [9]. Mechanizm rozrządu z hydraulicznymi kasownikami luzu, z wałem rozrządu wykonanym z żeliwa szarego o strukturze ledeburyt przemieniony, uzyskanej w procesie krystalizacji pierwotnej, ma korzystne właściwości tribologiczne [7]. Stwierdzono mniejszy współczynnik tarcia i szybkość zużycia tej pary materiałowej w porównaniu ze wałem rozrządu utwardzonym metoda hartowania i innymi procesami obróbki cieplnej. Dodatki przeciwzużyciowe ZDDP i/lub dwusiarczek molibdenu ( $\text{MoS}_2$ ) nie są skuteczne, w przeciwdziałaniu zużycia ściernego, dla krzywki z żeliwa chromowego i popychacza ze stali 15H z warstwą diamentową DLC [11]. Dla stali szybkościowej klasy M2 i płytek ze stali 15H pokrytych diamentem, z podwarstwą Cr/CrN, skutecznym okazał się olej syntetyczny z dodatkami [16]. Struktura chemiczna dodatków smarnych ZDDP w oleju bazowym, ma silny wpływ na tarcie i zużycie krzywki wału rozrządu z popychaczem [10]. Stwierdzono to dla bezpośredniego mechanizmu rozrządu z wałem rozrządu o krzywkach wykonanych z żeliwa szarego i utwardzonych pierwotnie w procesie odlewania. Materiał krzywek miał strukturę ledeburytu przemienionego. Popychacz szklankowy zaopatrzone z kolei w płytkę stalową o powłoce diamentowej DLC. Zmniejszenie strat tarcia takiego rozwiązania potwierdzają także wyniki obliczeń i badań silnika sportowego wysokoobrotowego Lamborghini [4]. Dla zbliżonego rozwiązania rozrządu, szczególne małe opory ruchu występują w wyniku wprowadzenia estru do oleju. Współczynnik tarcia uległ wówczas zmniejszeniu o 45% dla prędkości obrotowej 2000 obr/min [14].

Zużycie zmęczeniowe powierzchni popychacza będącego w styku z krzywką występuje po przekraczaniu granicy plastyczności jego materiału [31, 38]. Zużycie poprzez spalling i scuffing jest minimalizowane poprzez zmniejszenie współczynnika tarcia oraz poprawę wytrzymałość na ścislenie materiałów. Model zużycia Archard jest użyteczny, w obliczenia trwałości krzywki i popychacza, umożliwia bowiem uwzględnienie dynamiki obciążenia i zmiennych cech tribologicznych elementów [30]. Można przewidzieć trwałość i niezawodność krzywki i popychacza w wyniku symulacji dynamicznej dyskretnych modeli ich ruchu [18]. Zacieranie powierzchni mechanizmów w ruchu ślizgowym wynika z synergii wpływu

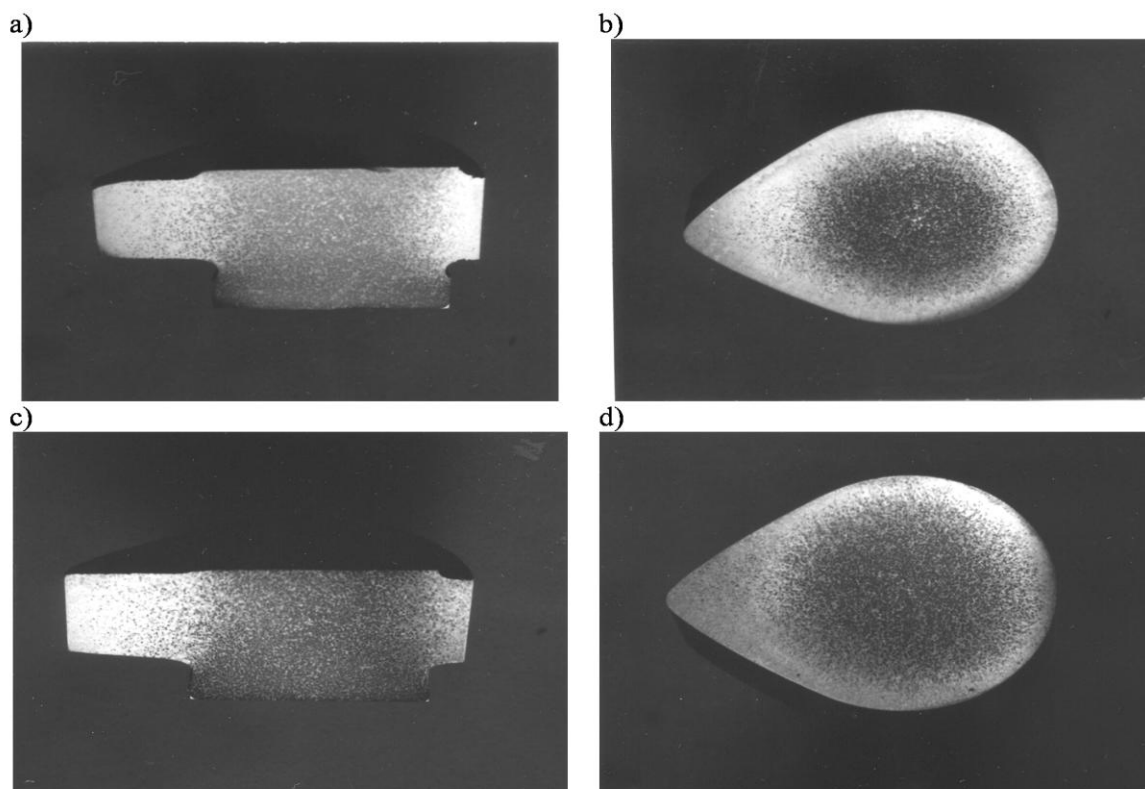
temperatury i nierówności powierzchni o zbyt małej nośności [5, 6]. Zastosowanie czujników elektrostatycznych monitorujących warunki smarowania i przebieg zacierania, krzywki mechanizmu rozrządu silnika TU3, zmniejszyło niebezpieczeństwo jego uszkodzenia. Krzywki były z żeliwa sferoidalnego utwardzone a popychacze z chromowego staliwa [2]. 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 zwiększenie obciążenia mechanicznego kontaktujących się powierzchni. Charakterystykę mechaniczną i metalograficzną wału rozrządu z krzywkami z żeliwa szarego utwardzonego pierwotnie w procesie odlewania przedstawił także Kumruoglu [17]. Charakter obciążenia krzywki wału rozrządu powoduje szczególnie duże wartości zużycia tribologicznego wierzchołka krzywki i nierównomierne zużycie powierzchni popychacza [12]. Niekiedy w eksploatacji, już po małym przebiegu samochodu (347 km) ulegają silnemu zużyciu zmęczeniowemu, poprzez spalling, popychacze silnika wysokoprężnego [39]. 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  $M_3C$ .

Opracowano obecnie sposób zastąpienia wału rozrządu za pomocą bezkrzywkowego zaworowego rozrządu. Wyniki badań symulacyjnych sterowania pracą silnika spalinowego, poprzez system elektrohydrauliczny, dla 4-suwowego silnika ZI YARIS 1,3 dm<sup>3</sup>, wykazały znaczący wzrost momentu obrotowego, umniejszenie emisji szkodliwych składników spalin i zwiększenie sprawności ogólnej silnika [29]. Systemy elektrohydrauliczne, magnetoelektryczne jak i elektromagnetyczne napędzania zaworów są bardzo skomplikowane oraz bardziej kosztowne od konwencjonalnego rozrządu zaworowego. Wymagają często hamowania zaworu podczas osiadania w gnieździe, ponieważ występuje gwałtowne zderzenie się dwóch części. Mają także szereg korzystnych właściwości [40]. W rodzinie silników grupy Fiat 0,9 dm<sup>3</sup> i 1,4 dm<sup>3</sup> uzyskano korzystne parametry użytkowe poprzez technologię Multiair (czy Uniair) [41]. Został zastosowany napęd zaworów dolotowych elektrohydrauliczny. Krzywka stalowego wałka rozrządu napędza poprzez rolkę popychacza tłoczek mechanizmu wstawianego z zaworami elektrycznymi. Umożliwia to tworzenie dowolnego profilu otwierania (recyrkulacji wewnętrznej) i zamykania zaworów dolotowych, oraz ich optymalnego szeregowania.

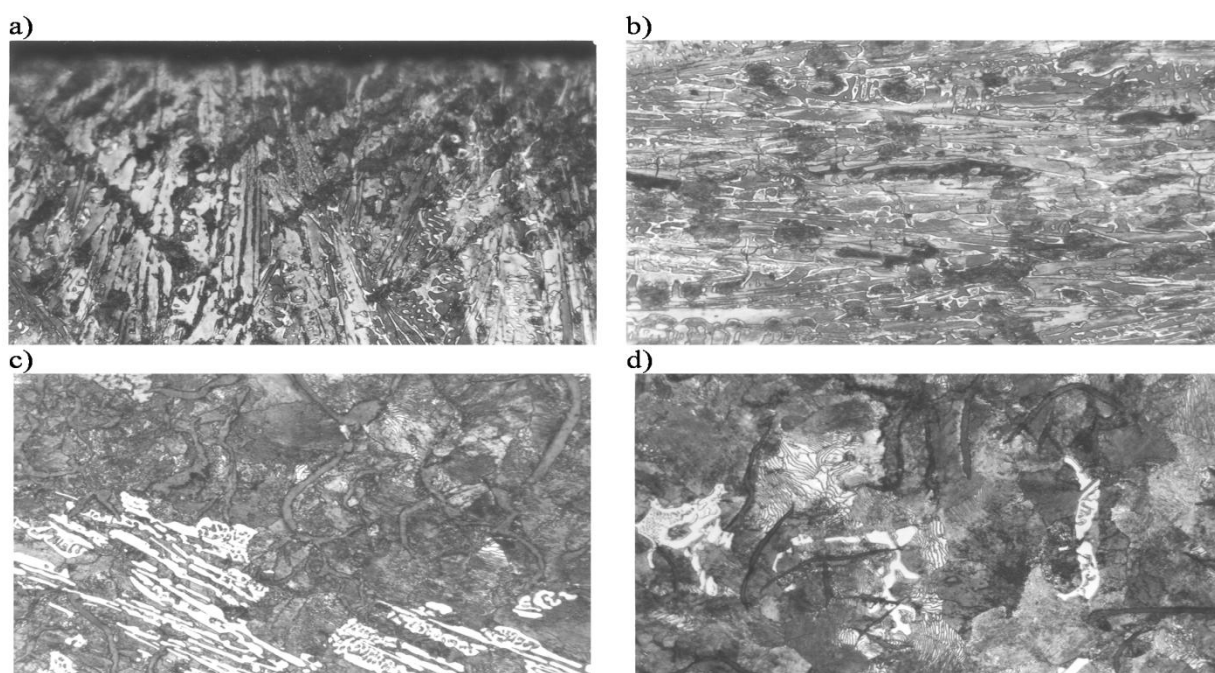
**Metodyka badań.** Analizowane elementy, wymontowano z głowicy silnika 1.4 16V DOHC (MPI). Wał rozrządu napędzany był przez wał korbowy silnika za pośrednictwem przekładni pasowej z paskiem zębatym. W głowicy znajdowały się dwa wały rozrządu. Silnik był rzędowy czterocylindrowy. Rozrząd zaworowy miał konstrukcję DOHC (ang. Double OverHead Camshaft, twin cam) - z dwoma wałami rozrządu, znajdującymi się w głowicy. Nad każdym cylindrem są dwa zawory dolotowe i dwa wylotowe, o osiach pod kątem do osi cylindra. Krzywki wału rozrządu naciskają na popychacze talerzykowe, tzw. szklankowe (metalowe cylindry), które przekazują ruch na popychacze hydrauliczne i na zawory. Zaletą rozwiązania jest zmniejszenie bezwładności elementów rozrządu - lekkie popychacze, pojedyncze zawory mają cienkie grzybki i trzonki o małej średnicy. Dane techniczne silnika 1.4 16V DOHC (MPI) z hydraulicznymi popychaczami szklankowymi zamieszczono w tabeli 1.

**Tabela. 1. Dane techniczne silnika 1.4 16V DOHC (MPI)**

Typ silnika, benzynowy Pb 95	1.4 ZI
System chłodzenia	cieczą
Liczba cylindrów	4
Układ cylindrów	rzędowy
Objętość skokowa	1396 cm <sup>3</sup>
Stopień sprężania	10 : 1
Moc, przy prędkości obrotowej 6000 obr/min	103 KM (76 kW)
Maksymalny moment obrotowy, przy prędkości obrotowej 5000 obr/min	127 Nm
Średnica cylindra	75 mm
Skok tłoka	79 mm
Cztery zawory w głowicy silnika nad każdym cylindrem	
Umiejscowienie wału rozrządu: DOHC	
Typ wtrysku: wielopunktowy (MPI) z elektronicznym wtryskiem paliwa	
Montaż silnika: z przodu, wzdłużnie. Model samochodu: Polonez Caro Plus 1.4	



**Rys. 1.** Krzywka zaworu dolotowego a), b) i wylotowego c), d). Makrofotografia: a), c) przekrój wzdłużny, b), d) przekrój poprzeczny. Makrostruktura: strefa biała (utwardzona) - ledeburyt przemieniony, strefa szara - żeliwo szare



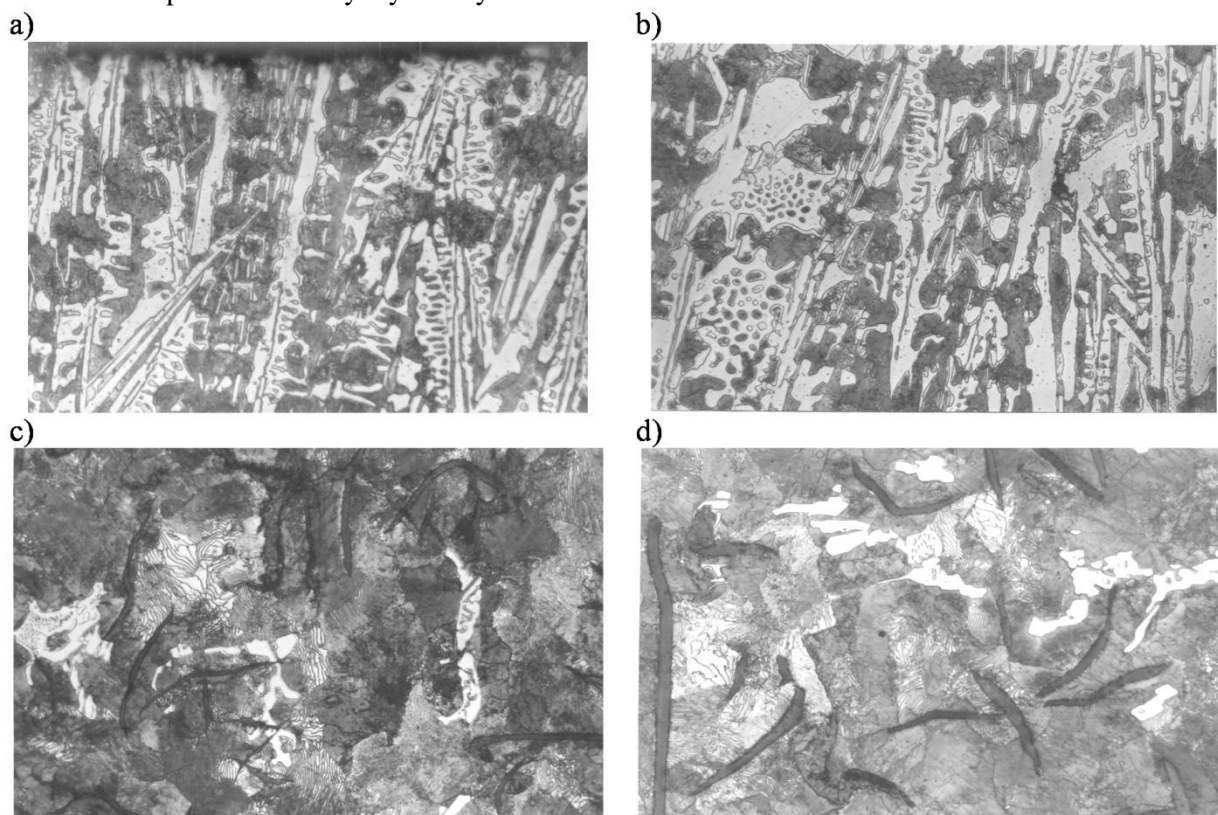
**Rys. 2.** Krzywka zaworu dolotowego: a) strefa brzegowa, pow. 750x, b) strefa zabilona, pow. 750x; a), b) - mikrostruktura: ledeburyt przemieniony, c) rdzeń, pow. 750x, d) rdzeń, pow. 150x – mikrostruktura c), d): perlit, grafit, gniazda ledeburytu przemienionego

Przedmiotem badań były krzywki dolotowego i wylotowego wałów rozrządu oraz hydrauliczne popychacze szklankowe (talerzykowe) zaworów dolotowych i wylotowych. Celem badań było określenie materiału, mikrostruktury, twardości badanych części i technologii wykonania.

Badania makrostruktury prowadzono na wzdłużnych i poprzecznych przekrojach krzywek oraz na wzdłużnym przekroju czopa. Makrofotografie struktur przedstawiono na rysunku 1. Mikrostrukturę krzywek wału rozrządu określono na zglądach metalograficznych, wykonanych na przekrojach wzdłużnych krzywek, trawionych odczynnikiem Nital. Próbki metalograficzne przygotowano przez cięcie, szlifowanie i polerowanie i obserwowano w mikroskopie świetlnym metalograficznym Carl Zeiss Jena, typu Neophot - 2. Mikrofotografie struktur metalograficznych przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Twardość krzywek mierzono metodą Rockwella (HRC), zgodnie z PN-91/H-04355. Pomiary wykona no na powierzchni krzywek, w strefie zabilonej i w rdzeniu. Dodatkowo twardość rdzenia mierzono metodą Brinella zgodnie z PN-91/H-04350. Uzyskano wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 2. Skład chemiczny żeliwa obydwu wałów rozrządu określono spektrometrem emisyjnym ze wzbudzeniem jarzeniowym LECO GDS 850.

Badania hydraulicznych popychaczy szklankowych zaworów: dolotowego i wylotowego pozwoliły stwierdzić, że obydwie popychacze wykonane są z identycznego materiału, przy zastosowaniu identycznej technologii. Dlatego, przedstawione wyniki odnoszą się do obydwu szklanek popychaczy. Makro- i mikrostrukturę szklanek badano na przekrojach wzdłużnych. Wyniki zamieszczono na rysunkach 4 - 6. Skład chemiczny metalu popychaczy określono także metodą spektralną i zamieszczono w tabeli 3. Twardość szklanek mierzono metodą Rockwella (HRC) wg PN-91/H-04355 oraz metodą Vickersa PN/H-04361 przy obciążeniu siłą od masy 50 g (mikrotwardość). Uzyskane wyniki dla: zewnętrznej płaskiej powierzchni i pobocznic popychaczy szklankowych, wzdłuż jej długości, zamieszczono w tabeli 4. Pozostałe elementy popychaczy mierzono na przekroju wzdłużnym i dotyczyły denka, płaszczka i półki wewnętrznej, co zamieszczono również w tabeli 4.

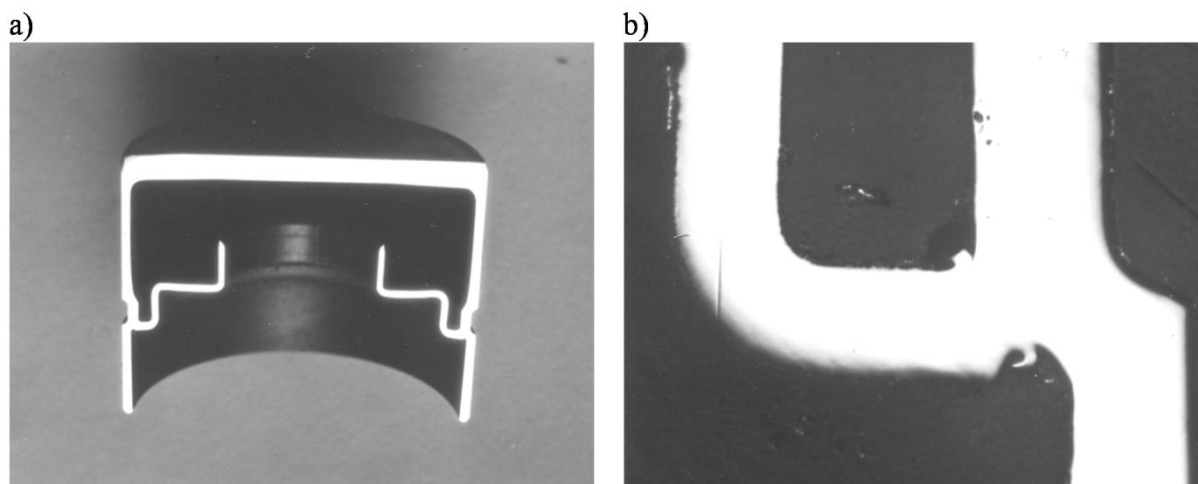
**Wyniki badań.** Obydwie wały rozrządu napędu zaworów dolotowych i wylotowych wykonano z identycznego żeliwa, identyczną technologią. Zastosowano chromowe niskostopowe żeliwo szare (Rys. 1-3, Tab. 2-3). Wały mają perlityczną osnowę i równomiernie rozmieszczony grafitem płatkowy. Zapewniło to twardość wałów na poziomie 280 HB. Odpowiednikiem tego materiału, według PN-88/H-83144 jest żeliwo Z1Cr0,8, a zbliżonym (niższym) Z1Cr. Krzywki są zabilone metodą metalurgiczną, przez zastosowanie ochładzalników. Zapewnia to powstanie ledeburytu przemienionego w strefie przypowierzchniowej krzywek, bez wtrąceń perlitu przedeutektycznego oraz twardość powierzchniową 50-51 HRC. Innych metod do utwardzania powierzchni czynnych krzywek nie zastosowano.



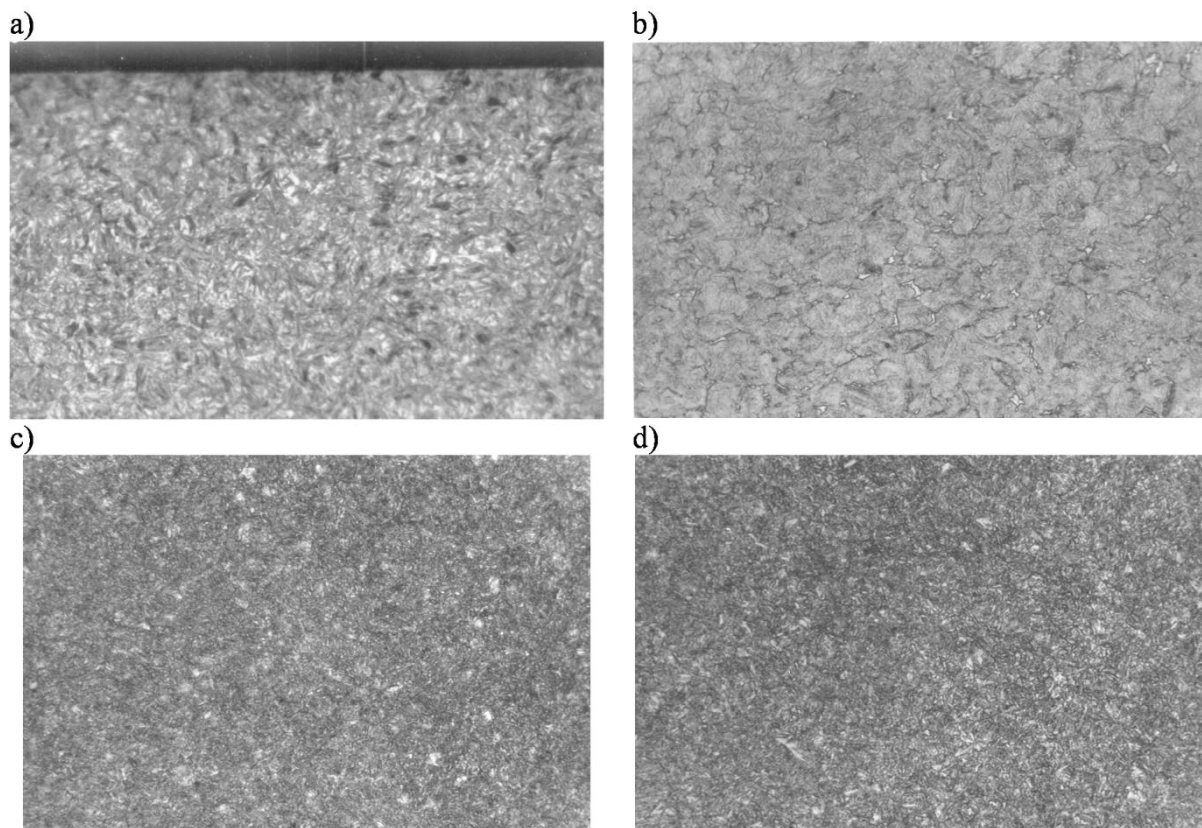
**Rys. 3.** Krzywka zaworu wylotowego: a) strefa brzegowa, pow. 750x, b) strefa zabilona, pow. 750; a), b) - mikrostruktura: ledeburyt przemieniony, c) rdzeń, pow. 750x, d) rdzeń, pow. 750x – mikrostruktura c), d): perlit, grafit, ślady ledeburytu przemienionego i eutektyki fosforowej

**Tabela. 2. Wyniki pomiaru twardości wałów rozrządu**

Miejsce pomiaru	Wał zaworów dolotowych	Wał zaworów wylotowych
Powierzchnia krzywki, HRC	50-51	49-51
Strefa zabielona, HRC	44-46	42-46
Rdzeń, HRC	24-25	23-25
Rdzeń, HB 2,5/187,5	278-286	278-286

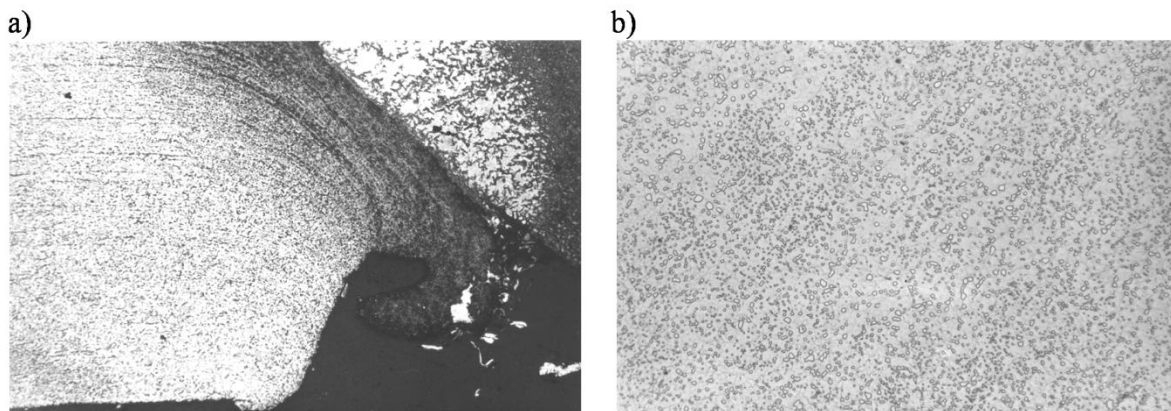


**Rys. 4.** Popychacz - makrostruktura: a) przekrój wzdłużny, b) połączenie półki z wewnętrzną ścianką płaszczu hydraulicznego popychacza szklankowego



**Rys. 5.** Popychacz: a) strefa zewnętrzna: mikrostruktura - martenzyt, b) rdzeń: mikrostruktura - sorbit, ziarna ferrytu (białe), c) płaszcz powyżej półki: mikrostruktura - sorbit, d) płaszcz poniżej półki: mikrostruktura - sorbit. Pow. 750x

Hydrauliczne popychacze szklankowe wykonano z identycznego gatunku stali, którego krajowym odpowiednikiem jest 40H (EN 41Cr4, AISI 5140, Rosja GOST 40Ch, ISO ~41Cr4), przy zastosowaniu identycznej technologii. Kształt wtrąceń niemetalicznych wskazuje na zastosowanie metod przeróbki plastycznej do kształtowania popychaczy.



**Rys. 6.** Połączenie płaszcza szklanki popychacza z półką: a) metal płaszcza w strefie zgrzeiny zahartowany od ciepła tarcia, linie płynięcia i wypływka z materiału półki, Pow. 150 x, b) półka wewnątrz popychacza: mikrostruktura: sferoidyt (ferrytyczna osnowa i sferoidalne węgliki), Pow. 750 x

**Tabela. 3. Skład chemiczny wałów rozrządu i popychaczy**

Część	Skład chemiczny, % wagowo										
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo	Cr	W	Cu	Fe
Wał zaworów dolotowych	3,44	2,10	0,91	0,01	0,053	-	-	0,77	-	-	92,717
Wał zaworów wylotowych	3,42	2,15	0,61	0,02	0,061	-	-	0,64	-	-	93,099
Popychacz zaworu dolotowego	0,37	0,21	0,61	0,02	0,042	0,1	0,1	0,92	0,10	0,20	97,328
Popychacz zaworu wylotowego	0,42	0,19	0,72	0,03	0,034	0,2	0,1	1,10	0,10	0,15	96,956

**Tabela. 4. Wyniki pomiaru twardości wałów popychaczy**

Miejsce pomiaru	Popychacz dolotowy i wylotowy	
Zewnętrzna powierzchnia denka szklanek (współpracująca z krzywką)	57-59 HRC	681-734 HV 0,05
Zewnętrzna pobocznica płaszcza szklanek w pobliżu denka	613 HV 0,05	
Zewnętrzna pobocznica płaszcza szklanek w części środkowej	548 HV 0,05	
Zewnętrzna pobocznica płaszcza szklanek w części dolnej	425 HV 0,05	
Denko, strefa zahartowana zewnętrzna	558-603 HV 0,05	
Denko, rdzeń	251-345 HV 0,05	
Denko, strefa zahartowana wewnętrzna	488-508 HV 0,05	
Płaszcz, rdzeń	306-314 HV 0,05	
Płaszcz, strefa wewnętrzna	641-481 HV 0,05	
Półka wewnętrzna	174-178 HV 0,05	



Ukształtowane, w całości, popychacze metodą ulepszania cieplnego mają twardości ~300 HB. Struktura zawiera drobno iglasty sorbit i ziarna ferrytu (rys. 5). Z kolei zewnętrzną i wewnętrzną powierzchnię denka szklanki zahartowano powierzchniowo na głębokość po około 1/4 grubości denka o twardości 57-58 HRC.

Następnie wewnątrz popychacza szklankowego umieszczono półkę. Połączono ją z płaszczem hydraulicznego popychacza szklankowego metodą zgrzewania tarcowego. Półkę wykonano ze stali 35 o twardości 170-175 HB, wyżarzanej zmiękczająco (sferoidyzująco, rys. 6b). Metal powierzchni bocznej popychacza w strefie zgrzeiny jest zahartowany od ciepła tarcia. O zgrzewaniu tarcowym świadczą linie płynięcia materiału i wypływka z materiału półki (rys. 6a).

Końcowe utwardzenie powierzchni pracujących hydraulicznych popychaczy szklankowych: zewnętrzna powierzchnia denka, zewnętrzna powierzchnia płaszcza - zrealizowano poprzez azotowanie, prawdopodobnie jonowe.

**Wnioski.** Wał rozrządu z żeliwa szarego z zabilionymi krzywkami silnika 1.4 16V DOHC (MPI), został wykonany z materiału o zbliżonym składzie chemicznym jak krajowe żeliwo Z1Cr0,8, a zbliżone (niższe) to Z1Cr. Identyczna jest jego struktura metalograficzna i zawartość C, Mn, Si, Cr, P i S jak podano w [27], jednak nie zawiera niklu. Jest to bardziej oszczędny materiał wału rozrządu silnika o zapłonie iskrowym.

Hydrauliczne popychacze szklankowe zaworów dolotowych i wylotowych wykonano z identycznego gatunku stali. Odpowiednik krajowy to stal w gatunku 40H, przy zastosowaniu identycznej technologii przeróbki plastycznej. Powierzchnie pracujące popychaczy są hartowane powierzchniowo i azotowane jonowo. Jak stwierdzono, na podstawie badań własnych, taki materiał popychacza zapewnia niewielki opór tarcia i małe zużycie ścieranie rozrządu zaworowego tj. krzywek o strukturze ledeburyt przemieniony, z żeliwa szarego niskochromowego, oraz popychaczy ze stali o strukturze sorbit z dodatkową warstwą azotowaną [23, 25, 26, 27]. Jest to para kinematyczna zalecana, w badaniach własnych.

#### LITERATURA

- [1] Bell J.C., Willemse 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), 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), 113-128, 2010.
- [3] Burdzik R., Folega P., Lazarz B., Stanik Z., Warczek J.: Analysis of the impact of surface layer parameters on wear intensity of friction pairs. Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 57 (4), 987-993, 2012.
- [4] Calabretta M., Cacciatore D., Carden P.: Valvetrain friction - modeling, analysis and measurement of a high performance engine alvetrain system. SAE International Journal of Engines, Vol. 3 (2), 72-84, 2010.
- [5] Cho D.-H., Kim J.-S., Jia J., Lee Y.-Z.: Comparative analysis based on adiabatic shear instability for scuffing failure between unidirectional and reciprocating sliding motion. Wear, Vol. 297 (1-2), 774-780, 2013.
- [6] Cho D.H., Lee Y.Z.: Comparison of scuffing life between unidirectional and reciprocating sliding motion. Wear, Vol. 271 (9-10), 1637-1641, 2011.
- [7] 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), 94-101, 2002.
- [8] Folega P., Burdzik R., Konieczny Ł., Stanik Z., Warczek J., Łazarz B.: Impact of the cam and follower cooperation and of lubrication on the cam wear. Archives of Materials Science and Engineering, 58 (2), 158-163, 2012.
- [9] 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), 687-699, 1999.
- [10] Haque T., Morina A., Neville A.: Effect of friction modifiers and antiwear additives on the tribological performance of a hydrogenated DLC coating. Journal of Tribology, Vol. 132 (3), 1-13, 2010.
- [11] 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), 393-405, 2011.

- [12] 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.
- [13] Iskra A.: *Dynamika mechanizmów tłokowych silników spalinowych*. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1995 r.
- [14] Kano M.: Super low friction of DLC applied to engine cam follower lubricated with ester-containing oil. *Tribology International*, Vol. 39 (12), 1682-1685, 2006.
- [15] Kaźmierczak A. (red.): *Tarcie, zużycie i smarowanie w silnikach spalinowych: praca zbiorowa*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1996 r.
- [16] Kosarieh S., Morina A., Lainé E.: Tribological performance and tribochemical processes in a DLC/steel system when lubricated in a fully formulated oil and base oil. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 217, 1-12, 2013.
- [17] Kumruoglu L.C.: Mechanical and microstructure properties of chilled cast iron camshaft: Experimental and computer aided evaluation. *Materials and Design*, Vol. 30 (4), 927-938, 2009.
- [18] Li B.-L., Jiang Q.-Y.: Numerical simulation of wear process and reliability life of cam-follower system. *Mocaxue Xuebao/Tribology*, Vol. 24 (6), 550-554, 2004.
- [19] Liu R.Y., Huang J., Cheng B.: Process improvement of camshaft of heavy duty diesel engine. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 275-277, 2252-2255, 2013.
- [20] Luft S.: *Podstawy budowy silników*. Warszawa, Wydanie 2 uaktualnione, WKiŁ, 2006 r.
- [21] Matzke W.: *Konstrukcja rozrządu silników szybkoobrotowych*. Warszawa, WKiŁ, 1974 r.
- [22] Matzke W.: *Rozrząd silników czterosuwowych*. Warszawa, WKiŁ, 1967 r.
- [23] Michalski J.: *Badania zużycia krzywek o syntetycznym profilu oraz płytek regulacyjnych w bezpośrednim mechanizmie rozrządu silnika spalinowego*. Wydawca: Zakłady Przemysłu Metalowego H. Cegielski w Poznaniu Przedsiębiorstwo Państwowe, *Silniki Spalinowe*, Nr 2, 1-8, 1988.
- [24] Michalski J.: Charakterystyka zużycia hartowanych indukcyjnie krzywek wałka rozrządu z żeliwa sferoidalnego. *Національний транспортний університет, Київ, Науково-технічний збірник, Вісник*, No. 25, 44-53, 2012.
- [25] Michalski J., Orłowicz W., Opiekun Z.: Metalograficzna analiza współpracującej krzywki wałka rozrządu - płytka regulacyjna. *Przegląd Mechaniczny*, Nr 4, 5-9, 1988.
- [26] Michalski J., Pawlus P., The analysis of assembly, com-followern wear in relation to material properties and heat treatment. *Mechanical Engineering Publications for the Institution of Mechanical Engineers in Bury St Edmunds, Word Tribology Congress*, Londyn, 552, 1997.
- [27] Michalski J., Marszałek J., Kubiak K.: An experimental study of diesel engine cam and follower wear with particular reference to the properties of the materials. *Wear*, Vol. 240 (1-2), 168-179, 2000.
- [28] Mistry K., Morina A., Neville A.: Single cam tribometer for evaluating tribological parameters and tribochemistry of DLC coated valve train follower. *Tribology - Materials, Surfaces and Interfaces*, Vol. 6 (1), 31-37, 2012.
- [29] Mitianiec W., Bac G.: Bezkrzywkowy hydrauliczny system sterowania zaworów w silnikach spalinowych. *Silniki Spalinowe*, Nr 3 (146), 28-37, 2011, (2011-SS3-304).
- [30] Mukras S., Kim N.H., Mauntler N.A., Schmitz T.L., Sawyer W.G.: Analysis of planar multibody systems with revolute joint wear. *Wear*, Vol. 268 (5-6), 643-652, 2010.
- [31] 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), 181-192, 2006.
- [32] Ołędzki A.: *Podstawy teorii maszyn i mechanizmów*. Warszawa, WNT, 1987 r.
- [33] Orłowicz A.W., Trytek A.: Effect of rapid solidification on sliding wear of iron castings. *Wear*, Vol. 254, 154-163, 2003.
- [34] Priest, M., Taylor, C.M.: Automobile engine tribology - approaching the surface. *Wear*, Vol. 241 (2), 193-203, 2000.
- [35] Sun J., Tang Z.: The parametric design and motion analysis about line translating tip follower cam mechanism based on model datum graph. *Procedia Engineering*, Vol. 23, 439-444, 2011.
- [36] Wajand J.A., Wajand J.T.: *Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe*. Warszawa, wyd. 3 zm, WNT, 2000 r.
- [37] Włodarski J.K.: *Tłokowe silniki spalinowe - procesy trybologiczne*. Warszawa, WKiŁ, 1982 r.
- [38] Xu X., Yu Z., Guo X.: Wear failure of truck diesel engine tappets. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 18, 1134-1139, 2011.

- [39] Zalisz Z., Watts A., Mitchell S.C., Wroński 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.
- [40] Zbierski K.: Bezkrzywkowy magnetoelektryczny rozrząd czterosuwowego silnika spalinowego. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2007 r.
- [41] <http://www.caranddriver.com/features/fiats-multi-air-valve-lift-system-explained>: Fiat's multi-air valve-lift system explained. Fiat's valve-lift system boosts power and saves [dostęp, 3 kwietnia 2014].

#### STRESZCZENIE

MICHALSKI Jacek. Metalograficzna charakterystyka krzywek wałów rozrządu i hydraulicznych popychaczy szklankowych silnika wysokoobrotowego / MICHALSKI Jacek // *Wisnyk Narodowego Uniwersytetu Transportu*. – K. : NUT, 2014. - № 30.

W artykule przedstawiono metalograficzną charakterystykę wałów rozrządu napędzających odpowiednio zawory dolotowe i wylotowe silnika wysokoobrotowego o pojemności 1,4 dm<sup>3</sup>. Wały rozrządu wykonane zostały z chromowego niskostopowego żeliwa szarego, identycznego dla obydwu wałów. Krzywki są zabilowane metodą metalurgiczną, poprzez zastosowane ochładzalników. Hydrauliczne popychacze szklankowe wykonano metodą przeróbki plastycznej ze stali, którego krajowym odpowiednikiem jest 40H, przy zastosowaniu identycznej technologii. Zewnętrzną i wewnętrzną powierzchnię denka hydraulicznych popychaczy szklankowych zahartowano powierzchniowo. Wewnątrz popychaczy umieszczono półkę z prowadnicą dla hydraulicznego kasownika luzu zaworowego. Była ona połączona z płaszczem popychaczy metodą zgrzewania tarcowego. Końcowe utwardzenie, powierzchni czołowej i zewnętrznej płaszcza popychaczy, zrealizowano poprzez azotowanie jonowe.

**SŁOWA KLUCZOWE:** WAŁY ROZRZĄDU SILNIKA WYSOKOOBROTOWEGO, KRZYWKI Z ŻELIWA SZAREGO UTWARDZONE POPRZEZ ZABIELENIE, HYDRAULICZNE POPYCHACZE SZKLANKOWE, WARSTWY UTWARDZONE NA STALI

#### РЕФЕРАТ

МИХАЛЬСЬКІ Яцек. Металографічна характеристика кулачків розподільних валів і гідравлічних штовхачів високооборотного двигуна / МИХАЛЬСЬКІ Яцек // *Вісник Національного транспортного університету*. – К. : НТУ, 2014. - Вип. 30.

У статті представлена металографічна характеристика кулачків розподільних валів приводу впускних та впускних клапанів високооборотного двигуна об'ємом 1,4 л. Розподільні вали виготовлені з хромованого низьколегованого сірого чавуну, ідентичного для обох валів. Кулачки відбілені металургійним методом, за допомогою охолоджувачів. Гідравлічні штовхачі виготовлені методом пластичної деформації зі сталі, національним відповідником якої є 40H, з використанням ідентичної технології. Зовнішню та внутрішню поверхні нижньої частини гідравлічних штовхачів піддано поверхневу гартування. В середині штовхача розташована полиця з напрямною для гідравлічного регулювання клапанного зазору. Вона з'єднана з кожухом штовхача методом зварювання тертям. Остаточне зміцнення зовнішньої та внутрішньої поверхонь кожуха штовхача виконано методом іонного азотування.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** РОЗПОДІЛЬНІ ВАЛИ ВИСОКОБОРОТНОГО ДВИГУНА, КУЛАЧКИ З СІРОГО ЧАВУНУ ЗМІЦНЕНОГО ВІДБІЛЮВАННЯМ, ГІДРАВЛІЧНІ ШТОВХАЧІ, ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ.

#### SUMMARY

MICHALSKI Jacek. Metallurgical characteristics cams camshafts and hydraulic tappets surface belleville engine high speed / MICHALSKI Jacek // *Visnyk of the National Transport University*. - K.: NTU, 2014. - № 30.

This paper presents metallographic characteristics that drive the camshafts, respectively. intake and exhaust valves, high-rev engine with a capacity of 1.4 dm<sup>3</sup>. Camshafts are made of low-alloy chromium cast iron, identical for both shafts. The cams are whitened by metallurgical, through applied hardened casting process. Glassy pushers were made using wrought steel, which is equivalent national 40H, using the same technology. The outer and inner surface of the bottom disc hydraulic tappets hardened surface. Inside, push the shelf provided with a guide for validating machine hydraulic valve clearance. It was connected with the mantle push by friction welding. The final curing, the face and the outer shell followers, realized by ion nitriding.

KEY WORDS: HIGH-REV ENGINE CAMSHAFTS, CAM MADE OF CAST IRON HARDENED BY RAPID COOLING, HYDRAULIC LIFTERS THIN-WALLED, HARDENED LAYER ON STEEL

AUTOR:

MICHALSKI Jacek, Dr inż., Politechnika Rzeszowska, Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Al. Powstańców Warszawy 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszów, Polska

АВТОР:

МІХАЛЬСЬКІ Яцек, доктор інженер, Жешовська Політехніка, Кафедра двигунів внутрішнього згорання і транспорту, Бульвар Повстанців Варшави 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Жешув, Польща

AUTHOR:

MICHALSKI Jacek, PhD., Rzeszow University of Technology, Department of Internal Combustion Engines and Transport, Warsaw Insurgents Boulevard 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszow, Poland

РЕЦЕНЗЕНТИ:

ЛЕЙДА Казімеж, доктор габілітований, професор, Жешовська Політехніка, завідувач кафедри двигунів внутрішнього згорання і транспорту, Жешув, Польща.

Гутаревич Ю.Ф, доктор технічних наук, професор, Національний Транспортний Університет, завідувач кафедри двигунів і теплотехніки, Київ, Україна.

REVIEWERS:

LEJDA Kazimierz, Doctor of Sciences, Professor, Rzeszow Polytechnic, Head of Department of Internal Combustion Engines and Transport, Rzeszow, Poland.

Gutarevych Y.F, Doctor of Sciences, Professor, National Transport University, Head of Department of Engines and Heating Engineering, Kyiv, Ukraine.