

Teresa WOLICKA¹
Mirosław TUPAJ²
Władysław ORŁOWICZ³

KSZTAŁTOWANIE MIKROSTRUKTURY ŻELIWNYCH TULEI CYLINDROWYCH SILNIKÓW SAMOCHODOWYCH W ASPEKcie ZAPEWNIENIA WYSOKICH WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH

W pracy analizowano czynniki wpływające na zużycie tulei cylindrowych. Przedstawiono wpływ morfologii wydzieleni grafitu na mechanizm zużycia tulei cylindrowych. Oceniono zgodność materiału tulei cylindrowych grupy silników z wymaganiami polskiej normy branżowej. Wykonano odlew prototypowej tulei cylindrowej o mikrostrukturze zapewniającej jej wysokie właściwości użytkowe.

1. WPROWADZENIE

Jednym z bardziej znanych węzłów trących pracujących w ruchu posuwisto-zwrotnym, od którego wymaga się również funkcji uszczelniającej, jest grupa tłokowo-cylindrowa silników spalinowych. Dzięki licznym pracom naukowo-badawczym nad jej trwałością silniki spalinowe osiągają przed naprawą główną przebiegi rzędu miliona kilometrów.

Szereg rozwiązań dotyczących materiału czy też struktury geometrycznej powierzchni współpracujących elementów grupy tłoko-cylindrycznej zostało opatentowanych lub stanowi tajemnicę producentów. Wiele ośrodków naukowych nadal pracuje nad nowymi, doskonalszymi rozwiązaniami materiałowymi głównie w odniesieniu do tulei cylindrowych.

2. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA ZUŻYCIE TULEI CYLINDROWYCH

Wyniki badań i rozważań teoretycznych wskazują, że około 25% strat mechanicznych w silnikach tłokowych jest efektem tarcia pomiędzy pierścieniami tłokowymi i tuleją cylindrową⁴. Wartość siły tarcia zależy między innymi od nacisku pierścieni na gładź cylindra, prędkości przemieszczania się pierścieni w tulei cylindrowej, lepkości oleju, grubości filmu olejowego oraz profilu przekroju poprzecznego.

Siła tarcia pomiędzy powierzchnią boczną pierścieni tłokowych i gładzią tulei cylindrowej maleje wraz z obniżaniem się sprężystości własnej pierścieni. Ze zmniejszaniem

¹ Dr Teresa Wolicka, Katedra Materiałoznawstwa, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska.

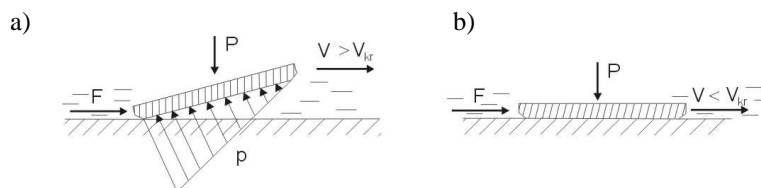
² Dr inż. Mirosław Tupaj, Katedra Odlewnictwa i Spawalnictwa, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska.

³ Prof. dr hab. inż. Antoni Władysław Orłowicz, Katedra Odlewnictwa i Spawalnictwa, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska.

⁴ A. Kaźmierczak, *Tarcie i zużycie zespołu tłok-cylinder*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005; J. Szkurłat, *Problemy zmniejszania oporów tarcia układu tłokowo-korbowodowego*, „Journal of KONES” 2/1 (1995), s. 503–508.

się siły nacisku pierścieni rośnie jednak zużycie oleju. Pierścienie z uwagi na ich sprężystość mogą wpadać podczas zmian kierunku ruchu tłoka w drgania o wysokiej częstotliwości. Są to drgania w kierunku promieniowym cylindra, które wpływają niekorzystnie na grubość filmu olejowego pomiędzy pierścieniami i gładzią cylindrową, co skutkuje wzrostem strat energii na tarcie, a także wpływa na wzrost przedmuchów gazów spalinyowych z komory spalania do skrzyni biegów⁵. Najlepsze uszczelnienie grupy tłokowo-cylindrowej występuje wówczas, gdy podczas cyklu pracy pierścienie tłokowe są dociśnięte do dolnej powierzchni rowka pierścieniowego w tłoku oraz do gładzi cylindrowej⁶. Ma na to również wpływ odkształcenie cylindra⁷.

Najlepsze warunki tribologiczne są wtedy, gdy pomiędzy pierścieniami tłokowymi i gładzią cylindra występuje tarcie płynne – hydrodynamiczne – to znaczy wówczas, gdy warstwa smarna jest wytworzona w wyniku przepływu oleju w szczelinie pomiędzy elementami współpracującymi ze sobą. Aby w sposób ciągły był dostarczany do tego obszaru olej, muszą zostać stworzone warunki do powstania klina smarnego⁸. Przy zastosowaniu oleju o zadowalającej lepkości, warunkiem powstania filmu olejowego oddzielającego pierścienie tłokowe od gładzi cylindra jest zapewnienie krytycznej prędkości V_{kr} przemieszczania się względem siebie elementów współpracujących oraz odpowiedni profil pierścienia – ukosowanie jego krawędzi (rys. 1).



Rys.1. Model powstawania klina smarnego. Obecność klina smarnego – a). Brak klina smarnego – b). F – siła powodująca przemieszczanie pierścienia; P – siła docisku pierścienia do gładzi cylindra; V , V_{kr} – prędkość przemieszczania się pierścienia względem gładzi cylindra; p – ciśnienie oleju w klinie smarnym.

Ponieważ w punktach zwrotnych zespołu tłok-pierścienie-cylinder następuje zmiana kierunku przemieszczania się tłoka, to prędkość pierścieni względem gładzi cylindra osiąga tam wartość zerową. W związku z tym w punktach tych brak warunków do utrzymania olejowego klina smarnego. W tych warunkach o zabezpieczeniu się przed zatarciem decyduje warstwa graniczna powstała w wyniku adhezji oleju i ukształtowanie odpowiedniej struktury geometrycznej powierzchni gładzi cylindra. Materiał tulei i materiał pierścieni tłokowych powinien posiadać takie właściwości tribologiczne, aby przy chwilowym braku substancji smarującej nie nastąpiło nadmierne zużywanie się gładzi cylindra i zacieranie. Braki substancji smarującej mogą być szczególnie widoczne podczas rozruchów silnika.

⁵ A. Iskra, Wpływ drgań własnych pierścienia uszczelniającego na warunki pracy zespołu tłokowo-cylindrowego, „Journal of KONES” 1/1 1994, s. 167–174.

⁶ J.B. Heywood, L.B. Noordzij, T. Tian, V.M. Wong, Modeling piston-ring dynamics, blowby and ringtwist effect, „Journal of Engineering for Gas Turbines and Power” 120/4 (1998), s. 843–854.

⁷ W. Kozaczewski, Konstrukcje grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinyowych, Wyd. Komunikacji i Łączności. Warszawa 2004.

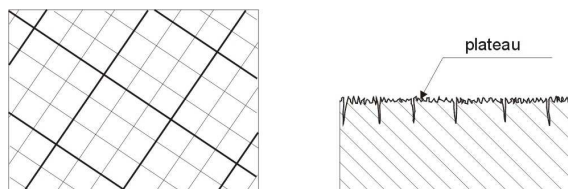
⁸ J.B. Heywood, L.B. Noordzij, T. Tian, V.M. Wong, op. cit.; W. Kozaczewski, op. cit.

Według niektórych autorów w trakcie pracy silnika film olejowy pomiędzy pierścieniami tłokowymi a gładzią cylindra ma grubość od 0,8 do kilku μm ⁹. Grubość filmu olejowego maleje ze wzrostem temperatury oleju, ponieważ następuje obniżanie jego lepkości dynamicznej. Jeżeli grubość filmu olejowego obniża się do wartości, przy której następuje kontakt wierzchołków nierówności powierzchni współpracujących elementów, to spowoduje to wrywanie fragmentów materiałów trących. W związku z tym grubość filmu olejowego powinna być na tyle duża, aby wierzchołki nierówności powierzchni współpracujących ze sobą elementów nie stykały się. Z drugiej strony nierówności nie mogą być nadmiernie duże.

Przyjmuje się, że jeżeli film olejowy jest utrzymywany przez 99,99% czasu pracy, to zużycie elementów pary trącej jest znikome. Jeżeli kontakt metaliczny występuje przez 1% czasu pracy, to zużycie jest duże. Przy jeszcze dłuższym czasie trwania takiego kontaktu może nastąpić zatarcie grupy tłokowo-cylindrowej¹⁰.

Przedstawiana analiza wskazuje, że z punktu widzenia żywotności silników ważnym zagadnieniem jest zapewnienie odpowiedniej jakości gładzi tulei cylindrowych. Gładź tulei cylindrowej powinna zapewnić utrzymanie trwałej warstwy oleju i powinna charakteryzować się zadowalającą nośnością. O trwałości warstwy smarnej decydują właściwości oleju¹¹ oraz struktura geometryczna powierzchni trących¹². Szczególnie dobrą zdolnością do tworzenia filmu olejowego już w momencie rozruchu silnika wykazują oleje syntetyczne. Są one mniej wrażliwe na zmiany lepkości wraz ze zmianami temperatury oleju, co ma duże znaczenie dla utrzymywania się filmu olejowego o stabilnej grubości.

Zbyt wysoka gładkość powierzchni tulei cylindrowych utrudnia utrzymywanie na nich filmu olejowego. Dla podwyższenia zdolności do utrzymywania się oleju na gładzi żeliwnych tulei cylindrowych wykonuje się zabieg honowania. Polega on na wykonaniu rys o odpowiednim profilu, ułożonych w siatkę. Różne firmy zalecają inne parametry mikrogeometrii gładzi cylindrowych. Firma Goetze zaleca honowanie dwustopniowe z ukształtowaniem powierzchni nośnej (*plateau*) o profilu jak na rysunku 2¹³. Wygląd powierzchni gładzi testowej tulei cylindrowej po badaniach trwałościowych oraz mikrostrukturę próbki wyciętej w płaszczyźnie prostopadłej do tej powierzchni przedstawiono na rysunku 3¹⁴.



Rys. 2. Schematyczne przedstawienie powierzchni honowanej z ukształtowaniem *plateau*

⁹ Y. Tateishi, *Tribological Issue in Reducing Piston Ring Friction Losses*, „Tribology International” 27/1 (1994).

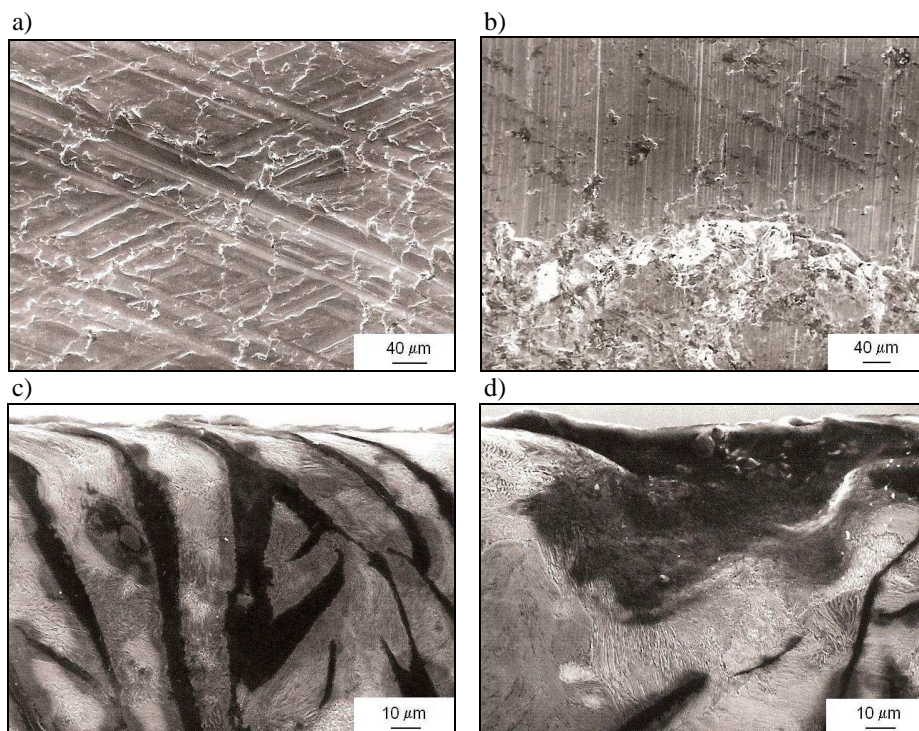
¹⁰ W. Kozaczewski, *Konstrukcje grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2004.

¹¹ S. Pytko, P. Pytko, *Problemy smarowania silników spalinowych w przyszłości*, „Tribologia” 3 (1991), s. 57–60.

¹² W. Okulicz, P. Pawlus, *Cylinder Liner Wear in Automotive Combustion Engine*, Proceedings of the International Scientific Conference “Mechanics 98”, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 1998, s. 195–204.

¹³ Materiały informacyjne firmy Goetzewerke.

¹⁴ E. Kościelny, W. Orłowicz, Z. Opiekun, J. Michalski, *Badania materiałowe silników samochodowych*, OBR SO, Warszawa 1987 (praca niepublikowana).

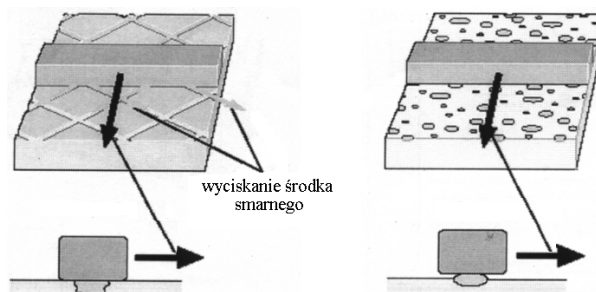


Rys.3. Wygląd powierzchni gładzi cylindrowej z obszaru połowy wysokości tulei – a). Wygląd powierzchni gładzi cylindrowej z obszaru nawrotu – b). Zużycie powierzchni gładzi przez odkształcenie plastyczne. Przekrój w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni gładzi w połowie wysokości tulei. Widoczne zawalcowanie i wyciskanie grafitu – c). Zużycie powierzchni gładzi przez wyrywanie materiału. Przekrój w płaszczyźnie prostopadłej do gładzi cylindrowej w obszarze nawrotu – d).

Представленные на рисунке 3 результаты badań wskazują, że w wyniku zróżnicowania kształtu, wielkości i rozmieszczenia wydzieleń grafitu oraz w wyniku różnych warunków współpracy pierścieni z tuleją cylindrową, jej zużycie dokonuje się według innego mechanizmu.

Według Volkswagena w przypadku wykonania rys honowniczych o stałej szerokości i głębokości w żeliwnej tulei cylindrowej o niskiej twardości, pierścienie tłokowe wyciskają olej wzdłuż rowków (rys. 4a)¹⁵. Może to spowodować nadmierne zmniejszenie grubości filmu olejowego. W efekcie tego nastąpi miejscowy metaliczny kontakt powierzchni współpracujących elementów. Zmniejszy to zużycie gładzi cylindra szczególnie w obszarach nawrotu tłoka i może być powodem zatarcia. W przypadku honowania utwardzonej powierzchni żeliwnej tulei cylindrowej nie uzyskuje się ciągłych rys, a tylko wgłębienia w obszarach wydzieleń faz o niższej twardości (rys. 4b). W trakcie przemieszczania się pierścieni, zagłębienia wypełnione olejem stanowią mikroobszary smarowania hydrodynamicznego. W wyniku zastosowania takiego rozwiązania materiałowego tarcie i zużycie wężła ciernego maleje.

¹⁵ Mototechnik, informacje techniczne firmy Volkswagen.



Rys. 4. Schemat oddziaływania rys i zagłębień holowniczych wypełnionych środkiem smarowym na kontakt pierścienia tłokowego z gładzią tulei cylindrowej¹⁶.

3. WPŁYW MORFOLOGII WYDZIELEŃ GRAFITU NA MECHANIZM ŻUŻYCIA ŻELIWNYCH TULEI CYLINDROWYCH

Badania materiałowe wielu tulei silników samochodowych wskazały na różny mechanizm ich zużycia w zależności od morfologii wydzieleń grafitu¹⁷. Dla ustalenia mechanizmu zużycia materiału tulei żeliwnych różniącego się wielkością i rozłożeniem wydzieleń grafitu¹⁸ wykonano badania zużycia ściernego na urządzeniu o ruchu posuwisto-zwrotnym. Badania wykonano na próbkach o wielkości wydzieleń grafitu do 15µm (Gw15), 31–60µm (Gw45) oraz 61–120µm (Gw90). O wielkości wydzieleń grafitu, a tym samym o jego rozłożeniu, decydują warunki krystalizacji. Wraz ze wzrostem szybkości krystalizacji odlewu rośnie skłonność do wzrostu drobnych wydzieleń grafitu o rozłożeniu międzidendrytycznym (Gr6, Gr7). Wraz ze spowolnieniem szybkości krystalizacji rośnie skłonność do wzrostu dużych wydzieleń grafitu o rozłożeniu równomiernym (Gr1) lub nierównomiernym (Gr2).

Wydzielena grafitu o wielkości do 15µm układają się w gniazda. Mówi się wówczas o rozłożeniu międzidendrytycznym grafitu. W obszarze takich wydzieleń materiał wykazuje niskie właściwości mechaniczne i dlatego jest podatny do tworzenia wyrwań w trakcie obciążeń zmiennych występujących w czasie cyklicznych obciążeń gładzi przez pierścienie tłokowe (rys. 5a,b).

W przypadku żeliwa o wielkości wydzieleń grafitu od 31µm do 60µm rozłożone są one w osnowie równomiernie lub nierównomiernie. Skutkuje to tym, że materiał w obszarze ciągłego filmu olejowego zużywa się równomiernie bez wyrwań (rys. 5c,d).

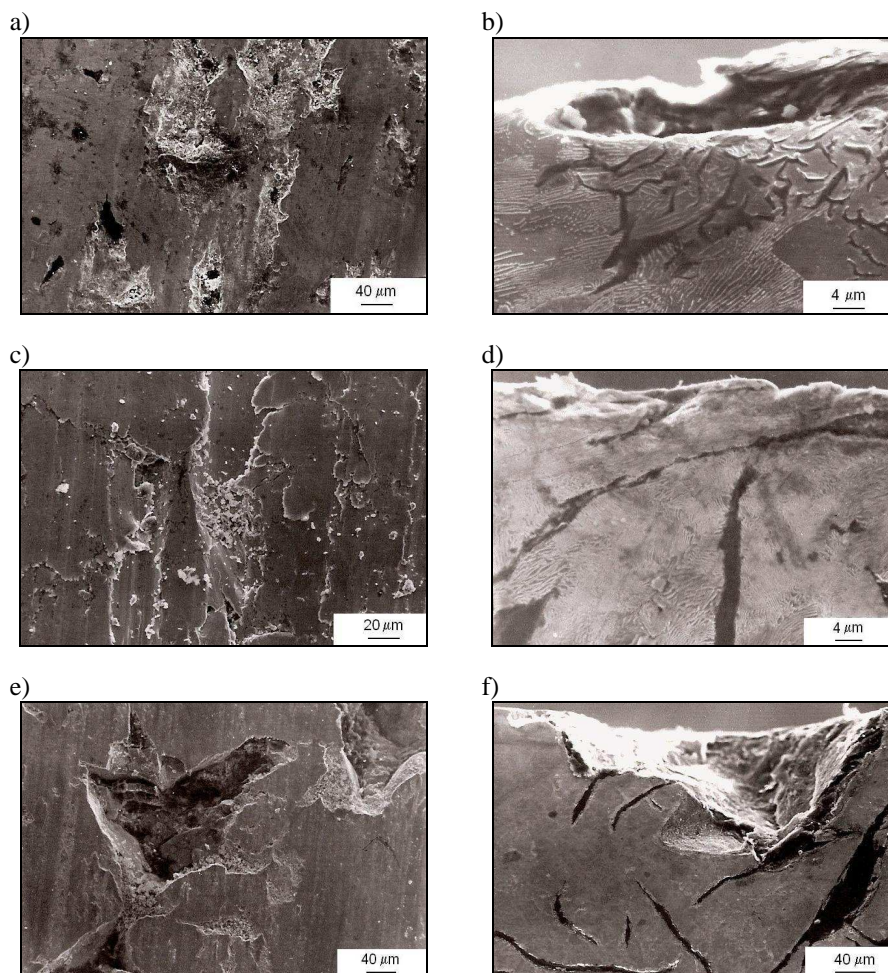
W przypadku żeliwa o wielkości wydzieleń grafitu powyżej 60µm w osnowie obecne są równomiernie rozłożone, często grube wydzielena grafitu. Część z tych wydzieleń jest ustawiona równolegle lub pod niewielkim kątem do powierzchni gładzi. W efekcie cy-

¹⁶ W. Orłowicz, M. Mróz, *Zastosowanie stopów Al-Si na tuleje silników spalinowych*, „Naukowi Wisti Nacionalno-go Technicznego Uniwersytetu «Kyiwskij politechnicznij institut»” 10 (2005), s. 51–63.

¹⁷ W. Orłowicz, Z. Opiekun, E. Kościelny, *Badania strukturalne tulei cylindra DX 03/2000, Renault, Opel, OBR SO*, Warszawa 1985 (praca niepublikowana); eadem, *Analiza materiałowa tulei oznaczonych symbolem 1 i 2, OBR SO*, Warszawa 1986 (praca niepublikowana); eadem, *Analiza materiałowa tulei żeliwnych oznaczonych numerami od 1 do 64, OBR SO*, Warszawa 1986 (praca niepublikowana); eadem, *Analiza materiałowa tulei cylindrowej firmy Ricardo, OBR SO*, Warszawa 1986; eadem, *Wykonanie odlewów tulei cylindrowych do silnika WARS, OBR SO*, Warszawa 1987; W. Orłowicz, A. Trytek, *Effect of Rapid Solidification on Sliding Wear Iron Castings*, „WEAR” 254 (2003), s. 154–163.

¹⁸ *Żeliwo szare, sferoidalne i ciagliwe. Badania metalograficzne. Określenie mikrostruktury*, PN-75/H-04661.

klicznego oddziaływania obciążeń zmiennych pochodzących od pierścieni tłokowych, na mostkach osnowy pomiędzy zakończeniem grafitu a powierzchnią gładzi rozwija się zmęczeniowe niszczenie materiału, co skutkuje tworzeniem się wyrwań (rys. 5e,f).



Rys. 5. Zużycie materiału tulei o zróżnicowanej morfologii wydzieliń grafitu płatkowego. Widoczne wyrwania materiału w obszarach gniazd drobnych wydzieliń grafitu o wielkości do $15\mu\text{m}$ i rozłożeniu międzidendrytycznym. Widok powierzchni gładzi – a). Widok w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni gładzi – b). Widoczne odkształcenia plastyczne warstwy przypowierzchniowej materiału i wyciskanie grafitu. Widok powierzchni gładzi – c). Widok w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni gładzi – d). Widoczne wyrwania materiału, który zalegał nad dużymi wydzieleniami grafitu płatkowego. Widok powierzchni gładzi – e). Widok w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni gładzi – f).

4. BADANIA MATERIAŁOWE ŻELIWNÝCH TULEI CYLINDROWÝCH

Od materiału stosowanego do wytwarzania tulei cylindrowych wymaga się dobrych właściwości odlewniczych i dobrej skrawalności, zdolności do tłumienia drgań, małej skłonności do zacierania się nawet w warunkach tarcia granicznego, odporności na zużycie ścierne, dobrej przewodności cieplnej, odporności korozyjnej oraz zadowalającej wytrzymałości doraźnej i zmęczeniowej.

Z uwagi na te wymagania najczęściej stosowanym materiałem do odtworzenia gładzi cylindrowych jest żeliwo szare. Tuleje z żeliwa szarego mogą być odtworzone w odlewie monobloku kadłub–tuleja, mogą być odlewane oddzielnie i potem montowane do kadłuba, mogą być również wykonane jako wtopki w odlewie monobloku kadłub–tuleja ze stopu aluminium z wtopką żeliwną lub w odlewie monobloku kadłub–tuleja ze stopu magnezu z wtopką żeliwną. Jeżeli odporność na zużycie ścierne tulei cylindrowej musi być szczególnie wysoka, to można ją podnieść poprzez hartowanie powierzchniowe w obszarze gładzi cylindra lub nadtapiania powierzchniowe w obszarze gładzi cylindra¹⁹.

Analiza materiałowa elementów silników samochodów osobowych produkowanych przez renomowanych producentów samochodowych wskazuje, że z uwagi na koszty wytwarzania zwykle nie są stosowane specjalne zabiegi w celu podwyższenia ich odporności na zużycie ścierne²⁰.

Ogólne wymagania stawiane odlewom na tuleje są zawarte w normie BN-78/1372-01²¹. Zaleca się w niej stosowanie żeliwa o składzie 3,0-3,7%C, 2,0-2,8%Si, 0,7-1,2%Mn, 0,25-0,55%Cr, 0,4-0,8%P, do 0,15%S, reszta Fe. Żeliwo to powinno się charakteryzować wydzieleniami grafitu o kształcie płatkowym prostym (Gf1) lub płatkowym zwichrowanym (Gf2). Wydzielenia grafitu powinny mieć wielkość od 31µm do 250µm (Gw45-Gw180). Dopuszcza się występowanie gniazd wydzielen grafitu o wielkości do 15µm (Gw15) oraz o wielkości od 16µm do 30µm (Gw25). Jego rozmieszczenie może być równomierne (Gr1), nierównomierne (Gr2), rozetowe (Gr5) i międzydendrytyczne (Gr6). Żeliwo powinno charakteryzować się osnową perlityczną z ewentualną niewielką ilością wydzielen ferrytu (P-P92). Eutektyka fosforowa w tym żeliwie powinna tworzyć siatkę dobrze ukształtowaną (Fr3) lub słabo ukształtowaną (Fr2). Żeliwo takie powinno wykazywać twardość od 210HB do 280HB. Jego wytrzymałość na rozciąganie nie powinna być niższa niż 225MPa.

Tuleje silników samochodowych wykonuje się zwykle metodą odlewania odśrodkowego. Z uwagi na specyfikę tej metody odlewania tuleje na przekroju grubości ścianki wykazują zróżnicowaną (gradientową) strukturę. W związku z tym dla uzyskania powtarzalnej struktury w obszarze gładzi cylindra muszą być szczególnie precyzyjnie utrzymane reżimy procesu technologicznego.

¹⁹ W. Orłowicz, A. Trytek, *Kształtowanie mikrostruktury i właściwości użytkowych odlewów żeliwnych uszlachetnionych powierzchniowo plazmą łuku elektrycznego*, Monografia, „Archiwum Odlewnictwa” 7/23 (2007).

²⁰ W. Orłowicz, Z. Opiekun, E. Kościelny, *Badania strukturalne tulei cylindra DX 03/2000, Renault, Opel, OBR SO*, Warszawa 1985 (praca niepublikowana); eide, *Analiza materiałowa tulei oznaczonych symbolem 1 i 2*; eide, *Analiza materiałowa tulei żeliwnych oznaczonych numerami od 1 do 64*; eide, *Analiza materiałowa tulei cylindrowej firmy Ricardo*; eide, *Wykonanie odlewów tulei cylindrowych do silnika WARS, OBR SO*, Warszawa 1987.

²¹ *Tuleje cylindrowe z żeliwa stopowego. Ogólne wymagania*, BN-78/1372-01.

Znacznie mniejsze niebezpieczeństwo uzyskania silnej struktury gradientowej występuje przy wytwarzaniu odlewów tulei w formach piaskowych. Mankamentem tej technologii jest dłuższy czas wytwarzania.

5. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy była ocena zgodności mikrostruktury tulei cylindrowych pozyskanych z silnika krajowej produkcji i silników zagranicznych z wymaganiami normy branżowej.

Celem praktycznym pracy było opracowanie i opisanie mikrostruktury odlewu tulei cylindrowej wykonanej w formie piaskowej dla zapewnienia wysokiej odporności na zużycie ściernie i niskiej podatności na zacieranie.

Zakres pracy obejmował:

- badania materiałowe jednej tulei z silnika produkcji krajowej oraz dwóch tulei cylindrowych z silników zagranicznych (francuskiego i japońskiego);
- wykonanie tulei doświadczalnej i jej badania materiałowe.

BADANIA MATERIAŁOWE WYBRANYCH TULEI SILNIKÓW SAMOCHODÓW OSOBOWYCH

Do badań wytypowano jedną tuleję z silnika produkcji krajowej, jedną tuleję z silnika produkcji francuskiej oraz jedną tuleję z silnika produkcji japońskiej. Oznaczono je odpowiednio numerami jeden, dwa i trzy.

Żeliwo na tuleję cylindrową silnika numer jeden miało następujący skład chemiczny: 3,2%C, 1,9%Si, 0,7%Mn, 0,5%Cr, 0,2%P, 0,05%S, reszta Fe. W żeliwie tym stwierdzono obecność wydzieleń grafitu o wielkości od 61µm do 120µm (Gw90). Wydzielena miały kształt prosty (Gf1) i były rozmieszczone w osnowie równomiernie (Gr1). Żeliwo posiadało perlityczną strukturę osnowy (P) ze słabo ukształtowaną siatką eutektyki fosforowej (Fr2). Twardość żeliwa zawierała się w zakresie 215–265HB.

Tak więc tuleja cylindrowa silnika numer jeden spełniała wymagania normy branżowej pod względem struktury i twardości.

Żeliwo na tuleję cylindrową numer dwa miało następujący skład chemiczny: 3,4%C, 2,4%Si, 0,5%Mn, 0,39%Cr, 0,22%Cu, 0,5%P, 0,027%S, reszta Fe. W żeliwie tym stwierdzono obecność wydzieleń grafitu o wielkości od 25µm do 60µm (Gw25-Gw45). Wydzielena miały kształt płatkowy prosty (Gf1) oraz kształt płatkowy zwichrowany (Gf2). Ich rozmieszczenie w osnowie było nierównomierne (Gr2) oraz rozetowe (Gr5). Mimo mniejszej niż wymagana normy zawartości manganu, ale dzięki wyższej zawartości miedzi żeliwo posiadało perlityczną strukturę osnowy (P) z dobrze ukształtowaną siatką eutektyki fosforowej (Fr3). Twardość żeliwa zawierała się w zakresie 212–264HB.

Żeliwo stosowane na tuleję cylindrową silnika numer dwa spełniało zatem wymagania normy branżowej pod względem struktury i twardości.

Żeliwo na tuleję cylindrową numer trzy miało następujący skład chemiczny: 3,2%C, 2,0%Si, 0,7%Mn, 0,2%Cr, 0,3%Cu, 0,14%P, 0,1%S, reszta Fe. W żeliwie tym stwierdzono obecność wydzieleń grafitu o wielkości od 31µm do 120µm (Gw45-Gw90). Wydzielena miały kształt prosty (Gf1). Były one rozmieszczone w osnowie równomiernie (Gr1) i nierównomiernie (Gr2). Żeliwo posiadało perlityczną strukturę osnowy (P) ze słabo

ukształtowaną siatką eutektyki fosforowej (Fr₂). Twardość żeliwa zawierała się w zakresie 121–179HB.

Wymagania odnośnie mikrostruktury były zatem spełnione, ale twardość była nieco niższa niż wymaga norma branżowa.

Reasumując, stwierdzić można, że skład chemiczny jednej tulei wykazał mniejszą zawartość manganu niż wymaga norma, ale wprowadzenie miedzi zrekompensowało oddziaływanie tego pierwiastka na osnowę w kierunku otrzymania struktury perlitycznej. Przy zastosowanym składzie chemicznym warunki krystalizacji odlewów na tuleje były tak dobrane, aby zapewnić perlityczną strukturę osnowy, ze słabo lub silnie ukształtowaną siatką eutektyki fosforowej i wydzieleniami grafitu o wielkości w zakresie od 16µm do 120µm. Jedną tuleją charakteryzowała się niższą twardością niż wymaga tego norma branżowa.

BADANIA ODLEWÓW DOŚWIADCZALNYCH

Model tulei miał średnicę wewnętrzną $\varnothing 70$ mm, średnicę zewnętrzną $\varnothing 100$ mm i długość 370mm. Tuleja zaformowana była pionowo. Metal doprowadzono do wnęki formy od góry. Dla dobrego zasilania w górnej części odlewu zaprojektowano zasilacz. W związku z tym odlew po usunięciu zasilacza miał długość 340mm.

Tuleję wykonano z żeliwa szarego przygotowanego w piecu indukcyjnym o pojemności 1500kg. Skład chemiczny żeliwa podano w tabeli 1.

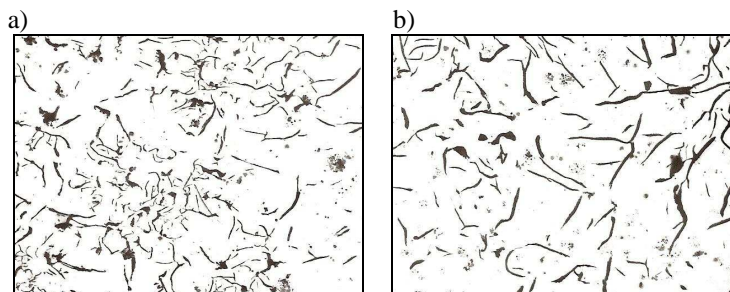
Tabela 1. Skład chemiczny materiału tulei

Zawartość pierwiastków, %								
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S	Fe
3,20	0,77	1,65	0,38	ślady	1,26	0,52	0,11	reszta

Badania metalograficzne wykonano na próbkach pobranych z obszaru odlewu tulei zalegającego 10mm od postawy oraz 170mm od podstawy (w połowie wysokości).

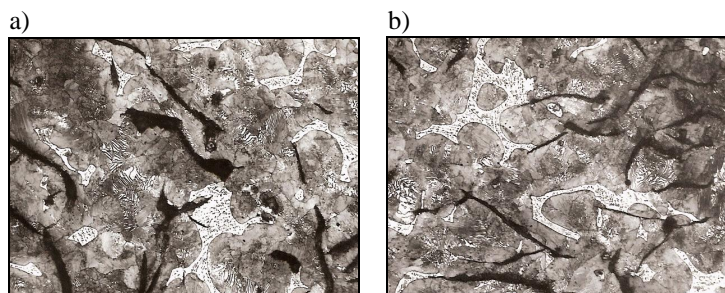
W związku z tym, że mikrostruktura próbek pobranych z obu analizowanych obszarów była do siebie zbliżona, jako przykładowe podano wyniki badań metalograficznych wykonanych na próbkach pobranych w połowie wysokości odlewu.

Ocenę wielkości, kształtu i rozmieszczenia wydzieleni grafitu wykonano na zgładach metalograficznych nietrawionych (rys. 6). Ocenę osnowy wykonano na zgładach metalograficznych trawionych w 4% HNO₃ (rys. 7). Ocenę eutektyki fosforowej wykonano na zgładach metalograficznych trawionych w 4% HNO₃ przez odpowiednio długi okres czasu (rys. 8).



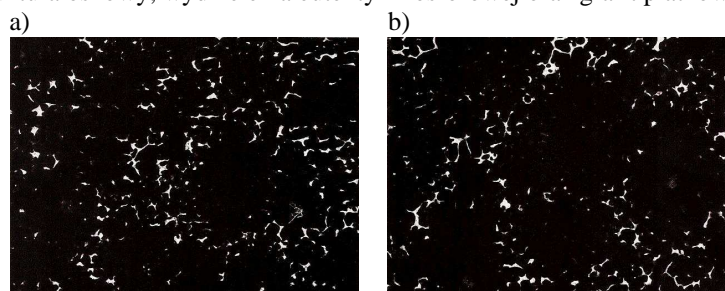
Rys. 6. Struktura odlewu tulei doświadczalnej w obszarze przy powierzchni wewnętrznej – a) i w połowie grubości ścianki odlewu – b). Zgład nietrawiony. Powiększenie 110x.

W analizowanym odlewie tulei doświadczalnej w obszarze przylegającym do powierzchni wewnętrznej stwierdzono obecność wydzieli grafitu o wielkości od $31\mu\text{m}$ do $60\mu\text{m}$ (Gw45) – które dominowały – oraz od $61\mu\text{m}$ do $120\mu\text{m}$ (Gw90). W połowie grubości ścianki stwierdzono obecność wydzieli grafitu o podobnej wielkości z tym, że dominowały wydzielania o wielkości od $61\mu\text{m}$ do $120\mu\text{m}$ (Gw90). Były to wydzielania o kształcie prostym (Gf1), rozmieszczone w osnowie nierównomiernie (Gr2) w przypadku obszaru przypowierzchniowego i równomiernie (Gr1) w przypadku połowy grubości odlewu.



Rys. 7. Struktura odlewu tulei doświadczalnej w obszarze przy powierzchni wewnętrznej – a) i w połowie grubości ścianki odlewu – b). Trawienie 4% HNO₃. Powiększenie 250x.

Stwierdzono, że w całym przekroju odlewu tulei doświadczalnej występowała perlityczna struktura osnowy, wydzielania eutektyki fosforowej oraz grafit płatkowy.



Rys. 8. Rozmieszczenie eutektyki fosforowej w odlewie tulei doświadczalnej w obszarze przy powierzchni wewnętrznej – a) i w połowie grubości ścianki odlewu – b). Trawienie 4% HNO₃. Powiększenie 50x.

Stwierdzono, że w całym przekroju odlewu tulei doświadczalnej wystąpiła siatka eutektyki fosforowej dobrze ukształtowana (Fr3). Twardość odlewu tulei doświadczalnej wynosiła od 250 do 263HB.

Uzyskane rezultaty wskazują, że przy zastosowanym składzie chemicznym oraz przyjętej grubości ścianki odlew tulei cylindrowej odlanej do formy piaskowej charakteryzował się taką morfologią wydzieleni grafitu, osnową i siatką eutektyki fosforowej, które powinny zapewnić wysokie właściwości użytkowe.

6. PODSUMOWANIE

1. Analiza wpływu mikrostruktury żeliwa stosowanego na tuleje cylindrowe silników samochodowych wskazuje, że proces technologiczny wytwarzania odlewów tulei należy prowadzić tak, aby w obszarze, z którego będzie wytwarzana tuleja, wystąpiły wydzielenia grafitu o wielkości od $31\mu\text{m}$ do $60\mu\text{m}$ (Gw45). Takie wydzielenia grafitu przy perlitycznej osnowie i zadowalającej siatce eutektyki fosforowej zapewnią najlepsze właściwości eksploatacyjne tulei.
2. Analiza grupy tulei cylindrowych stosowanych w silnikach krajowych i zagranicznych wskazuje, że charakteryzowały się one wielkością wydzieleni grafitu w zakresie od $16\mu\text{m}$ do $120\mu\text{m}$ (Gw25–Gw90).
3. Stwierdzić można, że dopuszczenie przez normę branżową obecności wydzieleni grafitu o wielkości do $15\mu\text{m}$ (Gw15) i o wielkości od $121\mu\text{m}$ do $250\mu\text{m}$ odpowiada bardziej potrzebom producenta niż użytkownika. Tuleje, w których będą występować wydzielenia grafitu o takiej wielkości, są podatne na szybkie zużycie.
4. Stwierdzono, że przy zastosowanym składzie chemicznym odlew tulei cylindrowej odlanej do formy piaskowej charakteryzował się mikrostrukturą (morfologią wydzieleni grafitu, osnową i siatką eutektyki fosforowej), która powinna zapewnić wysokie właściwości użytkowe.

LITERATURA

- [1] Kaźmierczak, A., *Tarcie i zużycie zespołu tłok-cylinder*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- [2] Szkurlat, J., *Problemy zmniejszania oporów tarcia układu tłokowo-korbowodowego*, „Journal of KONES” 2/1 (1995), s. 503–508.
- [3] Iskra, A., *Wpływ drgań własnych pierścienia uszczelniającego na warunki pracy zespołu tłokowo-cylindrowego*, „Journal of KONES” 1/1 (1994), s. 167–174.
- [4] Heywood, J.B.; Noordzij, L.B.; Tian, T.; Wong, V.M., *Modeling Piston-Ring Dynamics, Blowby and Ringtwist Effect*, „Journal of Engineering for Gas Turbines and Power” 120/4 (1998), s. 843–854.
- [5] Kozaczewski, W., *Konstrukcje grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2004.
- [6] Tateishi, Y., *Tribological Issue in Reducing Piston Ring Friction Losses*, „Tribology International” 27/1 (1994).
- [7] Pytko, S.; Pytko, P., *Problemy smarowania silników spalinowych w przyszłości*, „Tribologia” 3 (1991), s. 57–60.
- [8] Okulicz, W.; Pawlus, P., *Cylinder Liner Wear in Automotive Combustion Engine*, Materiały Konferencyjne MECHANICS 98. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 1998, s. 195–204.

- [9] Materiały informacyjne firmy Goetzewerke.
- [10] Kościelny, E.; Orłowicz, W.; Opiekun, Z.; Michalski, J., *Badania materiałowe silników samochodowych*, OBR SO, Warszawa 1987. Praca niepublikowana.
- [11] *Mototechnik*, informacje techniczne firmy Volkswagen.
- [12] Orłowicz, W.; Mróz, M., *Zastosowanie stopów Al-Si na tuleje silników spalinowych*, Naukowi Visti Nacionalnego Technicznego Uniwersytetu Ukrainy, z.10, 2005, 51-63.
- [13] Orłowicz, W.; Opiekun, Z.; Kościelny, E., *Badania strukturalne tulei cylindra DX 03/2000, Renault, Opel*, OBR SO Warszawa, 1985. Praca niepublikowana.
- [14] Orłowicz, W.; Opiekun, Z.; Kościelny, E., *Analiza materiałowa tulei oznaczonych symbolem 1 i 2*, OBR SO Warszawa, 1986. Praca niepublikowana.
- [15] Orłowicz, W.; Opiekun, Z.; Kościelny, E., *Analiza materiałowa tulei żeliwnych oznaczonych numerami od 1 do 64*, OBR SO, Warszawa 1986 (praca niepublikowana).
- [16] Orłowicz, W.; Opiekun, Z.; Kościelny, E., *Analiza materiałowa tulei cylindrowej firmy Ricardo*, OBR SO, Warszawa 1986.
- [17] Orłowicz, W.; Opiekun, Z.; Kościelny, E., *Wykonanie odlewów tulei cylindrowych do silnika WARS*, OBR SO, Warszawa 1987.
- [18] Orłowicz, W.; Trytek, A., *Effect of Rapid Solidification on Sliding Wear Iron Castings*, „WEAR” 254 (2003), s. 154–163.
- [19] *Żeliwo szare, sferoidalne i ciągliwe. Badania metalograficzne. Określenie mikrostruktury*, PN-75/H-04661.
- [20] Orłowicz, W.; Trytek, A., *Kształtowanie mikrostruktury i właściwości użytkowych odlewów żeliwnych uszlachetnionych powierzchniowo plazmą łuku elektrycznego*, Monografia, „Archiwum Odlewnictwa” 7/23 (2007).
- [21] *Tuleje cylindrowe z żeliwa stopowego. Ogólne wymagania*, BN-78/1372-01.

FORMATION OF MICROSTRUCTURE OF CAST IRON AUTOMOBILE ENGINE CYLINDER LINERS AIMED AT IMPROVEMENT OF THEIR SERVICE PROPERTIES

In the paper, factors affecting the wear of automobile engine liners are analyzed. The effect of graphite precipitates morphologies on the mechanism leading to wear of automobile cylinder liners is presented. Compliance of the material used in manufacture of cylinder liners for a group of engines with the requirements set out in Polish industry standard was assessed. A casting of a prototype cylinder liner was made with microstructure securing high level of its service properties.