

ZMIANA WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁU TŁOKA Z SILUMINU EUTEKTYCZNEGO ALSI12 PO DŁUGOTRWAŁEJ PRACY SILNIKA

Dr inż. Jacek MICHALSKI

W artykule przedstawiono mikrostrukturę, wydłużenie trwałe, twardość oraz wymiary i geometrię tłoków wykonanych z siluminu AK12 (stop AlSi12) po badaniu niezawodności silnika CE o zapłonie iskrowym, pojemności 1,6 l. Porównano materiał nowego tłoka z właściwościami tłoka po trzech cyklach badań stanowiskowych, o łącznym czasie trwania 9 godziny. Trzeci i czwarty tłok został poddany 334 cyklom badania niezawodności, w tym samym silniku, o łącznym czasie pracy 1002 godziny. Trzeci tłok miał jedynie objawy zużycia ściernego płaszczka. Z kolei czwarty analizowany tłok był zatarty w części ogniowej i na płaszczu. Trwałe zmiany wymiarowe materiału tłoka pozwoliły określić technologiczną temperaturę starzenia na niższą niż 200 °C. Z kolei analiza zmiany mikrostruktury, twardości i średnicy pozwoliła przyjąć 225÷230 °C, jako najwyższą temperaturę pracy tłoków. Pierwotne zatarcie tłoka rozpoczyna się w części koronowej, a zatarcie płaszczka tłoka jest efektem wtórnym.

1. WSTĘP

Spośród wszystkich części silnika spalinowego elementem najbardziej narażonym na uszkodzenia cieplne jest tłok. Stanowi on ruchomą część komory spalania, więc musi być odporny na wysokie temperatury i ciśnienia [1].

Tłoki podlegają zużyciu; ściernemu, adhezyjnemu, zacieraniu, korozyjnemu, kawitacji, cieplnemu, doraźnemu i zmęczeniowemu. Ich właściwości można skutecznie zwiększyć poprzez umacnianie. Umocnienia dokonuje się w wyniku procesu zgniotu, starzenia, utwardzenia wydzieleniowego oraz umacniania granicy ziaren.

Warunki techniczne wytwarzania tłoków określają oprócz wymaganych wartości wymiaru i kształtu także skład chemiczny stopu, właściwości mechaniczne, mikrostrukturę i stabilność wymiarową. W siluminach tłokowych składniki stopowe to Si, Cu, Mg, Ni, zanieczyszczeniami są Fe, Mn, Zn, Ti i inne. Po obróbce cieplnej tłoków kontrolowanymi właściwościami mechanicznymi jest: twardość, wytrzymałość na rozciąganie, umowna granica plastyczności, wydłużenie względne, moduł Younga, współczynnik przewodzenia ciepła i współczynnik rozszerzalności liniowej. Mikrostruktura tłoka odlewane grawitacyjnie do metalowej kokili jest określona wzorcami wielkości i rozmieszczeniem kryształów krzemu pierwotnego i eutektycznego oraz wzorcami roztworu stałego i faz międzymetalicznych. Stabilność wymiarowa tłoka, najczęściej czterech średnic, jest sprawdzana w wyniku 15 h wygrzewania w temperaturze 240 °C.

Wymagania te mogą być traktowane, jako parametry diagnostyczne. Ze względu na możliwość utraty właściwości użytkowych tłoka w eksploatacji, zatarcie, celem jest wskazanie symptomu diagnostycznego, czyli zorientowanej uszkodzeniowo miara sygnału diagnostycznego, niewystępującej w obiekcie zdającym [2].

2. PRZEGLĄD LITERATURY

W siluminach tłokowych duże, kruche, nierównomiernie rozłożone wydzielenia kryształów pierwotnych krzemu utrudniają obróbkę mechaniczną odlewów, a stop charakteryzuje się niską odpornością na zużycie ściernie oraz niską wytrzymałością zmęczeniową [6]. Skutecznym sposobem rozdrobnienia struktury siluminu jest szybkie chłodzenie stopu, celem wymuszenia efektu przechłodzenia. Jedną z niekonwencjonalnych metod jest także zastosowanie strumienia ciepła [7].

Wzrost temperatury pracy tłoka powoduje przyrost jego wymiarów geometrycznych jak i zmiany cech materiału. To może prowadzić do znacznego zmniejszenia luzu pomiędzy tłokiem a tuleją cylindrową i silnik ulegnie uszkodzeniu w wyniku zatarcia. Zarazem zmiany cech materiału, zwłaszcza w długotrwałym okresie eksploatacji, wywołują także zmianę struktury metalograficznej oraz często zmianę objętości materiału i tym samym wzrost jak i zmniejszenie wymiarów tłoka. Temperatura wygrzewania inicjuje charakterystyczne zmiany wydzielenia faz międzymetalicznych w roztworze stałym α stopu Al-Mn (Fe,Cr)-Si [8]. Stwierdzono, bowiem dla żarowytrzymałego stopu

AlSi5Cu2Mg, mogącego pracować do temperatury $\sim 250^{\circ}\text{C}$, charakterystyczną zmianę morfologii wydzieleni faz międzymetalicznych $\alpha\text{-AlFeMnSi}$ w procesie przesycania i starzenia P6, tzw. pismo chińskie [9]. Stop był przesycany $515^{\circ}\text{C}/5\text{h}$ i chłodzony w wodzie a następnie starzony w $225^{\circ}\text{C}/5\text{h}$ i chłodzony w powietrzu.

Chwilowa temperatura denka tłoka oraz powierzchni bocznej nad pierwszym pierścieniem tłokowym silnika spalinowego może osiągnąć wartość nawet do 350°C [1]. Tłok najszybciej nagrzewa się w pierwszych 5 s pracy silnika, gdzie szybkość przyrostu temperatury osiąga wartość $17^{\circ}\text{C}/\text{s}$. Największe obciążenie cieplne tłoka występuje w początkowym okresie rozruchu silnika, w komorze spalania tłoka. Poprzez zwiększenie recyrkulacji spalin ERG, istnieje możliwość zmniejszenia rozprzestrzeniania się płomienia, ograniczenia obszaru występowania wysokiej temperatury, oraz zmniejszenie obciążenia cieplnego tłoka.

Tłoki silników wysokoprężnych samochodów osobowych ulegają uszkodzeniom pomimo poprawnego składu chemicznego materiału i technologii wytwarzania [4]. Inicjacja pęknięć następuje od zbyt dużych ziaren krzemu pierwotnego i następnie poprzez rozwój mikropęknięć w pozostałych strukturach metalu. Niezależnie od wartości normalnego obciążenia, stosowanego w testach stanowiskowych, współczynnik tarcia płaszczka tłoka z powłoką grafitową był niższy niż dla powłoki diamentowej DLC [3]. Jednak powłoka grafitowa nie była skuteczna w ochronie powierzchni płaszczka tłoka.

Chropowatość powierzchni płaszczka tłoka, o wysokości $1\div 2\ \mu\text{m}$, w porównaniu z jego wysokością falistości powierzchni $10\ \mu\text{m}$, powoduje o rząd mniejszą siłę tarcia z cylindrem silnika spalinowego [5]. Na wartość siły kontaktu powierzchni i wypór hydrodynamiczny złożenia tłok-cylinder, większy wpływ wywiera kształt profilu tworzącej płaszczka tłoka niż jego falistość.

Mniejsza siła tarcia, temperatura oraz większa odporność na zatarcie ma miejsce w przypadku współpracy cylindra o mniejszej wysokości chropowatości ($R_a=0,5\div 0,7\ \mu\text{m}$ w porównaniu z $R_a=0,8\div 1,0\ \mu\text{m}$) z tłokiem także o mniejszej wysokości chropowatości [10].

3. METODYKA BADAŃ

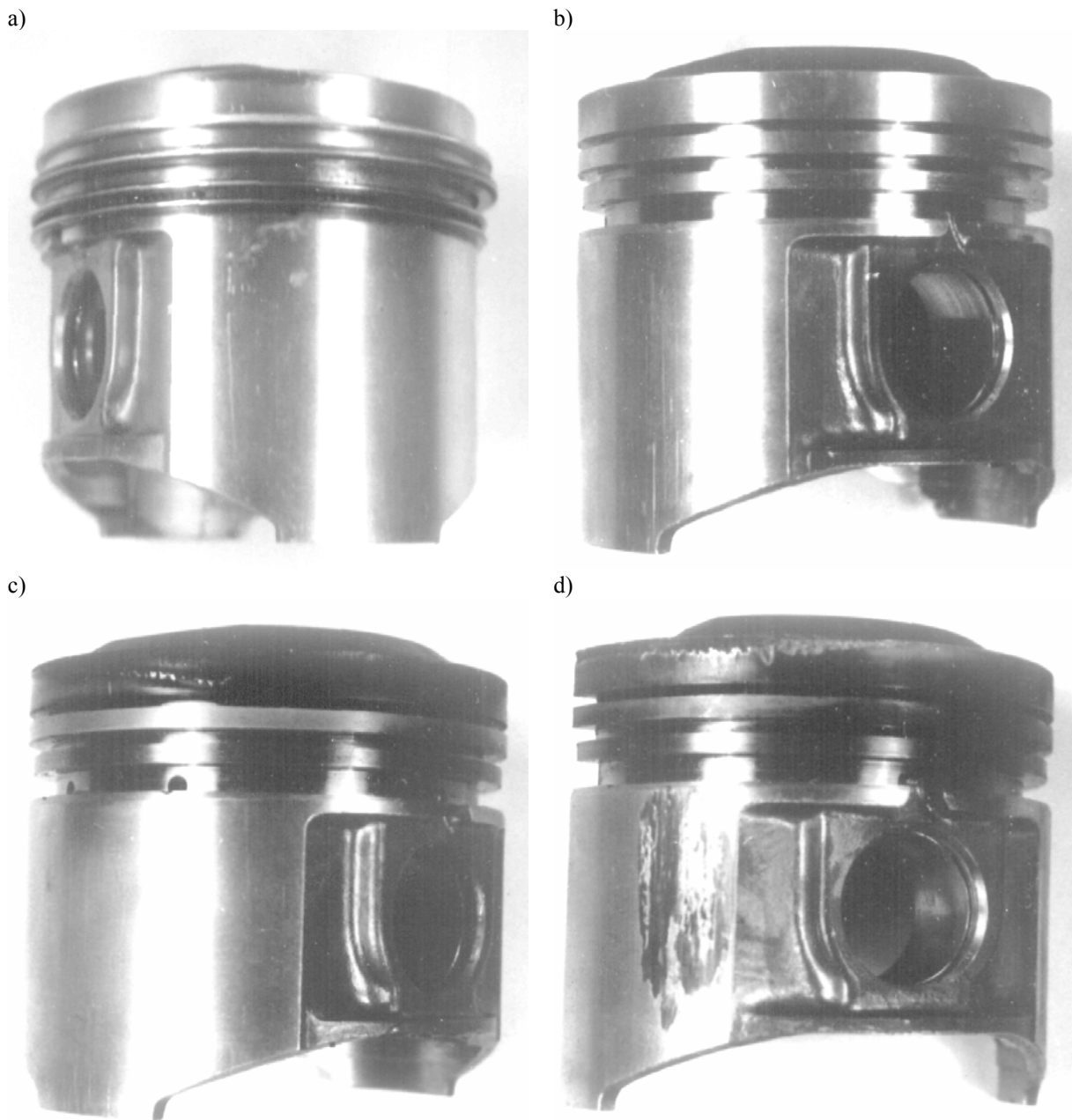
Badaniom poddano tłok nowy oraz tłok po trzech cyklach badań stanowiskowych, o łącznym czasie trwania 9 godziny, jak również dwa tłoki po 334 cyklach badania niezawodności silnika o czasie pracy 1002 godziny (rys. 1). Trzeci tłok miał jedynie objawy zużycia ściernego płaszczka. Z kolei czwarty analizowany tłok był zatarty w części ogniowej i na płaszczku. Silnik CE o zapłonie iskrowym, pojemności 1,6 l, podlegał badaniom niezawodności w 3 godzinnych cyklach pracy zgodnych z normą BN-79/1374-04. Przeprowadzono badania metalograficzne mikrostruktury, badania dylatometryczne stabilności wymiarów, pomiary twardości oraz pomiary kształtów, wymiarów, chropowatości powierzchni wszystkich tłoków.

Badania mikrostruktury prowadzono na przekroju poprzecznym denka każdego z badanych tłoków, a po próbach stabilności cieplnej mikrostrukturę badano na przekrojach poprzecznych próbek dylatometrycznych. Mikrostrukturę ujawniano trawiąc próbki odczynnikami o składzie: 0,5 ml HF+99,5 ml H₂O. Obserwację mikrostruktury materiału próbek przeprowadzono na mikroskopie optycznym NEOPHOT 2.

Pomiar twardości wykonano metodą Brinella, w wyniku pięciokrotnego powtórzenia, na podstawie normy PN-91/H-04350. Stosowano kulkę o średnicy $\varnothing 5\ \text{mm}$ i siłę 2,5 kN od masy 250 kg. Pomiary przeprowadzono na próbkach wyciętych z denka tłoków.

Skład chemiczny próbek tłoków wyznaczono spektrometrem emisyjnym ze wzbudzeniem jarzeniowym LECO GDS 850.

Badania stabilności wymiarowej przeprowadzono metodą dylatometryczną na próbkach $\varnothing 4\times 20\ \text{mm}$ wyciętych z denka każdego z tłoków, po ich umieszczeniu w kwarcowych rurkach. Atmosferą ochronną był argon. Określono trwałe zmiany wymiarów w temperaturze z zakresu $175\div 250^{\circ}\text{C}$. W każdej przyjętej temperaturze próbki starzono (stabilizowano) przez 24 godz. Stosowano dylatometr uniwersalny różnicowy z rejestracją wydłużenia czujnikiem indukcyjnym. Wyznaczono współczynnik rozszerzalności cieplnej.



Rys. 1. Makrofotografia tłoka silnika: nowego a), po 9 h pracy b), po 1002 h pracy bez uszkodzenia c) oraz po 1002 h pracy mającego zatarcie d)

Średnicę tłoka mierzono na wysokości tłoka 17 mm (położenie płaszczyzny nominalnej) oraz na wysokości 45 mm (płaszczyzna powyżej osi piasty tłoka dla sworznia tłokowego). Pomiar przeprowadzono nożykami na dużym mikroskopie warsztatowym Carl Zeiss Jena. Taki pomiar zapewniał największą powtarzalność wyników.

Pomiary kształtu realizowano na wysokości 45 mm. W płaszczyźnie tej nie występowały, bowiem uszkodzenia mechaniczne tłoka. Pomiary przeprowadzono współrzędnościową maszyną pomiarową FN-1106 Mitutoyo. Stosowano kulistą końcówkę trzpienia o średnicy 4 mm. Wartości wyznaczono z 300 punktów pomiarowych.

4. WYNIKI BADAŃ

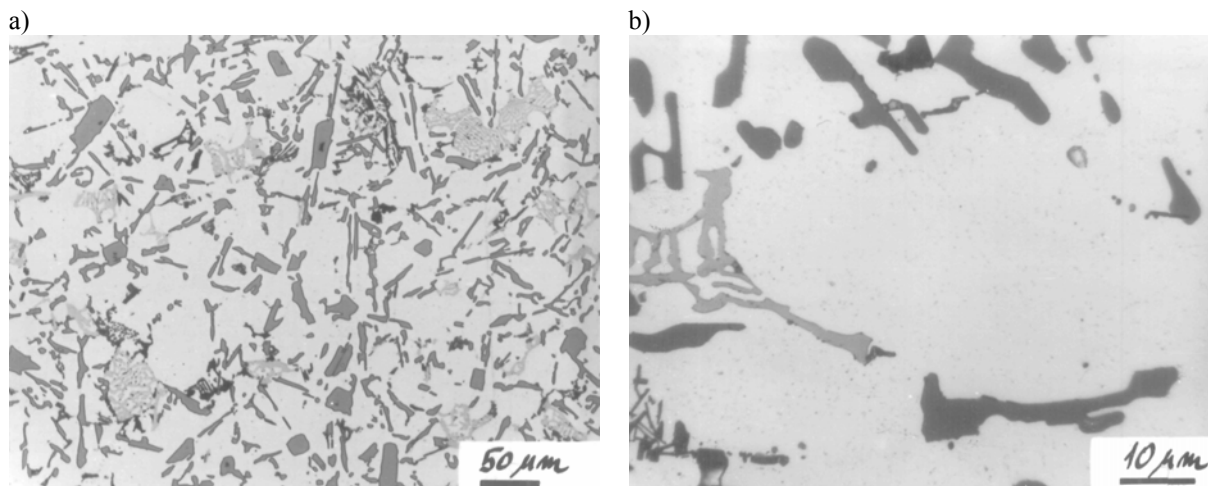
Makrofotografie badanych tłoków przedstawiono na rysunku 1. Skład chemiczny metalu, z którego wykonano tłok zamieszczono w tabeli 1. Skład ten jest zgodny z wymaganym przez PN-76/H-88027 dla gatunku AK12, stopu AlSi12.

Tłok nowy ma typową dla siluminu eutektycznego AK12 strukturę złożoną z pierwotnych ziaren krzemu, eutektycznych kryształów krzemu tj. fazy β (Si) i ziaren roztworu stałego, fazy α (rys. 2, 3). Segregacja dendrytyczna kryształów krzemu nie jest duża co świadczy o poprawności procesów metalurgicznych tłoka. Kształt i rozmiary kryształów są typowe jak dla eutektycznych siluminów modyfikowanych fosforem.

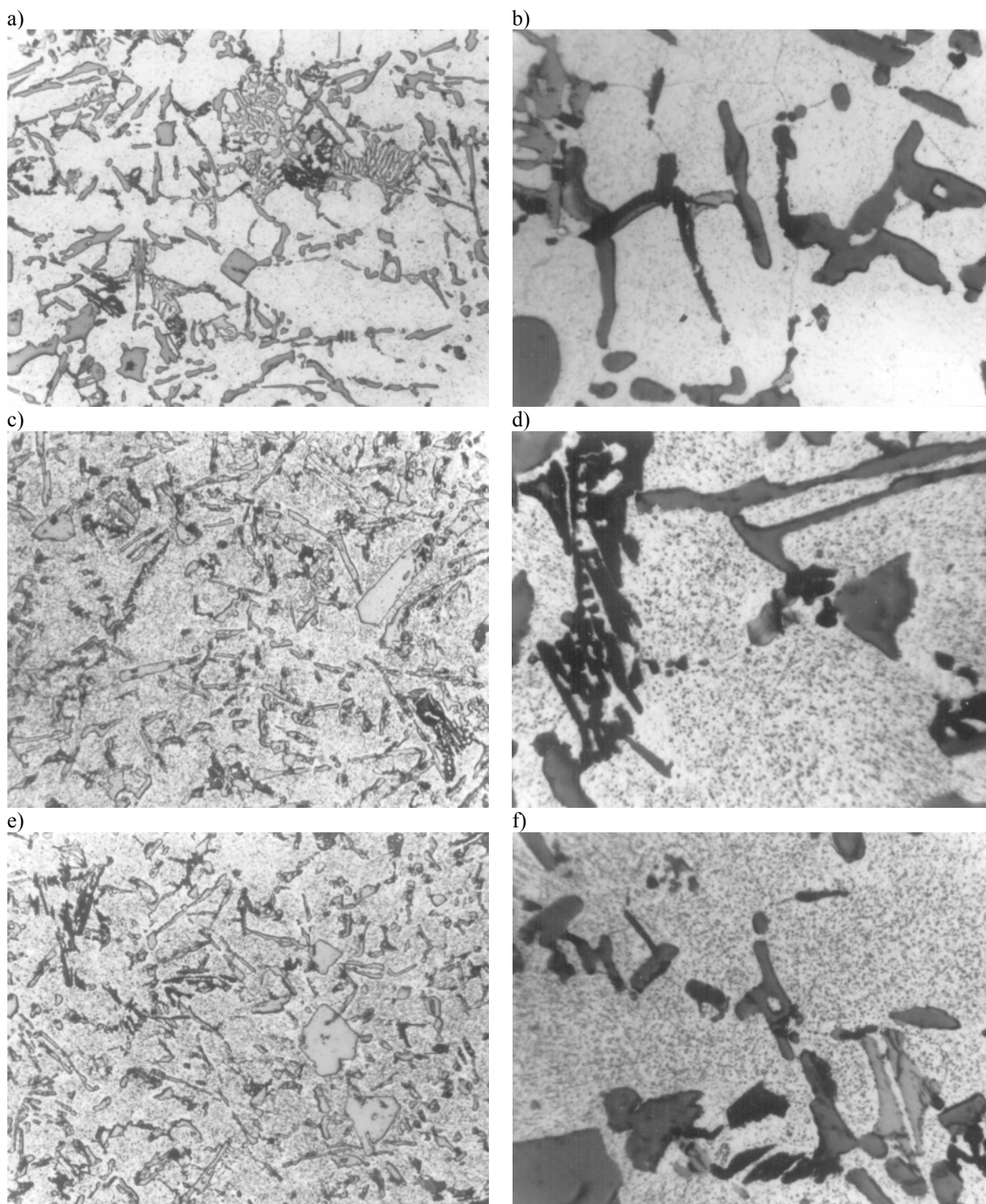
Zmiana struktury metalograficznej tłoka, po 1002 h pracy silnika, uwidacznia się rozdrobnieniem krzemu eutektycznego, zwiększeniem wielkości wydzieleni związków międzymetalicznych w roztworze α oraz zwiększeniem ziaren krzemu pierwotnego. W ziarnach fazy α , rysunek 2b, 3b, 3d, 3f, występują wydzielenia faz międzymetalicznych, powstałych podczas starzenia technologicznego tłoków nowych jak i starzenia podczas ich eksploatacji w silniku. Ich nasilenie w tłoku nowym (rys. 2a, 2b) oraz tłoku po 9 h użytkowaniu silnika (rys. 3a, 3b) nie jest duże. Z kolei radykalnie zwiększa się w tłokach, które pracowały w silnikach poddanych 1002 h próbie niezawodności (rys. 3c, 3d, 3e, 3f).

Starzenie próbek materiału wyciętego z denek tłoków, przez 24 h w temperaturze 175 °C, 200 °C, 215 °C, 235 °C i 250 °C, powoduje zwiększenie wielkości wydzieleni związków międzymetalicznych w roztworze α . Zmiany wydzieleni faz międzymetalicznych są w tych warunkach duże dla tłoka nowego (rys. 4). Z kolei są niewielkie po pracy silnika spalinowego 10 h (rys. 5) oraz 1002 godzin bez uszkodzeń (rys. 6) jak i 1002 godzin mającego zatarcie.

Przeprowadzone badania trwałych zmian wymiarowych wykazały ich brak po starzeniu w 175 °C (tab. 2). Starzenie próbek materiału tłoka nowego oraz tłoka po pracy 9 h w 200 °C i 215 °C wywołuje znaczny trwały przyrost wymiarów, od 0,18‰ do 0,26 ‰. Z kolei przyrost wymiarów próbek materiału tłoków, w analogicznym zakresie temperatur 200÷215 °C, jest nieduży po 1002 godzinnym badaniu niezawodności silników, 0,05÷0,11‰. Natomiast starzenie w 235 °C powoduje w przybliżeniu podobny przyrost wymiarów wszy-



Rys. 2. Mikrostruktura metalu denka nowego tłoka: a) Powiększenie 150x, b) Powiększenie 1200x



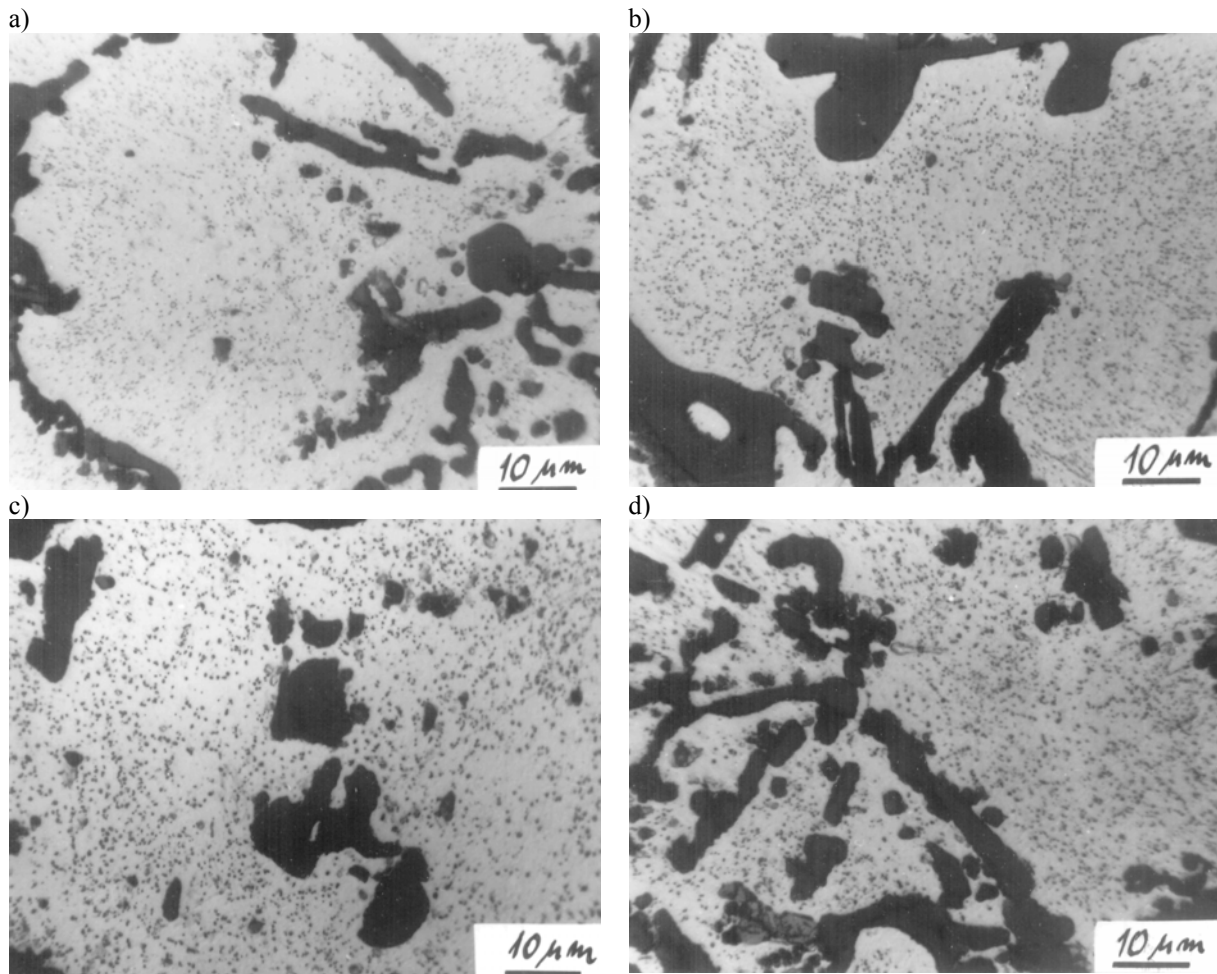
Rys. 3. Mikrostruktura metalu denka tłoka silnika: po 9 h pracy a), b), po 1002 h pracy bez uszkodzenia c), d), po 1002 h pracy mającego zatarcie e), f). Powiększenie: 260x a), c), e), 1200x b), d), f)

stkich tłoków, $0,12 \div 0,14\%$. Z kolei starzenie materiału z denek tłoków w temperaturze 250°C wywołuje jego kurczenie. Przebiega ono podobne jak w procesie technologicznym wyżarzania zmiękczającego.

Pozwala to przypuszczać, że temperatura stabilizowania tłoków w procesie technologicznym wytwarzania, była niższa niż 200°C .

Jednak puchnięcie materiału tłoka tylko w niektórych miejscach tłoka wywołuje trwałe zmiany wymiarowe. Wynika to z charakterystycznych temperatur obszarów tłoka oraz masy materiału, sztywności na obwodzie i wysokości. Zmiany wymiarowe tłoków po 1002 godzinach

pracy silnika są zbliżone. Występujące zatarcie wynika z nieco mniejszej średnicy kadłuba, odpowiedniego.



Rys. 4. Mikrostruktura metalu wyciętego z denka nowego tłoka poddanego starzeniu w piecu muflowym przez 24 godziny w temperaturze: 200 °C a), 215 °C b), 235 °C c), 250 °C d). Powiększenie 1200x a), b)

Tabela. 1. Skład chemiczny średni materiału tłoków

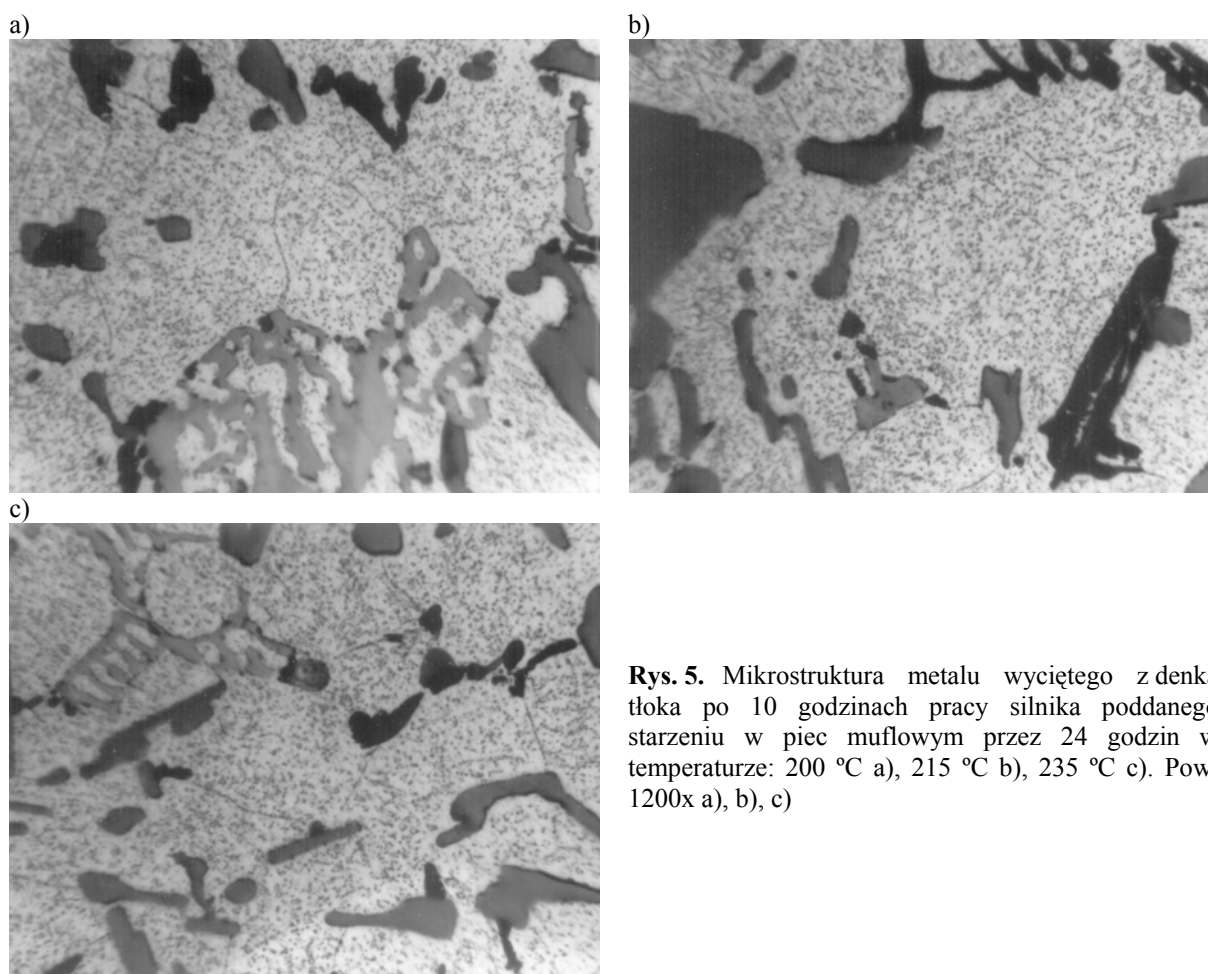
Stop	Skład chemiczny, % wagowo							
	Si	Mg	Cu	Ni	Fe	Mn	Zn	Al
AlSi12	12,95	0,80	1,50	1,08	0,30	0,10	0,05	84,22

Tabela 2. Trwałe zmiany wymiarów próbek z denek tłoków po procesie 24 h starzenia wraz ze współczynnikiem rozszerzalności cieplnej i twardością

Temperatura starzenia, przez 24 h	Trwałe zmiany wymiarów próbek z materiału tłoków nowych i po pracy silnika, ‰			
	Tłok nowy	Tłok po pracy 9h	Tłok po pracy 1002 h, bez uszkodzeń	Tłok po pracy 1002 h, zatarty
175 °C	0	0	0	0
200 °C	+ 0,26	+ 0,21	+ 0,05	+ 0,05
215 °C	+ 0,20	+ 0,18	+ 0,11	+ 0,11
235 °C	+ 0,14	+ 0,12	+ 0,14	+ 0,14
250 °C	-0,29	-0,23	-0,21	-0,20
Współczynnik rozszerzalności cieplnej, 20÷250 °C, K ⁻¹	2,3·10 ⁻⁵	2,2·10 ⁻⁵	2,0·10 ⁻⁵	2,1·10 ⁻⁵
Twardość, HB	119÷121	115÷119	86÷90	81÷84

Tabela. 3. Średnice i odchyłki okrągłości badanych tłoków silnika spalinowego

Wyszczególnienie	Tłok nowy	Tłok po pracy 9 h	Tłok po pracy 1002 h, bez uszkodzeń	Tłok po pracy 1002 h, zatarty
Średnica nominalna tłoka na wysokości 17 mm	79,978	79,976	79,954	79,956
Średnica tłoka na wysokości 45 mm	79,112	79,123	79,138	79,153
Odchyłka okrągłości na wysokości 45 mm	0,0694	0,0719	0,0797	0,0704

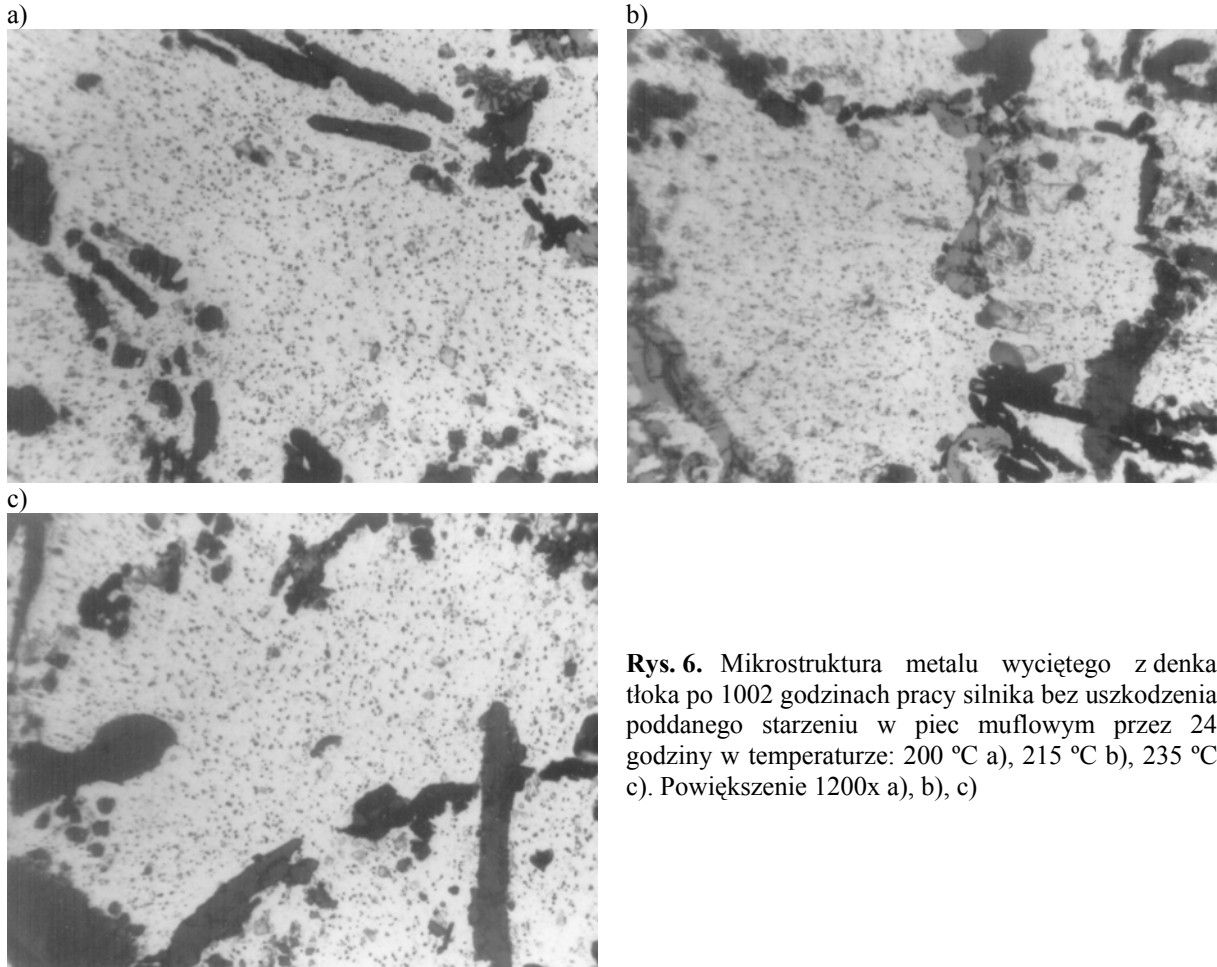


Rys. 5. Mikrostruktura metalu wyciętego z denka tłoka po 10 godzinach pracy silnika poddanego starzeniu w piec muflowym przez 24 godzin w temperaturze: 200 °C a), 215 °C b), 235 °C c). Pow. 1200x a), b), c)

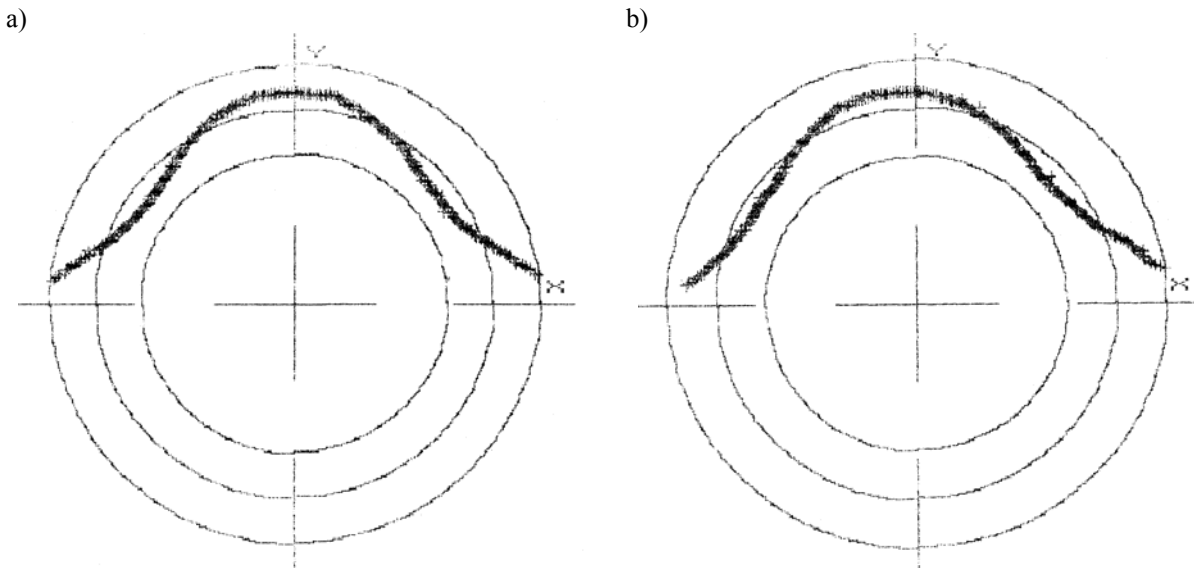
Twardość tłoka nowego i tłoka po 9 h pracy jest zbliżona i wynosi 115÷119 HB. Diametralnie ulega zmniejszeniu twardość tłoków po 1002 godzinnym badaniu niezawodności silnika. Nieco większą twardość mają próbki materiału denka tłoka, który był bez uszkodzeń gdyż wynosi 86÷90 HB a mniejszą próbki tłoka zatartego, 81÷84 HB. Uzyskane wartości interpretowano wpływem ciepła procesu zacierania.

Przykładowo zmianę średnicy i kształtu tłoka na wysokości 45 mm zamieszczono na rysunku 7. Występuje w tłoku po pracy 1002 godzin zwiększenie średnicy do wartości 79,159 mm. Z kolei tłok nowy miał tę średnicę 79,103 mm. Odchyłka okrągłości tłoka po pracy 1002 godzin zwiększa wartość do 0,0797 mm. W tłoku nowym wynosiła ona 0,0719 mm. Ma miejsce także zmiana kształtu zarysu niedomkniętego obwodu tłoka.

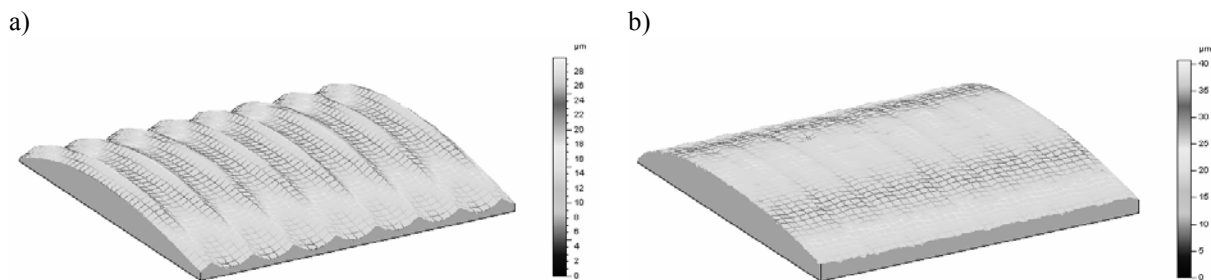
Zarazem można stwierdzić, że temperatura najsilniej nagrzanego tłoka denka, dochodziła do około 230 °C. Wynika to z porównania faz struktury metalograficznej tłoka, wydzielających się podczas 1002 godzinnej pracy silnika (rys. 3c, 3d, 3e, 3f), ze ich postacią



Rys. 6. Mikrostruktura metalu wyciętego z denka tłoka po 1002 godzinach pracy silnika bez uszkodzenia poddanego starzeniu w piec muflowym przez 24 godziny w temperaturze: 200 °C a), 215 °C b), 235 °C c). Powiększenie 1200x a), b), c)



Rys. 7. Wykres kształtu tłoka, dla jednego boku, wyznaczony na wysokości 45 mm: a) tłok nowy - średnica 79,103 mm, odchyłka okrągłości 0,0719 mm, odległość maksymalna od linii średniej do największego wymiaru promieniowego tłoka 0,0478 mm, odległość minimalna od linii średniej do najmniejszego wymiaru promieniowego tłoka -0,0241 mm, b) tłok po pracy 1002 h, zatarty - średnica 79,159 mm, odchyłka okrągłości 0,0797 mm, odległość maksymalna od linii średniej do największego wymiaru promieniowego tłoka 0,0540 mm, odległość minimalna od linii średniej do najmniejszego wymiaru promieniowego tłoka -0,0257 mm. Oś X jest osią otworu piast tłoka dla sworznia tłokowego



Rys. 8. Obrazy izometryczne powierzchni płaszczka tłoka: nowego a), po pracy 1002 h, bez uszkodzeń. Parametry chropowatości powierzchni toczzonej a): $S_a=1,92 \mu\text{m}$, $S_q=2,22 \mu\text{m}$, $S_z=8,95 \mu\text{m}$, $S_{sk}=0,52$, $S_{ku}=2,01$, $S_{ds}=635$ szczytów/ mm^2 , $S_{al}=0,0509 \text{ mm}$, $S_{fd}=2,31$, $S_k=3,3 \mu\text{m}$, $S_{pk}=3,96 \mu\text{m}$, $S_{vk}=0,14 \mu\text{m}$, $Sr1=31,7\%$, $Sr2=99,1\%$. Parametry chropowatości powierzchni po eksploatacji b): $S_a=1,05 \mu\text{m}$, $S_q=1,41 \mu\text{m}$, $S_z=10,32 \mu\text{m}$, $S_{sk}=-1,08$, $S_{ku}=6,17$, $S_{ds}=1504$ szczytów/ mm^2 , $S_{al}=0,127 \text{ mm}$, $S_{fd}=2,33$, $S_k=2,12 \mu\text{m}$, $S_{pk}=0,56 \mu\text{m}$, $S_{vk}=1,21 \mu\text{m}$, $Sr1=6,01\%$, $Sr2=87,2\%$

po starzeniu próbek tłoka nowego w dylatometrze (rys. 4). Można także przyjąć $225\div 230 \text{ }^\circ\text{C}$ jako największą temperaturę pracy tłoków. Czyli temperatura pracy tłoka jest wyższa od temperatury starzenia w procesie obróbki cieplnej producenta. Wskutek tego w materiale denka tłoka, podczas pracy silnika, zachodzi intensywnie proces starzenia, z czym wiąże się z puchnięcie tłoka w części koronowej, najsilniej nagrzanej.

Płaszcz nowego tłoka był toczony. Jego profil chropowatości powierzchni ma następujące parametry (filtr Gaussa, $\lambda_c=2,5 \text{ mm}$): $R_a=1,73 \mu\text{m}$, $R_q=2,06 \mu\text{m}$, $R_{tm}=6,81 \mu\text{m}$, $R_{sk}=0,92$, $R_{ku}=2,37$, $R_{\Delta q}=3,35^\circ$, $R_{HTp}=3,88 \mu\text{m}$, $R_{Sm}=0,238 \text{ mm}$ i $R_S=0,202 \text{ mm}$. Z kolei płaszcz tłoka po pracy 1002 godzin w silniku (bez stwierdzonych uszkodzeń), ma następujące ich wartości, odpowiednio: $R_a=0,56 \mu\text{m}$, $R_q=0,74 \mu\text{m}$, $R_{tm}=3,71 \mu\text{m}$, $R_{sk}=-0,64$, $R_{ku}=3,79$, $R_{\Delta q}=3,08^\circ$, $R_{HTp}=1,28 \mu\text{m}$, $R_{Sm}=0,063 \text{ mm}$ i $R_S=0,060 \text{ mm}$.

Charakterystyczne wartości parametrów powierzchni tłoka nowego są: wysokość chropowatości $S_a=1,92 \mu\text{m}$ i długość funkcji autokorelacji $S_{al}=0,0509 \text{ mm}$ (rys. 8). Po 1002 godzinach pracy silnika te parametry powierzchni płaszczka tłoka mają wartości $S_a=1,05 \mu\text{m}$ i $S_{al}=0,127 \text{ mm}$.

Płaszcz tłoka uległ zużyciu tribologicznemu. Zużycie płaszczka promieniowo wynosiło $3,10 \mu\text{m}$ (na podstawie zmiany parametru R_{tm}). Zmniejszyła się także średnia szerokość rowków elementu profilu R_{Sm} i średni odstęp miejscowych wzniesień R_S oraz diametralnie uległ zmianie charakter rozkładu amplitud i parametry krzywej udziału materiałowego (rys. 8).

5. WNIOSKI

Parametrem diagnostycznym utraty właściwości użytkowych tłoka jest twardość HB materiału. Twardość ulega znacznemu zmniejszeniu po długotrwałej eksploatacji silnika.

Symptomem diagnostycznym zacierania tłoków silników spalinowych jest temperatura, w której występują trwałe zmiany wymiarowe ich materiału. Zmiany wymiarowe stopu AlSi12 pozwalają jednoznacznie określić temperaturę stabilizowania (starzenia) przez producenta. W badanych tłokach była ona niższą niż $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Dla niezawodnej pracy tłoka temperatura starzenia musi być wyższa od temperatury tłoka występującej podczas pracy silnika spalinowego. Analiza mikrostruktury i zmian wymiarowych badanych tłoków umożliwia także określenie najwyższej temperatury pracy tłoków, wynoszącej $225\div 230 \text{ }^\circ\text{C}$. Zatarcie tłoka z AK12, po 1002 godzinach pracy silnika spalinowego, nastąpiło wskutek puchnięcia materiału. Jest to wynikiem zbyt niskiej temperatury procesu starzenia tłoka. Zatarcie na powierzchni płaszczka jest skutkiem wtórnym. Czynnikiem pierwotnym było zatarcie części koronowej, najsilniej nagrzanej.

Mikrostruktura materiału tłoków, w wyniku długotrwałej pracy silnika spalinowego, uległa zmianie. Rozdrobnieniu ulega krzem eutektyczny tj. faza β (Si), zwiększa się wielkość wydzieleni związków międzymetalicznych w roztworze α oraz następuje zwiększenie ziaren krzemu

pierwotnego. W nowych tłokach z siluminu AK12 struktura metalograficzna jest złożona z pierwotnych i eutektycznych ziaren krzemu oraz roztworu stałego α mającego umacniające fazy międzymetaliczne.

LITERATURA

- [1] Budzik G., Jaskólski J.: Obciążenia cieplne tłoków silników spalinowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.
- [2] Cempel C., Tomaszewski F.: Diagnostyka maszyn. Międzyresortowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego, Radom, 1992.
- [3] Cho D.H., Lee S.A., Lee Y.Z.: The effects of surface roughness and coatings on the tribological behavior of the surfaces of a piston skirt. Tribology Transactions, Vol. 53, s. 137-144, 2010.
- [4] Floweday G., Petrov S., Tait R.B., Press J.: Thermo-mechanical fatigue damage and failure of modern high performance diesel pistons. Engineering Failure Analysis, Vol. 18, s. 1664-1674, 2011.
- [5] Mansouri S.H., Wong V.W.: Effects of piston design parameters on piston secondary motion and skirt-liner friction. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, Vol. 219 (6), s. 435-449, 2005.
- [6] Pietrowski S.: Krystalizacja, struktura i właściwości siluminów tłokowych. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Monografie Nr 950, Łódź 1999.
- [7] Orłowicz W., Tupaj M., Mróz M.: Wpływ szybkości chłodzenia na strukturę siluminu AlSi7Mg0,3. Archiwum Odlewnictwa, Vol. 6, No 18 (1/2), s. 125-130, 2006.
- [8] Warmuzek M., Sieniawski J., Wicher K., Mrówka G.: The study of the distribution of the transition metals and Si during primary precipitation of the intermetallic phases in Al-Mn-Si alloys. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 175 (1-3), s. 421-426, 2006.
- [9] Wierzbńska M., Mrówka-Nowotnik G.: Identification of phase composition of AlSi5Cu2Mg aluminium alloy in T6 condition. Archives of Material Science and Engineering, Vol. 30 (2), s. 85-88, 2008.
- [10] Ye Z., Zhang C., Wang Y., Cheng H.S., Tung S., Wang Q.J., He X.: An experimental investigation of piston skirt scuffing: A piston scuffing apparatus, experiments, and scuffing mechanism analyses. Wear, Vol. 257 (1-2), s. 8-31, 2004.

CHANGE OF MATERIAL PROPERTIES OF PISTON MADE OF EUTECTIC SILUMIN ALSI12 AFTER LONG TIME ENGINE OPERATION

The article presents the microstructure, percentage elongation, hardness and geometry of the pistons made of silumin AK12 (alloy AlSi12) after the reliability test of spark-ignition engine of 1.6 liters capacity. The material properties of a new piston with the piston after three cycles of bench tests of a total duration of 9 hours are compared. The third and fourth piston has been analyzed by 334 cycles of reliability testing on the same engine, with a total time of 1002 hours of work. The third piston had only symptoms of abrasive wear on piston skirt. The fourth piston was seized in the fire and skirt fragments. Stable dimensional changes of piston material helped to determine the technological aging temperature lower than 200°C. The analysis of changes in the microstructure, hardness and size made it possible to adopt 225-230°C as the maximum operating temperature of the pistons. The initial seizure of the piston started at the crown, and the piston skirt seizure is the secondary effect.