

ANALIZA MATERIAŁU I GEOMETRII ZNISZCZONYCH WAŁÓW KORBOWYCH POWSTAŁYCH W PRÓBIE NIEZAWODNOŚCI SILNIKÓW SPALINOWYCH

Jacek MICHALSKI

W artykule analizowano czynniki materiałowe i geometryczne wpływające na powstałe zniszczenie awaryjnie wałów korbowych. Trzy wały uległy zniszczeniu w miejscu przyjscia czopa głównego pierwszego w czop korbowy poprzez ramię korbowe, podczas prób stanowiskowych niezawodności silników, trwających od 130 do 300 godzin. Przedstawiono mikrostrukturę, udarność i twardość wałów korbowych samochodu Polonez o silnikach CE, mających pojemność 1600 cm³. Określono mikrostrukturę: w strefie przypowierzchniowej, przejściowej i rdzeniu dla czopów głównych oraz korbowych, promieni przejść czopów w ramiona jak i w ramionach wału korbowego. Zamieszczono charakterystyczny profil zaokrąglenia między czopem głównym i ramieniem korbowym. Dokonano charakterystyki przełomu. Podano zalecenia analiz konstrukcyjnych, zmiany procesu technologicznego wytwarzania i rodzaju materiału wału korbowego stalowego.

1. WSTĘP

Wał korbowy (lub wał wykorbiony) jest elementem mechanizmu korbowego i jednym z głównych elementów silnika spalinowego [1, 2]. Jest także najdroższą (25-30%) i najcięższą (10-15%) jego częścią. Podczas pracy silnika wał korbowy podlega złożonym naprężeniom zmiennym od siły ciśnienia gazów, siły bezwładności oraz drgań skrętnych i zginających [3, 4, 5]. W analizie postaci i częstości drgań skrętno-giętych wałów korbowych silnika czterocylindrowego i sześciocylindrowego, stwierdzono większą przydatność, modelu bryłowego metody elementów skończonych aniżeli analizy Fouriera [6]. Miejsce pęknięcia czy zniszczenia wału jest trudne do przewidzenia [7, 8, 9]. Najczęściej przełomy mają charakter zmęczeniowy. Ich inicjacja jest w miejscu przejścia czopa w ramię korbowe, które stanowi naturalny karb geometryczny. Miejsce pęknięcia wału korbowego raczej nie zależy od momentu skręcającego (rzadko ma miejsce w zakończeniu tylnym i bliskości koła zamachowego) lecz od geometrii powierzchni, strefy przejściowej między warstwą utwardzoną i nie utwardzoną, struktury materiału, charakterystyki kanałów olejowych, karbów - zwłaszcza geometrycznych oraz rodzaju i amplitudy drgań skrętnych. Awaryjne zniszczenie wału korbowego silnika o mocy 1,5 MW, napędzającego generator, wynikło ze zbyt dużych naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa-Hencky'ego w obszarze promieni czopów korbowych [4]. Przeprowadzane badania metalograficzne uszkodzonych wałów korbowych często nie pozwalają na jednoznaczne określenie przyczyny ich zniszczenia [7, 8, 9].

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Wały korbowe najczęściej są stalowe kute lub odlewane. Współcześnie mogą być wytłaczane z rury, ciśnieniem cieczy o wartości 70 MPa [10]. W przypadku silnika dwusuwowego smarowanego mieszankowo, wał korbowy jest pełny i dzielony celem montażu łożysk tocznych przy czopach głównych i korbowych [11, 12]. Składane wały korbowe są stosowane w bardzo dużych silnikach okrętowych i przemysłowych, gdy odkucie i obróbka wału jednolitego przedstawiałaby poważne trudności, ze względu na wymiary i ciężar. Także w silnikach motocyklowych i lotniczych gwiazdowych, w których, ze względów konstrukcyjnych i montażowych wały muszą być wykonywane jako dzielone. W wielu silnikach wał korbowy jest zaopatrzony w przeciwcieżary, które mogą być odkute lub odlewane łącznie z wałem albo przykręcone śrubami. Wały korbowe napędzają zwykle kilka mechanizmów silnika spalinowego. Dokładność obróbki wałów korbowych, zwłaszcza czopów głównych oraz korbowych, powinna być bardzo duża. Czopy główne i korbowe obrabia się zwykle według 2 klasy dokładności, przy czym ich dopuszczalne odchyłki kształtu wynoszą od 0,005 do 0,02 mm, w zależności od przeznaczenia i wielkości silnika. W przypadku stosowania panewek cienkościennych istotną rolę odgrywają również odchyłki prostoliniowości czopów wynoszące 0,05-0,15 mm. Dopuszczalne odchyłki położenia wahają się zwykle w następujących granicach: odchyłka odległości pomiędzy

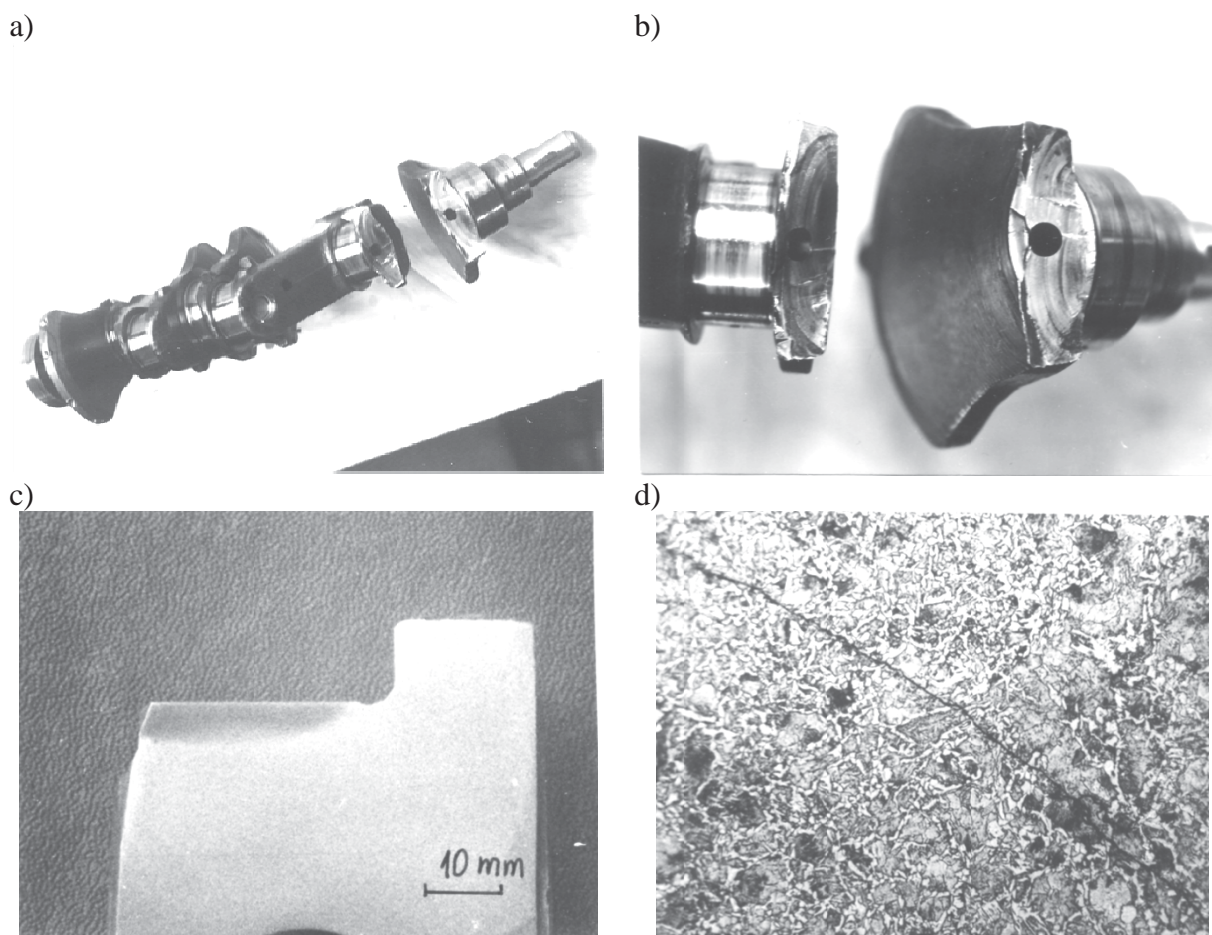
osiami czopów głównych i korbowych, czyli odchyłka promienia wykorbienia $\pm 0,15-0,2$ mm, nierównoległość osi czopów głównych i korbowych 0,01-0,02 mm na całej długości każdego czopa. Odchyłki współosiowości i prostoliniowości osi wału wynoszą zwykle 0,02-0,04 mm oraz odchyłki rozstawienia kąтового czopów korbowych $\pm 15-20'$. Gładkość powierzchni czopów głównych, korbowych i promieni przejść powinna również odpowiadać wysokim wymaganiom, zwykle wysokość chropowatości Ra wynosi $\leq 0,16$ μm .

Nagniatanie rolką promieni zaokrągleń czopów wału korbowego, o wartości 1,3 mm, zapewnia ich większą trwałość i niezawodność, dzięki wprowadzeniu odpowiednich naprężeń własnych [13]. Stal wału korbowego, kuta na gorąco AlSi H13 i azotowana, zwłaszcza w czasie 13 godzin według procesu technologicznego Sursulf, charakteryzuje się korzystną odpornością na zużycie w teście trzpień-tarcza. Wartość zużycie materiału, na krótkiej drodze tarcia, zależy od dwóch mechanizmów: odkształcenia plastycznego i zużycia ściernego. W przypadku dużych odległości ślizgania dominuje zużycie ściernie oraz zużycie poprzez utlenienie [14]. Azotowanie wałów korbowych jest często stosowane, aby zwiększyć ich trwałość i wytrzymałość zmęczeniową. Stwierdzono także bardzo małe zużycie czopów wału korbowego poddanego borowaniu laserowemu [15]. Wał korbowy silnika diesla, kuty ze stali 42CrMo i poddany azotowaniu, uległ awaryjnemu zniszczeniu zmęczeniowemu podczas użytkowania samochodu ciężarowego. Przyczyną był częściowy brak warstwy azotowanej w bliskim obszarze ramiona korbowego. Wynikało to z zbyt głębokiego szlifowania po azotowaniu i braku odpowiedniej staranności [16]. Awaryjne zniszczenie wału korbowego, napędzającego wałek rozrzędu za pomocą przekładni z kołami zębatymi walcowymi, nastąpiło po przebiegu 42000 km i było wynikiem zbyt małej głębokości warstwy azotowanej zębów [17]. Istnieje technologiczna możliwość napawania laserowego zużytych czopów wału korbowego silnika okrętowego, z zapewnieniem korzystnej twardości. Technologia ta nie uszkadza otworów olejowych czopów wału [18]. Zmęczeniowe zniszczenie wałów korbowych, ze stali węglowej 0,45% C, silników diesla jest inicjowane przy naprężeniach 175 MPa. Aby zapobiec powtórzeniu się awarii wałów korbowych promień zaokrągleń pomiędzy czopem a ramieniem korbowym musi być odpowiednio duży i mieć poprawny kształt geometryczny oraz obróbki wiórowe i końcowe szlifowaniem muszą być wykonana starannie [19]. Zniszczenie wału korbowego ze stali 40CrMnMo, silnika spycharki, po 20 min pracy było wywołane siłą tarcia, w procesie zacierania, nieoprawnie przeprowadzonej regeneracji i procesu technologicznego montażu. Stwierdzono podczas badań metaloznawczych, cztery pęknięcia na krawędzi otworu olejowego wzdłuż osi wału [20].

Zniszczenie wału korbowego silnika spalinowego było spowodowane drganiami harmonicznym i nastąpiło w rejonie rowka, gdzie wpływ geometrycznego współczynnika koncentracji naprężeń jest bardzo duży. Silnik napędzał sprężarkę klimatyzatora i generator [21]. Małe termiczne pęknięcia szlifierskie wzdłuż czopów wałów korbowych silników diesla ciągników, powstałe w procesie regeneracji, o przebiegu 300000 km, spowodowały ich uszkodzenie awaryjne po krótkotrwałej eksploatacji, 1000 km [22]. W masowym wytwarzaniu wałów korbowych ze stali i żeliwa, równocześnie szlifowaniem wglębnym kształtuje się powierzchnię walcową czopów i promienie zaokrągleń, z wydajnością nawet do 2000 mm³/mm·s, w wyniku optymalizacji cyklu dosuwu ściernicy i wysokiej prędkości skrawania, zapewniających niską temperaturę powierzchni obrabianej i integralność warstwy wierzchniej. Uzyskuje się to, ponieważ energia skrawania jest niska, dla tak wysokiej wydajności, natomiast ciepło skrawania zostaje unoszone poprzez produkty obróbki [23].

Tabela. 1. Skład chemiczny, uśredniony, stali badanych wałów korbowych

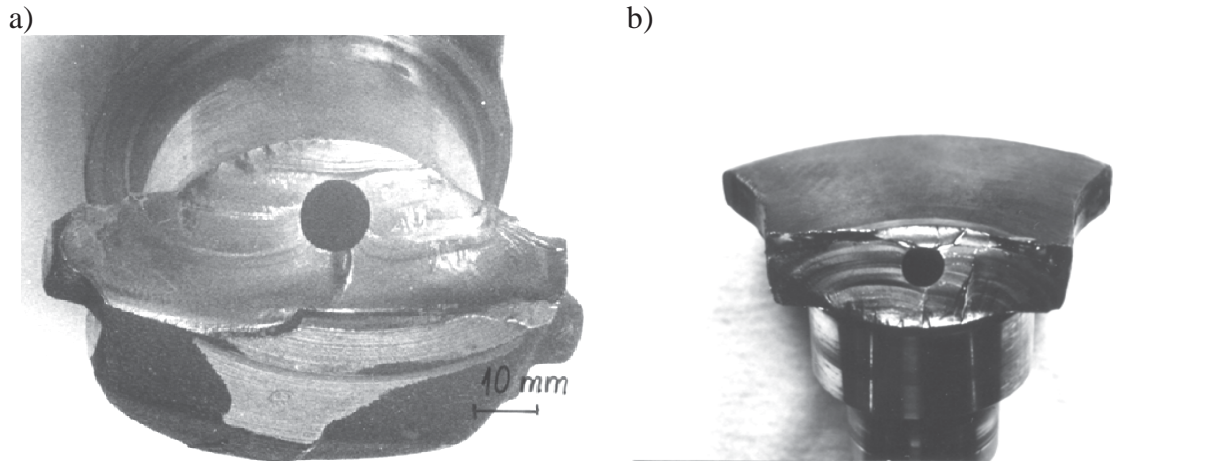
Stal gatunku	Skład chemiczny, % wagowo							
	C	P	S	Si	Mn	Ni	Cr	Cu
40	0,39	0,020	0,024	0,19	0,72	0,11	0,11	0,26



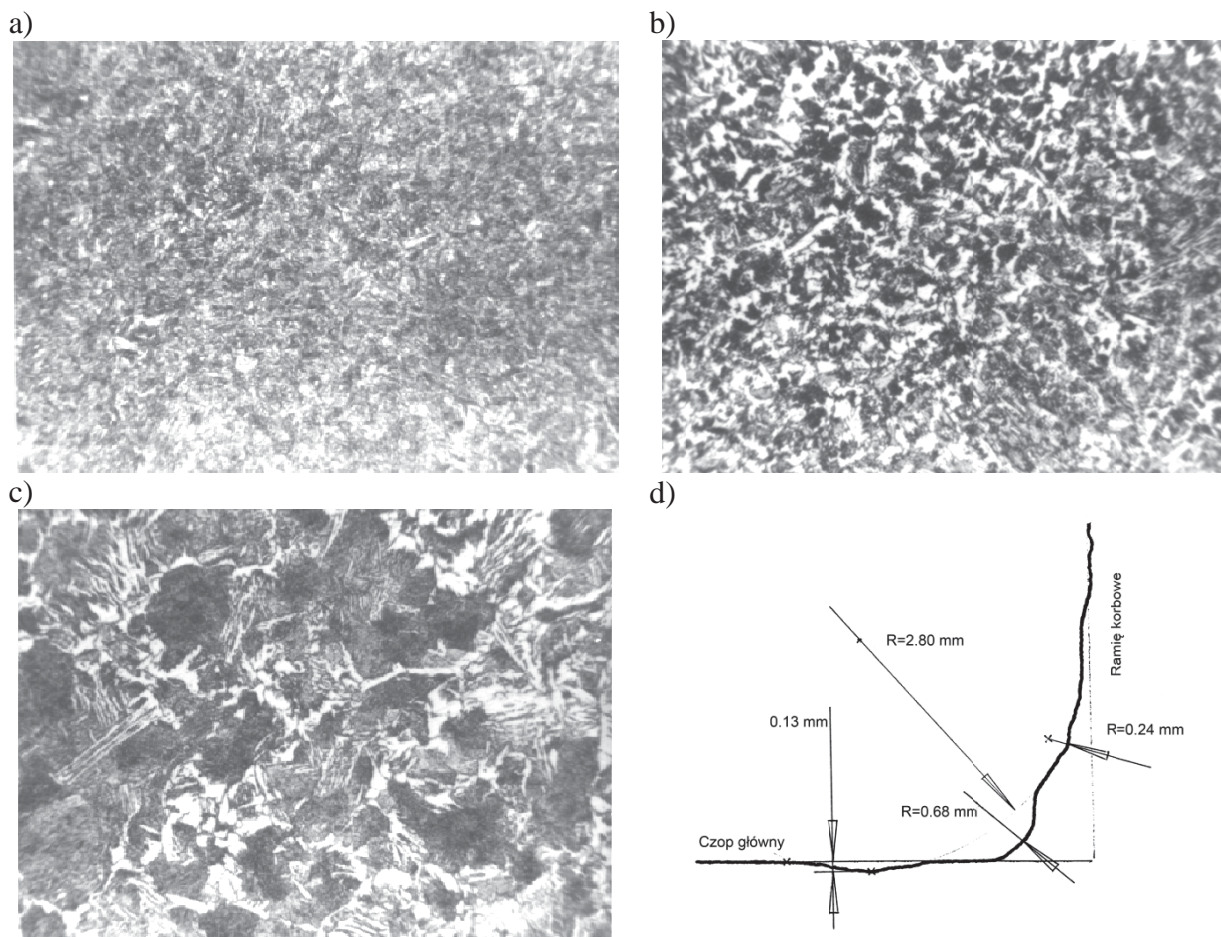
Rys. 1. Wyniki badań materiałowych: a) makrofotografia wału korbowego uszkodzonego awaryjnie po 300 h, b) makrofotografia przełomu zmęczeniowego, c) makrofotografia przekroju czopa głównego z ciemną strefą zahartowaną, d) pęknięcie zmęczeniowe w podtoczeniu – przebiegające niezależnie od elementów struktury (igły ferrytu na tle gruboziarnistego perlitu), pow. 250x

Podstawowym materiałem wałów korbowych kutych matrycowo są stale węglowe wyższej jakości do ulepszenia cieplnego o zawartości od 0,40% do 0,55% węgla i wytrzymałości na rozciąganie $R_m=700-800$ MPa (gatunki 40, 45 i 55). Często stosowanym materiałem są stale konstrukcyjne stopowe, najczęściej niklowe (3% Ni), chromowo-niklowe, chromowo-wanadowe lub podobne (gatunki 18HGM, 40H, 40 HM i 36 HWM). Stale stopowe stosuje się na wały korbowe wyższej wytrzymałości, zwłaszcza zmęczeniowej, oraz o większej twardości czopów. Surowe odkuwki są często po kuciu wyżarzane i normalizowane oraz następnie ulepszone cieplnie. Po obróbce mechanicznej czopy utwardza się powierzchniowo (najczęściej hartuje powierzchniowo, niekiedy nawęgla i hartuje lub azotuje) oraz zwykle odpuszcza [24]. Istnieje możliwość modelowania w procesie kucia matrycowego na gorąco: przepływu metalu, pola temperatury, kształtu wad i wykorzystania materiału za pomocą oprogramowania Ansys/LS-Dyna [25].

Obecnie coraz częściej wały korbowe są odlewane z żeliwa sferoidalnego lub perlitycznego rzadziej staliwa. Żeliwo zawiera do 2,6% C; 1,2% Ni; 1,8% Mn oraz 2,2% Si. Żeliwo takie ma własności fizyczne zbliżone do stali. Zmęczeniowe zniszczenie wału korbowego silnika wysokoprężnego w obszarze promienia czopa głównego, o powierzchniach hartowanych indukcyjnie, wynikało z niewłaściwej twardości materiału, niepełnej sferoidyzacji i obecności wolnego grafitu w żeliwie sferoidalnym [26]. Podczas wiercenia promieniowych otworów olejowych w wałach korbowych z żeliwa sferoidalnego pękały awaryjnie wiertła i pozostawały w jego materiale. Materiał wału miał w tych miejscach najwyższą zawartość węgla i miedzi oraz najwyższą wartość twardość Vickersa oraz drobnoziarnisty perlit [27].



Rys. 2. Makrofotografia faktografii przełamów zmęczeniowych z niedużym przełamem doraźnym - dołomem: a) przełam po 130 h próbie niezawodności, b) przełam po 300 h próbie niezawodności



Rys. 3. Wyniki badań materiałowych czopa głównego: a) strefa zahartowana (martenzyt), pow. 500x, b) strefa przejściowa (drobnoziarnisty ferryt i perlit skrytopłytkowy), pow. 500x, c) rdzeń wału (igły ferrytu i gruboziarnisty perlit – struktura Widmannstättena), pow. 500x, d) profil zaokrąglenia między czopem głównym i ramieniem korbowym – pęknięcie nastąpiło w miejscu oznaczonym promieniem $R=0,24$ mm (poprawny promień winien wynosić $R=2,8$ mm)

3. METODYKA BADAŃ

Analizowano trzy wały korbowe zniszczone awaryjnie po 130, 160 i 200 godzinach pracy silnika podczas badań stanowiskowych niezawodności modernizowanego silnika 115DB.6A.0000.76 Fiat (rys. 1). Wały miały zwiększoną średnicę otworów kanału olejowego.

Silniki były pojemności 1,6 dm³. Wały zaopatrzone w nową konstrukcję układu zasilania - wtrysk wielopunktowy i układ zapłonowy. Badania prowadzono zgodnie z stacjonarnym testem ESC (European Stationary Cycle) w 13 cyklach o łącznym czasie jednego etapu 28 min. Po 4 minutach pracy na obrotach biegu luzem, wykonano 12 cykli badań po 2 min, każdy o odpowiednio odmiennym momencie obciążenia i prędkości obrotowej.

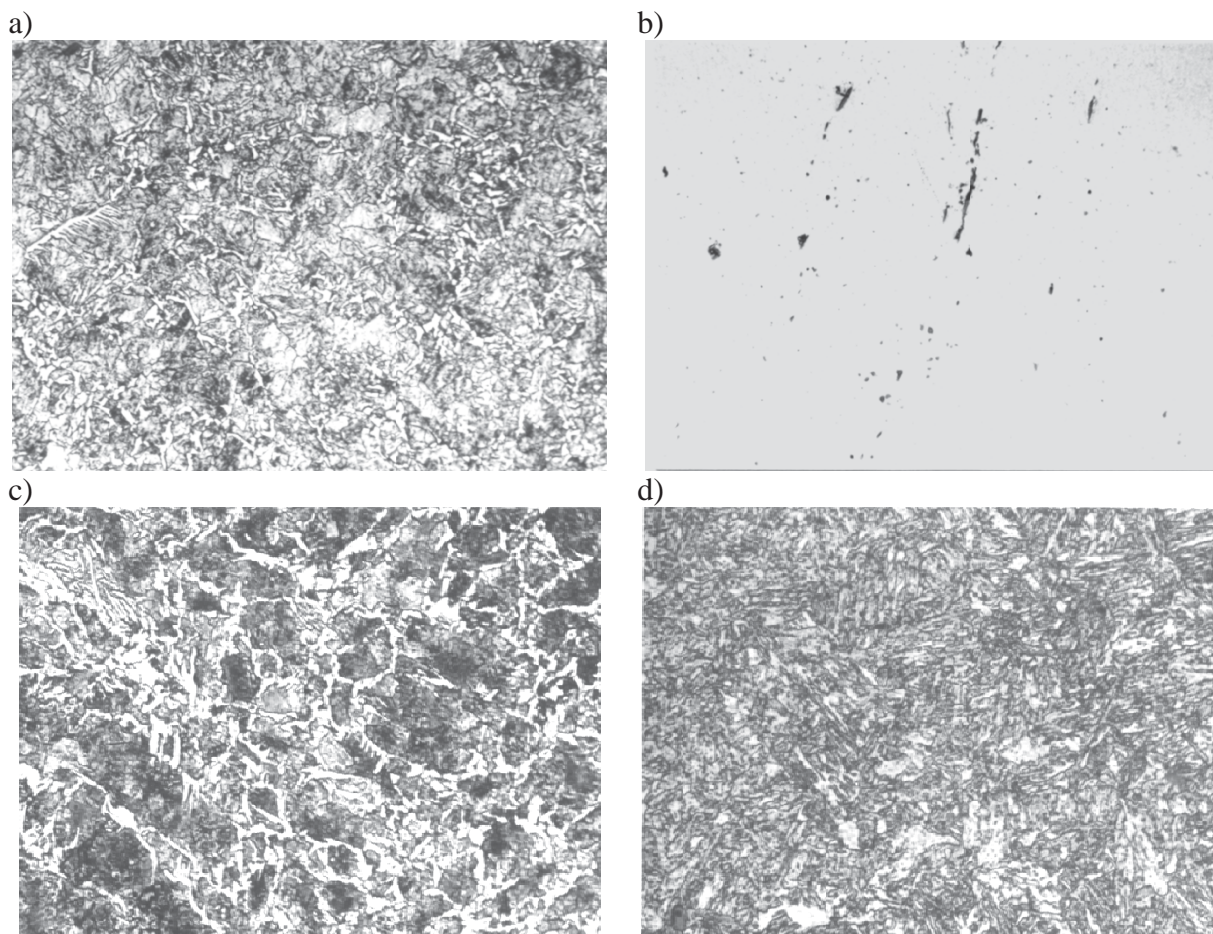
Przeprowadzono badania metalograficzne mikrostruktury wałów korbowych w strefie przypowierzchniowej, przejściowej i rdzeniu czopów głównych i korbowych, promieniach przejść czopów w ramiona oraz w ramionach. Analizowano mikrostrukturę we wszystkich przekrojach krytycznych wału korbowego w tym wtrącenia niemetaliczne. Jako krytyczny przyjęto przekrój przechodzący pomiędzy podtoczonym zaokrągleniem czopa głównego i ramieniem korbowym oraz odpowiednie podtoczenie czopa korbowego. Obserwacje prowadzono mikroskopem Carl Zeiss Jena, typu Neophot - 2. Skład chemiczny materiału wyznaczono spektrometrem emisyjnym ze wzbudzeniem jarzeniowym LECO GDS 850. Określono na odpowiednich próbkach materiału, wyciętego z wałów korbowych, głębokość odwęglenia, wytrzymałość na rozciąganie R_m, R_e, A₅, udarność KCU 2 i twardość HB Brinella. Stosowano w próbach rozciągania maszynę wytrzymałościową UTS 100 Testsysteme. Pomiaru geometryczne przeprowadzono współrzędnościową maszyną pomiarową Mitutoyo FN 1106. Głębokość odwęglenia zmierzono zgodnie z PN-75/H-05406, stosując metodę metalograficzną - M1. Twardość zmierzono metodą Brinella zgodnie z normą PN-78/H-04350. Udarność oceniono na 4 próbkach wyciętych z ramienia korbowego łączącego III i IV czop korbowy. Stosowano próbki z karbem U o głębokości 2 mm i młot Charpy'ego o energii 150 J (KCU 2/150), zgodnie z PN-79/H-04370.

4. WYNIKI BADAŃ

Wszystkie wał korbowe był zniszczone, rozdzielone na dwie części. Pęknięcie przebiegało przez ramię korbowe pomiędzy pierwszym czopem głównym i pierwszym czopem korbowym, od strony zakończenia przedniego - rozrządu. Przełom (rys. 1a, 1b, 2a, 2b) ma typowy wygląd przełomu zmęczeniowego. Strefa zmęczeniowa, która rozwinęła się od czopa głównego obejmuje dużą (większą) część przełomu. Proces pęknięcia rozpoczął się w materiale ramiona korbowego w miejscu przejścia zaokrąglenia czopa głównego w płaszczyznę czołową ramienia. W przeciwnym kierunku, od strony czopa korbowego również rozwinęło się pęknięcie zmęczeniowe. Jego strefa jest wąska i rozciąga się przez całe ramię korbowe. Pomiędzy nimi, przy zewnętrznych krawędziach ramienia, znajdują się nieduże przełomy doraźne (dołomy rys. 2). Świadczący o dołamaniu się wału na znacznym przekroju czynnym (rys. 2). Oś przełomu tworzy z osią wału nieduży kąt, co jest typowe przy łącznym działaniu naprężeń zginających i skręcających. Występuje to przy decydującym udziale naprężeń zginających.

Obok pęknięcia niszczącego wały, w podtoczeniach o strukturze igły ferrytu na tle gruboziarnistego perlitu, rozwinęły się również inne pęknięcia (rys. 1d), które powstały i przebiegają niezależnie od elementów struktury.

Skład chemiczny analizowanych wałów korbowych zamieszczono w tabeli 1. Odpowiada on stali w gatunku 40. W strukturze materiału widoczne są wytrącenia niemetaliczne, głównie siarczki (rys. 4b). Głębokość odwęglenia, oceniona grubość całkowitą strefy odwęglenia; zależnie od miejsca oceny, wynosi 0,4-0,5 mm. Twardość zmierzono na ramieniu korbowym w obszarze czopa środkowego wynosiła 240-260 HB, według metody Brinella, przy zastosowaniu kulki o średnicy 10 mm i sile 3 kN od masy 300 kg. Twardość materiału rdze-



Rys. 4. Mikrostruktura stali 40: a) w strefie zniszczenia (igły ferrytu na tle gruboziarnistego perlitu) pow. 250x, b) wtrącenia niemetaliczne w strefie zniszczenia wału, pow. 100x, c) typowa mikrostruktura przekroju czopa głównego pierwszego przy podtoczeniu (feryt – jasny, perlit), d) strefa przypowierzchniowa ramiona korbowego, w miejscu nie obrobionym mechanicznie (sorbit iglasty). Pow. 500x

nia zmierzono na przekroju przechodzącym przez przednie podcięcie obróbkowe pierwszego czopa głównego $HB_{sr}=198$ (187-207) oraz na powierzchni ramion korbowych $HB=240\pm 10$. Stosowano tutaj kulkę 2,5 mm i obciążenie od masy 187,5 kg. Oszacowana udarność wynosiła 117, 114, 120 i 109 J/cm². Jej poprawna wartość dla stali gatunku 40, świadczy o małym znaczeniu wtrąceń niemetalicznych (rys. 4b).

Powierzchnia czopa głównego i korbowego ma twardość 59-63 HRC nadaną przez hartowanie indukcyjne. Strefa hartowana indukcyjnie (rys. 1c) na czopie głównym wykonana jest poprawnie. Kończy się we właściwej odległości około 5 mm, od płaszczyzny czołowej ramienia korbowego. Nie zachodzi na zaokrąglenie promienia czopa. Również strefa zahartowana czopa korbowego kończy się poprawnie.

Mikrostrukturę strefy zahartowanej powierzchni czopa głównego, strefy przejściowej leżącej pod strefą zahartowaną oraz materiału rdzenia przedstawiono na rysunkach 3a, 3b, 3c, 4a i 4c. W strefie zahartowanej stal ma strukturę drobnolistwowego martenzytu, bez ziaren wolnego ferrytu (rys. 3a), co świadczy że proces hartowania przeprowadzono poprawnie.

Pod strefą zahartowaną znajduje się strefa normalizowania (rys. 3b). W strefie tej nastąpiło przekształcenie struktury i powstanie mieszaniny drobnych ziaren ferrytu w postaci siatki oraz ziaren perlitu skrytopłytkowego. Udział ferrytu w tej strefie jest dość znaczny, w niektórych miejscach dochodzi do 25% (wzorzec nr 4/7 wg PN-66/H-04505). Struktura ta jest poprawna. Strefa ta powstaje zawsze przy hartowaniu powierzchniowym stali niestopowej.

Metal rdzenia wału korbowego (rys. 3c) ma strukturę gruboziarnistą, przegrzaną. Struktura taka, tzw. struktura Widmannstättena, jest niekorzystna. Obniża, w zasadzie wszystkie parametry

charakteryzujące plastyczność stali. Powstaje ona, gdy nie są dostatecznie przestrzegane ciepłne parametry kucia. Jest ono prowadzone i zakończone w zbyt wysokiej temperaturze. W przypadku analizowanego zniszczenia wału korbowego, ta struktura może być uznana za czynnik; ułatwiający powstanie ogniska pęknięcia i przyspieszający jego rozwój. Ułatwia bowiem zarodkowanie oraz szybkie rozprzestrzenianie się pęknięć zmęczeniowych, ale nie jako czynnik, który wywołał analizowane zniszczenie.

Stosowane hartowanie wału, od temperatury kucia, przy dużym ziarnie austenitu, doprowadziło do wydzielenia się gruboiglastego martenzytu a po odpuszczeniu - sorbitu (rys. 4d). Taką mikrostrukturę stwierdzono także we wszystkich miejscach ulepszonych cieplnie (część przednia wału korbowego, ramię między trzecim i czwartym czopem korbowym). Wielkość igieł w sorbicie nie przekracza jednak dopuszczalnej (S8). W warstwie tej wolny ferryt nie występuje, lub jego udział jest minimalny (wzorce F0-F2).

W przekrojach przyjętych jako krytyczne, stal w większości przekroju, posiada strukturę gruboiglastych wydzieleni ferrytu na tle gruboziarnistego perlitu, tzw. strukturę Widmannstättena (rys. 4a, 4c). Świadczy to, że nie występuje tutaj strefa ulepszona cieplnie. Oznacza to, że podczas toczenia czopów warstwa ulepszona cieplnie uległa całkowitemu usunięciu. Ulepszona cieplnie warstwa przypowierzchniowa odkuwki (rys. 4d), o grubości typowej, ~5 mm, jak dla tych przekroi stali 40, oraz jej całkowity brak w miejscach obrobionych skrawaniem to efekt zbyt dużych naddatków na obróbkę.

Części odkuwki o mniejszych przekrojach (część przednia wału korbowego, ramiona między czopami) zostały ulepszone w całym przekroju (stan T). Natomiast w części odkuwki o dużych przekrojach (czopy) ulepszona została tylko warstwa przypowierzchniowa.

Przeprowadzono również analizę profilu zaokrąglenia pomiędzy pierwszym czopem głównym a płaszczyzną ramienia korbowego, rys. 3d. Zaokrąglenie to wykonane jest promieniem podstawowym $R \sim 2,8$ mm, ale zawiera wcięcia o znacznie mniejszych promieniach. Analizowane, w wale korbowym o trwałości 300 h, pęknięcie rozwijało się wzdłuż podcięcia oznaczonego promieniem $R=0,24$ mm. Również zaokrąglenie między czopem korbowym a płaszczyzną ramienia korbowego wykonane jest promieniem podstawowym $R \sim 2,8$ mm. Ono również zawiera podcięcia, które mają małe promienie: $R \sim 0,5$ mm i $R \sim 0,3$ mm.

5. WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań metaloznawczych oraz pomiarów geometrycznych przejść czopów w ramię korbowe nie uzasadniają preferowanego umiejscowienia pęknięć zmęczeniowych kolejnych wałów. W strefie inicjacji pęknięć nie stwierdzono wad materiałowych. Warstwa wierzchnia czopów - głównego i korbowego jest zahartowana poprawnie.

Przyczyną pęknięcia zmęczeniowego wałów korbowych jest przypuszczalnie niewystarczająca wytrzymałość materiału na zaistniały stan odkształceń i naprężeń. W obszarze promieni przejścia czopów w ramiona korbowe struktura to igły ferrytu na tle gruboziarnistego perlit - struktura Widmannstättena. O niewystarczającej wytrzymałości tej struktury materiału świadczy występowanie także innych pęknięć w podtoczeniach, przebiegających niezależnie od elementów struktury. Sugeruje to natomiast konieczność przeprowadzenia analizy stanu drgań i naprężeń w tym przekroju oraz ewentualnie analizę technologii pod kątem zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej stosowanego materiału (normalizowanie po kuciu lub ulepszenie cieplne ze zmianą gatunku stali, o większej hartowności, korzystnie 40H).

Niedokładnie wykonane (ostre, z podcięciami) promienie przejść czopa głównego i korbowego w przeciwagę, na których rozwinęło się pęknięcie, mogą być jedynie miejscami ułatwiającymi jego lokalizację. Przykładowo w wale korbowym zniszczonym po 300 godzinach pracy silnika, ognisko pęknięcia powstało i pęknięcie zmęczeniowe rozwijało się wzdłuż podcięcia wykonanego promieniem $R=0,24$ mm na przejściu zaokrąglenia w płaszczyznę czołową ramiona korbowe.

Należy także stwierdzić, iż odpowiednie zastosowanie przez producenta sugerowanej stali 40H, wyeliminowało awaryjną uszkodzenia wałów korbowych w eksploatacji.

LITERATURA

- [1] Dąbrowski Z.: Wały maszynowe. Seria: Podstawy Konstrukcji Maszyn. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1999.
- [2] Mazanek E. (red.): Przykłady obliczeń z podstaw konstrukcji maszyn. Wyd. 2. T. 1. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2008.
- [3] Dietrich M. (red.): Podstawy konstrukcji maszyn. Wyd. 3. T. 2. Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1999.
- [4] Espadafor F.J., Villanueva, J.B., García M.T.: Analysis of a diesel generator crankshaft failure. *Engineering Failure Analysis* Vol. 16 (7), s. 2333-2341, 2009.
- [5] Mourelatos Z. P.: An efficient crankshaft dynamic analysis using substructuring with Ritz vectors. *Journal of Sound and Vibration* Vol. 238 (3), s. 495-527, 2000.
- [6] Kang Y., Sheen G.-J., Tseng M.-H., Tu S.-H., Chiang H.-W.: Modal analyses and experiments for engine crankshafts. *Journal of Sound and Vibration* Vol. 214 (3), s. 413-430, 1998.
- [7] Stupnicka H., Wrona J.: Badania przyczyn zniszczenia wału korbowego silnika ZS z wtryskiem bezpośrednim. *Explo-Sil.* 92, Gdynia s. 122-127, 1992.
- [8] Wilczyński A.: Awaryjne silników spalinowych. Uszkodzenia w układach korbowych. Łódź, Wydawnictwo MiW, 1996.
- [9] Ktari A., Haddar N., Ayedi H.F.: Fatigue fracture expertise of train engine crankshafts. *Engineering Failure Analysis* Vol. 18 (3), s. 1085-1093, 2011.
- [10] Lin J.F., Yuan S.J.: Influence of internal pressure on hydroforming of double handles crankshaft. *Materials Science & Engineering A* Vol. 499 (1-2), s. 208-211, 2009.
- [11] Wajand J.A., Wajand J.T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2005.
- [12] Zajac P.: Silniki pojazdów samochodowych. Warszawa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2009.
- [13] Ho S., Lee Y-L, Kang H-T, Wang C.J.: Optimization of a crankshaft rolling process for durability. *International Journal of Fatigue* Vol. 31 (5), s. 799-808, 2009.
- [14] Castro G.; Fernández-Vicente A.; Cid J.: Influence of the nitriding time in the wear behaviour of an AISI H13 steel during a crankshaft forging process. *Wear* Vol. 263 (7-12), s. 1375-1385, 2007.
- [15] Lubas J.: Practical application of boron-modified sliding pairs in I.C. engine. *Tribology International* Vol. 43 (11), s. 2046-2050, 2010.
- [16] Yu Z., Xu X.: Failure analysis of a diesel engine crankshaft. *Engineering Failure Analysis* Vol. 12 (3), s. 487-495, 2005.
- [17] Yu Z. Xu X.: Failure investigation of a truck diesel engine gear train consisting of crankshaft and camshaft gears. *Engineering Failure Analysis* Vol. 17 (2), s. 537-545, 2010.
- [18] Koehler H., Partes K., Seefeld T., Vollertsen F.: Laser reconditioning of crankshafts: From lab to application. *Physics Procedia* Vol. 5 (Part A), s. 387-397, 2010.
- [19] Pandey R.K.: Failure of diesel-engine crankshafts. *Engineering Failure Analysis* Vol. 10 (2), s. 65-175, 2003.
- [20] Wang Ch., Zhao Ch., Wang D.: Analysis of an unusual crankshaft failure. *Engineering Failure Analysis* Vol. 12 (3), s. 465-473, 2005.
- [21] Becerra, J.A.; Jimenez, F.J.; Torres, M.; Sanchez, D.T.; Carvajal, E.: Failure analysis of reciprocating compressor crankshafts. *Engineering Failure Analysis* Vol. 18 (2), s. 735-746, 2011.
- [22] Silva F.S.: Analysis of a vehicle crankshaft failure. *Engineering Failure Analysis* Vol. 10 (5), s. 605-616, 2003.
- [23] Comley P., Walton I., Jin T., Stephenson D.J.: A high material removal rate grinding process for the production of automotive crankshafts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* Vol. 55 (1), s. 347-350, 2006.
- [24] Sińczak J.: Procesy przeróbki plastycznej. Kraków, Wydawnictwo Naukowe AKAPIT, 2001.

- [25] Zhang Y-J, Hui W-J, Dong H.: Hot forging simulation analysis and application of microalloyed steel crankshaft. *Journal of Iron and Steel Research International* Vol. 14 (5), Supplement 1, September, s. 89-194, 2007.
- [26] Asi O.: Failure analysis of a crankshaft made from ductile cast iron. *Engineering Failure Analysis* Vol. 13 (8), s. 1260-1267, 2006.
- [27] Neri M.A., Carreño C.: Effect of copper content on the microstructure and mechanical properties of a modified nodular iron. *Materials Characterization* Vol. 51 (4), s. 219-224, 2003.

FAILURE ANALYSIS CRANKSHAFTS CAUSED THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE RELIABILITY TEST ACCORDING TO CHARACTERISTICS OF MATERIAL AND GEOMETRY

The article analyzed the material and geometric factors affecting the crash caused the destruction of crankshafts. Three shafts were destroyed at the coming of the first in the main pivot crank pin through the crank arm, the reliability of the engine bench tests, lasting from 130 to 300 hours. Shows the microstructure, toughness and hardness of crankshafts for engines Polonez CE with capacity 1600 cm³. Determined the microstructure of the surface zone, transitional and core for the main journals and crank, the rays go pivots the arms and shoulders as the crankshaft. Posted distinctive profile and rounded between the main valve and crank arm. There have been a breakthrough performance. Set of recommendations structural analysis, changes in the technological process and the type of material steel crankshaft.