

POLITECHNIKA LUBELSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA INŻYNIERII
MATERIAŁOWEJ

**Laboratorium
Inżynierii
Materiałowej**

Uszkodzenia elementów pojazdów

Ćwiczenie nr 3

„Badania metalograficzne makroskopowe”

dr inż. Leszek Gardyński

Lublin 2016

dr inż. Leszek Gardyński

Uszkodzenia elementów pojazdów

Szczególnym rodzajem zużycia elementów pojazdów są różnego rodzaju uszkodzenia w tym pęknięcia. Treść bieżącego rozdziału stanowi przybliżenie problematyki powstawania i prezentacja wybranych przykładów przełomów.

Przełomy doraźne

Z przełomem mamy do czynienia, gdy nastąpi uszkodzenie elementu polegające na jego urwaniu, skręceniu, zgięciu lub innym sposobie zniszczenia, któremu towarzyszy powstanie (odsłonięcie) powierzchni składających się z cząstek, które przed zdarzeniem znajdowały się wewnątrz przedmiotu i właśnie te powierzchnie nazywa się przełomami. Przełom nazywamy doraźnym, gdy uszkodzenie następuje w wyniku jednorazowego przekroczenia wytrzymałości elementu przez wywołane jego obciążeniami naprężenia.

Wygląd powierzchni przełomu zależy od wielu czynników, takich jak np.:

- rodzaj, gatunek i stan materiału, w tym wielkość ziarna,
- szybkość zadziałania obciążenia,
- temperatura,
- historia elementu,
- rodzaj obciążenia,

W związku z powyższym nawet taki sam przedmiot, wykonany z tego samego materiału może ulec uszkodzeniu z wytworzeniem przełomu (przełomów) o zupełnie innym wyglądzie. Przedmioty o drobnym ziarnie, zwykle po obróbce cieplnej mają przełomy mniej chropowate i jaśniejsze – „suche”. Mniej twarde materiały charakteryzują się zwykle przełomami bardziej „ziarnistymi”, chropowatymi, często na ich wygląd mają wpływ istniejące w przedmiocie linie płynięcia, powstałe w wyniku przeróbki plastycznej. Wyższe temperatury i niższe prędkości obciążania powodują skłonność do „rozluźniania” ziarn i powstawania bardziej chropowatych przełomów międzykrystalicznych, co jest związane między innymi z występowaniem zanieczyszczeń na granicach ziarn. Na kolor przełomu wpływa w dużej mierze zawartość wydzielen, co można wykorzystywać do częściowej identyfikacji i oceny jakości stopów, np. żeliw.

W celu zilustrowania różnorodności wyglądu uzyskiwanych przełomów zestawiono poniżej wynik statycznego zginania trzech śrub M10 o jednakowym kształcie wykonanych w klasach wytrzymałości 5.8, 8.8 i 10.9 (zmierzone wartości twardości odpowiednio 26, 30 i 41 HRC). Jak widać w miarę wzrostu wytrzymałości i twardości przełom staje się coraz bardziej gładki. W każdym przypadku w miejscu, znajdującym się po stronie działania siły (strona ściskana przełomu), powstaje charakterystyczna strefa – „zawias”, umożliwiająca określenie kierunku zginania.

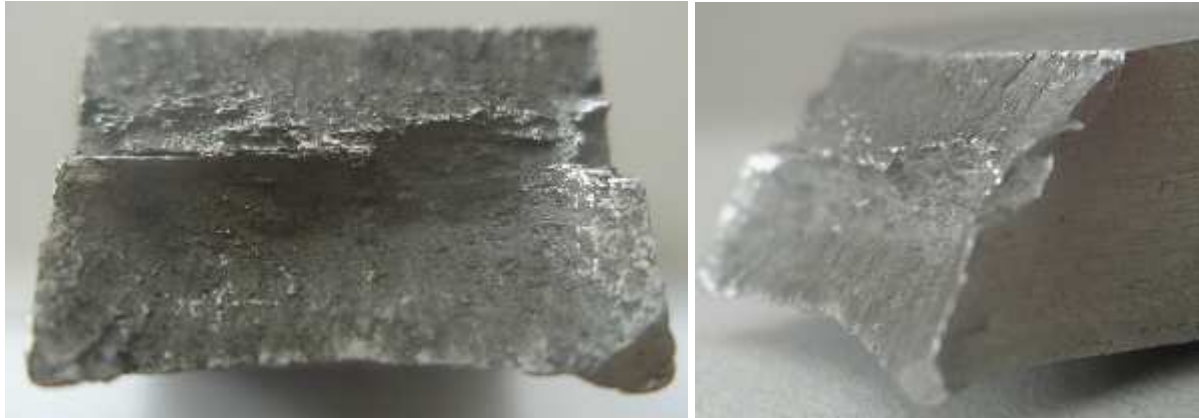




Wygląd łbów i przełomów badanych śrub M10 oraz zestawienie w celu zilustrowania kątów trwałego zgięcia, przy których śruby uległy zniszczeniu.



Dwie części przełomu doraźnego tłoczyska amortyzatora kolumny McPhersona (Daewoo Nubira). Przełom powstał przy pełnym wysunięciu tłoczyska w wyniku uderzenia pojazdu w drzewo. Powierzchnie obu przełomów pokryte nalotem produktów korozji powstałych po zdarzeniu.



Przełom powstały w wyniku zerwania próbki stalowej na maszynie wytrzymałościowej. W środkowej strefie „bardziej chropowaty” występ (uskok) – wynik mniejszego stopnia przewalcowania wewnątrz materiału. Pęknięcie próbki nastąpiło pod kątem 45°, a więc w płaszczyźnie największych naprężeń tnących.



Chropowaty przełom ucha tulei dławicy pompy wodnej, wykonanej z żeliwa szarego.



Doraźnie „ukręcona” końcówka czopa wału głównego przekładni kierowniczej (BMW serii 7), zastosowanej w samochodzie terenowym. Przyczyna – najechanie przednim kołem na twardą przeszkodę. Później powstały nalot korozyjny.



Dwie powierzchnie przełomu półosi napędowej, powstałego w miejscu osłabionym przez korozję pod gumowym tłumikiem drgań skrętnych (Nissan Primera). Widoczne różnice w wielkości ziarna przy powierzchni i wewnątrz przekroju. Spiralny kształt wynika z działania naprężeń skręcających.

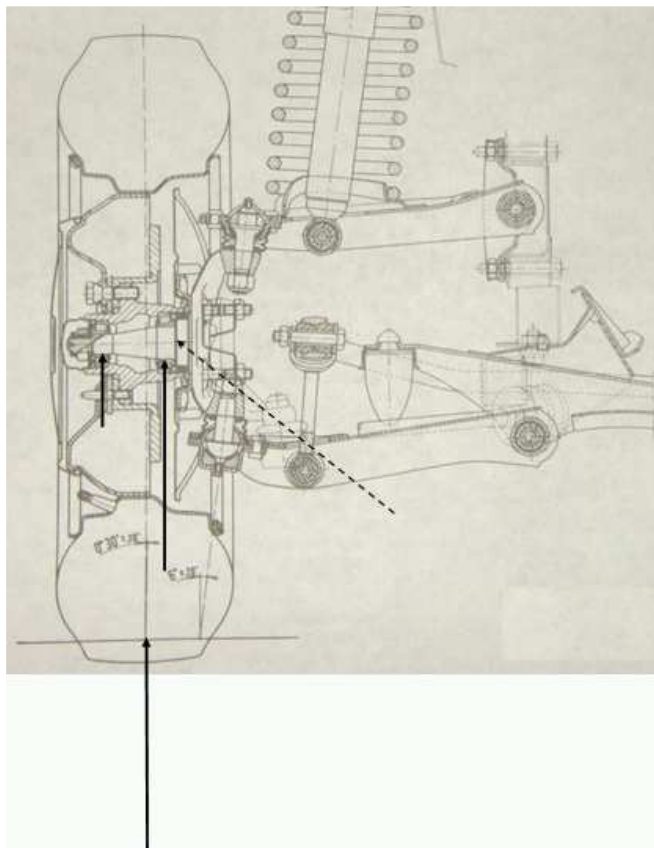


Odłamek korpusu artyleryjskiego pocisku odłamkowo-burzącego. Wielokrotne przełomy doraźne w płaszczyznach największych naprężeń tnących skorupy.

Przełomy zmęczeniowe

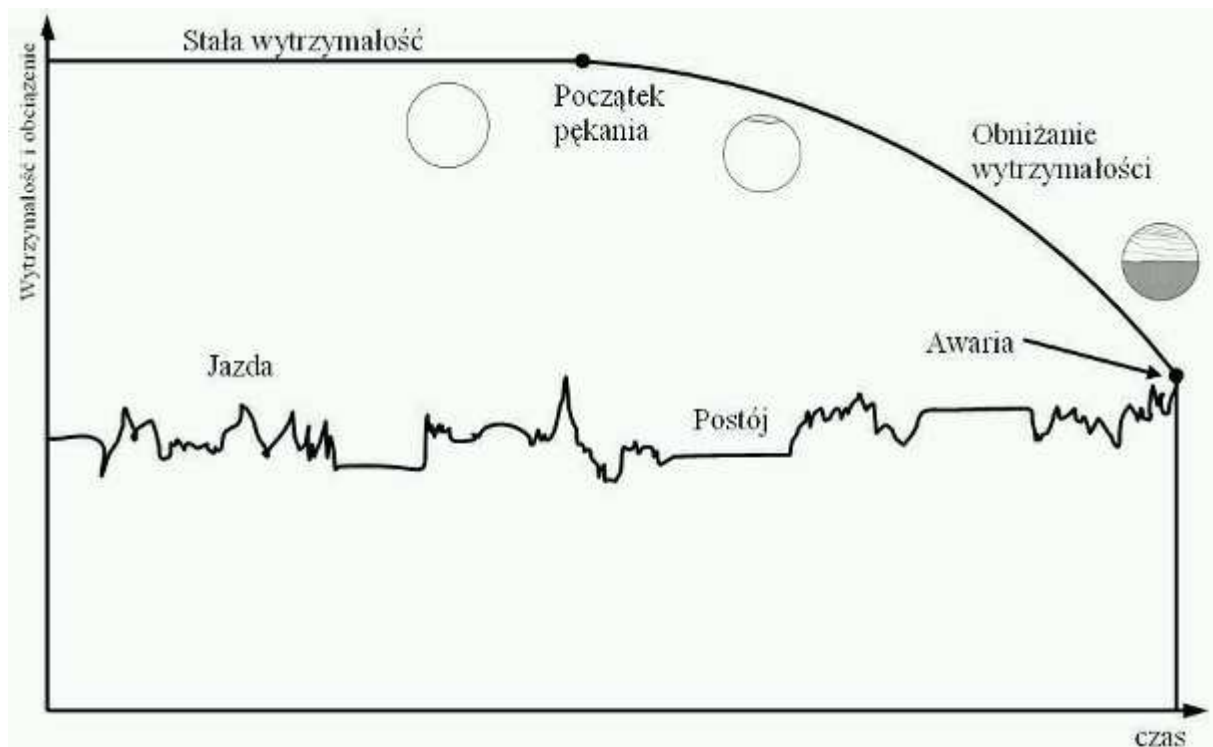
Z przełomem zmęczeniowym mamy do czynienia wtedy, gdy wartość naprężeń w elemencie jest niższa od jego wytrzymałości, lecz działają one w sposób zmienny w czasie, co w niektórych sytuacjach może doprowadzić do zainicjowania pęknięcia, które rozwijając się prowadzi do obniżenia wytrzymałości, a w konsekwencji do uszkodzenia. Klasyczny przełom zmęczeniowy składa się ze strefy (stref) pękania zmęczeniowego mającej początek w ognisku lub ogniskach (gładki, muszlowy kształt z liniami spoczynkowymi, powstającymi w miarę rozwoju przełomu ew. produkty korozji) oraz strefy resztkowej (dołamania), wykazującej cechy przełomu doraźnego. Nierzadko przełom rozwija się w różnych „równoległych” powierzchniach, czego efektem są prostopadłe do linii spoczynkowych uskoki na powierzchni strefy zmęczeniowej. Stosunek wskaźnika wytrzymałości na główny rodzaj obciążenia zniszczonego przekroju do wskaźnika wytrzymałości strefy resztkowej jest tzw. współczynnikiem bezpieczeństwa elementu. Najniższe współczynniki bezpieczeństwa stosuje się właśnie w środkach transportu ze względu na potrzebę ograniczenia masy. W celu zapewnienia bezpieczeństwa elementy poddaje się szczegółowej kontroli w procesie produkcji oraz eksploatacji. W celu zmniejszenia prawdopodobieństwa zmęczeniowego pęknięcia elementy projektuje się tak, aby uniknąć karbów geometrycznych i strukturalnych w niebezpiecznych strefach, a także poddaje się dodatkowym operacjom, np. szlifowanie, kulowanie, dogniatanie, hartowanie powierzchniowe czy specjalna obróbka chemiczna, jak np. anodowe utlenianie powierzchni tłoków silników spalinowych, wykonywanych z siluminów. Wystąpienie pęknięcia zmęczeniowego w pojeździe, zwłaszcza w przypadku elementu mającego wpływ na bezpieczeństwo, jest stanem nieprawidłowym, świadczącym o nieprawidłowej konstrukcji, niewłaściwym wykonaniu lub wadzie materiałowej, może być też wynikiem nieprawidłowej eksploatacji lub wynikać z wcześniejszego uszkodzenia innej części.

Poniżej zostaną rozważone dwa przypadki pęknięcia zmęczeniowego dotyczące sytuacji, które mogą zakończyć się odpadnięciem koła pojazdu i poważnym wypadkiem. W pierwszym z rozważanych przypadków mamy do czynienia z kołem nienapędowym, a więc np. przednim kołem pojazdu z napędem klasycznym lub tylnym kołem pojazdu ze zablokowanym napędem przednim. Taki sam przypadek zginania czopa piasty koła zachodzi również w przypadku przyczep czy kół nośnych pojazdów gąsienicowych.



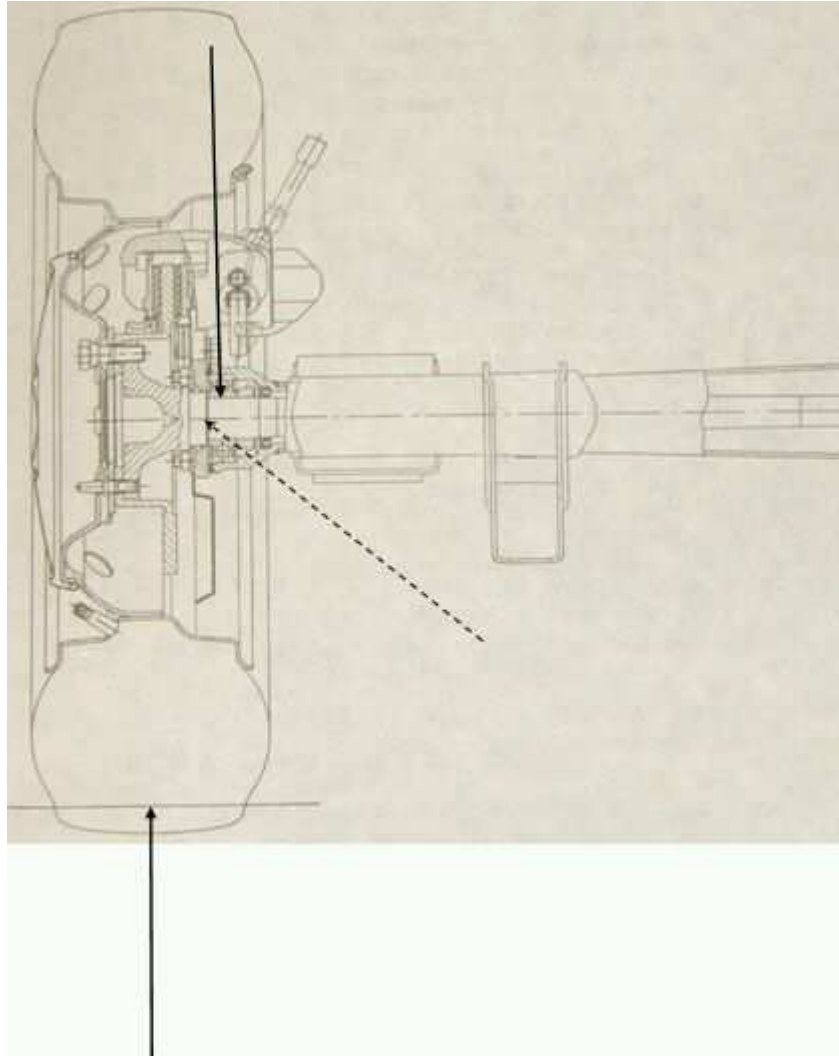
Schemat działania reakcji podłoża na koło i sił wywołujących moment gnący, działający przez łożyska na czop zwrotnicy przedniej osi nienapędzanej, zginających ją na postoju. Strzałką przerywaną zaznaczono przekrój zwrotnicy najbardziej narażony na pękanie zmęczeniowe w wyniku jednostronnego zginania. W czasie jazdy dochodzą zmienne siły boczne i pionowe, które dodatkowo zwiększają naprężenia. [Na podstawie Kaim E.: „Naprawa samochodów FSO 125P” WKŁ Warszawa 1988]. Po prawej obraz przełomu zmęczeniowego elementu poddanego jednostronnemu zginaniu.

W przypadku przedstawionym na powyższym rysunku czop zwrotnicy na postoju pojazdu i w czasie jazdy po prostej poddawany jest w krytycznym przekroju głównie zginaniu (dodatkowo jest ścinany oraz w nieznacznym stopniu skręcany momentem równym sumie momentów oporów obracania łożysk). Dodatkowe obciążenia pojawiają się w czasie jazdy po łuku, nierównościach i przy hamowaniu.



Schematyczne i uproszczone przedstawienie obciążeń czopa zwrotnicy w czasie, w sytuacji zainicjowania i rozwoju pęknięcia zmęczeniowego.

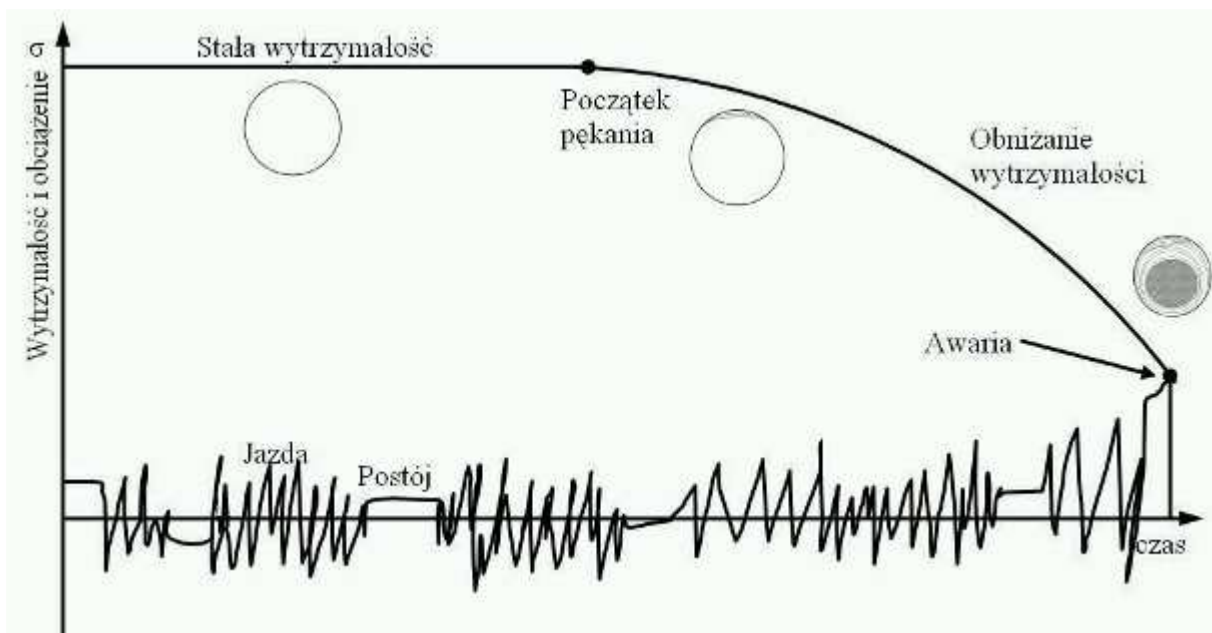
Następnym przypadkiem będzie półś napędowa obciążona, a więc element poddawany okresowemu skręcaniu, a przede wszystkim zginaniu analogicznemu jak w poprzednim przypadku, lecz z tą różnicą, że wykonuje on ruch obrotowy a więc płaszczyzna działania momentu gnącego obraca się względem osi symetrii części.



Schemat pary sił (reakcji podłoża i siły pionowej przenoszonej przez łożysko), zginających zewnętrzną część obciążonej półosi napędowej mostu napędowego pojazdu na postoju. Strzałką przerywaną zaznaczono przekrój najbardziej narażony na pękanie zmęczeniowe w wyniku obrotowego zginania. W czasie jazdy dochodzą zmienne siły boczne i pionowe, które dodatkowo zwiększają naprężenia od zginania. [Na podstawie Kaim E.: „Naprawa samochodów FSO 125P” WKŁ Warszawa 1988].



Obraz przełomu pękniętej zmęczeniowo półosi samochodu FSO Polonez. Obraz przełomu zatarty częściowo przez produkty korozji powstałe po zdarzeniu. Strefa zmęczeniowa pierścieniem otacza strefę dołamania. Pęknięcie zostało zainicjowane w karbie utworzonym przez uskok średnicy przy czopie łożyskowym. Bezpośrednią przyczyną awarii była próba regeneracji czopa przez napawanie.



Rys. 1b. Schematyczne i uproszczone przedstawienie obciążeń półosi w czasie, w sytuacji zainicjowania i rozwoju pęknięcia zmęczeniowego.

Poniżej zostaną przedstawione wybrane przykłady przełomów zmęczeniowych elementów pojazdów.



Przełom zmęczeniowy sprężyny zawieszenia oraz wyjaśnienie jego zainicjowania w postaci karbu „wybitego” przez koniec pręta sprężyny.



Powierzchnie dwu przełomów zmęczeniowych drążków stabilizatorów (Ford Escort). Po prawej obraz przełomu zatarty przez produkty korozji powstałe po wystąpieniu uszkodzenia.

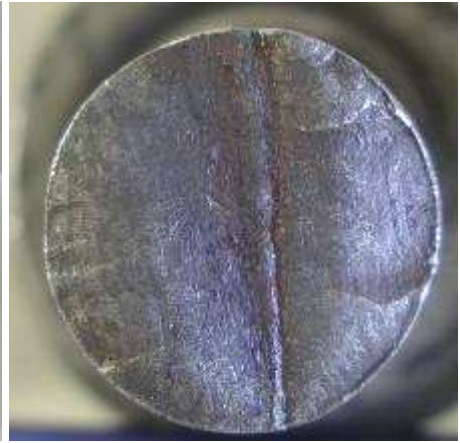




Przykład zmęczeniowego złamania pióra resoru (Volvo FL 10), poniżej wygląd przełomu i powiększenie strefy zmęczeniowej i fragmentu obszaru strefy dołamania - typowy obraz przełomów piór resorów. W górnej strefie przełomu pas produktów korozji powstałych prawdopodobnie w czasie przechowywania elementu, już po uszkodzeniu.



Wielokrotny przełom tulei sprzęgającej o charakterze zmęczeniowym. Ogniska przełomów w karcach utworzonych przez dna rowków wpustowych.



Zmęczeniowo pęknięte sworznie końcówek drążków kierowniczych. W obydwu przypadkach do uszkodzeń przyczyniły się znaczne luzy, powodujące uderowe obciążenia. W górnej końcówce dodatkowo miało miejsce nieprawidłowe przyleganie części stożkowej sworznia do otworu we współpracującym elemencie. W obydwu przypadkach strefę resztkową stanowią wąskie „kreski” materiału. Wynika to z faktu, że przy dwustronnym zganianiu jakimu poddawane są te elementy, przy ruchu w jedną stronę istniejąca „połówka” pęknięcia przenosi obciążenia ściskające tak jak nieuszkodzony materiał, oraz ze znacznej wartości stosowanych w tych częściach współczynników bezpieczeństwa. Asymetria przełomu jest wynikiem wcześniejszego zainicjowania pęknięcia po jednej stronie.



Pęknięcie zmęczeniowe końcówki drążka układu kierowniczego (Polonez Truck) w miejscu początku zaciśniętej na nim rury. Obraz przełomów charakterystyczny dla dwukierunkowego zginania.





Przełom jednej ze śrub mocowania tylnego koła bliźniaczego (STAR 1142), urwany na skutek nieprawidłowego wykonania śrub. Karby geometryczny w postaci obwodowych rys pochodzących z obróbki skrawaniem nakładające się na początek strefy rowków ustalających. Poniżej przykład prawidłowego wykonania śruby.



Przełom zmęczeniowy dźwigni zmiany biegów (Lublin)





Pęknięcia zmęczeniowe osi satelitów mechanizmu różnicowego (Bizon Super), powstałe w miejscach karbu geometrycznego.



Rozerwany na skutek zmęczenia wirnik sprężarki doładowującej wykonany ze stopu aluminium (Renault Magnum). Strefa zmęczeniowa na lewo od otworu wałka.



Pęknięcie zmęczeniowe pierwszego czopa korbowego kutego wału silnika (Neoplan)



Mniej „wyraźny” przełom zmęczeniowy czopa wału korbowego wykonanego z żeliwa sferoidalnego (Ford Transit). Pęknięcie wystąpiło po naprawie wcześniej zatartego czopa przez szlifowanie na mniejszy wymiar. Wcześniejsza awaria spowodowała obniżenie twardości a tym samym wytrzymałości zmęczeniowej elementu.



Pękanie wałów korbowych ma może mieć miejsce niekoniecznie w okolicy koła zamachowego (maksymalna wartość wytworzonego przez silnik momentu obrotowego). Jego umiejscowienie zależy od przypadkowych czynników takich jak np. luzy łożyskowe, prawidłowa geometria korpusu silnika oraz jakość obróbki powierzchni czopów, zwłaszcza w odniesieniu do łuków przejściowych.

Tablica 1. Typowe formy przełomów zmęczeniowych w zależności od sposobu i wielkości obciążenia [Drewnowski]

L P.	Obciążenie		Pręty gładkie		Pręty z miejscowymi spięzzeniami naprężeń			
	Nazwa	Schemat	silnie obciążone	slabo obciążone	dużymi		małymi	
			1	2	3	4	5	6
1	Rozciąganie ściskanie		a)	b)	c)	d)	e)	f)
2	Jednostronne zginanie		g)	h)	i)	j)	k)	l)
3	Dwustronne zginanie		l)	m)	n)	o)	p)	r)
4	Obrotowe zginanie		s)	t)	u)	w)	y)	z)

Zmęczenie cieplne

W sytuacji kiedy element pracuje w zmiennych temperaturach, prowadzi to do powstania zmiennych pól naprężeń, które z kolei mogą powodować powstawanie pęknięć, które określa się mianem zjawiska zmęczenia cieplnego. W praktyce zwykle elementy te poddawane są też zmiennym obciążeniom mechanicznym i właściwie należałoby mówić o zmęczeniu cieplno-mechanicznym. Wiele elementów pojazdów, zwłaszcza silników ulega tego rodzaju uszkodzeniom zmęczeniowym. Najczęściej dotyczą one tłoków i głowic.

Współczesne silniki samochodów ciężarowych osiągają znaczne wartości mocy jednostkowych dochodzące do 30 kW/dm^3 , maksymalne wartości średniego ciśnienia efektywnego przekraczają 2 MPa a maksymalna sprawność ogólna zbliża się do 50%. Wysoka efektywność silnika wiąże się ze zwiększeniem obciążeń mechanicznych i cieplnych jego elementów. Jednymi z najbardziej obciążonych cieplnie części są tłoki.

Miejszem szczególnie zagrożonym występowaniem pęknięć spowodowanych zmęczeniem cieplnym w tłokach silników wysokoprężnych z wtryskiem bezpośrednim jest krawędź zagłębionej w denku komory spalania. Problem pęknięcia denek tłoków dotyczy również silników z wtryskiem do komory wstępnej. Zmęczenie cieplne materiału stanowi barierę rozwoju silników, zwłaszcza wyposażonych w tłoki aluminiowe.

W czasie pracy silnika na tłok działają znaczne siły bezwładności wywołane przyspieszeniem oraz ciśnieniem gazów a także siły tarcia.

Siła normalna wywołuje dociskanie tłoka do gładzi cylindra, generując siłę tarcia. Ponadto denko tłoka w czasie pracy styka się z czynnikiem roboczym o temperaturze przekraczającej 2000 K. Wywołuje to zmienne w czasie obciążenie cieplne. Wynikiem

obciążenia cieplnego jest rozkład temperatury elementu. Temperatura elementów komory spalania wpływa na wskaźniki wytrzymałościowe materiałów, naprężenia cieplne a także warunki tarcia wywierając bezpośredni wpływ na trwałość i niezawodność silnika. Obciążenia cieplne są głównym ograniczeniem osiągnięć silników wysokoprężnych.

W czasie pracy silnika wymiana ciepła w cylindrze ulega ciągłym zmianom, różne przypadkowe czynniki powodują dodatkowo, że zmiany te nie są do końca okresowe nawet w tzw. ustalonych warunkach pracy silnika

Obok chwilowych zmian temperatury powierzchni i zmiennych obciążeń mechanicznych głównym czynnikiem wywołującym pęknięcie tłoków są zmiany rozkładów pól temperatur średnich tłoka w różnych stanach pracy silnika, głównie pomiędzy postojem a stanem, gdy temperatury osiągają wartości maksymalne. Przyjmuje się, że maksymalna temperatura średnia na powierzchni denka tłoka ze względu na trwałość materiału nie powinna przekraczać $225\div 350^{\circ}\text{C}$ dla tłoków wykonanych ze stopów lekkich, $400\div 450^{\circ}\text{C}$ dla tłoków żeliwnych i $450\div 500^{\circ}\text{C}$ dla stalowych. Maksymalna temperatura w rowku pierwszego pierścienia uszczelniającego oraz na powierzchni denka tłoka od strony skrzyni korbowej ograniczana jest temperaturą tworzenia laku przez olej silnikowy i w zależności od warunków pracy silnika i rodzaju oleju nie powinna przekraczać $160\div 220^{\circ}\text{C}$.

Pole temperatur tłoka jest efektem dostarczania ciepła od czynnika roboczego oraz odbierania ciepła przez układ chłodzenia. Zwiększenie strumienia ciepła doprowadzonego do tłoka wywoływane jest przede wszystkim poprzez wzrost obciążenia silnika oraz wzrost prędkości obrotowej. Istotny wpływ na temperatury tłoka mają również regulacja silnika oraz jego stan techniczny.

W celu obniżenia temperatury tłoka stosowane są różne zabiegi. Należą do nich na przykład stosowanie żeber na wewnętrznej powierzchni denka tłoka, obniżanie wysokości progu ogniowego poprzez podnoszenie pierwszego pierścienia, stosowanie natrysku oleju na wewnętrzną powierzchnię denka tłoka oraz różnego rodzaju kanały chłodzące. Innym sposobem obniżania zbyt wysokich temperatur jest stosowanie na zagrożone rejonu tłoka materiałów o większej odporności przy podwyższonej temperaturze od aluminium. Coraz częściej w silnikach dużych ciężarówek wzorem silników kolejowych stosuje się tłoki składane. Rozwiązanie takie stosowane jest w seryjnych silnikach między innymi przez firmy Renault, Scania i Volvo, a także przez Detroit Diesel. Denko wykonuje się w takich tłokach z żeliwa lub staliwa np. Volvo w tłokach silnika D10 stosuje ulepszone cieplnie staliwo o zawartości według badań autora 0,4% C, 0,6% Cr i 0,9 % Mn a część prowadzącą z siluminu. Rozwiązanie to umożliwi przejmowanie przez tłok większego obciążenia cieplnego oraz zmniejszenie luzu tłok-tuleja cylindrowa o 30% ze względu na mniejszy współczynnik rozszerzalności cieplnej denka i mniejszą temperaturę części prowadzącej, połączonej z denkiem jedynie przez sworzeń tłokowy. Układ korbowy z tego rodzaju tłokiem składanym jest zdegenerowaną formą układu korbowo-wodzikowego, stosowanego w silnikach okrętowych. Innym, starszym przykładem zabezpieczenia krawędzi komory spalania umieszczonej w denku tłoka jest żaroodporna wkładka składająca się np. z ok. 75 % Ni i ok. 19 % Cr.

Wahania temperatury materiału tłoka możemy podzielić na duże wahania temperatury średniej związane z pracą silnika w różnych stanach, zwłaszcza pomiędzy postojem a stanem maksymalnego obciążenia cieplnego, osiągające w ekstremalnych warunkach amplitudę nawet 400°C (w tłokach aluminiowych) oraz na małe wahania temperatury powierzchni tłoka w obrębie cyklu pracy. Przyjmuje się, że tłok nagrzewa się od temperatury otoczenia do temperatury pracy w czasie kilkudziesięciu sekund. Jeszcze krócej trwa proces ustalania się pól średnich temperatur tłoka przy przejściach silnika pomiędzy różnymi stanami obciążenia. Pojedyncze cykle nagrzewania i chłodzenia powierzchni tłoka trwają ułamki sekund, a prędkości nagrzewania powierzchni mogą przekraczać 1000 K/s . Gdy dla uproszczenia

założymy, że element powierzchni denka tłoka zamocowany jest sztywno i przyjmujemy chwilowe wahania temperatury powierzchni 15 K, to dla stopu AK12, przy współczynniku rozszerzalności cieplnej $\alpha=21 \times 10^{-6}$ 1/K i module Younga $E=7,1 \times 10^4$ MPa oraz liczbie Poissona $\nu=0,26$, otrzymamy dla płaskiego stanu obciążenia, wartość zmiany naprężeń $\Delta\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T / (1-\nu) \approx 30$ MPa. Co jest dla siluminów wartością dużą, zwłaszcza w podwyższonych temperaturach. Denko tłoka jest narażone na ogromne ilości takich szoków. Ilość chwilowych cykli cieplnych dla powierzchni denka tłoka dla typowego silnika ZI o maksymalnej prędkości obrotowej 5500 obr/min i założonej trwałości np. 150 tys. km przebiegu samochodu do naprawy głównej, przy prędkości średniej 60 km/h, i założeniu że silnik pracuje z prędkością obrotową równą połowie maksymalnej, wynosi $4,125 \times 10^8$ cykli. W silniku ZS samochodu osobowego przy $n_{\max} = 4200$ obr/min i przebiegu 250 tys. km ilość cykli cieplnych wynosi odpowiednio $5,25 \times 10^8$. W silniku dalekobieżnej ciężarówce przy założeniu $n_{\max} = 3000$ obr/min i trwałości 1.5 mln km (niektóre pojazdy osiągają taki przebieg do naprawy głównej silnika), liczba cykli cieplnych wynosi aż $2,25 \times 10^9$. Widmo dużych wahań temperatury średniej tłoka, czyli ich przebieg czasowy zależy od sposobu eksploatacji silnika. Częste zmiany obciążenia związane z pracą w warunkach nieustalonych towarzyszą silnikom stosowanym do napędzania samochodów poruszających się w warunkach ruchu miejskiego. Bardziej ustaloną pracą charakteryzują się silniki dalekobieżnych ciężarówek, kolejowe, okrętowe oraz stacjonarne.

Niszczenie wywołane zmęczeniem cieplnym w przypadku tłoków ujawnia się w postaci różnego rodzaju pęknięć występujących na denkach. W czasie badań autora największą uwagę zwrócono na tłoki silników krajowych tj. 359 i SW-680. Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że w wielu tłokach silnika SW-680 po przebiegu samochodu ok. 300 000 km, tj. typowym przebiegu do naprawy głównej silnika występują pęknięcia. Pęknięcia te występują głównie na krawędzi komory spalania, miejscami ich zapoczątkowania są karby utworzone przez brzegi wgłębień zaworowych. Znacznie bardziej zaawansowane pęknięcia zaobserwowano na denkach tłoków silnika TD-100A ciągnika siodłowego Volvo F10 rok produkcji 1980, prawdopodobny przebieg ok. 600÷800 tys. km. Tłoki silnika TD-100A podobnie jak w silniku SW-680 wykonane są z siluminów okołoeutektycznych.

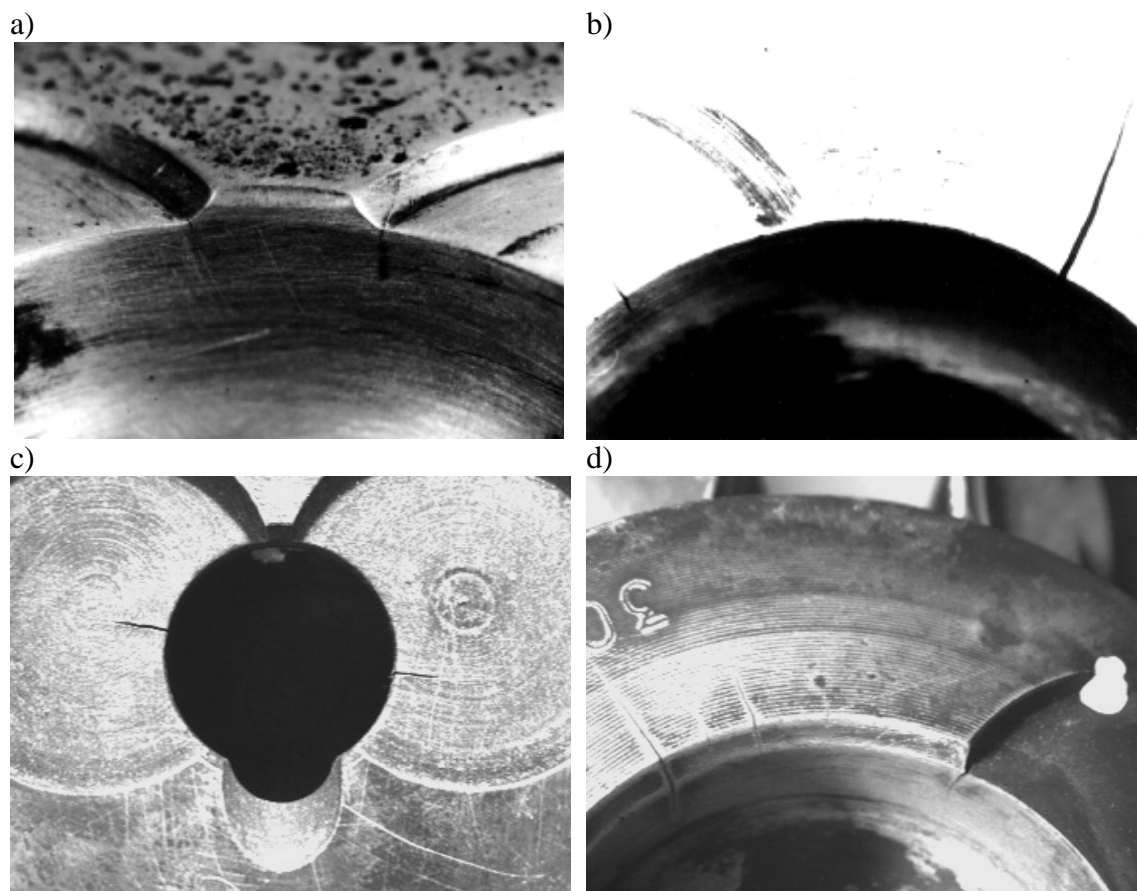
Pęknięcia denek tłoków często występują w silnikach stosowanych w samochodach Liaz i Kamaz występują często już przy niewielkich przebiegach, nawet 10 tys. km. Innym przykładem silnika z wtryskiem bezpośrednim, w którym zauważono ten rodzaj uszkodzeń jest stosowany w ciągnikach rolniczych Ursus C-330 silnik S-312.

Krawędź komory spalania umieszczonej w tłoku jest praktycznie wolna od naprężeń spowodowanych obciążeniem mechanicznym tłoka. Przyczyn pęknięcia należy się doszukiwać w zmiennych naprężeniach wywołanych obciążeniem cieplnym.

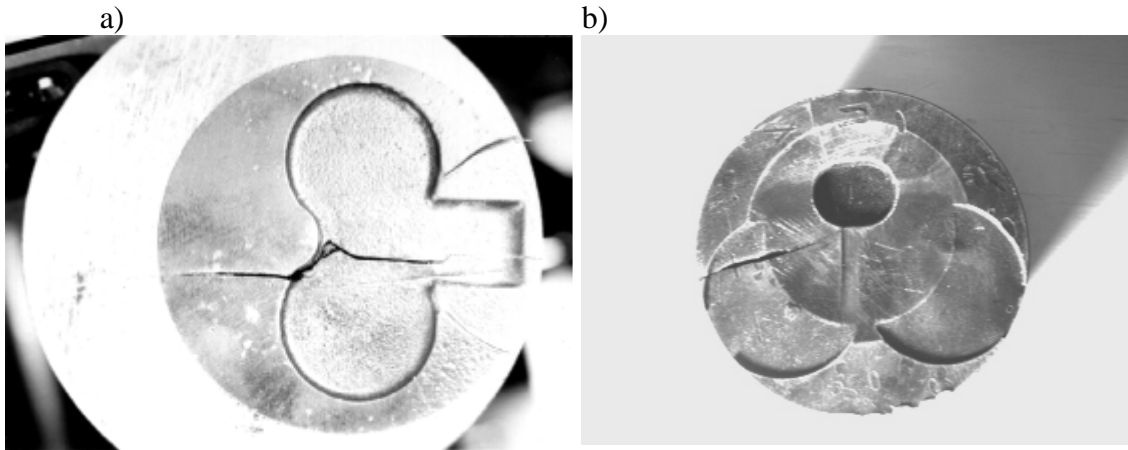
Rozwój pęknięć może prowadzić do różnych, niepożądanych skutków, od zaburzeń procesu spalania do zmniejszenia szczelności komory a nawet do poważnych uszkodzeń silnika. Do pęknięcia denek na wskroś dochodzi najczęściej w przypadku tłoków silników z wtryskiem do komory wstępnej. Tłoki takie charakteryzują się stosunkowo cienkim denkiem o mniejszej sztywności, silnie obciążonym cieplnie w miejscach omywanych płomieniami wydobywającymi się z komory. Taki charakter ma pęknięcie denek w krajowym silniku 4CT90, zwłaszcza intensywnie eksploatowanych przy dużych obciążeniach np. w samochodach LDV i Honker. Proces uszkodzania w tym przypadku ma charakter cieplno-mechaniczny ze względu na małą sztywność płaskiego denka tłoka silnika z wtryskiem do komory wirowej. Również na tym przykładzie widać wyraźny wpływ karbu..

Przeprowadzono badania na tłoku silnika 359M. Badania na silniku prowadzono przy prędkościach do 1500 obr/min oraz maksymalnym nadciśnieniu doładowania 0,12 MPa uzyskiwanemu z niezależnej sprężarki. Dzięki doładowaniu i zwiększonej dawce paliwa

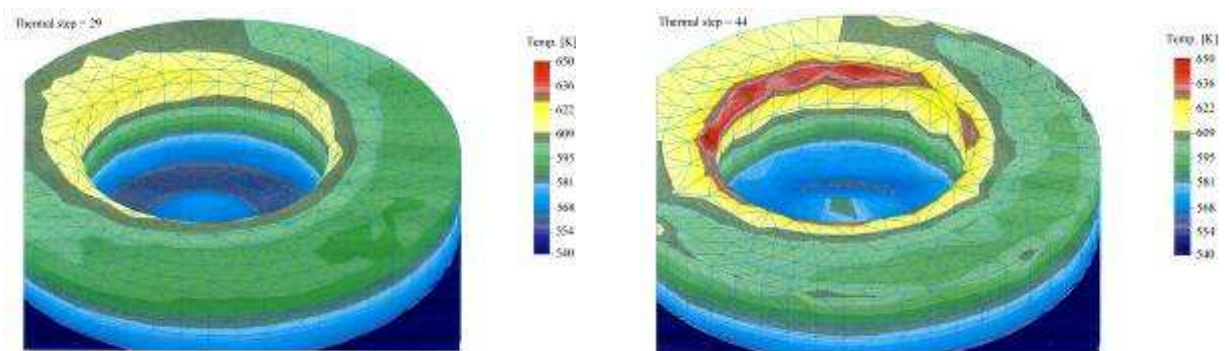
uzyskiwano nawet dwukrotny wzrost osiągnięć silnika w stosunku do niedoładowanej wersji oryginalnej. Do pomiarów temperatury krawędzi komory spalania na denku tłoka zastosowano pięć termopar powierzchniowych. Zastosowane termopary charakteryzowały się wykorzystaniem jako jednej z elektrod materiału tłoka. Drugą elektrodę stanowił drut konstantanowy o średnicy 0,5 mm, umieszczony w otworze o średnicy 0,8 mm i odizolowany od jego ścianek ceramiką. Spoinę termopary stanowiła warstwa złota o grubości poniżej 1 μm , dzięki czemu uzyskano wysoką czułość termopar. Zdecydowano się na konstantan gdyż ten materiał wytwarza w połączeniu z aluminium stosunkowo dużą siłę termoelektryczną, ponad 3 mV/100K, a termopara ma prawie liniową charakterystykę. Sygnał z termopar oraz z umieszczonego na krawędzi płaszczu tłoka termistora mierzącego temperaturę odniesienia przesyłano drogą galwaniczną poprzez elastyczną taśmę przewodową, przypinaną do gniazda na płaszczu tłoka. Zarówno budowa zastosowanych termopar jak i sposób transmisji danych zostały opracowane przez autora i są przedmiotem ochrony patentowej.



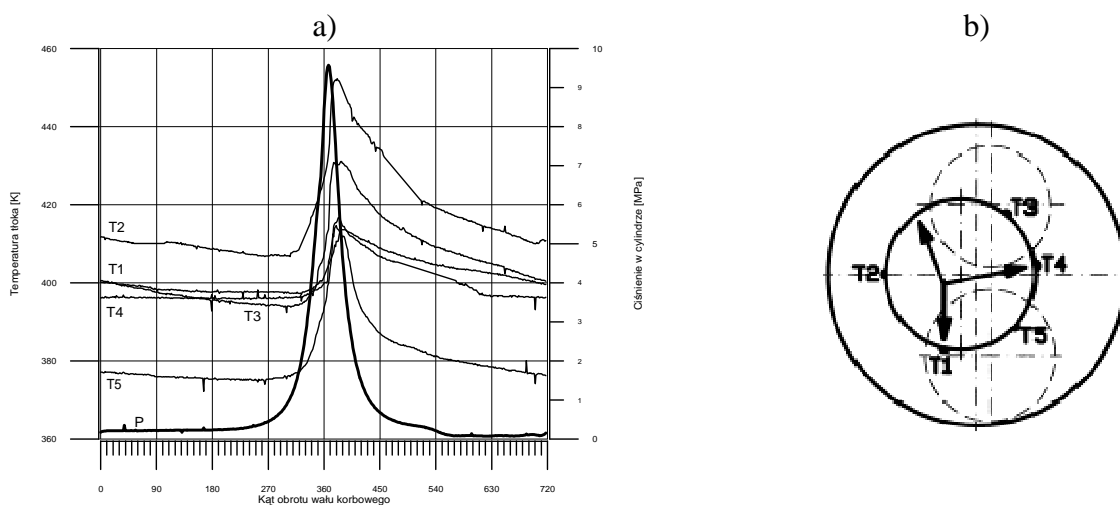
Przykłady pękania tłoków z komorą spalania w denku (wtrysk bezpośredni). a) fotografia fragmentu tłoka silnika SW-680 (średnica cylindra $D=127$ mm) z pęknięciami. Długość większego pęknięcia ok. 9 mm. b) fotografia fragmentu tłoka silnika Volvo TD-100A ($D=120$ mm) z pęknięciami. Długość większego pęknięcia ok. 24 mm. c) pęknięcia krawędzi komory spalania tłoka silnika S-312 ($D=112$ mm). d) pęknięcia krawędzi komory spalania tłoka silnika KamAZ 740 ($D=120$ mm) (fot. autor).



Przykłady pęknięcia denek tłoków silników ZS z wtryskiem do komory wirowej (a), na przykładzie tłoka silnika Opel 2.5 D (D=92 mm) i komory wstępnej (b), Mercedes-Benz (D=91 mm). W obydwu przypadkach pęknięcia denka na wskroś (fot. autor).

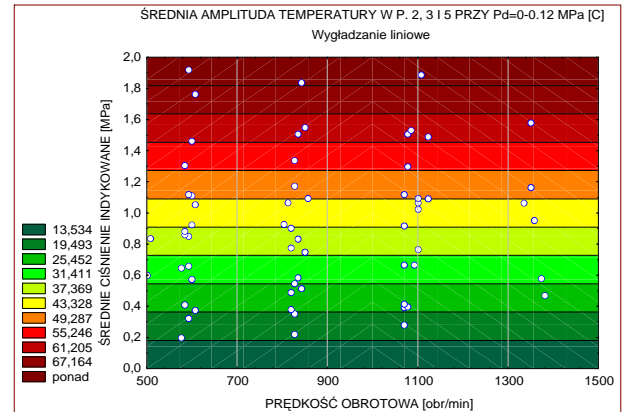
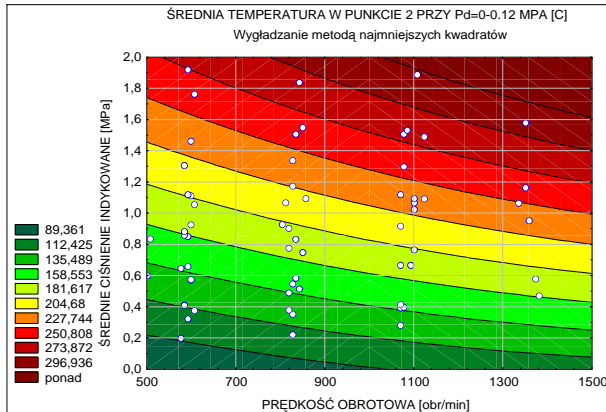


Wyznaczone na drodze badań modelowych pola minimalnej i maksymalnej temperatury denka tłoka w cyklu pracy.



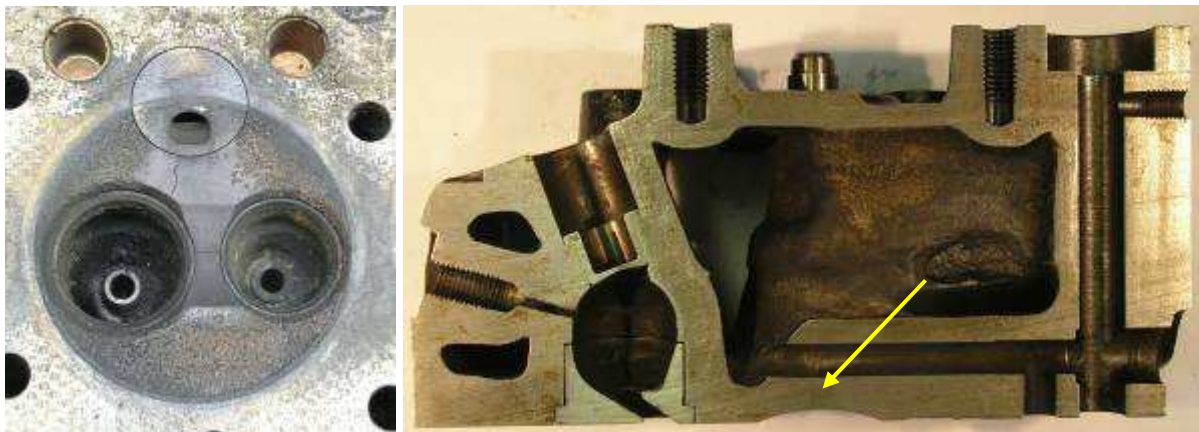
Przykład przebiegów temperatury pięciu punktów krawędzi komory spalania oraz ciśnienia w cylindrze w pojedynczym cyklu (a), wyznaczonych w czasie badań silnika 359M. Prędkość

585 obr/min, temperatura powietrza w kolektorze dolotowym 335 K, temperatura spalin 363 K, temperatura krawędzi płaszczka tłoka 329.7 K, ciśnienie doładowania 0.12 MPa, średnie ciśnienie indykowane 0.882 MPa. b) Schemat rozmieszczenia termopar na krawędzi komory spalania w tłoku, strzałki oznaczają strugi paliwa z wtryskiwacza



Rozkład izoterm temperatury średniej w punkcie krawędzi komory spalania o najwyższej temperaturze oraz amplitud temperatury powierzchni w punktach nie trafianych przez strugi paliwa w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia silnika 359M przy różnych wartościach ciśnienia doładowania.

Bardzo często zdarzają się pęknięcia na powierzchni ogniowej głowic silników, głównie wysokoprężnych. Prowadzą one do połączenia układu chłodzenia z komorą spalania i szybkiego niszczenia silnika. W niektórych przypadkach mogą spowodować wypadnięcie np. gniazda zaworowego, co prowadzi do zniszczenia awaryjnego.



Przykład pęknięć zmęczeniowych na jednej z powierzchni ogniowych głowicy silników 4C90 oraz przekrój ukazujący przebieg pęknięcia łączącego komorę spalania z kanałem chłodzącym.



Pęknięcie mostka międzyzaworowego głowicy aluminiowej, czterosuwowego silnika iskrowego, chłodzonego powietrzem (PF 126p).



Pęknięcia cieplne wentylowanej i monolitycznej tarczy hamulcowej

LITERATURA

- [1] De Sas Stupnicka H., Gardyński L.: „Badania metalograficzne zniszczonych wałów korbowych”. Materiały konferencyjne KONES'2000 Lublin 2000, str. 294÷300.
- [2] De Sas Stupnicka H., Gardyński L., Wrona J.: „Metallographic investigations of crankshafts' and connecting rods damages”. AUTOMOBILE AT THE BEGINING OF THE THIRD MILLENIUM – XI International Scientific Symposium MOTOR VEHICLES AND ENGINES, Kragujevac, YU 2000, str. 29÷32.

- [3] Drewnowski S.: „Formy złomów i zniszczeń elementów konstrukcji metalowych” Arkady, Warszawa 1969
- [4] Gardyński L.: „Badania nad podwyższeniem odporności na zmęczenie cieplne tłoków do wysoko doładowanych silników ZS”. Rozprawa doktorska pod kierunkiem prof. zw. dr hab. inż. Andrzeja Werońskiego, Politechnika Lubelska 1999.
- [5] Gardyński L.: „Odporność strefy tłoka materiał niezbrojony-kompozyt na szoki cieplne”. Journal of KONES’2000, Lublin 2000, str. 114÷118.
- [6] Gardyński L.: „Obciążenia cieplne tłoka silnika wysokoprężnego”. Samochody Specjalne, nr 1/2003, Wrocław 2003, str. 75÷79.
- [7] Gardyński L.: „Investigations of temperature fluctuations of DI diesel engine piston”. TeKa Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa PAN, tom III Lublin 2003, str. 105÷116.
- [8] Gardyński L.: „Odporność na pękanie zmęczeniowe materiałów stosowanych na tłoki. Cz. I Materiały stosowane na tłoki”. Samochody Specjalne, nr 4/2003, Wrocław 2003, str. 78÷81.
- [9] Gardyński L.: „Odporność na pękanie zmęczeniowe materiałów stosowanych na tłoki. Cz. II Badania odporności materiału tłoka na zmęczenie cieplne”. Samochody Specjalne, nr 5/2003, Wrocław 2003, str. 76÷79.
- [10] Gardyński L.: „Proste metody badawcze inżynierii materiałowej w zastosowaniach detektywistycznych”. Materiały III Ogólnopolskich Warsztatów „Kryminalistyczne Aspekty Likwidacji Szkód Komunikacyjnych”. PZU - Politechnika Lubelska - Laboratorium Kryminalistyczne Komendy Wojewódzkiej Policji, Kazimierz Dolny 2004. str. 155÷162.
- [11] Gardyński L.: „Spostrzeżenia z eksploatacji samochodu terenowego UAZ 31512 z zamontowanym silnikiem wysokoprężnym ANDORIA 4C90”. Problemy Eksploatacji uzbrojenia i sprzętu wojskowego. Zeszyty Naukowe Wyższej szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych im. gen. Tadeusza Kościuszki. Wrocław 2004. Wydano w roku 2005. Str. 51÷60.
- [12] Gardyński L.: „Stanowisko do symulacji cyklicznych zmian obciążenia cieplnego materiału tłoków”. TeKa Komisji Motoryzacji PAN. Zeszyt nr 29-30, str. 131÷136. Kraków 2005.
- [13] Gardyński L.: „Recent research on the wear of fuel supply system elements lubricated with bio-fuels”. Journal of EUROPEAN KONES’2006” Warszawa-Naęczów, 2006, Vol. 13, No. 4, str. 195÷200.
- [14] Gardyński L.: „Badania własności smarnych paliw w aspekcie zasilania silników wielopaliwowych”. Materiały konferencji EKSPLOLOG’2006. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Oficerskiej im. Gen. Tadeusza Kościuszki. Wrocław 2006. Rok wydania 2007. Str. 131-135
- [15] Gardyński L., Dębski H., Hejwowski T., Weroński A., Nastaj T.: „Analysis of failure causes of 4C90 engine head”. Journal of KONES’2008, Warszawa 2008, str. 179÷185.
- [16] Kocańda S.: „Zmęczenie metali” WNT Warszawa.
- [17] Weroński A., Hejwowski T.: „Thermal fatigue of Metals”. M. Dekker Inc. New York 1992.
- [18] Wilczkowski A.: „Awarie silników spalinowych. Uszkodzenia w układach korbowych”. MiW Łódź 1996.