

Romuald Gajewski
Ewaryst Grodzki
Arnold Wilczyński

PRÓBY ZMĘCZENIOWE MODELI WAŁÓW KORBOWYCH KUTYCH SWOBODNIE
I KUTYCH METODĄ TR W UKŁADZIE BADAŃ WIELOCZYNNIKOWYCH

Wstęp

Wymagania stawiane wałom korbowym silników spalinowych smuszają do stałego doskonalenia konstrukcji oraz technologii ich wytwarzania.

W przypadku silników wysokoprężnych, szczególnie kolejowych i okrętowych, najkorzystniejsze własności wytrzymałościowe wykazują wały wykonane z odkuwek.

Stosowane są dwie podstawowe technologie ich wykonania :

- kucie swobodne
- spęczania z równoczesnym wyginaniem /metoda RR¹/.

Własności odkuwek kutych metodą RR są wyższe od własności

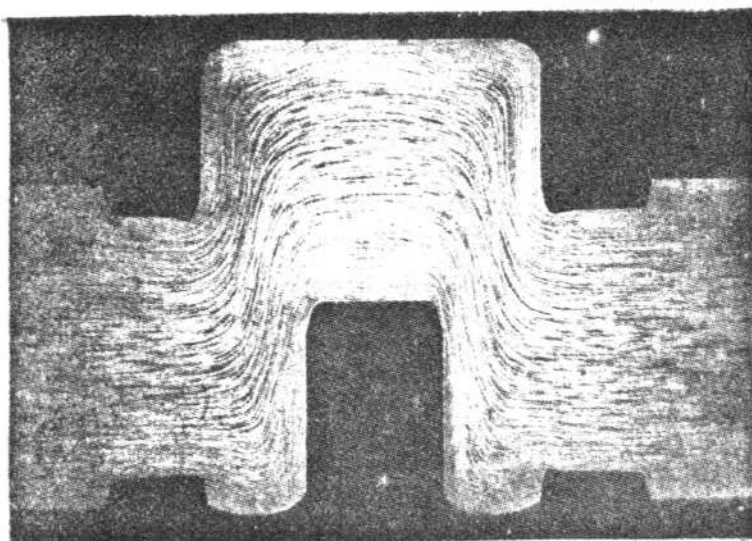
1. RR - proces kucia opracowany przez Francuza R.M. Roederera, stosowany od około trzydziestu lat w zakładzie de Sait-Chamond /Loire/, należącym obecnie do Compagnie des Ateliers et Forges de La Loire. Znalazła ona szerokie zastosowanie w krajach wysokoprzemysłowych. W Wielkiej Brytanii metodą tą nazwano CGS /continuous grain flow/.

odkuwek kutych swobodnie. W związku z tym metoda RR jest stale unowocześniana, a wieloletnie badania prowadzone w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu doprowadziły do opracowania nowej metody kucia, tzw. metody TR².

Przebieg procesu technologicznego oraz zasady działania urządzeń stosowanych przy kuciu wałów wymienionymi sposobami opisano szczegółowo w literaturze [1, 7, 13, 23, 25] .

Istotną zaletą technologii kucia metodą RR w porównaniu z kuciem swobodnym jest obok innych korzyści [7, 10, 13] , znaczny wzrost wytrzymałości wałów potwierdzony przez wycinkowe badania zmęczeniowe przeprowadzone za granicą [7, 17, 18, 19, 22] .

Zaleta ta, wynika głównie z ciągłego przebiegu włókien, zgodnego z konturem wału /rys. 1/ oraz korzystnego ułożenia śnieczyszczeń likwacyjnych w odkuwce.



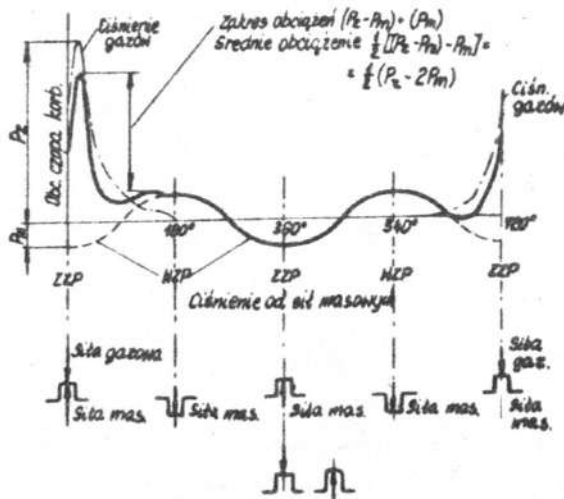
Rys. 1. Przebieg włókien w odkuwce wykonanej metodą TR

2. TR - najnowsza wersja kucia wałów korbowych sposobem spęczania z równoczesnym wyginaniem. Twórcą metody chronionej patentami krajowymi i zagranicznymi jest doc.dr inż. Tadeusz Rut. Metoda ta została wdrożona i stosowana w Hucie Batory a ostatnio w Hucie Warszawa oraz w kilku zakładach za granicą na prawach licencji.

Wprowadzenie metody TR w przemyśle krajowym oraz sprzedaż licencji za granicę, spowodowało /obok konieczności ciągłego jej doskonalenia/ do podjęcia badań mających na celu ocenę wpływu tej metody na wytrzymałość zmęczeniową wałów korbowych.

1. Czynniki wpływające na wytrzymałość zmęczeniową wałów korbowych

Wytrzymałość zmęczeniowa wałów korbowych jest problemem bardzo złożonym zarówno pod względem teoretycznym jak i technicznym. Spowodowane to jest przede wszystkim złożonym stanem obciążenia i skomplikowanym kształtem wału. Na wał korbowy działają zmienne w czasie obciążenia od sił gazowych i masowych /rys. 2/ oraz od drgań skrętnych, wzdłużnych i giętych:

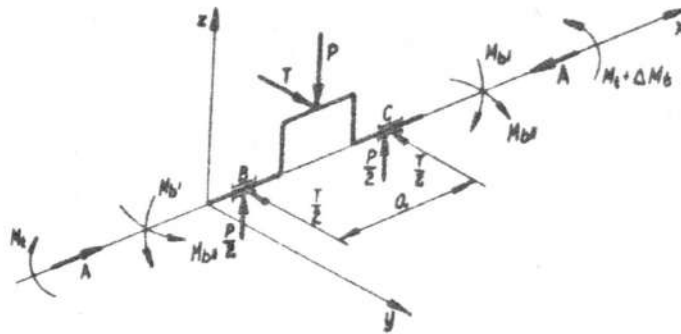


Rys. 2. Wykres obciążeń wału korbowego dla silnika czterosuwowego

Obciążenia przedstawione na rys. 3 wywołują w wale korbowym złożony stan naprężeń trudny do odtworzenia na stanowisku ba-

dawczym.

Analizowanie naprężeń w tej złożonej postaci byłoby bardzo uciążliwe. Dlatego w licznych badaniach, mających na celu określenie wpływu różnych czynników na rozkład i wartość naprężeń oraz na wytrzymałość zmęczeniową wałów korbowych, na ogół rozgraniczono przypadki obciążeń gnących i skręcających i ustalano pewne zależności oddzielenie dla obu rodzajów obciążeń [6, 7, 11, 14, 19] .



Rys. 3. Stan obciążeń wykorbienia wału

Złożony kształt wału jest przyczyną wysokich miejscowych koncentracji naprężeń.

Wyniki dotychczasowych badań w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej wałów korbowych pozwalają jedynie na jakościową ocenę wpływów poszczególnych czynników na stan i rozkład naprężeń w wale korbowym oraz wytrzymałość i nośność zmęczeniową wałów. Wskutek braku wyczerpujących danych eksperymentalnych dokładne obliczenia wałów korbowych mogą być przeprowadzone tylko w nielicznych przypadkach [11, 12] . Dla obliczenia nośności zmęczeniowej wałów korbowych w oparciu o znane wzory konstruktor zmi-

szony jest wyznaczać doświadczalnie wartości odpowiednich współczynników.

Obliczenia nie dają dostatecznie miarodajnych wyników [11, 14], nawet wtedy, gdy wartości odpowiednich współczynników wyznaczono doświadczalnie. Wynika to przede wszystkim stąd, że nie uwzględnia się w nich wielu czynników. Występuje pewna nieokreśloność jeżeli chodzi o trwałość i wytrzymałość zmęczeniową. Nieokreśloność ta wyraża się często dużym rozrzutem. Inną przyczyną jest to, że modelując kształt i rozkład naprężeń w badaniach prowadzonych dla wyznaczenia wartości odpowiednich współczynników nie uwzględnia się współdziałania /interakcji/ innych czynników.

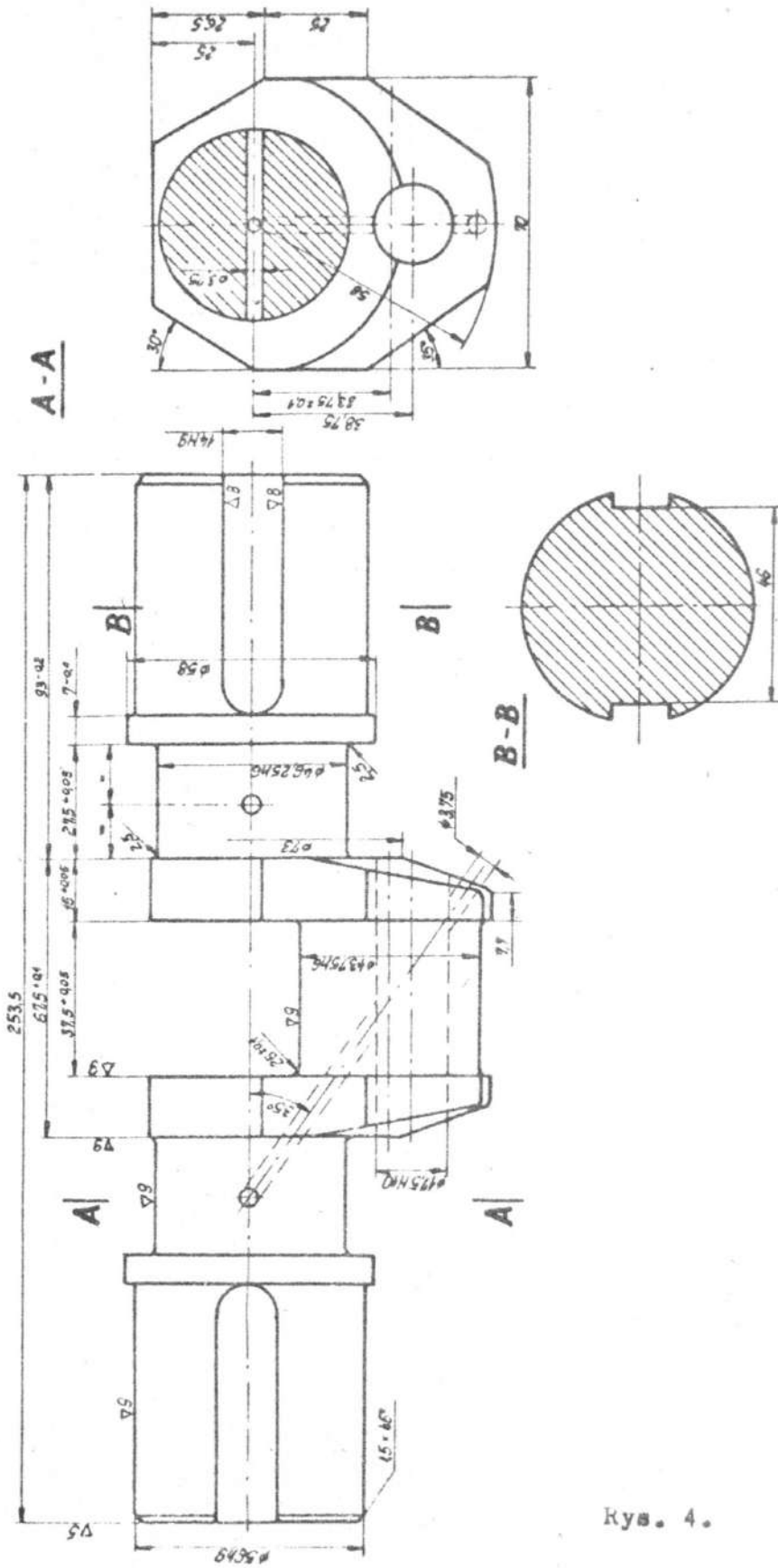
Konieczność uwzględnienia takich czynników jak : rodzaj materiału, kształt wału, technologia kucia, stan obciążeń itp., spowodowała rozwinięcie się szeregu kierunków badawczych poświęconych analizie wpływu poszczególnych czynników na wytrzymałość zmęczeniową wałów [11, 12, 14] .

Duże znaczenie zarówno teoretyczne jak i doświadczalne mają badania rozkładu naprężeń. Nawet stosunkowo dokładne obliczenia wałów korbowych, oparte na znajomości rozkładu naprężeń, własności materiału i technologii wykonania nie mogą wyeliminować doświadczalnych badań zmęczeniowych.

Spośród wszystkich badań wytrzymałościowych szczególnie badania zmęczeniowe dają bardzo znacznie różniące się pomiędzy sobą wyniki, które zależą nie tylko od uwzględnianych w badaniach czynników, ale w bardzo dużym stopniu od przyjętej metodyki badań.

W zakres opracowanej metodyki badań wytrzymałości zmęczeniowej wałów korbowych wchodzi :

- technologia kucia modeli wałów korbowych,
- materiał próbek modelowych wałów korbowych,
- kształt i wymiary próbek,

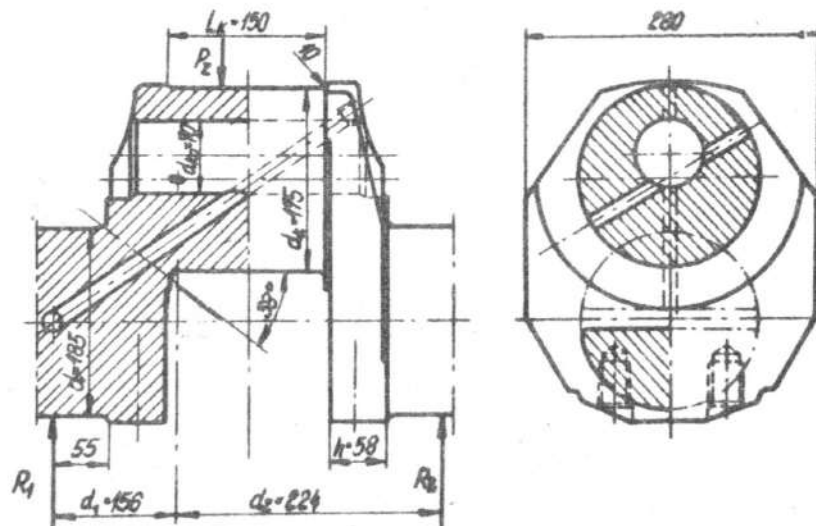


Rys. 4.

- obróbka mechaniczna próbek,
- kontrola przed badaniami,
- przygotowanie stanowiska badawczego,
- sposób mocowania próbki na stanowisku badawczym,
- wyznaczenie wartości i rodzaju obciążenia,
- wyznaczenie liczby cykli /baży/,
- kontrola wartości obciążeń w czasie badań,
- opracowanie wyników badań.

2. Modelowanie wału korbowego

Badania wytrzymałości zmęczeniowej wałów korbowych kutych swobodnie i kutych metodą TR przeprowadzono na modelu geometrycznie podobnym do pojedynczego wykorbienia oryginalnego wału silnika a8C22¹ /rys. 5/. Model stanowi pojedyncze wykorbienie tego wału wykonane w skali jeden do czterech.



Rys. 5

1. -Odkuwki tych wałów wykonuje Huta Batory

Geometryczne podobieństwo modelu i rozpatrywanego obiektu /oryginału/ zapewnia analogię rozkładów naprężeń pod warunkiem, że są również spełnione kryteria podobieństwa w odniesieniu do obciążeń.

3. Geometria modelu wału korbowego

Kształt i wymiary przyjętego modelu wału korbowego przedstawiono na rys. 4. Model składa się z części zasadniczej, modelującej wykorbienie rzeczywistego wału korbowego oraz z dwóch czopów, umożliwiających realizację obciążeń.

Model różni się tym od oryginału, że nie wykonano w nim otworów olejowych.

Usytuowanie otworów olejowych w wałach oryginalnych kątach swobodnie i metodą TR jest identyczne.

Założono, że nie wykonanie otworów olejowych nie wpływa na ocenę różnic wytrzymałości zmęczeniowej badanych modeli kątach swobodnie i metodą TR.

Bezwymiarowe parametry określające kształt i wymiary modelu wału są identyczne jak dla wału silnika a8022 /tablica 1/.

4. Wybór materiału

Do wykonania modeli wałów korbowych przyjęto dwa gatunki stali :

- stal węglową 35, jako najczęściej stosowaną spośród stali węglowych na wały korbowe silników wysokoprężnych,
- stal stopową 40 HMNA, jako szeroko stosowaną na wały korbowe

wysokoprężnych silników kolejowych i okrętowych, między innymi na wał silnika a8022.

Tabela 1

Lp.	Określenie	Oznaczenie	Wykorbie- nie wału a8022 /mm/	Model /skala 1:4/ wykorbie- nia wału /mm/
1.	Srednica czopa głównego	d_1	180	45,0
2.	Srednica czopa korbowego	d	175	43,75
3.	Srednica otworu czopa korbowego	d_w	70	17,5
4.	Mimośród otworu czopa korbowego	e	20	5
5.	Grubość ramienia	h	60	15
6.	Szerokość ramienia	b	280	70
7.	Promień przejść	r	10	2,5
8.	Pokrycie czopów		45	11,25
9.	Długość czopa korbowego	l	150	32,5
10.	Wskaźnik przekroju na skręcanie	W_o	1246cm^3	$16021,5\text{mm}^3$
	Wskaźnik przekroju na zginanie	W_y	693cm^3	$8010,7\text{mm}^3$
11.	Parametry konstrukcyjne /bezwymiarowe/			
	$\frac{r}{h} = 0,16$,	$\frac{b}{d} = 0,4$,	$\frac{r}{d} = 0,0571$,	
	$\lambda = \frac{e}{d} = 0,1143$,	$\frac{d}{d} = 0,2571$,		
	$m = \frac{d}{d} = 0,4$,	$\frac{h}{d} = 0,3429$,		

Materiałem wyjściowym na próbki modelowe były dwa przekute wlewiki z powyższych stali otrzymane z Huty Batory. Stopień przekucia obu wlewków był jednakowy. Skład chemiczny stali /wg wykonanej analizy/ podano w tablicy 2¹.

Tablica 2.

Nr wyt.	Gat.	C	Si	Mn	P
P35269	35	0,34	0,22	0,57	0,015
7196791A	40HMNA	0,37	0,23	0,60	0,024

Tablica 2 cd.

Nr wyt.	Gat.	S	Cr	Ni	Mo	Cu
P35269	35	0,018	0,08	0,08	-	0,05
7196791A	40HMNA	0,010	0,72	1,32	0,19	0,06

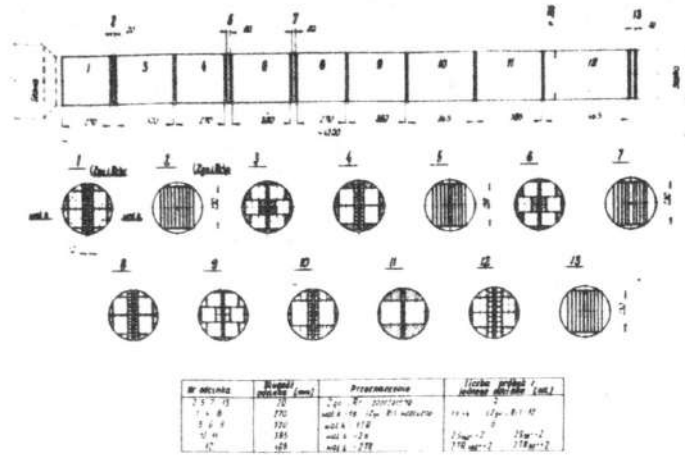
Przekute wlewiki pocięto mechanicznie na odcinki zgodnie z rys. 6 i 7. Powyższe rysunki wyjaśniają również przeznaczenie tych odcinków i sposobów pobierania z nich materiału wyjściowego na próbki modelowe wałów S i TR² i próbki standardowe dla wyznaczenia R_r i Z_{go}.

Materiał wyjściowy na te ostatnie pobierano wzdłuż i w poprzek kierunku włókien /w celu otrzymania tzw. próbek "wzdłużnych" i "poprzecznych" /rys. 11, 12/.

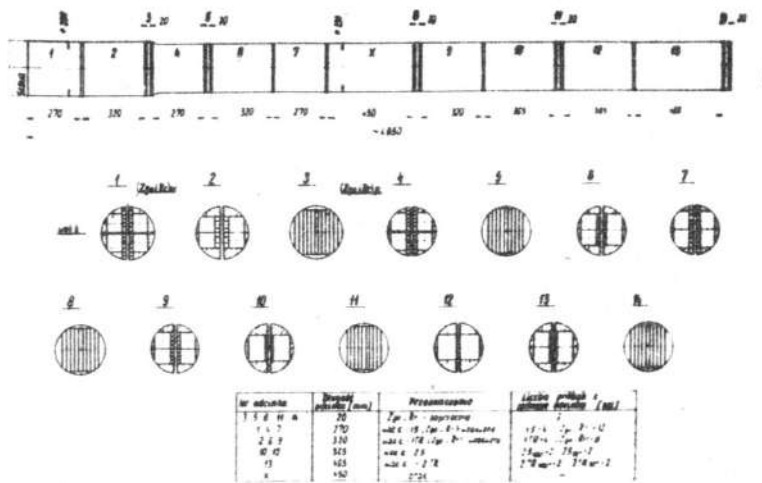
1. Materiał ten pochodzi z produkcji bieżącej i był przeznaczony na odkuwki wału korbowego silnika a8022. Materiał badano defektoskopem ultradźwiękowym.

2. TR - próbki modeli wału kute metodą TR
S - próbki modeli wału kute swobodnie.

Met. A-35



Rys. 6

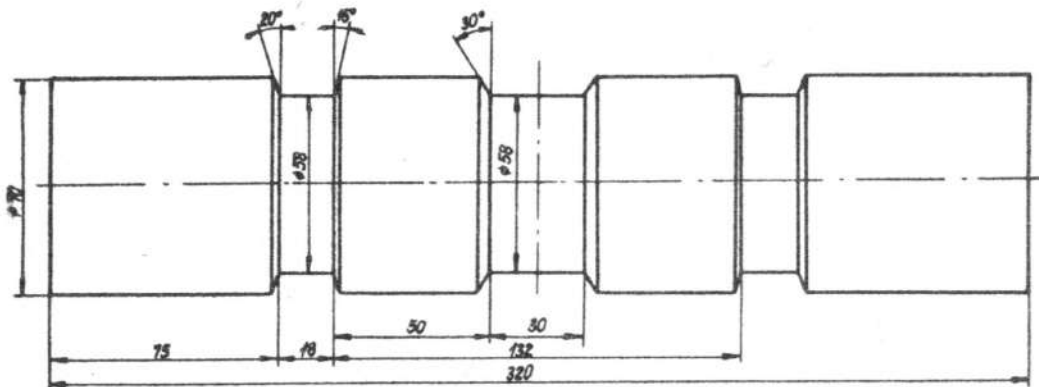


Rys. 7

5. Wykonanie próbek modelowych i standardowych

Wykonaną z materiału wyjściowego odkuwkę modelu wału korbowego kąta swobodnie przedstawiono na rys. 9. Kształt wykorbienia tych odkuwek otrzymano za pomocą obróbki wiórowej.

W celu otrzymania odkuwek modeli wałów korbowych kątach metodą TR przygotowano wstępnie materiał wyjściowy zgodnie z rys. 8.

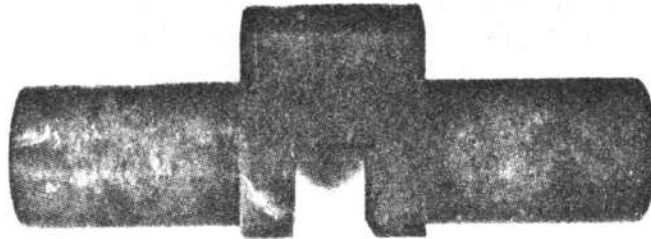


Rys. 8.

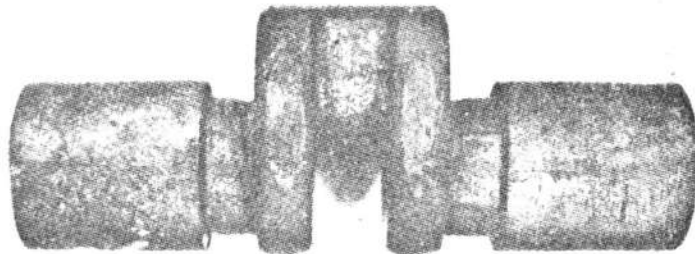
Z przygotowanego materiału wyjściowego wykonano odkuwki w przyrządzie modelowym USW-4M, na prasie hydraulicznej FYE-250.

Parametry kucia w przyrządzie modelowym USW-4M :

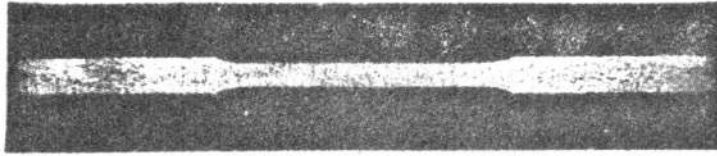
- skok wyginaka 34 mm
- ustawienie końcowe łączników $\alpha = 18^\circ$
- temperatura nagrzewania 1050°C .



Rys. 9. Odkuwka modelu wału korbowego kuta swobodnie i obrabiona wiórowo



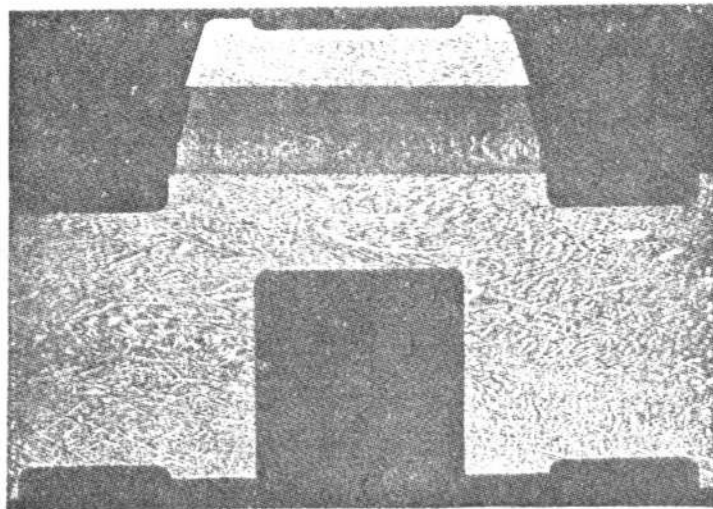
Rys. 10. Odkuwka modelu wału korbowego wykonana metodą TR



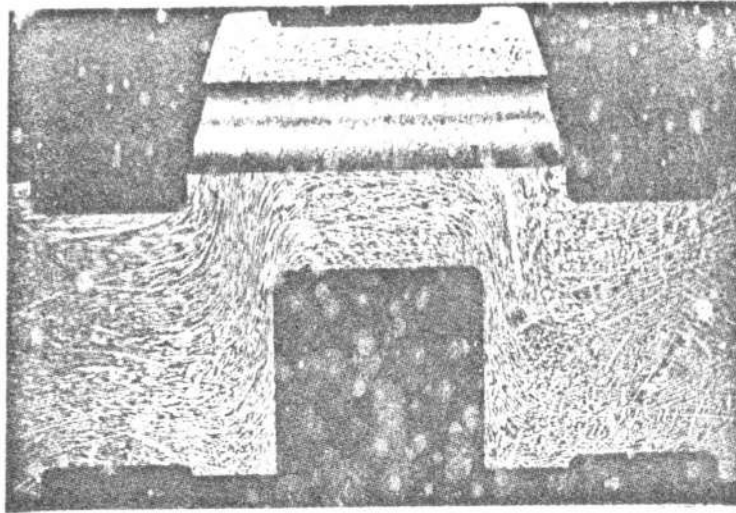
Rys. 11. Przebieg włókien w próbce wzdłużnej



Rys. 12. Przebieg włókien w próbce poprzecznej



Rys. 13. Przebieg włókien w modelu kętym swobodnie



Rys. 14. Przebieg włókien w modelu kuty metodą TR

W celu zapewnienia podobnych własności odkuwek, również odkuwki kute swobodnie nagrzewano do temperatury 1050°C w tym samym piecu i w tych samych warunkach co odkuwki kute metodą TR.

Po wstępnej obróbce mechanicznej odkuwek wykonanych metodą TR i S wszystkie modele wałów normalizowano w tych samych warunkach /temperatura pieca 850°C , czas grzania 50 minut/.

Nie stwierdzono różnic w twardości modeli wałów kutyh swobodnie i metodą TR¹.

Wszystkie modele wałów były obrabiane wiórowo na tych samych maszynach.

Chropowatość powierzchni czopa korbowego wszystkich wykonanych modeli wałów odpowiadała klasie $\nabla 9$.

Pomiary chropowatości wykonano na profilometrafie ME10 prod. NRD.

Natomiast pomiar promienia przejściowego czopa korbowego

1. W badaniach opisanych w [18] stwierdzono wyższą twardość wałów kutyh metodą ciągią /RR/.

w ramię wykonano na uniwersalnym mikroskopie "Zeisa" przy pomocy głowicy rewolwerowej E2 przy powiększeniu 30 x.

Próbki standardowe dla wyznaczania R_r i Z_{go} wykonano zgodnie z zaleceniami PN-62/H-04310, PN-65/H-04308, PN-65/H-04325. Próbki te podzielono na dwie grupy. Pierwsza grupa była normlizowana w podobnych warunkach jak próbki modelowe wałów, a druga grupa próbek była wyżarzana odprężająco w temperaturze 300°C .

Twardość wykonanych próbek standardowych nie różniła się istotnie od twardości modeli wałów.

6. Program prób

Wytrzymałość zmęczeniową wałów definiuje się jako punkt przecięcia prostej Wöhlera /w układzie współrzędnych $\sigma - \log N/$ z bazą. Jest to wytrzymałość umowna.

W przeprowadzonych próbach modeli wałów korbowych uwzględniono wpływy następujących czynników na wytrzymałość zmęczeniową :

- technologia kucia,
- gatunek stali,
- rodzaj obciążenia,
- wartość obciążenia.

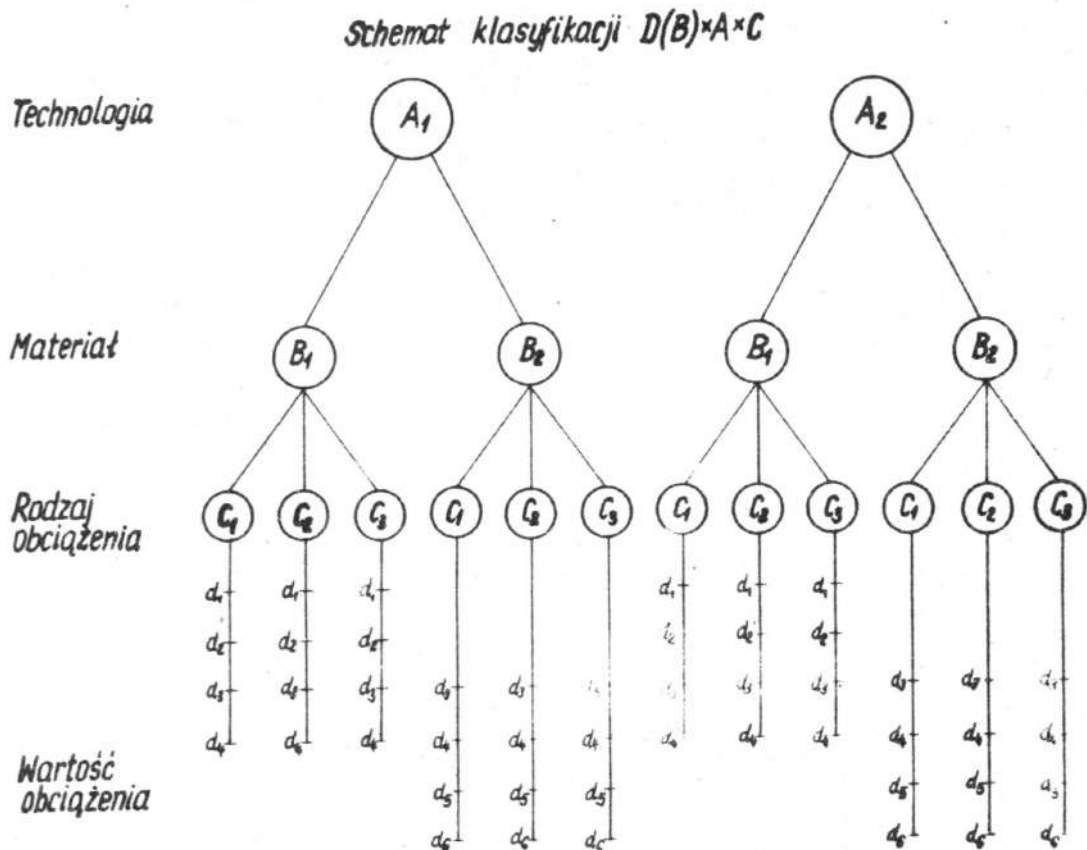
W oparciu o znane wzory i wyniki doświadczeń oraz o badania przeprowadzone na próbkach gładkich wzdłużnych i poprzecznych, w przybliżeniu wyznaczono wartość obciążeń odpowiadających trwałości wałów korbowych w przedziale liczby cykli między punktem przecięcia krzywej Wöhlera a bazą.

Przyjęto bazę $N = 5 \cdot 10^6$ cykli.

Istotność wpływu poszczególnych czynników oraz interakcja po-

między poziomami czynników ustalono na podstawie analizy wariancji i analizy regresji.

Program prób obejmował ocenę łącznego wpływu czynników wymienionych w tabelicy 3 zgodnie z przedstawionym schematem /rys.15/ na wytrzymałość zmęczeniową wałów korbowych.



Rys. 15.

Tablica 3.

Czynnik	Określenie	Oznaczenie
Technologia	wały kute swobodnie	A ₁
	wały kute metodą TR	A ₂
Materiał	35	B ₁
	40 HMNA	B ₂
Rodzaj obciążenia	zginanie \pm Mg	C ₁
	skręcanie \pm Ms	C ₂
	zginanie i skręcanie jednoczesne $/\pm$ Mg + $/\pm$ Ms /	C ₃
Wartość obciążenia	w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej trwałej	D _i i=1,2,3,4

7. Program obciążeń

W celu dobrania odpowiedniego zakresu wartości obciążeń do prób zmęczeniowych modeli wałów obliczono na podstawie wzorów [11] naprężenia dla różnych wartości obciążeń. Porównując uzyskane wartości naprężeń z wytrzymałością zmęczeniową próbek standardowych przyjęto ostatecznie do programu prób wartości obciążeń zestawione w tablicy 4,5,6. W tablicach tych podano jednocześnie wyliczone wartości naprężeń maksymalnych w czopie korbowym i na powierzchni przejściowej czopa korbowego w ramię, jakie wystąpią przy odpowiednich obciążeniach.

W programie obciążeń dla modeli poddanych jednoczesnemu zginaniu i skręcaniu /tablica 6/ zachowano stały stosunek momentu skręcającego, który wynosi 0,425. Wartość ta odpowiada rzeczywistemu obciążeniu wału silnika a8C22.

Tablica 4. Program obciążeń dla modelu zginanego

Ip.	Siła gnąca + P		Moment gnący + M - g		Naprężenia gnące na czopie korbowym + max - min		Naprężenia w promieniu przejściowym + max - min		Dla modeli wałów wykonanych ze stali
	KG	(kN)	kGcm	(kNmm)	KG/mm ²	(MN/m ²)	KG/mm ²	(MN/m ²)	
-									-
1.	1800	(17,65)	19125	(187,8)	5,8	(56,9)	18,25	(179)	35
2.	2000	(19,61)	21250	(208,3)	6,5	(63,7)	20,27	(223)	35
3.	2300	(22,56)	24438	(240,0)	7,4	(72,6)	23,31	(228,2)	35 i 40 HMNA
4.	2600	(25,5)	27625	(276,0)	8,4	(82,4)	26,35	(258)	35 i 40 HMNA
5.	2900	(28,44)	30813	(302,2)	9,4	(92,2)	29,4	(288)	40 HMNA
6.	3200	(31,38)	34000	(334,0)	10,3	(101)	32,44	(318,2)	40 HMNA

Tablica 5. Program obciążeń dla modelu skręcanego

Ip.	Moment skręcający + M - S		Naprężenia styczne na czopie korbowym		Naprężenia styczne w promieniu przejści- ciowym wykorbienia		Dla modeli wa- żów wykonanych ze stali
	kGm	(Nm)	kG/mm ²	(MN/m ²)	kG/mm ²	(MN/m ²)	
1.	80	(784,5)	6,0	(58,8)	11,5	(113)	35
2.	90	(883,0)	6,8	(66,7)	13,0	(127,8)	35
3.	100	(980,7)	7,5	(73,5)	14,4	(141,2)	35
4.	110	(1079,0)	8,3	(81,4)	15,9	(156,0)	35 i 40 HMNA
5.	120	(1177,0)	9,0	(88,3)	17,2	(169,0)	40 HMNA
6.	130	(1275,0)	9,8	(96,1)	18,7	(183,6)	40 HMNA
7.	140	(1373,0)	10,5	(103,0)	20,0	(196,0)	40 HMNA

Tablica 6. Program obciążeń dla modeli poddanych jednoczesnemu zginaniu i skręcaniu

Ip.	Siła gnąca		Moment skręcający		Naprężenia zstępne na czopie korbowym		Naprężenia zstępne w promieniu przejściowym czopa w ramię		Dla modeli wałów wykonanych ze stali
	± P	(kN)	± Ms	(Nm)	± z max	(MN/m ²)	± z max	(MN/m ²)	
-	kg		kGm		kg/mm ²		kg/mm ²		-
1.	1200	(11,77)	30	(294,2)	5,5	(53,9)	13,6	(133,3)	35
2.	1400	(13,73)	35	(343,2)	6,4	(62,8)	15,8	(155,0)	35
3.	1600	(15,69)	40	(392,3)	7,3	(71,6)	18,1	(177,8)	35 i 40 HMNA
4.	1800	(17,65)	45	(441,3)	8,2	(80,4)	20,3	(200,7)	35 i 40 HMNA
5.	2000	(19,61)	50	(490,0)	9,2	(90,2)	24,8	(243,2)	40 HMNA
6.	2200	(21,57)	55	(539,0)	10,0	(98,1)	25,8	(253,0)	40 HMNA

8. Przebieg badań

Przed przystąpieniem do zasadniczych prób zmęczeniowych modeli wałów korbowych wykonano wstępnie badania własności wytrzymałościowych na próbkach gładkich, w ramach których wyznaczono:

- wytrzymałość na statyczne rozrywanie dla próbek poprzecznych i wzdłużnych,
- wytrzymałość zmęczeniową na obrotowe zginanie dla próbek gładkich wzdłużnych i poprzecznych.

Wyniki powyższych badań służyły za podstawę do ustalenia programu obciążeń do prób zmęczeniowych modeli wałów.

Zasadnicze próby zmęczeniowe przeprowadzono na 48 modelach wałów korbowych, które podzielono na 12 grup zgodnie z tablicą 7.

Dla każdej grupy stosowano cztery zakresy wartości obciążeń /tablica 4,5,6/, przy czym modele wykonane metodą S i TR z tej samej stali i poddane temu samemu rodzajowi obciążenia, badano przy jednakowych zakresach wartości obciążeń.

Próby zmęczeniowe modeli wałów przeprowadzono na specjalnie zbudowanym stanowisku badawczym, którego opis znajduje się w oddzielnym artykule tego zeszytu.

Wszystkie próby zmęczeniowe przeprowadzono przy tej samej częstotliwości obciążenia wynoszącej 520 cykli na minutę i przy zbliżonych warunkach otoczenia /temperatura 18 - 26°/.

Przetrwanie przez model założonej bazy 5×10^6 cykli uważano za zakończenie próby.

Podczas prób zmęczeniowych, w których model poddany był zginaniu, zauważono występowanie silnego zużycia się czopa korbowego i czopów głównych wskutek zniszczenia kontaktowego. Wprowadzenie smarowania tych miejsc roztworem grafitu koloidalnego i oleju silnikowego zmniejszyło w znacznej mierze intensywność tego procesu.

Tablica 7.

Nr grupy	Liczba modeli w grupie	Metoda kucia	Materiał	Rodzaj obciążenia
1	4	S /A ₁ /	35 /B ₁ /	zginanie /C ₁ /
2	4	TR /A ₂ /		
3	4	S /A ₁ /	40 HMNA /B ₂ /	
4	4	TR /A ₂ /		
5	4	S /A ₁ /	35 /B ₁ /	skrećanie /C ₂ /
6	4	TR /A ₂ /		
7	4	S /A ₁ /	40 HMNA /B ₂ /	
8	4	TR /A ₂ /		
9	4	S /A ₁ /	35 /B ₁ /	zginanie i skrećanie /C ₃ /
10	4	TR /A ₂ /		
11	4	S /A ₁ /	40 HMNA /B ₂ /	
12	4	TR /A ₂ /		

W czasie badań trzykrotnie wymieniano zespoły sprężyna talerzowych celem uniknięcia ich zniszczenia zmęczeniowego.

Wyniki badań zmęczeniowych modeli wału korbowego zestawiono w tabelicy 8.

Wyniki badań na wytrzymałość zmęczeniową wałów korbowych
/model AS-C22/ kutech swobodnie i metodą TR

Tablica 8.

Rodzaj obciążenia /C/	Wartość obciążenia /Obliczona amplituda naprężeń/		Technologia S /A ₁ /			Technologia TR /A ₂ /			Materiał /B/	
	kg/mm ² /D ₁ /	/MN/m ² / i=1,2,3,4	Nr próbki	liczba cykli x 10 ⁶	-zniszczona +niezniszczona	Nr próbki	liczba cykli x 10 ⁶	-zniszczona +niezniszczona		
Zginanie /C ₁ /	+ 8,4	/+ 82,4/	11-A8	0,66	-	3-A3	0,91	-	35 /B ₁ /	
	+ 7,4	/+ 72,6/	6-A4	0,92	-	1-A3	3,2	-		
	+ 6,5	/+ 63,7/	2-A1	1,4	-	5-A6	5,0	+		
	+ 5,8	/+ 56,9/	10-A8	4,2	-	10-A9	5,0	+		
	+ 10,3	/+ 101,0/	8-B4	0,57	-	8-B6	0,98	-		
	+ 9,4	/+ 92,2/	9-B7	0,97	-	2-B2	2,6	-		
	+ 8,4	/+ 82,4/	6-B4	1,9	-	9-B9	5,0	+		
	+ 7,4	/+ 72,6/	11-B7	5,0	+	12-B9	5,0	+		
Zginanie /C ₂ /									40 BINA /E ₂ /	

Tablica 8. cd.

Rodzaj obciążenia /C/	Wartość obciążenia /Obliczona amplituda naprężeń/		Technologia S /A ₁ /			Technologia TR /A ₂ /			Materiał /B/
	kg/mm ² /D ₁ /	/MN/m ² /i=1,2,3,4	Nr próbek	Liczba cykli x 10 ⁶	-zniszczona +niezniszczona	Nr próbek	Liczba cykli x 10 ⁶	-zniszczona +niezniszczona	
skrajnie 2 +1 /C ₂ /	+ 8,3	+ 81,4/	9-A8	0,68	-	2-A3	0,97	-	35 /B ₁ /
	+ 7,5	+ 73,5/	12-A8	0,99	-	8-A6	1,7	-	
	+ 6,8	+ 66,7/	5-A4	2,2	-	6-A6	5,0	+	
	+ 6,0	+ 58,8/	7-A4	4,6	-	12-A9	5,6	+	
	+ 10,5	+ 103,0/	4-B1	0,66	-	3-B2	0,71	-	
	+ 9,8	+ 96,1/	2-B1	1,1	-	6-B6	2,4	-	
	+ 9,0	+ 86,3/	5-B4	1,9	-	7-B6	5,0	+	40 /B ₂ /
	+ 8,3	+ 81,4/	12-B7	5,0	+	10-B9	5,0	+	

Tablica 8. cd.

Rodzaj obciążenia /C/	Wartość obciążenia /Obliczona amplituda naprężeń/		Technologia S /A./			Technologia TR /A ₂ /			Materiał /B/	
	kg/mm ² /D ₁ /	/MN/m ² /i=1,2,3,4	Nr próbki	Liczba cykli x 10 ⁶	-zniszczona +niezniszczona	Nr próbki	Liczba cykli x 10 ⁶	-zniszczona +niezniszczona		
Zginanie i skręcanie /C ₃ /	+ 8,2	/+ 80,4/	S-A4	0,68	-	9-A9	0,93	-	35 /B ₁ /	
	+ 7,3	/+ 71,6/	A-A1	0,94	-	4-A3	1,4	-		
	+ 6,4	/+ 62,8/	3-A1	1,4	-	7-A6	3,7	-		
	+ 5,5	/+ 53,9/	1-A1	4,1	-	11-A9	5,0	+		
	+ 10,0	/+ 98,1/	3-B1	0,77	-	4-B2	1,1	-		
	+ 9,2	/+ 90,2/	1-B1	0,98	-	1-B2	3,1	-		
	+ 8,2	/+ 80,4/	7-B4	3,6	-	11-B9	5,0	+		
	+ 7,3	/+ 71,6/	10-B7	5,0	+	5-B6	5,0	+		
									40 HMNA /B ₂ /	

9. Przełomy zmęczeniowe modeli wałów

Z badanych 48 próbek modeli wału korbowego, 34 uległo zniszczeniu. Poniższa tablica przedstawia liczby zniszczonych próbek przy danym rodzaju obciążenia, materiale i technologii kucia modelu.

Tablica 9.

Rodzaj obciążenia	Materiał	Metoda kucia	Liczba modeli zniszczonych
Zginanie	35	S	4
		TR	2
	40 HMNA	S	3
		TR	2
Skręcanie	35	S	4
		TR	2
	40 HMNA	S	3
		TR	2
Zginanie i skręcanie	35	S	4
		TR	3
	40 HMNA	S	3
		TR	2

Niniejsza praca nie obejmowała badań i analizy powstawania przełomów zmęczeniowych zależnych między innymi od kształtu modelu wału i obróbki cieplnej. Zagadnienie makro i mikro budowy złomu zmęczeniowego jest bardzo obszerne i zależy od dużej ilości czynników.

W pracy przeanalizowano umiejscowienie przełomów i lokalizację ognisk zmęczeniowych na zniszczonych modelach wałów. Na rys. 16 do 18 przedstawiono przykładowy przebieg pęknięcia zmęczeniowego w przejściu promieniowym czopa korbowego w ramię.

Odnosnie usytuowania przełomów zmęczeniowych można wyodrębnić 3 grupy modeli. Najliczniejszą grupę /28 szt./ stanowią modele, w których przełom zmęczeniowy jest w ramieniu i przebiega przez wewnętrzną powierzchnię przejściową czopa korbowego w ramię /rys. 19 i 20/. Grupa ta obejmuje wszystkie modele kute metodą TR niezależnie od rodzaju obciążenia i materiału, oraz wszystkie modele kute swobodnie obciążane zginaniem.

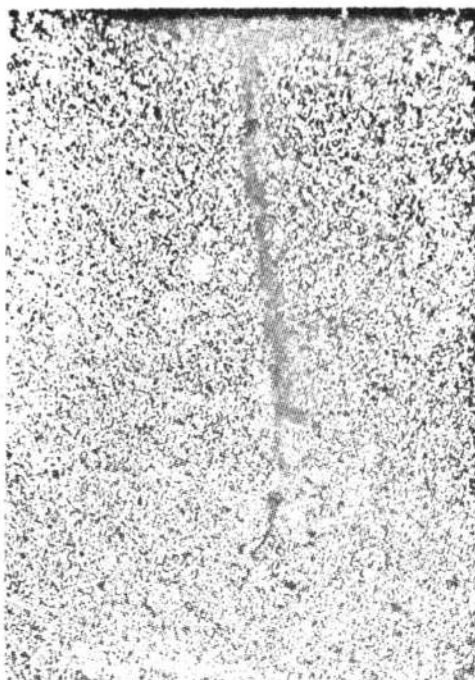
Druga grupa modeli /4 szt./ charakteryzuje się przełomem leżącym w czopie korbowym.

Do grupy tej należy część modeli kutych swobodnie i obciążonych momentem skręcającym /rys. 21/.

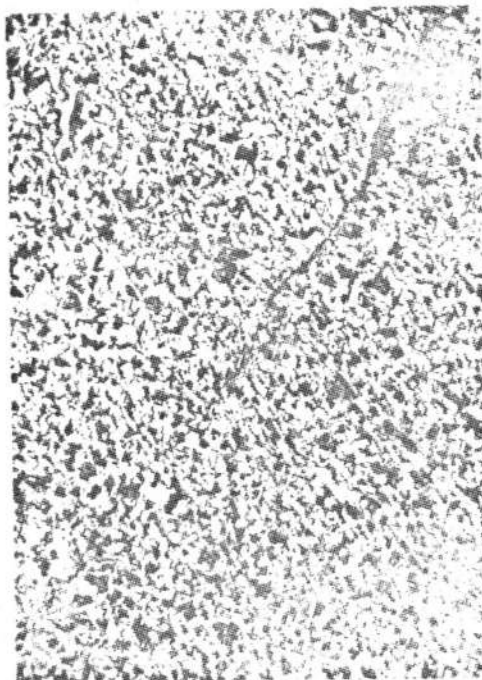
W pozostałych 2 modelach przełom zmęczeniowy przebiega przez powierzchnię przejściową czopa głównego w ramię.

Ogniska zmęczeniowe w dwóch pierwszych grupach modeli zlokalizowane są w przejściu promieniowym czopa korbowego w ramię, przy czym nie są ograniczone do określonego punktu, lecz występują w zakresie łuku $+ 60^{\circ}$ od płaszczyzny wykorbienia. Obserwacja początków powstawania pęknięć i ich dalszego rozwoju w trakcie próby zmęczeniowej była utrudniona ze względu na sposób zamocowania modelu.

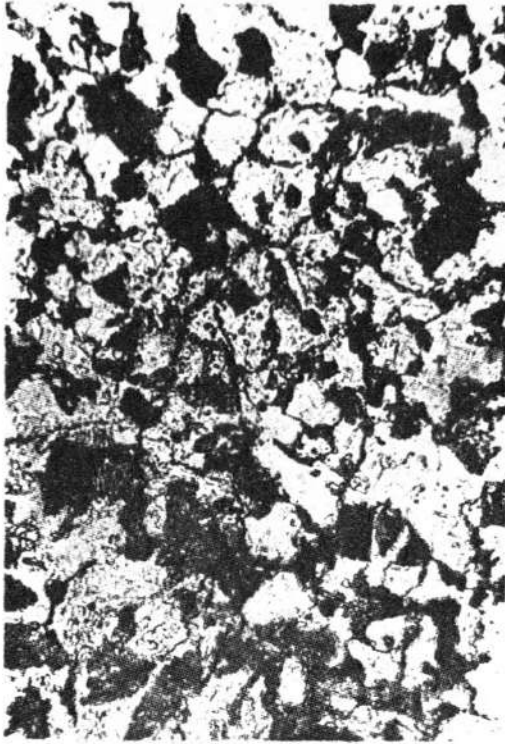
Dlatego też w przypadku przełomów o większej liczbie ognisk, nie ma pewności do właściwej początkowej pozycji pęknięcia.



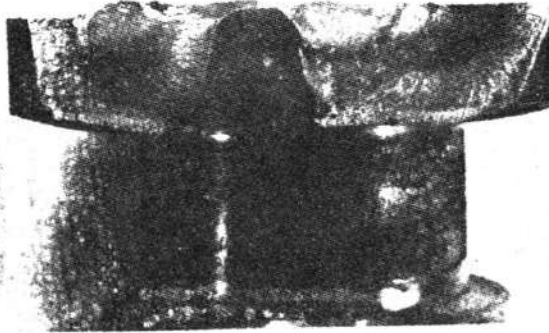
Rys. 16. Pęknięcie zmęczeniowe w przejściu promieniowym czopa korbowego w ramię /powiększenie 25x/



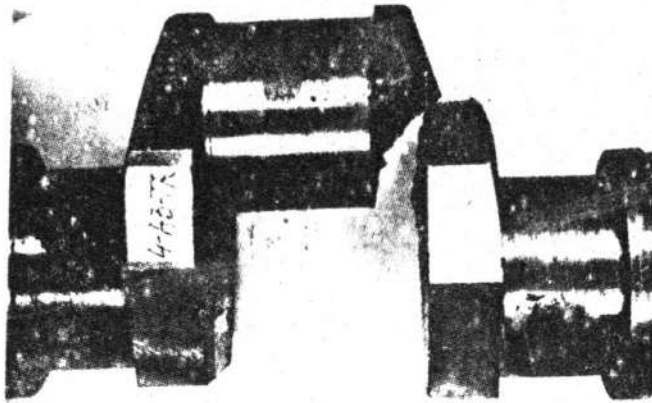
Rys. 17. /powiększenie 100x/



Rys. 18. /powiększenie 500x/



Rys. 19. Złom mechaniczny modelu wału



a



b

Rys. 20.

Nr próbki 4-A3-TR

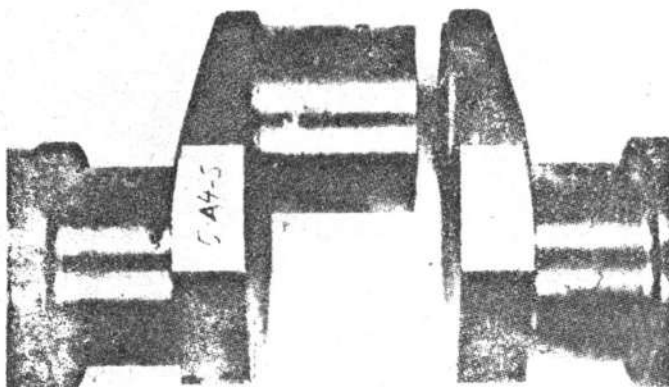
Materiał 35

$P = \pm 1600 \text{ kG} / \pm 15,69 \text{ kN/}$

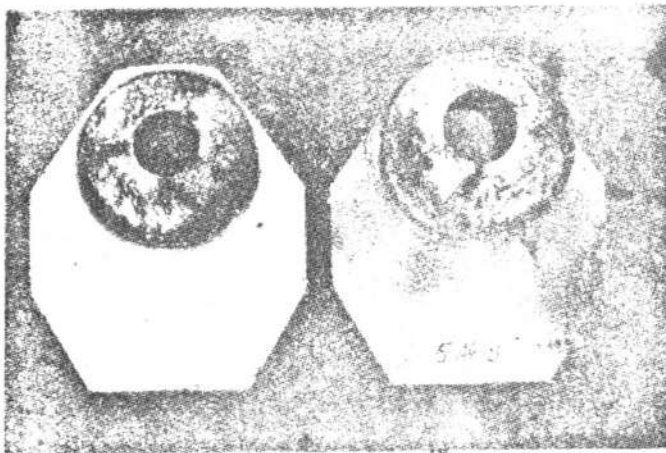
$M = \pm 40 \text{ kGm} / \pm 392,3 \text{ Nm/}$

$\sigma_z = \pm 7,3 \text{ kG/mm}^2 / \pm 71,6 \text{ MN/m}^2 /$

$N = 1400000 \text{ cykli}$



a



b

Rys. 21.

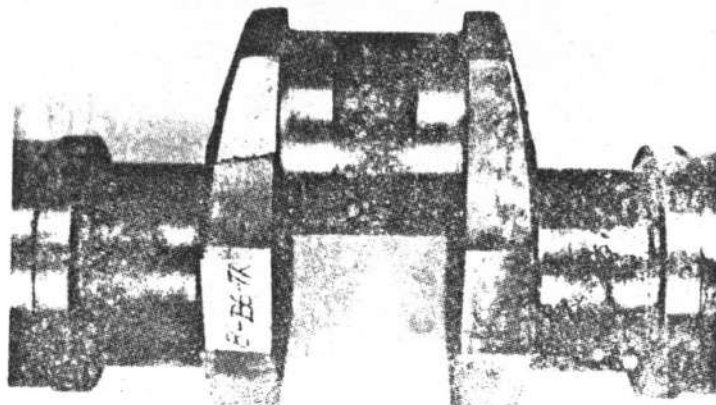
Nr próbki 5-A4-S

Materiał 35

$M = + 90 \text{ kGm} \quad /+ 883 \text{ Nm/}$

$\tau = + 6,8 \text{ kG/mm}^2 \quad /+ 66,7 \text{ MN/m}^2/$

$N = 2200000 \text{ cykli}$



Rys. 22

Nr próbki 8-B6-TR

Materiał 40 HMNA

$P = \pm 3200 \text{ kG} / \pm 31,3 \text{ kN}$

$\sigma = \pm 10,3 \text{ kG/mm}^2 / \pm 101 \text{ MN/m}^2$

$N = 980000 \text{ cykli}$

Literatura

1. Cleghorn G., Burnell J.H. : The manufacture crankshafts by the continuous grein flow process. Transp. Inst. Mar. Engrs 1954-66 March, 49.
2. Cleghorn G., Burnell J.H. : The manufacture of crankshaft by the continuous grein flow. The Marine Eng. and Naval Arch. 1954, nr 2, s. 59.
3. Dyląg Z., Orłowski Z. : Wytrzymałość zmęczeniowa materiałów. WNT, W-wa 1962.

4. Gajewski R. : Analiza wytrzymałości zmęczeniowej wałów korbowych kutych swobodnie i kutych metodą TR. Obróbka Plastyczna, 1973, nr 3, s. 107-116.
5. Gajewski R. : Fatigue strength of crankshafts made by flat die forging and by TR-method. Metal Working Institute, Poznań, 1974.
6. Hoshino J. : Strength Design of Marine Diesel Engine Crankshaft. Bulletin of J.S.M.E., 1968, t.11, nr 43.
7. Hunt R.J., Russell J.E. : Crankshaft forging : Evaluation of continuous grain flow. Proc. Instn. Mech. Engrs 1966-67, t. 181.
8. Katarzyński S., Kocańda S., Zakrzewski M. : Badanie własności mechanicznych metali. Wydanie 3, WNT, W-wa 1969.
9. Krzekotowski Z. : Technologia kucia swobodnego i półswobodnego. Wyd. "Śląsk" Katowice, 1964. Wyd.1.
10. Krzekotowski Z. : Kilka uwag na temat produkcji odkuwek wałów korbowych. Silniki spalinowe nr 4, 1969, s. 7.
11. Lejkin A.S. : Naprężalność i wytrzymałość detali skomplikowanej konfiguracji. Maszynostrojnie, Moskwa 1968.
12. Lejkin A.S. : Stress Concentration in Crankshaft Fillets. Russian Engineering Journal. Nr 5, 1960, s. 14-17.
13. Łukomski Z. : Technologia spalinowych silników kolejowych i okrętowych. WKiŁ, W-wa 1972.
14. Maass H. : Die Gestaltfestigkeit von Kurbelwellen, insbesondere nach den Forderungen der Klassifikationsgesellschaften. MTZ 25, 1964, nr 10, s. 391-405.
15. Materiały konstrukcji silnika a8C22. Obliczenia, badania eksploatacyjne - CBKSS - W-wa 1970
16. Müller L. : Teoria podobieństwa mechanicznego. WNT, W-wa 1961.
17. Niewiarowski K. i in. : Długotrwała próba silnika kolejowego a8C22. Silniki spalinowe nr 2, 1969, s. 20-26.

18. Nishihara M., Bunzai An, Fukui Y. : Fatigue Testing Machines for Crankshafts. Japan Shipbuilding Marine Engineering, May 1969.
19. Nishihara M., Takeuchi T. : Forging of Large Crankshaft in Japan. Materiały z Kobe Steel, Ltd.
20. Nishihara M. Takeuchi T. : Forging of Large Crankshafts in Japan, International Forging Congress. Berlin 1965, 73 /Publ.V.D.Rh., Düsseldorf, 1966/.
21. Oktaba W. : Elementy statystyki matematycznej i metodyka doświadczalnictwa. PWN /wyd. 2/ W-wa 1966.
22. Orłóś Z., Dyląg Z. : Urządzenia do badań zmęczeniowych. Prace Instytutu Techniki Budownictwa, Seria 2, Arkady, W-wa 1962.
23. Pasetti A. : Fatigue Tests and Tensiometric Records on Crankshaft Models Subjected to Torsional Stresses. Fiat Stabilimento Grandi Motori. Technical Bulletin, nr 2, 1969.
24. Rut T., Haliasz J. : Obecne możliwości i granice stosowania polskiej metody spęczania z równoczesnym wyginaniem w produkcji wałów korbowych. Silniki spalinowe nr 4, 1969, s.9.
25. Rut T. : Nowa metoda spęczania z równoczesnym wyginaniem. Obróbka Plastyczna 1963, s. 477-505.
26. Tychowski F. : Forgeage des grands vilbrequins. Referat na "Jourenes Internat, de la Grosse Forge", Paryż 1963.