ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1987

Seria: ENERGETYKA z. 101 Nr kol. 920

Eryk PRUGAR

Zakład Silników Spalinowych
Politechniki Śląskiej w Gliwicach

POSTEP W KONSTRUKCJI SZYBKOOBROTOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM DO NAPĘDU SAMOCHODÓW OSOBOWYCH I DOSTAWCZYCH

Streszczenie. Artykuł dotyczy zagadnień związanych z pracami nad postępem w konstrukcji silników spalinowych o zapłonie samoczynnym jako przyszłościowych jednostek napędowych samochodów osobowych i dostawczych. W artykule omówiono proponowany przez autora nowy obieg termodynamiczny dla wymienionych wyżej silników.

Od czasu opublikowanego przeze mnie, w "Technice Motoryzacyjnej" nr 10 w 1968 r., artykułu pt.: Szybkoobrotowe silniki z zapłonem samoczynnym (ZS) o pojemności do 3000 cm^3, do napędu samochodów osobowych - dał i daje się zauważyć znaczny wzrost liczby samochodów osobowych i dostawczych napędzanych tymi silnikami. W artykule tym, do którego napisania skłoniło mnie pojawienie się w 1967 r. najmniejszego wówczas na świecie silnika spalinowego ZS firmy PEUGEOT typ XLD - przedstawiłem dane techniczne produkowanych praktycznie od 1936 r. silników spalinowych ZS przeznaczonych do napędu samochodów osobowych.

Pierwszy na świecie samochodowy silnik ZS został zbudowany w 1923 r. w Niemczech, przez firmę BENZ i MAN. Potwierdzeniem postępu w konstrukcji samochodowych silników ZS może być porównanie danych technicznych wspomnianego uprzednio silnika PEUGEOT - XLD z danymi technicznymi aktualnie najmniejszego silnika ZS firmy DAIHATSU typ CL, zamieszczonych w tablicy 1. Z porównania tego wynika, że silnik DAIHATSU-CL odznacza się wyższym objętościowym wskaźnikiem mocy uzyskiwanym przy niższym stopniu sprężania i przy niższej prędkości obrotowej; w wersji z doładowaniem osiąga on moc N_e = 34 kW.

Fabryki samochodów osobowych i dostawczych produkują modele, w których stosowane są silniki ZI i jako alternatywne - silniki ZS. Typowym przykładem coraz większego wzrostu liczby samochodów osobowych i dostawczych z silnikami ZS jest RFN, w której udział tych samochodów w globalnej produkcji stanowi aktualnie ~ 14%, a przewiduje się. że do 2000 roku wyniesie on blisko 20%.

Jakkolwiek samochody osobowe i dostawcze z silnikami ZS są średnio ~ 13% droższe od samochodów napędzanych silnikami ZI, to jednak następujące względy decydują o coraz powszechniejszym nabywaniu tych pierwszych:

- mniejsze zużycie paliwa,
- spełnianie norm EWG dotyczących toksyczności ich spalin.

Tablica 1

Dane techniczne silników PEUGEOT - XLD i DAIHATSU - CL

Silnik	i	D	S	ε	V_{ss}	N_e		n_N	M_o	n_M	$\frac{N_e}{V_{ss}}$	
		mm	mm		dm^3	KM	kW	min^{-1}	Nm	min^{-1}	$\frac{KM}{dm^3}$	$\frac{kW}{dm^3}$
PEUGEOT-XLD	4	75	71	22,3	1.255	40	29	5000	73		32	23
DAIHATSU-CL	3	76	73	21,5	0.993	37	27	4600	60	3500	37,2	27,2

Oznaczenia:

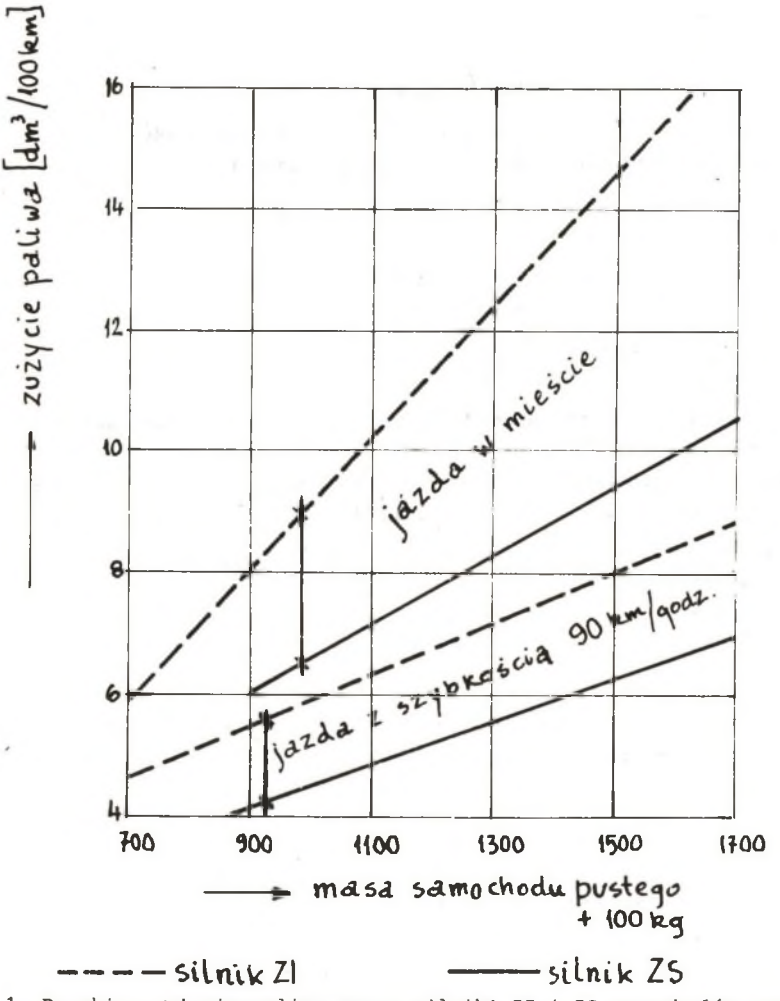
i - liczba cylindrów
D - średnica tłoka
S - skok tłoka
ε - stopień sprężania
V_{ss} - pojemność skokowa silnika
N_e - maksymalna moc silnika
n_N - prędkość obrotowa silnika przy maksymalnej mocy
M_o - maksymalny moment obrotowy silnika
n_M - prędkość obrotowa silnika przy maksymalnym momencie
$\frac{N_e}{V_{ss}}$ - objętościowy wskaźnik mocy

W 1984 r. udział samochodów osobowych i dostawczych z silnikami ZS w globalnej produkcji poszczególnych firm zachodnioniemieckich wynosił:

- Mercedes typ 200-300 TD 44%
- Mercedes typ 190 39%
- VW typ Jetta 19%
- VW typ Golf 21%
- Opel typ Kadett 15%
- Ford typ Fiesta 11%

Aktualnie firma Volkswagen jest największym na świecie producentem silników ZS do napędu samochodów osobowych i dostawczych. W tablicach 2,1, 2.2 i 2.3 zestawiono dla celów porównawczych dane techniczne niektórych samochodowych silników spalinowych o zapłonie iskrowym (ZI) i o zapłonie samoczynnym (ZS). Z danych technicznych przedstawionych w tablicach wynika, że:

- silniki ZS przy zbliżonych objętościach skokowych silników ZI rozwijają mniejszą moc, średnio o 30% do 40%,
- masy samochodów napędzanych silnikami ZS są większe o 50 do 100 kg od mas samochodów napędzanych silnikami ZI.



Rys. 1. Przebieg zużycia paliwa przez silniki ZI i ZS samochodów osobowych o różnych masach i przy jeździe w mieście oraz z szybkością 90 km/h

Fig. 1. The course of fuel use by the engines ZI and ZS of the different mass cars while tourning in the city at the speed of 90 km per hour

Na rys. 1 przedstawiono przebieg zużycia paliwa przez silniki ZI i ZS samochodów osobowych o różnych masach i przy jeździe w mieście oraz z szybkością 90 km/h. Odcinki rzędnych, zawartych pomiędzy prostymi charakteryzu-

cymi przebieg zużycia paliwa, określają różnicę w zużyciu paliwa przez silniki ZI i ZS. Pomiarów zużycia paliwa wg norm ECE Nr 15-04, których wyniki przedstawiono na rys. 1, dokonano na 132 samochodach osobowych napędzanych silnikami ZI i na 41 samochodach osobowych napędzanych silnikami ZS. Z pomiarów tych wynika, że zużycie paliwa przy samochodach napędzanych silnikami ZS jest mniejsze, niż przy samochodach osobowych napędzanych silnikami ZI, średnio o:

- 21% przy jeździe miejskiej.
- 15% przy jeździe z szybkością 90 km/h.

Jeśli chodzi o toksyczność spalin ulatujących z silników samochodowych ZS, to spełniają one normy EWG, dopuszczające zawartości:

- CO w ilości ~ 30 g(Test),
- $C_mH_n + NO_x$ w ilości 8 g(Test),

gdyż ich rzeczywiste ilości kształtują się dla silników ZS o objętościach skokowych $V_{ss} = 1,4 \ldots 2\ dm^3$ na poziomie:

- CO w ilości ~ 4,5 g(Test),
- $C_mH_n + NO_x$ w ilości 5 g(Test).

Jakkolwiek ilości emitowanych składników nie przekraczają aktualnie dopuszczalnych limitów, to jednak duże utrudnienie sprawia jeszcze redukcja mieszaniny śladowych związków, których ilości wyrażają się w mg i μg na kilometr przebytej przez samochód drogi. W skład tej mieszaniny wchodzą:

- zawiesiny wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych,
- związki siarki,
- podtlenek azotu,
- związki cjanowe,
- sadza.

Większe stężenia tych związków są toksyczne oraz rakotwórcze. Normy kalifornijskie, aktualnie najostrzejsze w świecie, dopuszczają w spalinach samochodowych silników ZS ilości wymienionych składników w granicach do 0,124 g/km, europejskie silniki ZS wydalają te składniki w ilości 0,375 g/km.

W większości dotychczas produkowanych silników spalinowych ZS przeznaczonych do napędu samochodów osobowych i dostawczych stosowany jest system pośredniego wytrysku paliwa do komór wstępnych względnie wirowych - o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych. System pośredniego wtrysku pozwala na uzyskiwanie dużych prędkości obrotowych silników, rzędu: 4200-5000 $[min^{-1}]$, oraz stosunkowo wysokich wartości objętościowego wskaźnika mocy ~ 20 $[kW/dm^3]$ ~ (28 KM/dm^3). Wadą tego systemu jest większe zużycie paliwa oraz utrudniony rozruch silnika, zwłaszcza przy niższych temperaturach otoczenia.

Uzyskiwanie dużych prędkości obrotowych silników ZS z systemem pośredniego wtrysku paliwa jest możliwe dlatego, że system ten zapewnia silne ruchy wirowe powietrza i jego dobre wymieszanie z paliwem, przez co uzyskuje się wysoką jednorodność ładunku powietrze-paliwo. Z reguły stosowany jest system RICARDO-Comet Mark V oraz jego odmiany.

Począwszy od 1980 r. dały się zauważyć tendencje do stosowania w samochodowych silnikach spalinowych ZS systemu bezpośredniego wtrysku paliwa. Początkowo silniki te pracowały przy szybkościach obrotowych rzędu: 3000--3200 $[min^{-1}]$ i wykazywały mniejsze o 50-70 [g/kWh] zużycie paliwa niż silniki z systemem pośredniego wtrysku. Osiągi te zachęciły wiele renomowanych firm do rozwoju konstrukcyjnego samochodowych silników ZS z bezpośrednim wtryskiem paliwa i tak w 1984 r. firma FORD wyprodukowała pierwszy na świecie szybkoobrotowy $n > 3200$ $[min^{-1}]$ silnik ZS do napędu samochodu dostawczego "Transit", o następujących danych technicznych: $V_{ss} = 2,496$ $[dm^3]$, $\varepsilon = 19,1$, $N_e = 50$ [kW] przy $n_N = 4000$ $[min^{-1}]$, $M_o = 145$ [Nm] przy $n_M = 2700$ $[min^{-1}]$ z turbosprężarką.
Możliwe do osiągnięcia najwyższe wartości sprawności ogólnych i najniższych wartości jednostkowego zużycia paliwa przez samochodowe silniki spalinowe ZS przedstawiono w tablicy 3.

Tablica 3

Sprawność ogólna i jednostkowe zużycie paliwa dla różnych rodzajów silników spalinowych

Rodzaj silnika	Sprawność ogólna %	Jednostkowe zużycie paliwa	
		g/kWh	g/KMh
Czterosuwowy silnik ZS wolnossący - system wtrysku pośredniego	35	245	180
Czterosuwowy silnik ZS wolnossący - system wtrysku bezpośredniego	41	211	155
Czterosuwowy silnik ZS doładowany - system wtrysku bezpośredniego	44	197	145

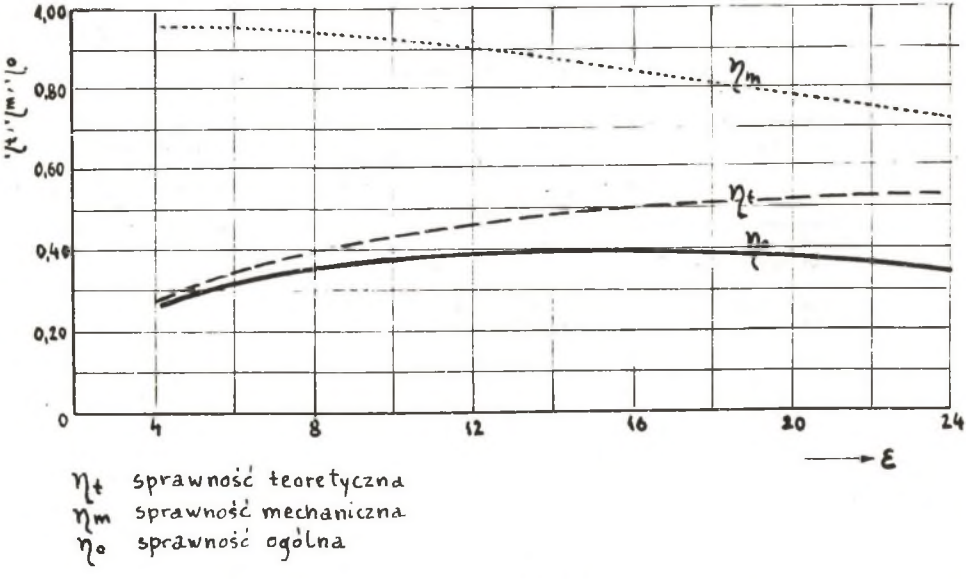
Z porównania wartości sprawności ogólnych i jednostkowego zużycia paliwa wynika, że sprawność ogólna silników ZS - z systemem bezpośredniego wtrysku paliwa - jest wyższa o 17% w porównaniu z silnikami ZS - z systemem pośredniego wtrysku, a w przypadku silnika doładowanego o 26%. Odnośnie do jednostkowego zużycia paliwa, to dla silników ZS - z systemem wtrysku bezpośredniego, jest ono mniejsze o 14% i 20% w porównaniu z jednostkowym zużyciem paliwa przez silniki ZS - z systemem pośredniego wtrysku paliwa.

Jakkolwiek silniki ZS z systemem bezpośredniego wtrysku są bardziej ekonomiczne od silników ZS z systemem pośredniego wtrysku i odznaczają się stosunkowo łatwym ich uruchomianiem przy niższych temperaturach otoczenia, to jednak dla osiągnięcia wymienionych wskaźników pracy takiego silnika wymagane jest stosowanie wysokich stopni sprężania $\varepsilon = 21...23,5$. Powoduje to, że maksymalne ciśnienia spalania wzrastają nieproporcjonalnie szybciej w stosunku do nieznacznego wzrostu średnich ciśnień użytecznych - decydujących o mocy silników. Jest to objaw niekorzystny, gdyż pociąga za sobą ko-

nieczność budowy ciężkich silników, których elementy narażone na działanie znacznych sił muszą mieć odpowiednio większe przekroje i grubości lub muszą być wykonane z bardziej wytrzymałych, a więc kosztownych, wysokogatunkowych materiałów. Przy większych siłach, działających przede wszystkim na układ korbowy silnika, występują większe opory ruchu - na skutek czego sprawność mechaniczna silnika zmniejsza się. Wielkość tych oporów przy stopniu sprężania $\varepsilon > 12$ staje się tak znaczna, że korzyść wynikająca ze stosowania wysokich stopni sprężania (wyższe sprawności teoretyczne) przestaje być opłacalna, gdyż ogólna sprawność silnika zaczyna się zmniejszać.

Najbardziej optymalne wartości występują przy $\varepsilon = 12...13$, co przedstawiono na rys. 2, ilustrującym przebieg zależności:

η_t, η_m i $\eta_o = f(\varepsilon)$



Rys. 2. Przebieg zależności: η_t, η_m i $\eta_o = f(\varepsilon)$

Fig. 2. The course of the dependence: η_t, η_m i $\eta_o = f(\varepsilon)$

Zwiększeniu stopnia sprężania towarzyszy wzrost maksymalnej i średniej temperatury, a tym samym wzrost emisji tlenków azotu. Stwierdzono, że obniżenie stopnia sprężania od wartości $\varepsilon = 16,5$ do 13,7 spowodowało zmniejszenie emisji NO_x o 15 do 20% przy małych obciążeniach i o 20 do 60% przy obciążeniach dużych.

Celem uniknięcia konieczności stosowania wysokich stopni sprężania w samochodowych silnikach ZS z systemem bezpośredniego wtrysku paliwa, autor wprowadził nowy obieg termodynamiczny dla tych silników. Celem zrealizowania

Tablica 2.1

Dane techniczne niektórych samochodowych silników spalinowych o zapłonie iskrowym (ZI) i samoczynnym (ZS)

Firma	Rodzaj silnika	i	V_{ss}	D	S	s	ε	N_e		n_N	M_o		n_M	M_H		e_N	e_M	E	$\frac{N_e}{V_{ss}}$		m_s	$\frac{m_s}{N_e}$		$\frac{N_{e_1}}{F_t}$	$C_{śr}$	
			dm^3	mm	mm			KM	kW	min^{-1}	kGm	Nm	min^{-1}	kGm	Nm				$\frac{km}{dm^3}$	$\frac{kW}{dm^3}$	kg	$\frac{kg}{KM}$	$\frac{kg}{dm^2}$	$\frac{KM}{dm^2}$	$\frac{kW}{dm^2}$	m/s
AUDI	ZI-G	4	1,595	81	77,4	0,95	9	75	55	5200	12,7	125	2700	10,3	101	1,92	1,24	2,38	47	34,5				36,3	26,7	13,4
	ZS	4	1,588	76,5	86,4	1,13	23	54	40	4800	10,2	100	2500	8,15	80	2,09	1,25	2,61	34	25,2				29,6	21,7	13,8
	ZS-Turbo	4	1,588	76,5	86,4	1,13	23	80	59	4500	15,8	155	2800	12,8	125	1,61	1,24	2,00	50,4	37				43,6	32,1	13
	ZI-W	5	1,994	81	77,4	0,95	10	115	85	5200	17,3	170	3000	15,9	156	1,73	1,09	1,88	57,7	42,6				44,9	33	13,4
	ZS	5	1,986	76,5	86,4	1,13	23	69	51	4800	12,5	123	2800	10,3	101	1,71	1,22	2,09	35,2	25,7				30,2	22,2	13,8
	ZD-Turbo	5	1,986	76,5	86,4	1,13	23	87	64	4500	17,5	172	2750	13,9	136	1,64	1,26	2,07	44	32				37,9	27,9	13
BMW	ZI-W	6	2,494	84	75	0,89	8,8	170	125	5800	22,6	222	4000	21	206	1,45	1,08	1,56	68,2	50				51,1	37,6	14,5
	ZS	6	2,443	80	81	1,01	22	86	64	4600	15,5	152	2500	13,3	131	1,84	1,16	2,13	35,2	25,7				28,9	21,2	12,4
	ZS-Turbo	6	2,443	80	81	1,01	22	115	85	4800	21,4	210	2400	17,2	169	2,00	1,24	2,48	47	34,8				38,3	28,2	13
CITROEN	ZI-W	4	2,499	93	92	0,99	8,8	137	101	5000	21	206	4000	19,7	193	1,25	1,07	1,33	55	40,4				50,5	37,2	15,3
	ZS	4	2,499	93	92	0,99	22,3	75	55	4250	14,7	144	2000	12,6	124	2,12	1,16	2,46	30	22				27,5	20,2	13
	ZS-Turbo	4	2,499	93	92	0,99	22,2	95	70	3700	22	216	2000	18,4	181	1,85	1,19	2,23	38	28				35	25,8	11,3
DAIHATSU	ZI-G	3	0,993	76	73	0,96	9,5	60	44	5600	8,5	83	3200	7,6	75	1,75	1,11	1,94	60,4	44,3	92	1,53	2,1	44	32,3	13,6
	ZS	3	0,993	76	73	0,96	21,5	38	28	4800	6,4	63	3500	5,7	56	1,28	1,12	1,44	38,3	28,2	111	2,92	3,96	28	20,6	11,7
	ZS-Turbo	3	0,993	76	73	0,96	21,5	50	37	4800	9,5	93	2900	7,5	74	1,65	1,26	2,07	50,3	37,3				37	27,2	11,7
FIAT	ZI-G	4	1,301	86,4	55	0,64	9,5	66	48	5600	10,2	100	3000	8,3	81,9	1,87	1,22	2,28	50,7	36,9				20,8	15,3	10,3
	ZS	4	1,301	76,1	71,5	0,94	20	45	33	5000	7,6	75	3000	6,4	63	1,67	1,19	1,99	34,6	25,4				24,7	18,1	12
	ZS-Turbo	4	1,367	78	71,5	0,92	20	70	51	4800	11,9	117	3000	10,3	101	1,60	1,16	1,85	51,2	37,3				36,3	26,7	11,4
	ZI-G	4	1,995	84	90	1,07	9,4	131	96	5900	17,9	176	3600	15,8	155	1,64	1,13	1,86	65,7	48,1				58,9	43,3	17,7
	ZS	4	1,929	82,6	90	1,09	21	65	48	4600	12	119	2000	10,2	100	2,30	1,19	2,74	33,7	24,9				30,4	22,4	13,8
	ZS-Turbo	4	1,929	82,6	90	1,09	20	80	59	4200	17,5	172	2400	13,7	134	1,75	1,28	2,25	41,5	30,6				37,4	27,5	12,6
FORD	ZI-G	4	1,597	80	79,5	0,99	9,5	95	70	5750	13,4	132	4000	11,8	116	1,44	1,14	1,64	59,5	43,8				30,0	22,3	15,2
	ZS	4	1,608	80	80	1,00	21,5	54	40	4800	9,7	95	3000	8,15	80	1,60	1,19	1,90	33,6	24,9				27	19,9	12,8
	ZS	4	2,499	94	90	0,96	23	69	51	4200	15,1	148	2000	11,8	116	2,10	1,27	2,67	27,6	20,4				25	18,4	12,6
	ZS-TUrbo	4	2,496	93,7	90,5	0,97	19,1	68	50	4000	14,8	145	2700	12,1	119	1,48	1,22	1,80	27,2	20	200	3,2	4,3	24,6	18,1	12,1
ISUZU	ZI-G	4	1,471	79	77	0,97	9,8	85	63	5800	12,7	125	3600	10,6	104	1,61	1,20	1,93	57,8	42,8				43,7	32,1	14,9
	ZS	4	1,488	82	76	0,93	23	54	40	5400	9,7	95	2600	7,2	71	2,08	1,34	2,78	36,3	26,9				25,7	18,9	13,7
	ZS-Turbo	4	1,488	82	76	0,93	22	71	51	5000	13,8	135	2500	9,9	97	2,00	1,39	2,78	47,7	34,3				32,8	24,1	12,7
LANCIA	ZI-W	4	1,995	84	90	1,07	9,8	120	88	5250	17	167	3300	16,3	160	1,59	1,04	1,66	60,1	44,1				54	39,7	15,7
	ZS	4	1,929	82,6	90	1,09	21	65	48	4600	12	119	2000	10,2	100	2,30	1,19	2,74	33,7	24,9				30,4	22,4	13,8
	ZS-Turbo	4	1,929	82,6	90	1,09	20	80	59	4200	17,5	172	2400	13,7	134	1,75	1,28	2,25	41,5	30,6				37,4	27,5	12,6

Tablica 2.2

Dane techniczne niektórych samochodowych silników spalinowych o zapłonie iskrowym (ZI) i samoczynnym (ZS)

Firma	Rodzaj silnika	i	V_{ss}	D	S	$\frac{S}{D}$	ε	N_e		n_N	M_o		n_M	M_N		e_n	e_M	E	$\frac{N_e}{V_{ss}}$		m_s	$\frac{m_s}{N_e}$		$\frac{N_{e_1}}{F_t}$		$C_{śr}$
			dm^3	mm	mm			kM	kW	min^{-1}	kGm	Nm	min^{-1}	kGm	Nm				$\frac{kM}{dm^3}$	$\frac{kW}{dm^3}$	kg	$\frac{kg}{KM}$	$\frac{kg}{kW}$	$\frac{KM}{dm^2}$	$\frac{kW}{dm^2}$	m/s
MAZDA	ZI-G	4	1,994	82	88	1,07	8,8	110	81	5400	17,3	170	3400	14,6	143	1,59	1,19	1,89	55,2	40,6				52,1	38,3	15,8
	ZS	4	1,995	90	84	0,93	21	73	54	4700	12,9	127	2500	11,2	110	1,88	1,15	2,17	36,6	27,1				28,9	21,2	13,2
	ZS-Turbo	4	1,995	90	84	0,93	21	88	65	4500	19,4	190	2500	14,1	138	1,80	1,38	2,48	44,1	32,6				34,7	25,5	12,6
MERCEDES	ZI-W	4	2,299	95,5	80,3	0,84	9	130	100	5100	20,9	205	3500	19	187	1,46	1,09	1,60	56,5	43,5				45,3	33,3	13,6
	ZS	4	1,997	87	84	0,96	22	72	53	4600	12,5	123	2600	11,2	110	1,64	1,12	1,84	36	26,5				30,3	22,3	12,9
	ZS-Turbo	6	2,296	87	84	0,96	22	143	105	4600	27,5	270	2800	22,2	218	1,64	1,24	2,03	62,3	45,7				30,3	22,3	12,9
MITSU-BISHI	ZI-G	4	1,795	80,6	88	1,09	8,5	105	77	5500	15,3	150	3500	13,6	134	1,57	1,12	1,76	58,5	42,9				51,3	37,7	16,1
	ZS	4	1,795	80,6	88	1,09	21,5	61	45	4500	11,7	115	2500	9,7	95	1,80	1,21	2,18	34	25,1				30	22	13,2
	ZS-Turbo	4	1,795	80,6	88	1,09	21,5	82	60	4500	16,3	160	2500	13	127	1,80	1,26	2,27	45,7	33,4				26	19,1	13,2
OPEL	ZI-G	4	2,197	95	77,5	0,84	9,4	115	85	5800	18,5	182	2600	14,3	140	2,23	1,30	2,89	52,3	38,4				40,8	30	15
	ZS	4	2,260	92	85	0.12	23	73	54	4400	14,1	138	2400	11,9	117	1,83	1,18	2,16	32,3	23,9				27,6	20,3	12,5
	ZS-Turbo	4	2,260	92	85	0,92	23	90	66	4200	19,4	190	2200	15,3	150	1,90	1,27	2,41	39,8	29,2				33,7	24,8	12
	ZS-Comprex	4	2,260	92	85	0,92	22	95	70	4200	19,9	195	2200	16,2	159	1,91	1,23	2,34	42	31				35,8	26,3	12
PEUGEOT	ZS	4	2,498	94	90	0,96	23	70	51	4500	14,8	145	2000	11	108	2,25	1,34	3,02	28	20,4				25	18,4	13,5
	ZS-Turbo	4	2,498	94	90	0,96	21	90	66	4150	20,8	204	2000	15,5	152	2,07	1,34	2,78	36	26,4				32,3	23,8	12,4
P	ZS-Turbo	4	2,498	94	90	0,96	21	105	77	4150	23,9	235	2000	18,1	177	2,07	1,33	2,75	42	30,8				37,7	27,7	12,4
NISSAN	ZI-W	4	1,585	76	88	1,16	9,4	73	54	5000	13,1	129	2600	10,5	103	1,78	1,25	2,23	46	34,1				40,5	29,7	14,7
	ZS	4	1,667	80	83,6	1,04	21,8	54	40	4800	10,6	104	2800	8,1	80	1,71	1,30	2,22	32,4	24				27	19,9	13,4
RENAULT	ZI-W	4	2,165	88	89	1,01	9,9	124	91	5250	18,1	178	2750	16,5	162	1,91	1,09	2,09	55,9	41,1				50,9	37,4	15,6
	ZS	4	2,068	86	89	1,03	21,5	63	46	4500	12,6	124	2250	9,9	98	2,00	1,26	2,52	30,5	22,2				26,9	19,8	13,3
	ZS-Turbo	4	2,068	86	89	1,03	21,5	89	65	4250	18,4	181	2000	14,9	146	2,12	1,24	2,63	43	31,4				38	28	12,6
STEYR	ZS	3	1,600	91	82	0,90	22	43,5	32	4300	9,2	90	2300	7,2	71,1	1,87	1,26	2,37	27,2	20	140	3,22	4,37	18,5	13,6	11,7
	ZS-Turbo	3	1,600	91	82	0,90	22	68	50	4300	13,8	135	2500	11,3	111	1,72	1,22	2,09	42,4	31,2	150	2,20	2,99	34,9	25,6	11,7
P	ZS-Turbo	3	1,600	91	82	0,90	22	83	61	4300	19,4	190	2800	13,8	135	1,53	1,41	2,15	51,8	38,1	165	1,99	2,71	42,5	31,3	11,7
	ZS	4	2,133	91	82	0,90	22	66,6	49	4300	14,5	142	2300	11,1	109	1,87	1,30	2,43	40,8	30	165	2,48	3,37	25,6	18,8	11,7
	ZS-Turbo	4	2,133	91	82	0,90	22	99,3	73	4300	17,8	175	2500	16,5	162	1,72	1,08	1,86	46,5	34,2	175	1,76	2,39	38,2	28,1	11,7
P	ZS-Turbo	4	2,133	91	82	0,90	22	116	85	4300	22,9	225	2800	19,3	189	1,53	1,19	1,82	54,1	39,8	190	1,64	2,23	44,4	32,7	11,7
	ZS	6	3,200	91	82	0,90	22	99,3	73	4300	20,4	200	2300	16,5	162	1,87	1,23	2,31	31	22,8	230	2,32	3,15	25,4	18,7	11,7
	ZS-Turbo	6	3,200	91	82	0,90	22	143	105	4300	30,6	300	2500	23,7	233	1,72	1,29	2,21	44,6	32,8	240	1,68	2,28	36,6	27	11,7
P	ZS-Turbo	6	3,200	91	82	0,90	18,5	164	121	4300	33,6	330	2800	27,4	268	1,53	1,23	1,88	51,4	37,8	255	1,55	2,11	42,2	31	11,7
TOYOTA	ZI-W	4	1,832	80,5	90	1,12	9	105	77	5400	16,3	160	3000	13,9	136	1,80	1,18	2,12	57,3	42				41,4	30,4	16.2
	ZS	4	1,839	83	85	1,02	23	64	47	4700	12	118	2600	9,7	95	1,81	1,24	2,25	35	25,5				29,5	21,7	13,3
	ZS-Turbo	4	1,839	83	85	1,02	22,5	88	65	4500	15,8	155	2400	14,1	138	1,87	1,12	2,10	47,8	35,3				40,8	30	12,7

Tablica 2.3

Dane techniczne niektórych samochodowych silników spalinowych o zapłonie iskrowym (ZI) i samoczynnym (ZS)

Firma	Rodzaj silnika	i	V_{ss}	D	S	$\frac{S}{D}$	ε	N_e		n_N	M_o		n_M	M_N		e_n	e_M	E	$\frac{N_e}{V_{ss}}$			$\frac{m_s}{N_e}$		$\frac{N_{e_1}}{F_t}$		C_{sr}
			dm^3	mm	mm			KM	kW	min^{-1}	kGm	Nm	min^{-1}	kGm	Nm				$\frac{kM}{dm^3}$	$\frac{kW}{dm^3}$	kg	$\frac{kg}{kM}$	$\frac{kg}{kW}$	$\frac{KM}{dm^2}$	$\frac{kW}{dm^2}$	m/s
VOLVO	ZI-W	4	2,383	96	80	0,83	10,3	131	96	5500	19,4	190	3300	17	167	1,67	1,14	1,90	55	40,3				45,3	33,2	14,7
	ZS	6	2,383	76,5	86,4	1,13	23	82	60	4800	14,3	140	2800	12,2	119	1,71	1,18	2,01	34,4	25,2				29,6	21,8	13,8
	ZS-Turbo	6	2,383	76,5	86,4	1,13	20	109	80	4800	20,9	205	2400	16,2	159	2,00	1,29	2,58	45,7	33,6				39,5	29	13,8
VW	ZI-G	4	1,595	81	77,4	0,95	9	75	55	5000	12,7	125	2500	10,7	105	2,00	1,19	2,38	47	34,5				23,8	17,5	12,9
	ZS	4	1,588	76,5	86,4	1,13	23	54	40	4800	10,2	100	2500	8,1	80	1,92	1,25	2,40	34	25,2				29,6	21,7	13,8
	ZS-Turbo	4	1,588	76,5	86,4	1,13	23	70	51	4500	13,5	133	2700	11	108	1,67	1,23	2,06	44,1	32				37,7	27,7	13
WSW-4C90	ZS	4	2,416	90	95	1,05	20,5	70	51	4200	14,9	146	2500	11,9	117	1,68	1,25	2,09	29	21,3	235	3,36	4,56	48,1	35,4	13,3

Oznaczenia:

Rodzaj silnika:

ZI-G, silnik o zapłonie iskrowym, zasilany gaźnikiem
ZI-W, silnik o zapłonie iskrowym, zasilany wtryskowo
ZS - silnik o zapłonie samoczynnym
ZS-Turbo - silnik o zapłonie samoczynnym z turbosprężarką

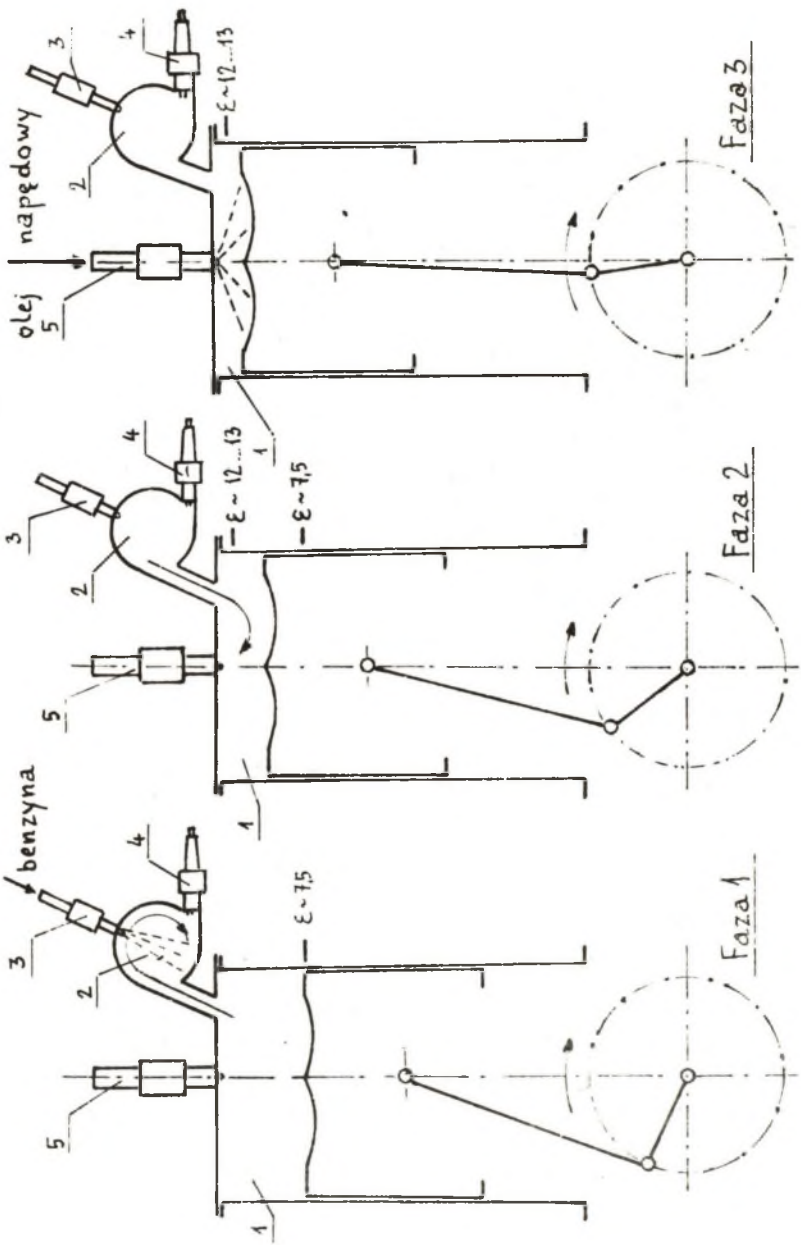
i - liczba cylindrów
V_{ss} - pojemność skokowa silnika
D - średnica tłoka
S - skok tłoka
S/D - stosunek skoku tłoka do jego średnicy
ε - stopień sprężania
N_e - maksymalna, efektywna moc silnika
n_M - prędkość obrotowa silnika przy maksymalnej mocy
M_o - maksymalny moment obrotowy silnika
n_M - prędkość obrotowa silnika przy maksymalnym momencie
M_N - moment obrotowy silnika przy maksymalnej mocy

e_n - wskaźnik elastyczności prędkości obrotowych
e_M - wskaźnik elastyczności momentów obrotowych
$E=e_n \cdot e_M$ - wskaźnik elastyczności silnika
$\frac{N_e}{V_{ss}}$ - objętościowy wskaźnik mocy
m_s - masa silnika
$\frac{m_s}{N_e}$ - jednostkowa masa silnika
$\frac{N_{e_1}}{F_t}$ - tłokowy wskaźnik mocy
N_{e_1} - moc z jednego cylindra
F_t - powierzchnia dna tłoka
P - silnik z chłodnicą powietrza doładowującego
$C_{śr}$ - średnia szybkość tłoka

nowego obiegu termodynamicznego dla szybkoobrotowych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym i z wtryskiem bezpośrednim, każdy cylinder silnika wyposaża się w dodatkową komorę, zwaną komorą zapłonową. Do komory tej, która łączy się z przestrzenią roboczą cylindra za pomocą odpowiedniego otworu, wtłacza się powietrze przez tłok przesuwający się (podczas suwu sprężania) od ZPZ ku WPZ. W chwili, gdy przesuwający się tłok znajdzie się w położeniu, przy którym stopień sprężania osiągnie wartość $\varepsilon \sim 7{,}5$, do komory zapłonowej zostaje wtryśnięta mała dawka benzyny, po czym następuje jej zapłon za pomocą iskry elektrycznej. W wyniku spalania wtryśniętej dawki benzyny w komorze zapłonowej następuje wzrost temperatury i ciśnienia spalin. Wypływające pod znacznym ciśnieniem z komory zapłonowej do przestrzeni roboczej cylindra spaliny o wysokiej temperaturze, mieszając się z powietrzem wypełniającym cylinder, powodują wzrost jego temperatury. Dalsze podwyższanie temperatury powietrza wypełniającego przestrzeń roboczą cylindra, niezbędnej do wywołania samozapłonu oleju napędowego w chwili, gdy olej ten zostaje wtryśnięty do tej przestrzeni, odbywa się przez sprężanie tego powietrza od położenia tłoka odpowiadającemu stopniowi sprężania $\varepsilon \sim 7{,}5$ do WPZ, przy którym stopień sprężania wynosi $\varepsilon \sim 12$. Na rys. 3 przedstawiono w ujęciu schematycznym poszczególne położenia tłoka oraz zasilanie silnika, przy realizacji nowego obiegu termodynamicznego, w którym oznaczają:

1 - przestrzeń robocza cylindra,
2 - komora zapłonowa,
3 - wtryskiwacz benzyny (metanolu),
4 - świeca zapłonowa,
5 - wtryskiwacz oleju napędowego.

W nowym obiegu termodynamicznym dla szybkoobrotowych silników spalinowych o zapłonie symoczynnym z wtryskiem bezpośrednim, odpowiednio wysoką temperaturę powietrza potrzebną do samozapłonu oleju napędowego uzyskuje się więc nie przez stosowanie wysokich stopni sprężania: $\varepsilon = 20...23$, lecz przez wprowadzenie dwustopniowego podgrzewania tego powietrza. Możliwość uzyskania odpowiednio wysokiej temperatury powietrza przy niższych wartościach stopnia sprężania ε sprawia, że wprowadzenie nowego obiegu termodynamicznego do szybkoobrotowych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa daje następujące korzyści: W znacznej mierze obniża się maksymalne ciśnienie spalania, przez co zmniejszają się maksymalne siły tłokowe. W wyniku tego poszczególne elementy silnika mogą mieć odpowiednio zmniejszone przekroje i grubości, a więc i masy (mniejsze wartości: jednostkowej masy silnika i sił bezwładności). Przy mniejszych siłach tłokowych zmniejszają się opory ruchu i wzrasta sprawność mechaniczna silnika. Dalszą korzyścią jest możliwość zmniejszenia kąta wyprzedzenia wtrysku oleju napędowego i osiągnięcie początku jego spalania bezpośrednio w pobliżu WPZ. Skrócenie okresu opóźnienia zapłonu sprawia, że bieg silnika staje się bardziej "miękki" (mniej hałaśliwy), ze względu na łagodniejszy przebieg przyrostu ciśnienia na 1 stopień obrotu wału korbowego. Osią-



Rys. 3. Położenie tłoka oraz zasilanie silnika przy realizacji nowego obiegu termodynamicznego

Fig. 3. Piston situation and engine feed at the realization of the new thermodynamic cycle

ga się to dzięki temu, że strumień płonącej mieszanki wypływający z komory zapłonowej, oprócz podgrzewania powietrza zawartego w przestrzeni roboczej cylindra, staje się równocześnie wielopunktowym (przestrzennym) źródłem zapłonu wtryskiwanego do tej przestrzeni oleju napędowego. Opisane rozwiązanie zezwala również na ustalanie wysokości temperatury powietrza w przestrzeni roboczej cylindra - dzięki regulacji ilości benzyny wtryskiwanej do komory zapłonowej, co ma ogromne znaczenie przy uruchamianiu silnika, zwłaszcza przy niskich temperaturach otoczenia oraz przy pracy silnika na biegu jałowym.

Przedstawiona możliwość ustalania wysokości temperatury powietrza (przed wtryskiem oleju napędowego) w zależności od obciążenia silnika daje taki sam efekt, jaki uzyskuje się w silniku o zmiennym stopniu sprężania - osiąganym przez specjalną konstrukcję jego tłoków.

Nowy obieg termodynamiczny uzyskał 20.08.1986 r. decyzją Urz. Pat. PRL Patent Nr P-238239.

Duże szanse dla dalszego postępu w konstrukcji szybkoobrotowych silników samochodowych ZS stwarzają pewne osiągnięcia w dziedzinie materiałów ceramicznych. Dzięki tym osiągnięciom wyłania się możliwość wyprodukowania w niedalekiej już przyszłości pełnosprawnego i trwałego silnika "ceramicznego". Problem ten, jakkolwiek nie jest zupełnie nowy, dopiero w latach siedemdziesiątych nabrał realnego kształtu. W wielu ośrodkach badawczych i wytwórczych silników spalinowych prowadzone są aktualnie intensywne prace dotyczące możliwości wykonania niektórych elementów silników całkowicie z materiałów ceramicznych lub pokrywania elementów metalowych trwałą warstwą materiałów ceramicznych - metodą ich plazmowego napawania albo natryskiwania.

Z materiałów ceramicznych nadających się do ich wykorzystania w silnikach spalinowych i turbosprężarkach należy wymienić:

- Si_3N_4 azotek krzemu,
- SiC węglik krzemu,
- SiO_2 dwutlenek krzemu,
- $Z_r[SiO_4]$ krzemian cyrkonu,
- Z_rO_2 dwutlenek cyrkonu,
- Al_2O_3 trójtlenek glinu.

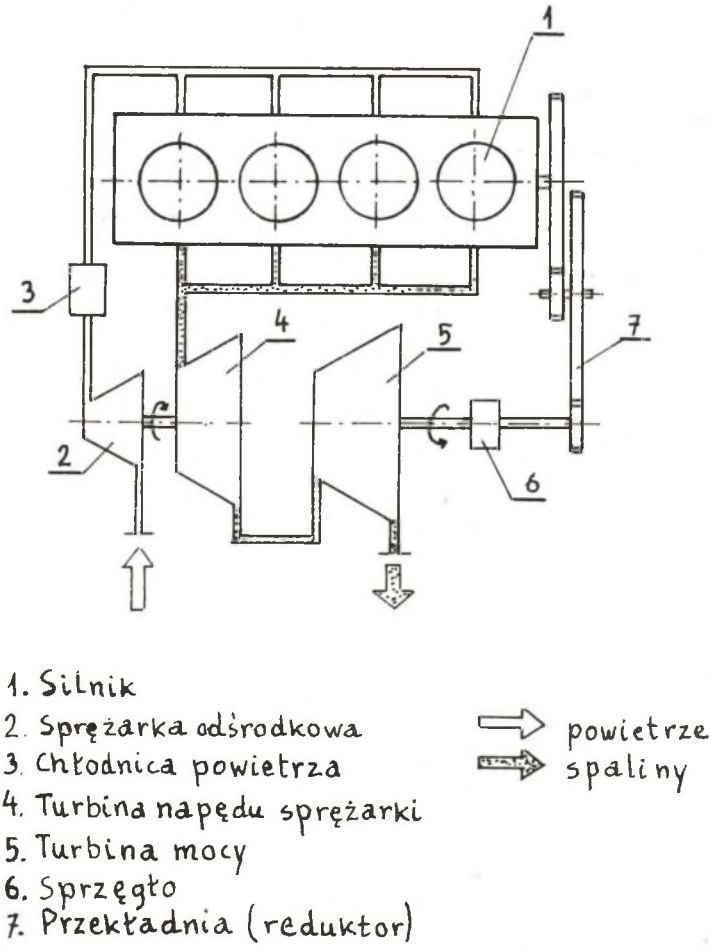
Materiały ceramiczne na bazie cyrkonu najlepiej nadają się do połączenia ze stalą lub żeliwem, gdyż ich współczynniki rozszerzalności cieplnej mają zbliżone wartości.

Wymienione materiały ceramiczne odznaczają się:

- dużą wytrzymałością w wysokich temperaturach (1000-1500 K),
- małym współczynnikiem przewodnictwa cieplnego,
- dużą odpornością na zużycie,
- małym współczynnikiem tarcia w zetknięciu z metalem.

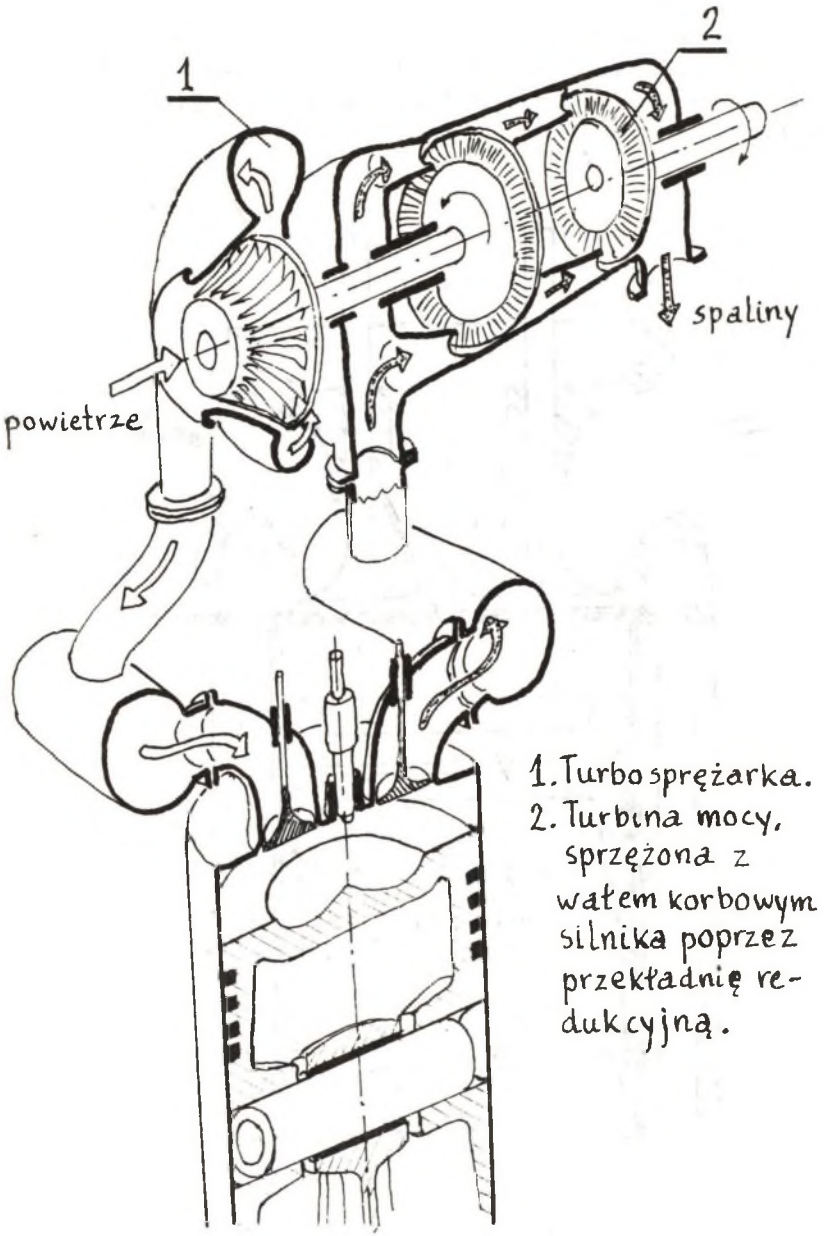
Wadą materiałów ceramicznych jest jeszcze ich niedostateczna odporność na szybkie (milisekundowe) zmiany temperatury, jakie występują w silnikach spalinowych i ich duża kruchość - mała odporność na obciążenia udarowe.

Stosując materiały ceramiczne na takie elementy silnika, jak: denko tłoka i tuleja cylindrowa oraz pokrywając warstwą materiałów ceramicznych talerzyki zaworów oraz wnętrze przewodu wylotowego, zmniejsza się ilość ciepła oddawanego na rzecz otoczenia przez układ chłodzenia silnika. Powo-



Rys. 4a. Schemat silnika spalinowego ZS z turbosprężarką i turbiną mocy

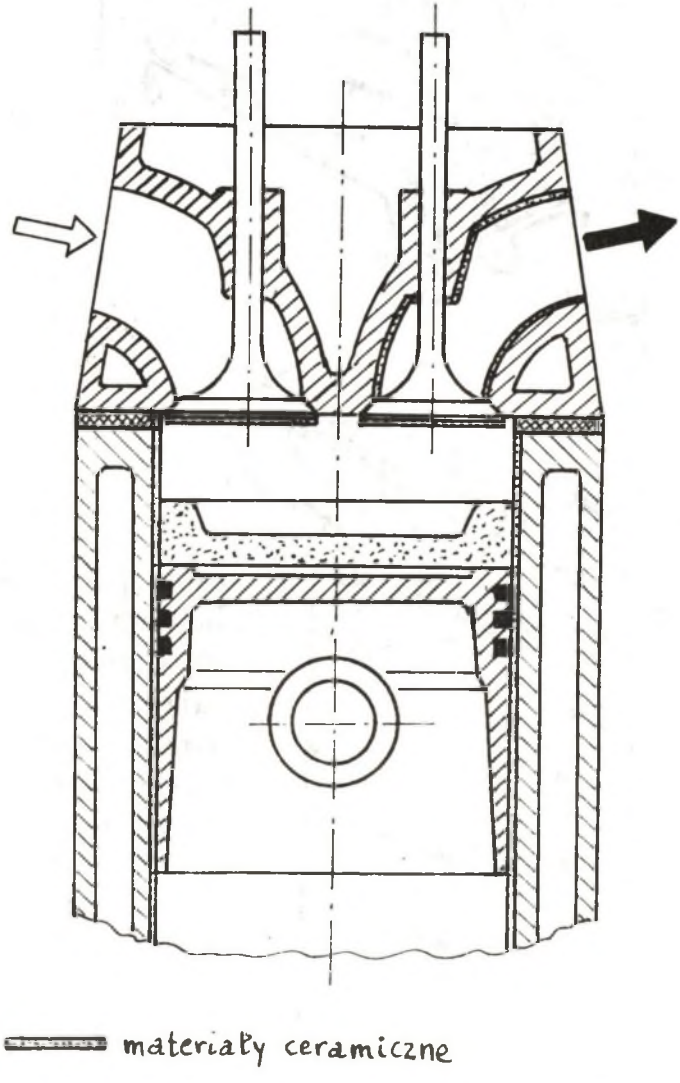
Fig. 4a. Scheme of the combustion engine ZS along with the turbo-compressor and power turbine



Rys. 4b. Schemat silnika spalinowego ZS z turbosprężarką i turbiną mocy

Fig. 4b. Scheme of the combustion engine ZS along with the turbo-compressor and power turbine

duje to wprawdzie pewien przyrost mocy silnika, lecz równocześnie wzrasta energia cieplna spalin odprowadzanych do otoczenia. W tej sytuacji, w celu odzyskania zwiększonej energii cieplnej spalin, celowe jest stosowanie, obok turbiny napędzającej sprężarkę doładowującą, dodatkowej turbiny połączonej za pomocą odpowiedniej przekładni z wałem korbowym silnika (tzw. turbina mocy), co przedstawiono na rys. 4a i 4b.



Rys. 5. Fragment silnika "ceramicznego"
Fig. 5. Fragment of the "ceramic" engine

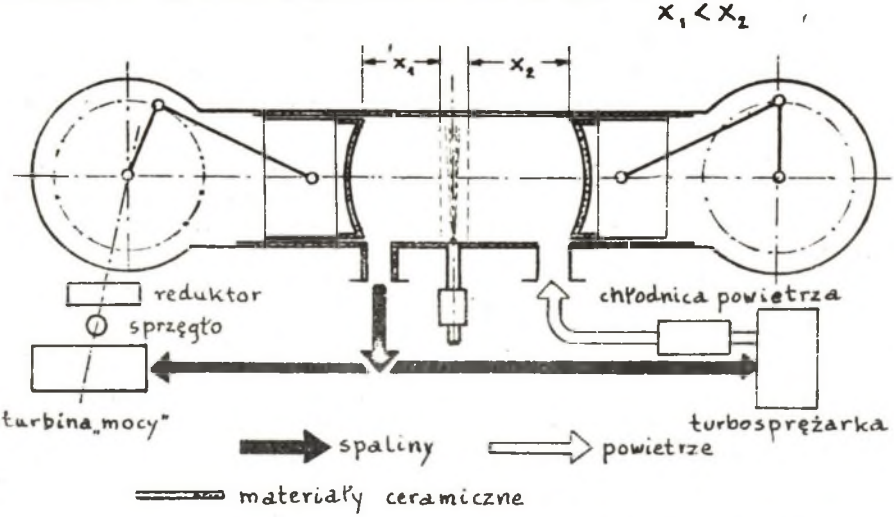
Na rys. 5 przedstawiono w ujęciu schematycznym fragment silnika "ceramicznego".

W 1981 r. japońska firma Kyoto Ceramics CO. (Kyocera) przedstawiła doświadczalny silnik "ceramiczny" z systemem wtrysku bezpośredniego z turbosprężarką, o następujących danych technicznych:

Liczba cylindrów 3:
- V_{ss} - 2,82 dm^3,
- ε = 17,
- N_e = 43 kW przy n_N = 2800 min^{-1},

którego sprawność ogólna wynosiła η_o = 0,45, podczas gdy sprawność takiego silnika w wykonaniu "metalowym" wynosiła η_o = 0,32. Silnik pracował bez układu chłodzenia. Jako materiału ceramicznego w tym silniku użyto Si_3N_4. Z takiego samego materiału ceramicznego inna firma japońska, Mitsubishi Heavy Industries, wykonała wirniki dla turbosprężarek, których masa jest o 30% mniejsza od masy wirników stalowych (ρSi_3N_4 = 2,2 - 3,18 kg/dm^3). Przy próbie wytrzymałościowej na rozerwanie wirniki te pracowały bez awarii w temperaturze ponad 700 K przy szybkości obwodowej rzędu 600 m/s.

Izolowanie przestrzeni, w której przebiega proces spalania, jakkolwiek powoduje zmniejszenie zużycia paliwa średnio o 15%, ułatwia uruchamianie silnika przy niższych temperaturach otoczenia i zezwala na stosowanie gorszych gatunków paliwa, to jednak przy zbyt dużym stopniu "izolowania" (60--70%) powoduje występowanie problemu smarowania gładzi cylindrowych. Z uwagi na łatwiejsze "izolowanie" przestrzeni, w której przebiega proces spalania, wydaje się korzystniejsze budowanie dwusuwowych silników ZS z tłokami przeciwbieżnymi, których koncepcję przedstawiono na rys. 6.



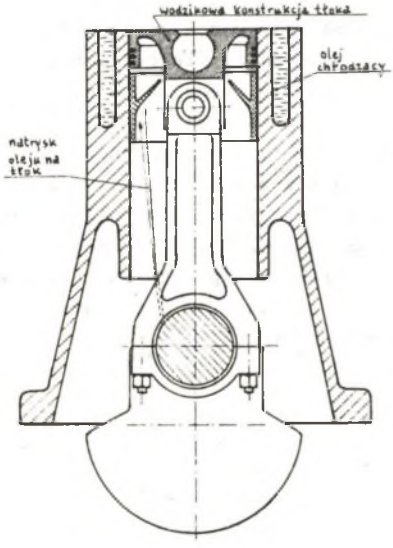
Rys. 6. Koncepcja "ceramicznego" dwusuwowego silnika z tłokami przeciwbieżnymi
Fig. 6. The concept of the "ceramic" two-stroke engine with the oposite pistons

Wspomniany silnik doładowany turbosprężarką wraz z dodatkową turbiną wspomagającą (turbiną mocy) i połączony z 5-stopniową skrzynką biegów mógłby stać się przyszłościową jednostką napędową dla samochodów.

Na szczególną uwagę zasługują ostatnie rozwiązania konstrukcyjne silników ZS z systemem wtrysku bezpośredniego, przedstawione przez znaną austriacką firmę STÉYR oraz przez zachodnioniemiecką firmę ELSBETT-KONSTRUKTION. Dane techniczne rodziny silników STEYER, obejmującej odmiany 3-, 4- i 6-cylindrowe, zamieszczone są w tablicy 2.2. Silniki te w każdej z odmian budowane są jako:

- wolnossące,
- turbodoładowane,
- turbodoładowane z chłodzeniem powietrza doładowującego.

Silniki rodziny M1 odznaczają się: dużą trwałością, mniejszą hałaśliwością, wysokimi objętościowymi wskaźnikami mocy $\left[\frac{kW}{dm^3}\right]$ oraz niskimi jednostkowymi masami $\left[\frac{kg}{kW}\right]$. W silnikach tych wrócono do dawnych rozwiązań konstrukcyjnych, w których kadłub silnika, tuleje cylindrowe i głowice stanowiły monolit (jednolity odlew). Przy takim rozwiązaniu uzyskuje się konstrukcję sztywniejszą, lżejszą i równocześnie mniej podatną na odkształcenia mechaniczne i termiczne.



Rys. 7. Fragment silnika "ELKO-D1" w przekroju

Fig. 7. Fragment of the engine "ELKO-D1" in its section

Na rys. 7 przedstawiono przekrój poprzeczny 3-cylindrowego doświadczalnego silnika ZS turbodoładowanego "ELKO-91" wg koncepcji ELSBETTA, którego dane techniczne podano w tablicy 4. W silniku tym wprowadzono ciekawe rozwiązania konstrukcyjne, z których na uwagę zasługują:

- zmniejszenie pojemności układu chłodzenia, przy czym jako czynnik chłodzący występuje olej,
- zastosowanie niekonwencjonalnych tłoków, w których denko i część pierścieniowa wykonane są z żeliwa sferoidalnego, a część prowadząca wykształtowana jako wodzik wykonana jest ze stopów lekkich.

Obie te części tłoka łączą się nawzajem poprzez sworzeń tłokowy. W denku tłoków znajdują się specjalnego kształtu komory spalania, do których zostaje bezpośrednio wtryskiwane paliwo przez ukośnie usytuowane wtryskiwacze.

Tablica 4

Dane techniczne doświadczalnego silnika ZS "ELKO-D1" wg koncepcji ELSBETTA

V_{ss}	$\frac{s}{D}$	ε	N_e		n_N	M_o	n_M	$\frac{N_e}{V_{ss}}$		m_s	$\frac{m_s}{N_e}$	
dm^3			KM	kW	min^{-1}	Nm	min^{-1}	$\frac{KM}{dm^3}$	$\frac{kW}{dm^3}$	kg	$\frac{kg}{KM}$	$\frac{kg}{kW}$
1,387	1,15	18	89,7	66	4500	165	3000	64,7	47,6	130	1,45	1,97

Na rys. 8 przedstawiono tłok silnika ELKO-D1, w którego górnej części znajduje się kulista komora spalania. Powietrze przepływające przez stycznie usytuowane (w głowicy silnika) kanały ulega silnemu zawirowaniu. Na skutek działania siły odśrodkowej powietrze jest dociskane do ścianek kulistej komory spalania, tworząc warstwę izolacyjną, utrudniającą przepływ ciepła wywiązującego się podczas spalania wtryskiwanego do wnętrza komory paliwa. Powietrze przylegające do ścianek komory spalania spełnia taką rolę, jak materiały ceramiczne w uprzednio opisanym silniku "ceramicznym".

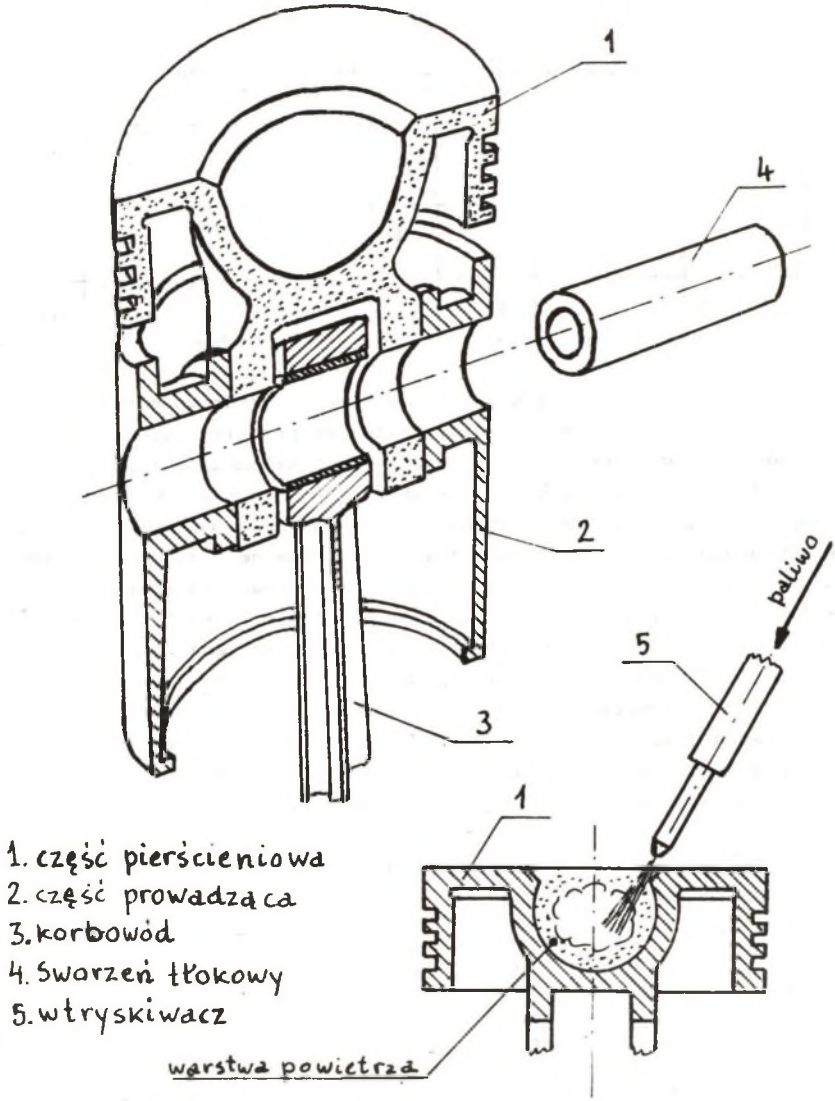
Przedstawiona na rys. 8 konstrukcja tłoka, odciążająca jego część prowadzącą od dużych obciążeń termicznych, zabezpiecza tę część od ewentualnego zatarcia i zapewnia utrzymywanie się filmu olejowego na gładzi cylindrowej; ponadto część prowadząca jest chłodzona natryskiwanym na nią olejem. Silniki wg koncepcji ELSBETTA, aktualnie badane i doskonalone, mogą w przyszłości konkurować z jeszcze niecałkowicie dopracowanymi silnikami "ceramicznymi".

O postępie w rozwoju konstrukcyjnym samochodowych silników spalinowych ZS świadczą przedstawione na rys. 9, 10 i 11:

- wartość objętościowego wskaźnika mocy $\frac{kW}{dm^3}$,
- wartość jednostkowej masy silników $\frac{kg}{kW}$,
- wartości tłokowego wskaźnika mocy $\frac{kW}{dm^2}$,

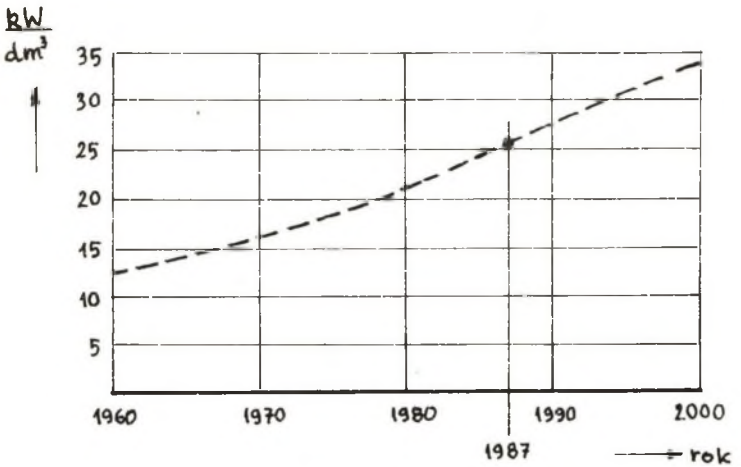
tak jak kształtowały się one w latach: 1960-1987 i jakie przewidywane są do 2000 roku.

Niektóre fabryki samochodów osobowych, chcąc jak najszybciej włączyć się do programu "dieselizacji", skonstruowały silniki ZS w ten sposób, ażeby można było w jak najkrótszym czasie - na linii produkcyjnej przeznaczonej uprzednio dla silników ZI - produkować podobne im silniki ZS. Konstrukcja nowego silnika ZS zdeterminowana była więc możliwościami obróbczymi linii produkcyjnej silników ZI. Oznaczało to, że znakomita większość specjalistycznych obrabiarek, uchwytów i przyrządów obróbczych oraz modeli odlewniczych musiała nadawać się do produkcji nowych silników ZS.

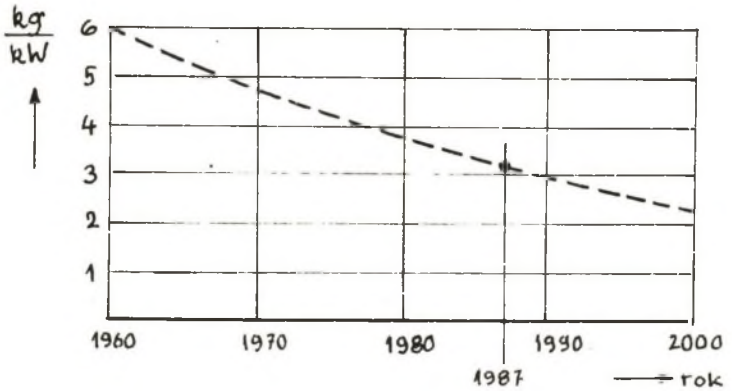


Rys. 8. Tłok silnika "ELKO-D1"
Fig. 8. Engine piston "ELKO-D1"

W latach 1975-1976 fabryka samochodów osobowych OPEL jako pierwsza wyprodukowała, na bazie dotychczasowego silnika ZI, nowy silnik ZS typ - 2100 D, wykorzystując w dużej mierze linię produkcyjną silnika ZI. W ślad za firmą OPEL, japońska firma MITSUBISHI - MOTOR - CORPORATION wyprodukowała w 1984 r. w podobny sposób silnik ZS, typ 4D65 - Sirius - będący pochodną silnika ZI o takiej samej pojemności skokowej i posiadający wiele wspól-



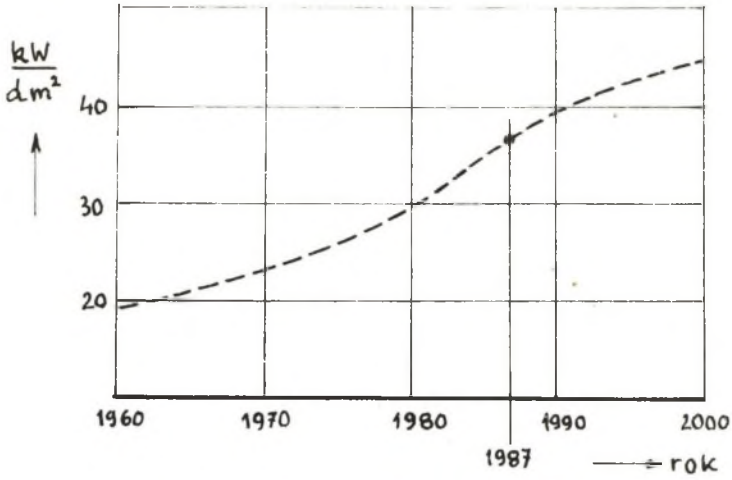
Rys. 9. Wartość objętościowego wskaźnika mocy
Fig. 9. Value of the volumetric force indicator



Rys. 10. Wartość jednostkowej masy silników
Fig. 10. Value of the elementary engine mass

nych części. W tablicy 5 podane są dane techniczne silnika 4D65 - Sirius, w którym celem wyrównoważenia sił bezwładności II stopnia zastosowano dodatkowe masy wirujące, umieszczone na dwu wałkach usytuowanych symetrycznie względem osi wału korbowego silnika.

Dalszym przykładem dostosowywania konstrukcji silników spalinowych ZS do możliwości obróbczych ich elementów na dotychczasowych liniach produk-



Rys. 11. Wartość tłokowego wskaźnika mocy
Fig. 11. Value of the piston force indicator

cyjnych silników ZI mogą być silniki firmy Perkins-Engine Ltd. Silniki te, o symbolu Prima 65 i Prima 80 T, były wyprodukowane w grudniu 1986 r. w Zakładach Austin-Rover w Longbridge, produkujących dotychczas wyłącznie silniki ZI. W tablicy 6 zamieszczono dane techniczne wymienionych silników, przy czym silnik Prima 65 jest silnikiem wolnossącym, a silnik Prima 80T jest silnikiem z turbosprężarką, w obu silnikach zastosowano system bezpośredniego wtrysku paliwa.

Dodatkową informacją o postępie w rozwoju konstrukcyjnym silników spalinowych ZS są dane i prognozy przedstawione w tablicy 7.

W konkluzji należy podkreślić, że szybkoobrotowe silniki spalinowe ZS, jakkolwiek w porównaniu z podobnymi silnikami spalinowymi ZI wykazują:

- niższe wartości objętościowego i tłokowego wskaźnika mocy,
- wyższe wartości jednostkowej masy,
- wyższe koszty wytwarzania,
- utrudnione uruchamianie zwłaszcza przy niższych temperaturach otoczenia,
- wyższą głośność pracy,

to jednak mają zalety takie, jak:

- mniejsze przebiegowe zużycie paliwa, zwłaszcza na biegu jałowym i w warunkach jazdy miejskiej (prawie dwukrotnie mniejsze),
- możliwość wyłączenia zasilania przy hamowaniu pojazdu z pomocą silnika,
- prawie dwukrotnie większy przebieg do naprawy głównej.

Opłacalność stosowania silników spalinowych ZS występuje szczególnie przy napędzie taksówek i miejskich samochodów dostawczych oraz przy rocznym przebiegu rzędu 60 tys. km dla samochodów osobowych.

Tablica 5

Dane techniczne silnika ZS - typ 4D65 - Sirius

i	V_{ss}	D	S	S	ε	N_e		n_N	M_o		n_M	M_N		e_n	e_M	E	m_s	N_e/V_{ss}		m_s/N_e		N_e/F_t		$C_{śr}$
	dm^3	mm	mm	D		KM	kW	min^{-1}	kGm	Nm	min^{-1}	kGm	Nm				kg	$\frac{KM}{dm^3}$	$\frac{kW}{dm^3}$	$\frac{kg}{KM}$	$\frac{kg}{kW}$	$\frac{KM}{dm^2}$	$\frac{kW}{dm^2}$	m/s
4	1,795	80,6	88	1,09	21,5	65	47,8	4500	11,5	113	2500	10,3	101	1,80	1,12	2,02	154	36,2	26,6	2,37	3,22	31,9	23,4	13,2

Tablica 6

Dane techniczne silnika ZS - firmy Perkins-Engine Ltd

[illegible]	i	V_{ss}	D	S	S	ε	N_e		n_N	M_o		n_M	M_N		e_n	e_M	E	m_s	N_e/V_{ss}		m_s/N_e		N_e/F_t		$C_{śr}$
		dm^3	mm	mm	D		KM	kW	min^{-1}	kGm	Nm	min^{-1}	kGm	Nm				kg	$\frac{KM}{dm^3}$	$\frac{kW}{dm^3}$	$\frac{kg}{KM}$	$\frac{kg}{kW}$	$\frac{KM}{dm^2}$	$\frac{kW}{dm^2}$	m/s
Prima 65	4	1,993	84,4	88,9	1,05	18,1	62	46	4500	12,4	122	2500	9,87	97,7	1,8	1,26	2,27	125	31,1	23	2,02	2,72	27,7	20,[illegible]	13,3
Prima 80T	4	1,993	84,4	88,9	1,05	17,2	80	59,5	4500	15,5	154	2500	12,7	126	1,8	1,24	2,22	132	40,1	29,8	1,56	2,22	35,7	26,6	13,3

Tablica 7

Jednostkowe zużycie paliwa i rozchód energii cieplnej
w różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych silników spalinowych ZS

Lp.	Silnik spalinowy ZS	g_e	Rozchód energii cieplnej %		
		g/kWh	Q_e	Q_{ch}	Q_w
1	+ turbosprężarka + chłodnica powietrza wtrysk pośredni	290	33	31	36
2	+ turbosprężarka + chłodnica powietrza częściowo "ceramiczny" wtrysk bezpośredni	255	39	29	32
3	+ turbosprężarka + chłodnica powietrza + turbina mocy wtrysk bezpośredni	216	42	29	29
	+ turbosprężarka + chłodnica powietrza + turbina mocy "ceramiczny" wtrysk bezpośredni	187	48	17	35
	+ turbosprężarka + chłodnica powietrza + turbina mocy "ceramiczny" łożyska "gazowe" wtrysl bezpośredni	165	58	9	33

Oznaczenia:

Q_e - ilość energii cieplnej zamienionej na pracę użyteczną,
Q_{ch} - ilość energii cieplnej odprowadzonej z czynnikiem chłodzącym,
Q_w - ilość energii cieplnej odprowadzonej ze spalinami,
g_e - jednostkowe zużycie paliwa,
Lp. 1 - konstrukcje lat osiemdziesiątych
Lp. 2 - konstrukcja lat dziewięćdziesiątych
Lp. 3 - konstrukcja do roku 2000

Recenzent: prof. dr hab. inż. Marian Zabłocki

Wpłynęło do Redakcji w czerwcu 1987 r.

ПРОГРЕСС В КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКООБОРОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ЗАЖИГАНИЕМ ДЛЯ ПРИВОДА ЛЕГКОВЫХ И ГРУЗОВЫХ АВТОМАШИН

Р е з ю м е

Статья касается вопрос связанных с работами по совершенствованию конструкций двигателей внутреннего сгорания с автоматическим зажиганием в качестве будущих приводов легковых и грузовых автомашин.

В статье оговорен, предлагаемый автором, новый термодинамический цикл для оговариваемых двигателей.

PROGRESS IN CONSTRUCTION OF HIGH-SPEED I.C. ENGINE WITH SELF-IGNITION FOR CARS AND TRUCKS

S u m m a r y

The article presents the problems of studies on the progress in construction of I.C. engines with self-ignition as future drive units of cars and trucks.

A new thermodynamic cycle for mentioned above engines - suggested by the author was discussed.