

INGRANAGGI IN PLASTICA PER LA DISTRIBUZIONE DI UN MOTORE DIESEL

I materiali avanzati, quali le materie plastiche rinforzate con fibre, vengono sempre più utilizzati per costruire componenti strutturali in motori per autoveicoli. In questo lavoro viene descritta l'applicazione della poliammide rinforzata con fibra corta di carbonio per realizzare alcune ruote dentate della distribuzione di un motore a c.i. Le ruote dentate sono state ottenute con stampaggio a iniezione, studiato e ottimizzato con apposita simulazione al computer. Sono state effettuate prove sperimentali sul motore, a differente velocità di rotazione. I risultati ottenuti forniscono importanti indicazioni sulle possibilità di utilizzo delle poliammidi rinforzate come materiale per ingranaggi della distribuzione o per altri utilizzi simili.

di GIUSEPPE CRIPPA, PIERMARIA DAVOLI, CARLO GORLA, SANTE QUARANTA

Scopo delle prove sperimentali che vengono qui descritte è stato l'analisi della possibilità di sostituire le convenzionali ruote dentate in acciaio che azionano la pompa di iniezione e l'albero a camme di un motore Diesel turbocompresso per veicoli industriali con ruote realizzate con materia plastica. La sostituzione ha riguardato solo il materiale, senza alcuna modifica delle dimensioni delle ruote; ciò ha comportato alcune limitazioni, che riguardano il dimensionamento, la scelta del materiale e il procedimento tecnologico, che avrebbero potuto essere diversi se non vi fossero state queste limitazioni.

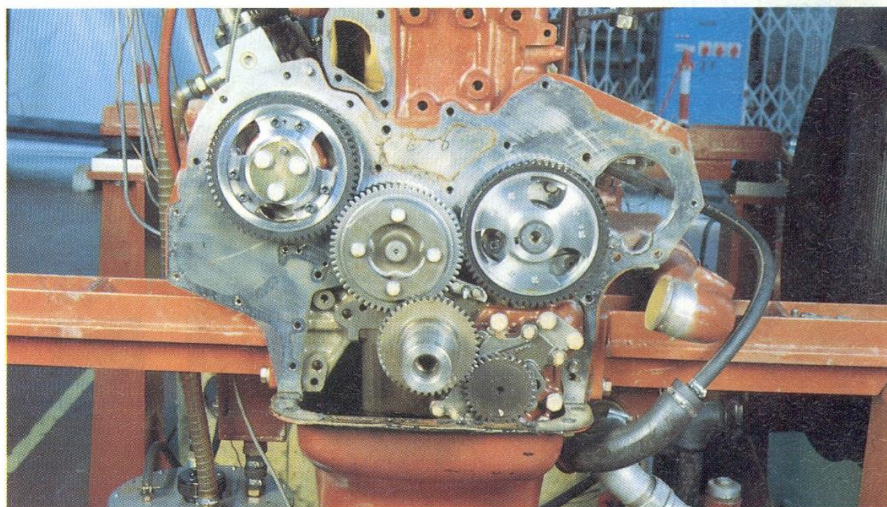


Fig. 1 - Vista degli ingranaggi della distribuzione del motore diesel IVECO 8460; la ruota a sinistra aziona la pompa di iniezione, quella di destra l'albero a camme e gli accessori (pompa acqua, compressore aria freni, idroguida); nella foto gli accessori non sono montati.



Piermaria Davoli

È professore associato di Costruzione di Macchine Movimento Terra alla Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Milano. Si occupa di trasmissioni, di ingranaggi (in particolare in plastica), di analisi delle sollecitazioni negli organi delle macchine, di resistenza a fatica.

Carlo Gorla

Laureato in Ingegneria meccanica al Politecnico di Milano, è attualmente ricercatore presso il Dipartimento di Meccanica dello stesso Ateneo. Si occupa del calcolo della sollecitazione nelle strutture meccaniche e negli organi delle macchine, di resistenza a fatica e di trasmissione di potenza con ingranaggi in plastica.



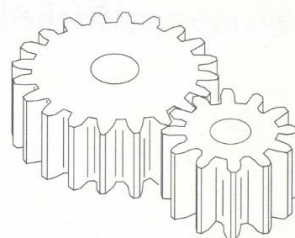
Sante Quaranta

Laureato in fisica all'Università di Bari; ha lavorato presso la Sorin Impianti Nucleari per la messa a punto dei processi di fabbricazione di fibre di carbonio e di componenti di nitrato di silicio; successivamente, presso il Centro Ricerche Fiat, è stato responsabile dell'ente preposto alla caratterizzazione dei materiali e dei processi di trasformazione. Attualmente è responsabile in Iveco della ricerca e applicazione nuovi materiali.



Giuseppe Crippa

Laureato in Ingegneria Meccanica; dopo una esperienza decennale presso la Industrie Pirelli, dal 1986 lavora presso la STP Tecnopolimeri occupandosi tra l'altro dell'ottimizzazione di materie plastiche destinate alla produzione di ingranaggi per trasmissione di potenza meccanica.



mento acciaio/plastica in entrambi i casi (vedi [1], dove è stato descritto questo programma di ricerca).

Le principali dimensioni delle ruote dentate sono riportate in tabella I; siccome si è operata una semplice sostituzione, queste sono rimaste invariate per le ruote in plastica.

Realizzazione delle ruote

Come è stato descritto in [1], la metodologia di realizzazione delle ruote che è stata scelta consiste nello stampaggio a iniezione della corona dentata su un inserto in acciaio, seguita da lavorazione meccanica di finitura della dentatura.

Definito il numero di cavità dello stampo, il problema principale consiste nella scelta della posizione del punto d'iniezione e del layout delle canalizzazioni.

La scelta di più punti d'iniezione (4, 6 o anche 8) collocati su un diametro vicino alla dentatura consente di ridurre il consumo di

La distribuzione nei motori diesel e la sostituzione delle ruote in acciaio

Nel motore IVECO 8460 la distribuzione è comandata da ingranaggi (fig. 1 e 2).

Il pignone dell'albero a gomiti, attraverso una ruota intermedia oziosa, aziona due ruote identiche: quella della pompa di iniezione, e quella dell'albero a camme, che a sua volta aziona gli accessori (pompa acqua, compressore aria per i freni, idroguida).

La sostituzione dell'acciaio con la plastica ha riguardato le due ruote identiche (pompa di iniezione e albero a camme), per ottenere il favorevole ingrana-

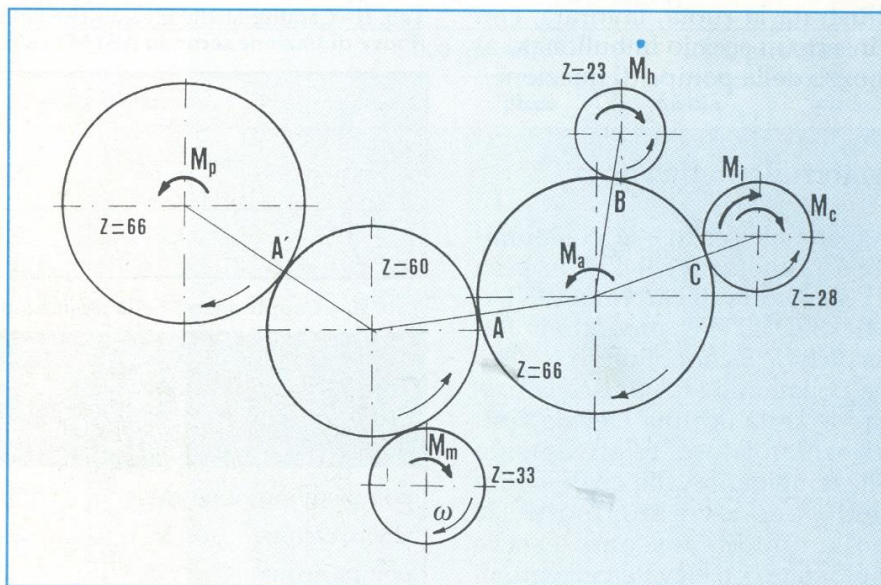


Fig. 2 - Schema della distribuzione con le coppie che agiscono su ciascuna ruota: M_p = pompa di iniezione; M_h = pompa acqua; M_a = albero a camme; M_i = idroguida; M_c = compressore aria freni, M_m = coppia motrice trasmessa dall'albero a gomiti.

Tab. I - Dimensioni delle ruote.

numero di denti	66	modulo normale	[mm] 2,25
angolo di pressione	14° 30'	diametro primitivo	[mm] 162,553
angolo d'elica	24°	larghezza	[mm] 28,1

materiale, ma crea linee di saldatura che, spesso, sono punti deboli nel pezzo.

Per questo motivo la scelta è caduta su un sistema d'iniezione circolare, a ombrello, alimentato da un canale centrale, che deve essere poi rimosso con lavorazione meccanica dopo lo stampaggio. Entrambe le soluzioni sono state simulate con un apposito software (FaBest della Plastics & Computers), ottenendo in tutti e due i casi risultati accettabili riguardo a pressione d'iniezione, distribuzione della temperatura etc.; ugualmente è stata scelta la soluzione che consente di evitare le linee di saldatura e di ottenere uno stampaggio più uniforme. Il profilo a evolvente è stato ottenuto per successiva lavorazione (con fresa creatore). In figura 3 è illustrata la ruota, lavorata, con l'inserto in acciaio imbullonato al mozzo della pompa di iniezione.

Materiale della ruota

Il materiale scelto è la poliammide 6.6 rinforzata col 40% in peso di fibre corte di carbonio (SNIAMID SSD 400 FC, prodotto in Italia da STP Tecnopolimeri).

La poliammide 6.6 unisce la bassa viscosità ad una elevata resistenza al calore, relativamente alle temperature alle quali le ruote devono lavorare. Inoltre le poliammidi possono essere rinforzate con elevate percentuali di fibre, con conseguente incremento delle caratteristiche meccaniche. Infine l'uso di fibre corte

consente di avere un materiale che può essere stampato a iniezione, cioè con un processo produttivo economico che consente un'elevata produzione anche con ridotto investimento.

La fibra scelta per il rinforzo è quella di carbonio, nonostante il costo più elevato rispetto alla fibra di vetro, perché essa consente minore usura, sia della ruota in sé sia di quella in acciaio con la quale ingrana, come è stato già sperimentato [2]. Altri vantaggi di un tecnopolimero quale è la poliammide 6.6 rinforzata con fibre di carbonio sono: elevata resistenza meccanica con relativamente bassa densità; basso coefficiente di dilatazione termica; sufficiente stabilità dimensionale; buone proprietà smor-

Tab. II - Caratteristiche meccaniche della pa 6.6. 40% FC, (Prove di trazione secondo ASTM D 638 a 23 °C; SNIAMID SSD 400 FC).

R _m [MPa]	A [%]	E [MPa]	R _{p1.0} [MPa]	R _{p0.2} [MPa]
193	2,2	31530	175	93

Tab. III - Coppie agenti nella trasmissione con ingranaggi in acciaio (valori in Nm).

		1.000 giri/min		1.800 giri/min	
		media	picco	media	picco
pompa di iniezione	M _p	10	159	21	225
albero camme	M _a	26	35	16	41
pompa acqua	M _h	2	2	4	4
compressore aria	M _c	16	126	17	126
idroguida	M _i	32	32	31	31



Fig. 3 - Ruota in plastica con inserto in acciaio, imbullonata sul mozzo della pompa ad iniezione.

zanti. In tabella II sono riportate le principali caratteristiche meccaniche di questo materiale.

Apparato sperimentale

Il motore Diesel (6 cilindri in linea, 9500 cm³) è stato utilizzato come apparato di prova, dopo aver eliminato pistoni e bielle ed averlo collegato con un motore elettrico a c.c. da 84 kW per trascinarlo in rotazione (vedi figura 1 e la descrizione riportata in [1] e [3]). La pompa di iniezione e gli iniettori sono collegati all'esterno del motore, con un circuito che consente la ricircolazione del liquido riproducendo le reali

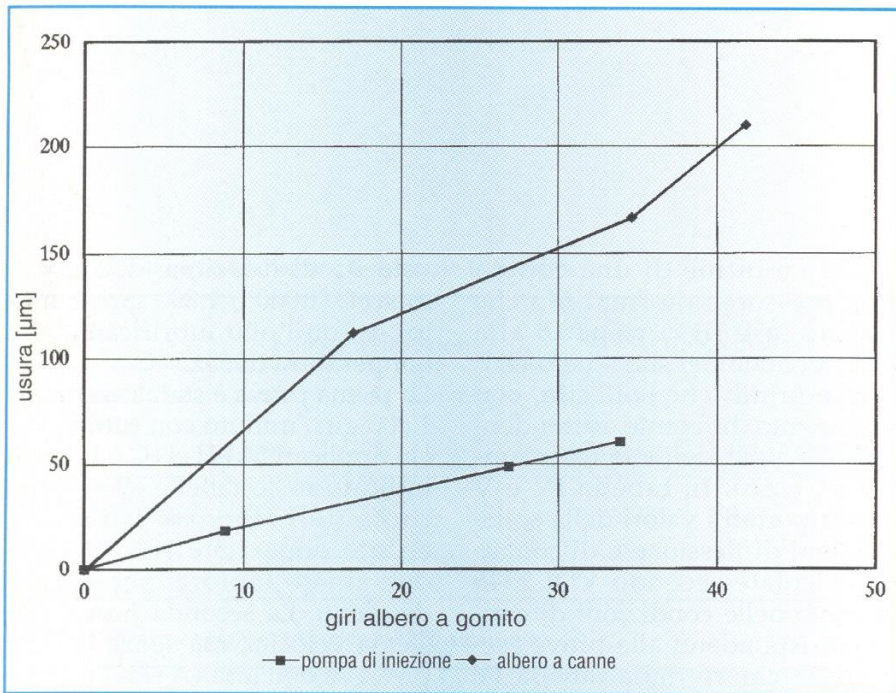


Fig. 4 - Andamento dell'usura sulla ruota della pompa di iniezione (carico P) e su quella dell'albero a camme (carico A+H) a 1.800 giri/minuto.

condizioni di esercizio della pompa. Le temperature dell'acqua e dell'olio possono essere regolate con opportuni scambiatori di calore. Poiché la potenza assorbita dalla pompa dell'idroguida e dal compressore dell'aria dei freni passa attraverso la ruota dentata dell'albero a camme, il motore di prova è dotato di appositi apparati, che simulano opportunamente i relativi cicli di carico. I principali parametri (pressione dell'olio, temperatura dell'acqua e dell'olio, velocità di rotazione) sono misurati e acquisiti con un data-logger Solartron Orion. L'apparato di prova è stato realizzato e montato nei laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano, dove sono state anche condotte le sperimentazioni.

La coppia agente sulle ruote

In figura 2 è schematizzata la trasmissione, e sono messe in evidenza le coppie che agiscono su ciascuna ruota. I valori della coppia utilizzati nel calcolo riguardano la distribuzione convenzionale con ruote in acciaio, e potrebbero essere differenti da quelle effettivamente agenti nelle condizioni di prova - cioè con

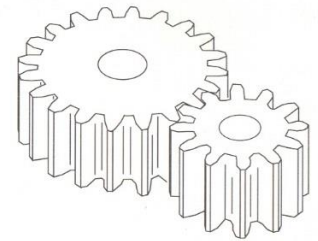
due ruote in plastica, che hanno minore rigidità della dentatura - a causa del diverso comportamento dinamico.

La coppia della pompa di iniezione M_p , che è ciclicamente variabile e che ha 6 picchi ogni 2 giri dell'albero a gomiti, è quasi pulsatoria, con $R = M_{pmin} \cdot M_{pmax} \approx 0$; è stata misurata su questo stesso motore, come descritto in [3]. I valori medio e di picco, a 1.000 e 1.800 giri/minuto, sono riportati

Tab. IV - Valori calcolati dello sforzo al piede del dente [MPa]

punto	carico	1.000 giri/min		1.800 giri/min	
		media	picco	media	picco
A	A+H+I+C	30	87		
B	A+H+I+C	-2	-2		
C	A+H+I+C	-25	-84		
A	A+H+I	22	24		
B	A+H+I	-2	-2		
C	A+H+I	-17	-17		
A	A+H	7	9	6	11
B	A+H	-2	-2	-3	-3
C	A+H	-	-	-	-
A'	P	2	33	5	47

A, B, C, A' si riferiscono ai diversi punti di ingranamento delle due ruote dentate; i carichi sono: A = albero a camme; H = pompa acqua; I = idroguida; C = compressore aria freni; P = pompa di iniezione.



in tabella III.

La coppia dell'albero a camme M_a è stata ricavata da calcoli del costruttore del motore (IVECO). A 1.000 giri/min i valori sono sempre positivi, mentre a 1.800 giri/min vi sono anche valori negativi dovuti alla dinamica del sistema. A 1.800 giri/min i picchi sono più alti, ma il valore medio è minore. I valori sono riportati in tabella III.

La coppia della pompa acqua M_p può essere considerata ragionevolmente costante al variare dell'angolo di rotazione dell'albero a gomiti, ed è stata calcolata sulla base delle caratteristiche della pompa e del motore sul quale è applicata. I valori, per le velocità che interessano le prove, sono riportati in tabella III. La coppia della pompa dell'acqua, ridotta all'albero a camme, deve essere sommata alla coppia dell'albero a camme stesso, e sollecita i denti della ruota che ingranano con la ruota intermedia; sono invece di segno opposto le sollecitazioni che produce

sugli stessi denti nell'ingranamento della ruota della pompa stessa con la ruota dell'albero a camme.

La **coppia del compressore aria** M_c non può essere considerata costante, perché mostra un forte picco ogni giro. Il valore medio può essere ricavato da dati ottenuti dal costruttore, mentre invece i valori di picco sono stati misurati da IVECO. Questi valori sono riportati in tabella III. Le sollecitazioni sui denti delle ruote interessate (ruota albero a camme e ruota del compressore) hanno andamento qualitativamente analogo a quello descritto per la pompa acqua.

Infine la **pompa dell'olio dell'idroguida**, che è in serie al compressore, richiede una coppia quasi costante M_i (se è fissa la pressione di esercizio); i valori, ottenuti da diagrammi forniti dal produttore, sono in tabella III. Siccome agisce sullo stesso albero del compressore, analoghe sono le considerazioni qualitative sugli sforzi sui denti.

Le sollecitazioni nelle dentature

Gli sforzi sui denti della ruota della pompa di iniezione, conseguenti alla trasmissione della coppia M_p , sono diversi da quelli che si hanno su una ruota dentata che trasmette una coppia costante (e dove quindi tutti i denti sono soggetti allo stesso carico), perché i picchi di coppia hanno una fase fissa rispetto alla ruota; di conseguenza solo alcuni denti, e sempre gli stessi, sono sollecitati ai valori di picco della coppia. Gli sforzi sui denti della ruota dell'albero a camme sono il risultato della sovrapposizione di una coppia costante (pompa dell'acqua M_h e idroguida M_i), di una coppia che ha fase fissa rispetto alla ruota (albero a camme

M_a) e infine di una coppia (compressore aria freni M_c) che ha una fase fissa rispetto alla ruota dentata del suo albero ($Z = 28$), e quindi che sollecita, con sfasamento differente, tutti i denti della ruota dell'albero a camme ($Z = 66$). In tabella IV e V sono riportati i valori della sollecitazioni di flessione e di contatto, calcolate secondo VDI 2545 [4], solo nelle condizioni di carico corrispondenti alle prove eseguite. È chiaro dalla tabella IV che i denti della ruota della pompa di iniezione sono soggetti a sollecitazioni pulsatorie ($R = \sigma_{min}/\sigma_{max} \approx 0$); i denti della ruota dell'albero a camme, invece sono soggetti a sollecitazioni alterante, non simmetriche ($R \approx -0,3 \div -1$ a seconda del carico).

Risultati delle prove

a) rottura dei denti

Le prove sono state eseguite sostituendo entrambe le ruote in acciaio con quelle in plastica, come illustrato in figura 1, a due

velocità di rotazione dell'albero motore (1.000 e 1.800 giri/minuto), e con l'olio lubrificante alla temperatura di 65 ± 5 °C.

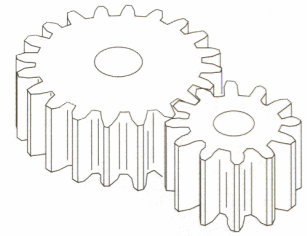
La prima prova è stata condotta a 1.000 giri/minuto con tutti i carichi applicati (A+H+I+C e P, come indicato nelle tabelle IV e V): la ruota dell'albero a camme ha ceduto dopo $1,5 \cdot 10^6$ rotazioni dell'albero motore, per rottura dei denti. La seconda prova, alla stessa velocità, ma senza il compressore dell'aria (A+H+I e P) ha visto il cedimento della ruota dell'albero a camme dopo $3,8 \cdot 10^6$ rotazioni, sempre per rottura dei denti. La terza prova, alla stessa velocità, ma dopo aver tolto anche la pompa dell'idroguida (A+H e P), non ha prodotto rotture, ed è stata interrotta dopo $36,8 \cdot 10^6$ rivoluzioni dell'albero motore totalizzate dalla ruota dell'albero a camme, e $42,1 \cdot 10^6$ rivoluzioni totalizzate dalla ruota della pompa di iniezione. La prova è stata poi interrotta.

La quarta prova è stata eseguita a 1.800 giri/minuto, alla stessa temperatura e con gli stessi uti-

Tab. V- Valori calcolati della sollecitazione di contatto [MPa]

punto	carico	1.000 giri/min		1.800 giri/min	
		media	picco	media	picco
A	A+H+I+C	115	196		
B	A+H+I+C	38	38		
C	A+H+I+C	141	258		
A	A+H+I	100	104		
B	A+H+I	38	38		
C	A+H+I	116	116		
A	A+H	54	62	52	71
B	A+H	38	38	56	56
C	A+H	-	-	-	-
A'	P	31	122	45	145

A, B, C, A' si riferiscono ai diversi punti di ingranamento delle due ruote dentate; i carichi sono: A = albero a camme; H = pompa acqua; I = idroguida; C = compressore aria freni; P = pompa di iniezione. Le sollecitazioni di contatto, quando i denti sono in B e C, agiscono su fianchi opposti rispetto a quando ingranano in A.



Tab. VI - Usura e tasso d'usura delle ruote in plastica

velocità di rotazione	pompa di iniezione			albero a camme		
	usura [μm]	cicli [10 ⁶]	tasso [μm/10 ⁶ c]	usura [μm]	cicli [10 ⁶]	tasso [μm/10 ⁶ c]
1.000 giri/min	73	42,1	1,7	228	36,8	6,2
1.800 giri/min	60	33,9	1,8	210	41,8	5,0

Tab. VII - Danneggiamento ruota albero a camme

	n. cicli [10 ⁶]	media	dente più danneggiato
1.000 giri/min	36,8	1,1%	7,9%
1.800 giri/min	41,8	2,6%	23,4%

lizzatori della terza prova (A+H e P). Non si sono manifestati cedimenti dopo $41,8 \cdot 10^6$ rivoluzioni per la ruota dell'albero a camme, e dopo $33,9 \cdot 10^6$ per la ruota della pompa di iniezione (la differenza è dovuta al cedimento di una ruota della pompa per motivi estranei).

b) usura e danneggiamento superficiale

Nel corso delle prove l'usura dei denti è stata quantificata con misure Wildhaber su entrambe le ruote che hanno lavorato nelle condizioni di carico A+H e P rispettivamente. Nella tabella VI sono riportati i dati dell'usura rilevata sulle due ruote, mediata su 6 settori di 7 denti; le differenze fra un settore e l'altro della stessa ruota sono irrilevanti. È ovvio che, solo per la ruota dell'albero a camme, per la quale i denti lavorano su entrambi i fianchi, viene misurata l'usura di tutti e due. Durante le prove svolte a 1.800 giri/minuto l'evolversi dell'usura è stato seguito a intervalli di 10-15 milioni di giri, come è mostrato in figura 4. La

ruota della pompa di iniezione non ha mostrato segni evidenti di danneggiamento della superficie dei denti, sia nelle prove a 1.000 giri/minuto sia in quelle a 1.800. Un certo danneggiamento, invece, si è verificato sulla ruota dell'albero a camme, come appare in figura 5. Questo danneggiamento può essere quantificato esprimendolo in percentuale della superficie del fianco attivo del dente al termine della prova (per il dente più danneggiato e media di tutti i denti). In tabella VII sono riportati questi dati.

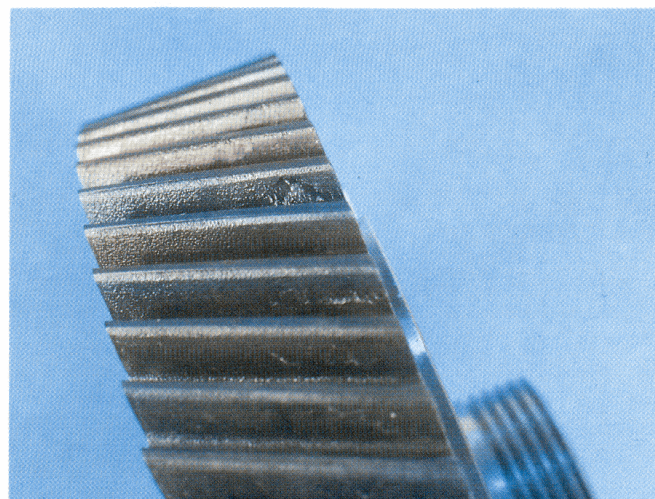


Fig. 5
Danneggiamento superficiale dei denti della ruota albero a camme dopo, $41,8 \cdot 10^6$ giri dell'albero a gomiti a 1.800 giri/minuto.

c) commenti

Le rotture dei denti delle ruote si sono verificate quando sforzi alternati ($R \approx -1$) dovuti ad una coppia media relativamente elevata sono stati accompagnati da picchi alternati (ruota dell'albero a camme nelle condizioni di carico A+H+I+C e A+H+I a 1.000 giri/min). Non vi sono state rotture nelle condizioni di carico A+H, ma in questo caso gli sforzi erano più bassi con $R \approx -0,2 \div -0,3$. Non vi sono state rotture anche per la ruota della pompa di iniezione a 1.000 giri/min, con coppia dal valore medio basso e sforzi pulsatori ($R \approx 0$), anche se accompagnati da picchi relativamente elevati. Questi risultati sono confermati dalle prove eseguite a 1.800 giri/min, nelle quali gli sforzi sono più elevati che a 1.000 giri./min. Il comportamento a fatica delle poliammidi non è ancora conosciuto a fondo, e l'esistenza di un vero e proprio limite di fatica non è del tutto certa. Secondo Mandell [5], i risultati del quale sono stati discussi in [3], si può valutare la resistenza a fatica della PA6.6 40% FC a 10^6 cicli a 50 MPa per sollecitazione quasi pulsatoria ($R = 0,1$) a 70 °C. Il numero di prove eseguite non è sufficiente a gene-

ralizzare il confronto; possiamo però osservare che, nelle condizioni di carico A+H e P, non vi sono stati cedimenti per rottura del dente dopo alcune decine di milioni di giri di esercizio.

Si è avuta invece usura sui denti, con un tasso legato al carico, come è mostrato in tabella VI; dell'usura, che non impedisce la trasmissione della potenza meccanica, occorre però tener conto per un numero elevato di cicli di esercizio. Il danneggiamento superficiale si è verificato solo sulla ruota dell'albero a camme; per le prove eseguite, il livello raggiunto può essere considerato il cedimento vero e proprio delle ruote.

Conclusioni

Le prove eseguite confermano che:

- le poliammidi caricate con fibre corte sono un materiale adatto per costruire ruote dentate;
- le poliammidi con elevata carica di fibre di carbonio possono essere utilizzate per realizzare ruote dentate con la tecnica dello stampaggio a iniezione.

È inoltre stato osservato che:

- la ruota in plastica dell'albero a camme può trasmettere potenza, senza rottura del dente ma con un certo danneggiamento e usura, per diverse decine di milioni di cicli;
- la ruota in acciaio della pompa di iniezione può essere sostituita con una ruota in plastica senza problemi di rotture o danneggiamenti superficiali, e con più bassi tassi d'usura, per qualche decina di milioni di cicli.

Le prove eseguite confermano, in definitiva, che le ruote dentate in plastica, anche in condizioni gravose di lavoro, possono sostituire ruote dentate in acciaio, specialmente se vengono riprogettate

appositamente e non semplicemente sostituite a quelle esistenti.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato sviluppato sulla base di contratti di ricerca stipulati col Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica, da IVECO S.p.A. (studio di ingranaggi in plastica per la distribuzione dei motori diesel) e da STP Tecnopolimeri S.p.A. (ingranaggi in plastica per la trasmissione di potenza). La ricerca è stata anche parzialmente finanziata con fondi MURST 60% 1992. Gli autori ringraziano il sig. S. Bruno, l'ing. L. De Alberti e il sig. N. Gheller, tecnici dei laboratori del Dipartimento di Meccanica, e l'ing. M. Antonini, neo-laureato in ingegneria meccanica, per il loro contributo alle prove sperimentali qui descritte. Un ringraziamento va anche all'ing. Vittoriano Zanotti (Rossi Motoriduttori S.p.A., Modena), per aver cortesemente eseguito i controlli dimensionali sulle ruote e per i relativi consigli. Le ruote sono state realizzate da F.Ili Cattini S.n.c., S. Martino in Rio (RE).

Bibliografia

- [1] G. Crippa, P. Davoli, S. Quaranta, «Capabilities of carbon reinforced plastic for diesel engine gears», Congresso Internazionale A.I.P.I. «Il nostro futuro con nuovi materiali», Milano, 23-24 maggio 1991.
- [2] G. Crippa, P. Davoli, «Comparative Fatigue Resistance of Fiber Reinforced Nylon 6 Gears», A.S.M.E. 6th International Power Transmission and Gearing Conference, Phoenix, 13-16 september 1992 (in corso di pubblicazione su «Trans. A.S.M.E., Journal of Mechanical Design»).
- [3] G. Crippa, P. Davoli, S. Tonti, «Toothed Couplings for Diesel Engines: an example of steel substitution with fiber reinforced plastics», Third International Conference on Materials innovations and their applications in the transportation industry (ATAMAT 91), Torino, 5-6-7 june 1991; anche in «Kunststoffe», 3/93, pag. 221-226.
- [4] VDI 2545 - Zahnräder aus Thermoplastischer Kunststoffen, Verein Deutscher Ingenieure, Januar 1981.
- [5] J. Mandell et al., «Some effects of matrix and interface properties on the fatigue of short fiber reinforced thermoplastics», in «Polymer composite», january 1983, vol. 4, n. 1.