

La progettazione degli ingranaggi in plastica



Una delle motivazioni della diffusione degli ingranaggi in plastica risiede nei grandi volumi di produzione ottenibili grazie alla tecnologia dello stampaggio ad iniezione (injection moulding), ma non è solo questa la ragione del loro successo. Gli ingranaggi in plastica offrono infatti altri vantaggi e benefici, quali ad esempio la massa ridotta, le buone proprietà di smorzamento, la libertà progettuale, la possibilità di esercizio senza lubrificante, e la competitività dei costi nella produzione su larga scala. D'altro canto, non si possono neppure ignorare alcune limitazioni di molti dei materiali utilizzati per le ruote dentate in plastica, quali le moderate temperature di esercizio ammissibili, la più bassa resistenza alla fatica al piede del dente e da contatto (resistenza del fianco), l'assorbimento dell'acqua o l'elevato coefficiente di dilatazione termica. Però, forse anche a causa della mancanza di norme internazionali universalmente condivise per il calcolo e la verifica delle prestazioni, si ha spesso l'impressione che non vi sia la consapevolezza, talvolta anche tra gli addetti ai lavori, che la progettazione degli ingranaggi deve essere affrontata tenendo conto delle peculiarità del materiale e che non è meno complessa di quella degli ingranaggi metallici.

Si deve invece sottolineare che la progettazione degli ingranaggi in plastica è questione da specialisti, i quali non solo devono conoscere approfonditamente le problematiche della progettazione delle trasmissioni in generale, ma devono anche avere una competenza specifica nel dominare i problemi specifici le-

GLI INGRANAGGI IN PLASTICA SONO SEMPRE PIÙ DIFFUSI ED APPLICATI NEL CAMPO DELLA TRASMISSIONE DEL MOTO E DELLA POTENZA: I LORO NUMERI HANNO ORMAI SUPERATO QUELLI DEGLI INGRANAGGI METALLICI E, DALL'INDUSTRIA AUTOMOBILISTICA A QUELLA DELLE APPLICAZIONI MEDICALI, DALL'INDUSTRIA SPAZIALE AI SEMPLICI GIOCATTOLE, SI TROVANO ORMAI IN MOLTISSIME APPLICAZIONI

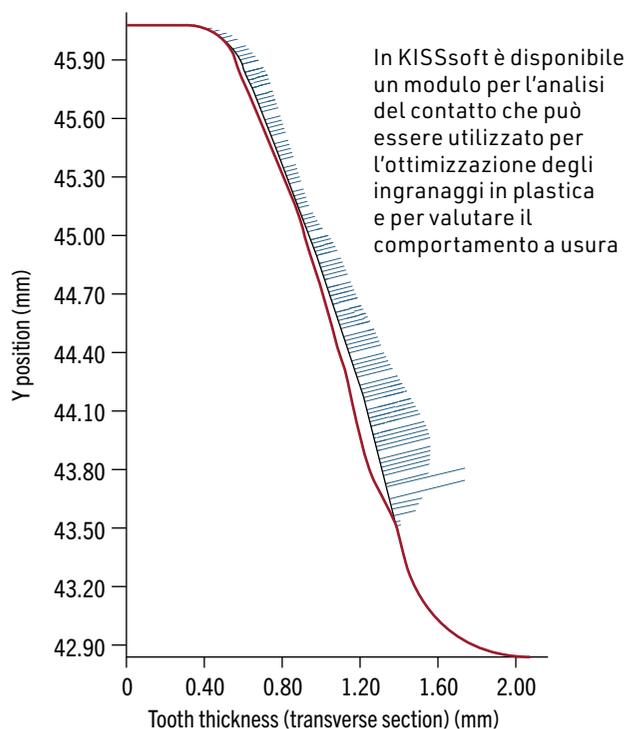


L'ING. ALJAZ POGACNIK, DOCENTE DEL SEMINARIO, ORGANIZZATO DA KISSOFT AG, PRESSO IL POLITECNICO DI MILANO. FRA I PARTECIPANTI, PROGETTISTI PROVENIENTI DA PRIMARIE AZIENDE, QUALI AD ESEMPIO FERRARI E BONFIGLIOLI

gati all'utilizzo della plastica e, non ultimo, operare utilizzando metodi e strumenti appropriati.

Proprio di questo si è parlato nel seminario tenutosi presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano, dedicato a una discussione approfondita sulla progettazione degli ingranaggi in plastica, nella quale sono stati affrontati gli obiettivi, i metodi e gli strumenti disponibili per il progettista, con particolare riferimento al software KISSsoft, che si presenta come uno strumento completo e costantemente aggiornato con i più recenti sviluppi nel campo dei metodi di calcolo e della conoscenza delle proprietà dei materiali.

Il seminario, di due giornate, si è svolto lo scorso febbraio ed è stato un'ottima opportunità di confronto e di scambio tra gli specialisti dei metodi e degli strumenti di calcolo, rappresentati in particolare dall'Ingegnere Aljaz Pogacnik, che è intervenuto come relatore per l'organizzatore KISSsoft, e i progettisti, provenienti da primarie aziende, quali ad esempio Ferrari e Bonfiglioli.



La nuova VDI 2736 è completamente implementata in KISSsoft, che al momento è l'unico software sul mercato che consente il calcolo e la verifica complessiva degli ingranaggi in plastica

Non sono mancati tra i partecipanti anche alcuni ricercatori accademici, attivi nel campo della ricerca sulle ruote dentate, che hanno così colto l'occasione per approfondire le loro conoscenze in tema di ingranaggi in plastica.

La presenza di utenti altamente qualificati conferma, da un lato, l'importanza che gli ingranaggi in plastica stanno assumendo nella trasmissione di potenza anche in settori quali l'industriale e l'automotive e, dall'altro, l'evidenza che, anche per i progettisti già esperti negli ingranaggi metallici, il progetto di una trasmissione con ruote dentate in tecnopolimero non può essere concepito come una semplice estensione della pratica e dei metodi utilizzati per quelle metalliche, soprattutto se si vogliono sfruttare appieno le potenzialità e i vantaggi.

I partecipanti hanno avuto modo di apprezzare la formula dei seminari del mondo KISSsoft, in grado di combinare le indispensabili informazioni di base con gli aspetti teorici e metodologici e con le applicazioni pratiche, che per alcuni casi di studio sono state affrontate con esempi numerici, svolti con l'utilizzo del software di calcolo.

In ultima analisi il workshop ha evidenziato che il progetto delle trasmissioni con ingranaggi in plastica necessita di un software aggiornato con gli sviluppi nei metodi di calcolo e con il database dei materiali, ma anche la conoscenza delle informazioni di base relative alla corretta scelta dei materiali, alle criticità e ai tipi di cedimento, delle quali si propone una sintesi nel seguito.

I materiali plastici

I materiali plastici per ingranaggi più popolari sono le poliammidi (PA) e le resine acetaliche (POM). Più dell'80% di tutte le ruote dentate in plastica sono costruite con uno dei materiali summenzionati. Il motivo è che hanno una buona compatibilità tribologica con l'acciaio o tra di loro, che sono facili da processare e che non sono costosi. Naturalmente hanno alcune limitazio-

ni, principalmente legate alle temperature di esercizio, che dovrebbero rimanere al di sotto degli 80 °C, e per le PA all'assorbimento di umidità, che può ridurre sensibilmente le proprietà meccaniche. Alcuni di questi svantaggi possono essere eliminati scegliendo un materiale plastico migliore, ma questo usualmente si traduce in un costo più alto e/o in un processo di produzione più complesso.

Ci sono più di dieci materiali plastici base che possono essere adatti per la costruzione di ingranaggi, quali POM, PA, PE-EK, PPS, PBT, PAI, PEI, PC ed altri. Il materiale base può essere combinato con un rinforzo (fibra di vetro, carbonio, aramide o nanoparticelle) con differenti percentuali in peso (dal 5% al 50% o anche più). Inoltre, i materiali possono essere addizionati con cariche lubrificanti, utilizzando PTFE o MoS₂. Per questi motivi il progettista di ingranaggi si deve confrontare con il non facile compito di selezionare il materiale adatto da un ampio ventaglio di scelte possibili.

I metodi di calcolo

I primi metodi di calcolo per gli ingranaggi in plastica furono introdotti dal libro di Niemann (Elementi di Macchine) e successivamente sintetizzati in una direttiva per il calcolo delle ruote dentate in materiale termoplastico emanata dall'associazione degli ingegneri tedeschi (VDI 2545), che fu introdotta nel 1981 e ritirata nel 1996, perché nel frattempo non era stata aggiornata in modo appropriato. Il metodo di calcolo era applicabile alle dentature cilindriche e comprendeva le verifiche per la fatica al piede del dente (sicurezza rispetto al cedimento al piede), per la fatica da contatto del fianco (pitting), per la temperatura del dente e per la deformazione del dente.

La base era rappresentata dal metodo di calcolo secondo la norma DIN 3990, esteso introducendo la dipendenza dalla temperatura delle proprietà dei materiali.

METODI DI CALCOLO

Nel periodo tra il 1996 e il 2013, non è esistita una direttiva ufficiale per il calcolo degli ingranaggi in plastica ma gli ingegneri hanno continuato ad utilizzare la VDI 2545, nonostante fosse stata ritirata. Negli anni 2013 e 2014, è stata pubblicata infine la nuova direttiva VDI 2736, che è un successore della VDI 2545. La nuova direttiva è ampiamente rivista, estesa e migliorata, ma continuano a mancare alcuni dati fondamentali per gli ingranaggi, come verrà meglio mostrato nel seguito.

La direttiva VDI 2736 consiste di 4 parti:

- Parte 1, dedicate alle proprietà delle materie plastiche, alla scelta del materiale, ai metodi di produzione e alle tolleranze.
- Parte 2, sul calcolo della capacità di carico degli ingranaggi cilindrici. Questa sezione è molto simile alla precedente direttiva VDI 2545, con alcune migliorie.
- Parte 3, calcolo della capacità di carico degli ingranaggi elicoidali ad assi incrociati.
- Parte 4, determinazione dei valori a fatica ammissibile per il fianco e al piede del dente (determinazione della curva SN)

Le parti 3 e 4 sono completamente nuove, mentre le parti 1 e 2 sono riprese dalla VDI 2545, con aggiornamenti e modifiche. La nuova VDI 2736 è completamente implementata in KISSsoft, che al momento è l'unico software sul mercato che consente il calcolo e la verifica complessiva degli ingranaggi in plastica.

Dati dei materiali necessari per il calcolo

La valutazione completa di una trasmissione con ingranaggi in plastica richiede la conoscenza di numerose proprietà del materiale. Tenuto conto che le materie plastiche sono sensibili alla variazione di temperatura, anche i dati noti devono essere in dipendenza dalla temperatura. Sono necessarie le seguenti caratteristiche generali: modulo di Young a differenti temperature, coefficiente di Poisson, carico di rottura e di snervamento a differenti temperature e dati tribologici.

Tuttavia, sono anche indispensabili alcuni dati specifici per gli ingranaggi, i cosiddetti "Gear data", per calcolare i fattori di sicurezza a durata per il fianco e il piede del dente. Le proprietà generali sono di dominio pubblico (Campus Database) o si possono ottenere dai produttori. Il problema principale è invece quello di possedere le curve SN (cioè le curve di Wöhler) per la resistenza al fianco e al piede per diversi materiali. Al momento l'unico modo per generare queste curve è quello di eseguire prove sperimentali su dentature, secondo una procedura descritta in dettaglio nella VDI 2736-4.

La VDI 2736-2 fornisce le curve SN solamente per un numero limitato di materiale base (POM, PA6, PBT and PA12). Ciò non di meno, l'utente di KISSsoft può fruire delle proprietà di in numero ben più ampio di materiali: la release 2020 ne prevede infatti ben 78. Naturalmente non tutti i dati derivano da una campagna di caratterizzazione completa: in alcuni casi non sono disponibili le curve SN, o in altri è disponibile solo la curva SN per la resistenza al piede, ad esempio. Tuttavia, KISSsoft costituisce un riferimento nel quale tutti i dati misurati sono raccolti, valutati e implementati in un database. Si tratta in generale di dati forniti dai produttori, e in alcuni casi frutto di misurazioni.



Ci sono più di dieci materiali plastici base che possono essere adatti per la costruzione di ingranaggi, quali POM, PA, PEEK, PPS, PBT, PAI, PEI, PC ed altri

Determinazione sperimentale delle curve SN

I dati dei materiali specifici per ingranaggi (gear data) sono disponibili per un numero molto limitato di materiali, soprattutto se confrontato con l'abbondanza di materiali plastici idonei per questa applicazione.

La ragione è che le curve SN si possono ottenere solamente facendo prove sperimentali ad hoc. Questo implica la necessità di stampare ad iniezione (o tagliare) ingranaggi adatti per un banco prova funzionante a carichi bassi (quindi non della taglia del banco FZG standard) e di misurare sperimentalmente i dati della curva SN per diverse temperature. Mediamente la caratterizzazione di ogni singolo materiale può richiedere non meno di 3-5 mesi di prove ed è anche piuttosto costosa. Naturalmente ci sono molti istituti in grado di svolgere con competenza le prove necessarie alla definizione della curva SN per il fianco e per il piede in modo accurato.

Progetto degli ingranaggi in plastica

Uno dei più grandi vantaggi che si hanno nella progettazione di ingranaggi in plastica stampati ad iniezione è che non si deve dipendere da un utensile "fisico", come ad esempio il creatore, nella realizzazione della dentatura. Questo significa che non si hanno vincoli circa l'utilizzo di moduli o angoli di pressione standard o derivanti dalla disponibilità dell'utensile, ma si può invece agire senza limitazioni se lo si desidera. Anche le modifiche di profilo sono applicabili liberamente al fine di ottimizzare l'errore di trasmissione o il comportamento a usura. Le modifiche longitudinali sono invece raramente applicate perché complicano la realizzazione dello stampo per l'iniezione.

Il processo di progettazione inizia dall'esame dei requisiti del cliente, i cui elementi critici sono rappresentati dalla coppia, il numero di cicli e la temperatura. La scelta del materiale dovrebbe essere effettuata sin dai primi passi, in modo da poter effettuare un dimensionamento preliminare con KISSsoft. Alla luce di tale predimensionamento, si può quindi dare il via alle fasi di affinamento, nelle quali si ha un'ottimizzazione della macrogeometria (modulo normale, spostamento di profilo, angolo di pressione, profilo di riferimento, ...).

METODI DI CALCOLO

Un fattore importante per il progetto è costituito dalla temperatura di esercizio attesa nel funzionamento della trasmissione. La determinazione della temperatura costituisce un elemento assai critico del progetto e i metodi di calcolo disponibili non sono ancora sufficientemente accurati nel calcolarla ed è quindi più appropriato parlare di stime: anche le equazioni fornite dalla VDI 2545 o dalla stessa VDI 2736 ad esempio non sono molto precise. Naturalmente il processo di ottimizzazione è guidato dai requisiti del prodotto. I criteri più ovvi e più spesso utilizzati sono i fattori di sicurezza rispetto alla resistenza del fianco e del piede, che sono calcolabili utilizzando la direttiva VDI 2726. Il calcolo della resistenza secondo la VDI 2736 non tiene conto della deformabilità del dente e pertanto trascura l'effetto dell'aumento del rapporto di condotta sotto carico, che invece rappresenta un comportamento tipico negli ingranaggi in plastica.

Con tutto ciò, sempre più spesso la resistenza non rappresenta più il criterio di progetto prevalente. L'NVH (noise-vibrations-harshness) sta acquisendo sempre più rilievo, soprattutto per gli ingranaggi operanti in ambienti sensibili, come le attrezzature di misura o gli attuatori delle auto, dove il comfort del passeggero costituisce la priorità. Anche l'usura è importante perché può a sua volta indurre rumore o vibrazioni indesiderati, ma anche produrre particelle residue di materiale che non sono tollerate in alcune applicazioni (come ad esempio quelle medicale e alimentare). In KISSsoft è disponibile un modulo per l'analisi del contatto che può essere utilizzato per l'ottimizzazione degli ingranaggi in plastica e per valutare il comportamento a usura.

NVH

Il comportamento rispetto all'NVH può essere migliorato in diversi modi. Ad esempio si può agire sulla scelta della combinazione dei materiali, adottando per la ruota un materiale più deformabile, oppure si può incrementare la qualità delle dentature. Questi approcci possono aumentare la complessità della trasmissione e i suoi costi. Il modo più semplice per intervenire sull'NVH e sul comportamento a usura è attraverso la macrogeometria della dentatura (modulo normale, angolo d'elica, profilo di riferimento, spostamento di profilo, ...) e con un progetto microgeometrico appropriato (modifiche di profilo). Si deve sottolineare che, tenuto conto della costruzione per injection moul-

GIOCO DI ESERCIZIO

Gli ingranaggi devono avere un po' di gioco (spazio "libero" tra i fianchi) per poter lavorare correttamente nella pratica. Il gioco di esercizio dipende dalle tolleranze sullo spessore dei denti e sull'interasse, dalla qualità della costruzione ma anche dalla temperatura in funzionamento. I materiali plastici non rinforzati hanno coefficienti di espansione lineare molto elevati (10 volte più alti dell'acciaio), il che significa che le dimensioni possono cambiare significativamente nel campo di temperature in condizioni di esercizio (ad esempio da -40°C a 110°C per alcune applicazioni automobilistiche). Per conservare un gioco sufficiente anche nelle situazioni più critiche è indispensabile scegliere in modo appropriato le tolleranze sugli spessori dei denti e sui diametri. In KISSsoft è disponibile un modulo dedicato al gioco in condizioni di funzionamento che può essere utilizzato per questa finalità.



Oltre 45 materiali plastici per ingranaggi sono disponibili per la progettazione in KISSsoft.

ding, l'adozione di una macro- e microgeometria ottimizzata non ha ripercussioni sul costo degli ingranaggi.

Le principali sorgenti di rumore in una coppia di ruote dentate sono le variazioni di rigidità, gli errori geometrici, gli strisciamenti superficiali e gli urti tra i denti nell'ingranamento. Il comportamento può essere migliorato applicando le modifiche di profilo. Le modifiche più tipiche per un funzionamento dolce sono la modifica lunga di testa e di piede (lineare, progressiva o ad arco di cerchio) e la bombatura di profilo. L'effettivo rumore generato dagli ingranaggi in plastica (in termini di dB(A)) non può essere calcolato facilmente. Quando si ottimizzano gli ingranaggi in plastica per il rumore, si utilizza essenzialmente la stessa tecnica degli ingranaggi metallici, che prevede di ridurre l'errore di trasmissione e di evitare gli urti nel contatto.

Anche le modifiche longitudinali (d'elica) possono avere un'influenza positiva sull'NVH, soprattutto quando finalizzate a compensare inclinazioni dell'asse o a errori di costruzione. Se da un lato le modifiche longitudinali possono essere vantaggiosamente applicate in questi casi, dall'altro esse sono raramente utilizzate negli ingranaggi in plastica, perché sono difficili da realizzare con lo stampaggio ad iniezione.

In sintesi

Il seminario svoltosi presso il Politecnico di Milano ha confermato che il progetto degli ingranaggi in plastica è molto complesso e non deve essere sottovalutato. Richiede competenze specifiche, la conoscenza dei metodi di calcolo e molta esperienza. Un supporto indispensabile è costituito dall'utilizzo di un software, come ad esempio KISSsoft che costituisce lo strumento più evoluto attualmente sul mercato, che disponga delle necessarie funzioni per un calcolo efficace degli ingranaggi in plastica. Tuttavia, ad oggi, la sperimentazione costituisce ancora un elemento indispensabile del processo progettuale.

Ringraziamenti

L'autore ringrazia il dott. Aljaz Pogačnik (Bauhar s.p., Slovenia) e il dott. Ulrich Kissling (KISSsoft AG, Switzerland) per le informazioni fornite per la stesura del presente articolo.