

Rivestimenti duri su ruote dentate



È stato dimostrato che i processi di deposizione di film sottili duri portano benefici dal punto di vista della fatica e della fatica da contatto. La ricerca si propone di verificare modelli previsionali che permettono di studiare il comportamento meccanico di componenti rivestiti per valutare le fasi di innesco e di propagazione di cricche

Le tecniche di deposizione di film sottili consentono di applicare, sulla superficie di un componente, uno strato di materiale estremamente duro avente uno spessore al più di qualche μm . I metodi per ottenere questi rivestimenti si basano su processi che avvengono sotto vuoto. I principali sono l'evaporazione termica, l'evaporazione a fascio elettronico e lo sputtering.

Con queste tecniche si operano trasformazioni di fase del materiale con cui si vuole realizzare lo strato di rivestimento: il materiale di partenza, in forma solida, deve essere vaporizzato e successivamente condensato su un substrato, andando così a formare il film sottile.

I processi di deposizione di questo tipo vengono complessivamente denominati Physical Vapor Deposition (Pvd) e sono distinti dai processi di ti-

po Chemical Vapor Deposition (Cvd), in cui giocano un ruolo fondamentale le reazioni chimiche sia nella fase gassosa che sulla superficie del substrato.

Tramite questi processi è possibile realizzare film sottili dei più disparati materiali per diverse applicazioni, da quelle meno sofisticate (metallizzazione di bigiotteria e trofei, ricopertura del filo delle lamette da barba, fogli decorativi, ricopertura di campioni per microscopia elettronica) a quelle più sofisticate (strati usati in microelettronica, contatti ohmici, resistori e conduttori, componenti ottici ad alte prestazioni, rivestimenti protettivi, occhiali da sole a specchio, ecc.).

La tecnica più diffusa per eseguire rivestimenti in materiali duri, quali nitruro di titanio (TiN), carbonitruro di titanio (TiCN), nitruro di titanio ed



1. Modelli 3D ruote dentate fornite da Ducati Corse.



	E [MPa]	ν	R ₀ [MPa]	R _m [MPa]	HV
GH	208000	0,2		3080	1793
16NiCr11	208000	0,3	1130	1380	757
18NiCrMo5	208000	0,3	680	620	556
18NiCr6	208000	0,3	1650	1960	848
Ti6Al4V	110000	0,34	680	980	349

2. Strato di CrN applicato su un substrato

di acciaio e caratteristiche dei materiali impiegati.

alluminio (AlTiN), nitrato di cromo (CrN) e nitrato di zirconio (ZrN), è la deposizione fisica (Pvd).

Le tecniche di deposizione di film sottili duri Cvd e Pvd sono diffuse nell'ambito di molte applicazioni meccaniche. I rivestimenti ottenuti forniscono ottime prestazioni per quanto riguarda la resistenza a usura, la durezza e la resistenza alla corrosione [1]. Inoltre, le tensioni residue di compressione generate da alcuni processi di deposizione nello strato superficiale dei componenti rivestiti contribuiscono a incrementarne il limite di fatica [2-5], aspetto che può essere ulteriormente approfondito e su cui si è concentrato il lavoro di ricerca.

L'obiettivo dell'attività di ricerca è quello di studiare,

tramite modelli numerici a elementi finiti (Fem) e prove sperimentali, il comportamento, dal punto di vista della resistenza a fatica e della fatica da contatto, di ruote dentate di trasmissioni meccaniche, sia per l'ambito delle competizioni motociclistiche (figura 1) che per quello dell'industria automobilistica, rivestite in nitrato di cromo (CrN) (figura 2). In particolare, sono state prese in esame la coppia pignone - quinta marcia (16NiCr11 cementato) di una Ducati 999 che ha partecipato al campionato mondiale Super Bike e la ruota dentata della retromarcia (18NiCrMo5 cementato) di un modello di automobile di media-grossa cilindrata.

Per le ruote motociclistiche sono stati realizzati modelli ad elementi finiti, simulando l'ingranamento tra pignone e ruota condotta, per indagare i fenomeni di fatica alla base del dente, confrontando ruote in acciaio non trattato, cementato e rivestite; è stato inoltre valutato il comportamento a fatica di una ruota realizzata in lega di titanio (Ti6Al4V) rivestita, materiale che garantisce un significativo risparmio di massa rispetto all'acciaio.

Sulla ruota dentata di tipo automobilistico è stato possibile effettuare prove sperimentali sia di tipo statico che di fatica, e sono stati realizzati modelli Fem che simulassero le condizioni di prova in modo da poter confrontare i modelli numerici con i risultati sperimentali.

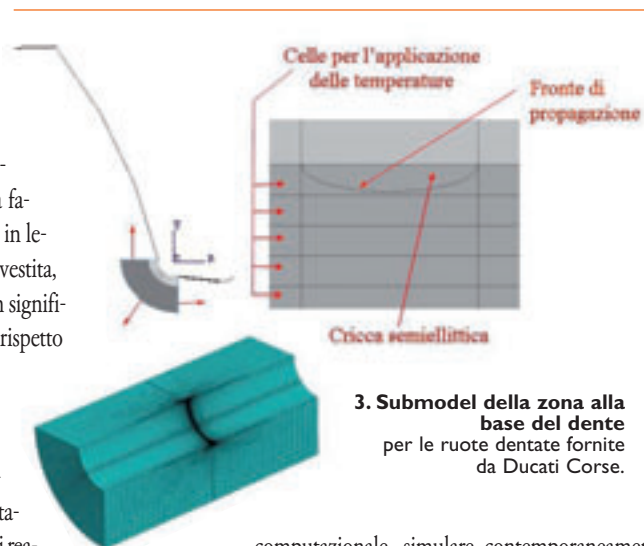
Il sistema di prova utilizzato prevede di forzare un cilindro (100Cr6 indurito superficialmente), di diametro pari a 8 mm e lunghezza pari a 20 mm, tra due denti successivi. In questo modo il contatto cilindro-denti si realizza nel punto di contatto singolo più esterno, che rappresenta la condizione più critica dal punto di vista del carico sul dente durante la trasmissione del moto tra una coppia di ingranaggi.

Modelli ad elementi finiti

Le simulazioni ad elementi finiti (Fem) sono state condotte con l'ausilio del software commerciale ABAQUS [6], con cui si possono modellare effica-

cemente condizioni critiche come il contatto tra i fianchi dei denti, la presenza del rivestimento sottile ceramico, la presenza di un difetto superficiale e le tensioni residue indotte dal trattamento Pvd. La geometria delle ruote dentate fornite da Ducati Corse, priva di simmetrie a causa della presenza di alleggerimenti, non ha consentito di effettuare semplificazioni. È stato quindi realizzato un modello tridimensionale completo delle ruote ingrananti con elementi di tipo solido (elementi di tipo C3D8 a funzione di forma lineare [6]).

In questa fase si pone particolare attenzione all'imposizione dei vincoli, dei carichi e dell'interazione di contatto tra i fianchi dei denti che ingranano. Essendo molto oneroso, dal punto di vista



3. Submodel della zona alla base del dente per le ruote dentate fornite da Ducati Corse.

computazionale, simulare contemporaneamente l'ingranamento tra le ruote dentate, la presenza di una cricca e le tensioni residue dovute al processo Pvd, si è scelto di suddividere il problema in due parti. Con un modello d'assieme (global model [6]) si sono simulate le forze che si scambiano le ruote dentate a livello macroscopico, senza considerare la presenza della cricca. La mesh è stata quindi infittita sui denti che entrano in contatto e il rivestimento è stato simulato in maniera semplificata con elementi di tipo shell a 5 punti di integrazione [6]. Successivamente è stato realizzato un modello più dettagliato (submodel [6]) della zona maggiormente sollecitata alla base del dente della ruota condotta, comprensivo di cricca, tensioni residue e rivestimento superficiale. A questo modello sono stati trasferiti gli spostamenti nodali risultanti dalle simulazioni sul modello globale.

Poiché la rottura per fatica avviene spesso a causa



4. Mesh del global model e del submodel per la ruota dentata automobilistica.

di difetti presenti sulla superficie, sono state simulate cricche superficiali di forma semiellittica (figura 3).

Per imporre le tensioni residue dovute al processo di deposizione superficiale, si è proceduto con una suddivisione del submodel in celle, di spessore pari a 5 µm ciascuna, a cui applicare un opportuno profilo di temperature in grado di generare il campo di tensioni residue voluto.

Per evitare che durante il ciclo di carico le due facce della cricca si potessero compenetrare, a causa dello stato di compressione indotto, è stato necessario imporre sulle facce stesse un vincolo di contatto (self contact).

Sono state condotte simulazioni per modelli di ruote dentate in acciaio e in titanio, con e senza rivestimento, con cricche di profondità rispettivamente pari a 5, 25, 50, 100, 200, 400 µm.

Per ogni cricca è stato realizzato un submodel in cui la mesh è stata controllata e curata nei minimi dettagli, trattandosi di zone estremamente limitate e con forte gradiente di sforzo.

Per tutti i modelli il comportamento del materiale, sia per il rivestimento che per il substrato, è stato considerato di tipo elastico lineare. Questo perché i modelli previsionali di tipo analitico che sono stati utilizzati si riferiscono alla propagazione di cricche in campo elastico.

Sulle ruote dentate automobilistiche è stata simulata l'azione del rullino che, per il carico verticale imposto, viene forzato tra due denti vicini. Data la maggiore semplicità della ruota dentata rispetto alle precedenti e la simmetria del problema, è possibile realizzare un modello 2D (elementi di tipo CPS4 a funzione di forma lineare [6]) di metà ruota, avendo cura di utilizzare opportuni vincoli di simmetria. Come in precedenza, il problema è sta-

to affrontato utilizzando due diversi modelli (figura 4), uno globale, con cui si simula il contatto rullino-ruota su scala macroscopica, e un submodel, che affina l'analisi nella zona di contatto e con cui è stato modellato accuratamente il rivestimento superficiale e la presenza delle tensioni residue. Attraverso il submodel è stato possibile ricavare con precisione i valori di sforzo e deformazione sia nel rivestimento che nel substrato nella zona di contatto.

Per simulare adeguatamente il comportamento meccanico reale dei materiali con cui sono stati realizzati i componenti studiati, sia l'acciaio della ruota dentata che quello del rullino sollecitante sono stati considerati a comportamento elasto-plastico, ricostruendo la curva sforzo deformazione da dati di letteratura; il materiale del rivestimento, invece, è stato considerato puramente elastico, vista la sua natura fragile.

Risultati

Per quanto riguarda le ruote dentate fornite da Ducati Corse, dal modello globale si è ricavata la pressione di contatto sul dente, che è risultata non simmetrica lungo la profondità a causa della diversa geometria dei denti di pignone e ruota condotta.

Dal submodel sono stati ricavati i valori di sforzo e deformazione all'apice della cricca (figura 5) e si è misurata l'apertura delle varie cricche, parametro che, attraverso opportuni modelli teorici, ha consentito di stabilire se una certa cricca può avanzare, la sua velocità di avanzamento e il numero di cicli di carico per cui la profondità della cricca stessa risulta critica per la resistenza del componente (propagazione instabile del difetto).

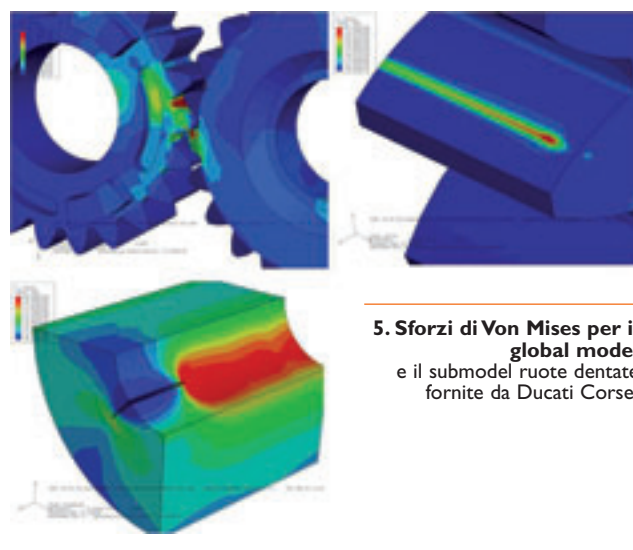
Le simulazioni condotte hanno mostrato che l'applicazione del rivestimento e delle tensioni residue influenzano molto lo stato di sforzo all'apice della cricca; infatti, lo stato di compressione sulla superficie del pezzo e negli strati immediatamente sottostanti, indotto dal processo di deposizione, tende a chiudere la cricca, in contrapposizione alla flessione generata dal carico sul dente, che invece tende ad aprirla.

Per valutare la criticità del difetto, è necessario determinare il fattore di intensificazione degli sforzi (K_I) e confrontarlo con un valore teorico di soglia che indichi il limite oltre il quale si ha propagazione instabile del difetto.

Il calcolo analitico di K_I è stato condotto utilizzando il metodo "c-open" [4], che prevede di calcolare il fattore di intensificazione degli sforzi basandosi sul semi-spostamento relativo tra due lembi della cricca.

Per stabilire se la cricca avanza è necessario confrontare i K_I così determinati con un valore di soglia valutato tramite i modelli teorici di Murakami Endo [3], di El-Haddad [7,8] o della meccanica della frattura lineare elastica.

Nei modelli in cui si hanno cricche che propagano, è possibile stimarne la velocità di propagazione ed il numero di cicli associato a questa attraverso



5. Sforzi di Von Mises per il global model e il submodel ruote dentate fornite da Ducati Corse.

so le formule di Kato, Deng, Inoue e Takatsu [9]. Dalle simulazioni è risultato che, per i modelli con substrato non cementato, l'introduzione del rivestimento, con le relative tensioni residue, porta un notevole beneficio poiché lo stato di compressione causato da queste ultime impedisce l'apertura delle cricche, quindi la propagazione delle stesse, fino a lunghezze pari a 100 µm per le ruote in acciaio e 200 µm per le ruote in titanio.

Nel modello senza rivestimento si è, invece, osservata la propagazione già a partire da difetti profondi di 25 µm.

Per quanto riguarda i modelli con substrato cementato, non si è avuta propagazione dei difetti per le cricche prese in considerazione già nel modello senza rivestimento. Pertanto, l'applicazione del ri-

lunghezza cricca (µm)	acciaio non cementato	acciaio cementato	acciaio rivestito	Titanio rivestito
5	Non propaga	Non propaga	Non propaga	Non propaga
25	propaga	Non propaga	Non propaga	Non propaga
50	propaga	Non propaga	Non propaga	Non propaga
100	propaga	Non propaga	propaga	Non propaga
200	propaga	Non propaga	propaga	propaga
400	propaga	Non propaga	propaga	propaga
Numero cicli da 200 a 400	100000	/	100000	140000

Tabella 1.
Confronto tra i casi simulati.

vestimento non è sembrata necessaria (tabella 1). Si è però notato come, con l'introduzione del rivestimento per cricche superiori a 100 µm, la differenza tra il valore del fattore di intensificazione degli sforzi effettivo e quello di soglia è risultata superiore alla differenza tra gli analoghi parametri ricavati nel modello senza rivestimento. Quest'ultimo aspetto ha indotto a ritenere che ruote dentate rivestite possano comunque sopportare condizioni di carico superiori, mantenendo un ottimo comportamento a fatica.

Per quanto riguarda le simulazioni sulle ruote di tipo automobilistico, l'obiettivo delle analisi è quello di valutare in maniera accurata il comportamento della zona di contatto nel caso in cui sia applicato il rivestimento ceramico. Con modelli numerici è stato possibile determinare lo stato tenso-deformativo nel rivestimento e nel substrato (figura 6). Una volta determinato il carico limite che porta a rottura il rivestimento, imponendo carichi via via

inferiori, è stato possibile ricavare i valori di deformazione che, attraverso un opportuno modello teorico, permettano di determinare il numero di cicli per cui avviene l'innescio di una cricca di fatica da contatto. Per la determinazione del numero di ci-

Prove sperimentali

Le prove sperimentali sulla ruota automobilistica sono state condotte sulla macchina di prova assiale modello VT250 dell'azienda BRT (figura 7) utilizzando un'attrezzatura di sostegno della ruota dentata e un codolo per l'applicazione del carico realizzati per lo scopo.

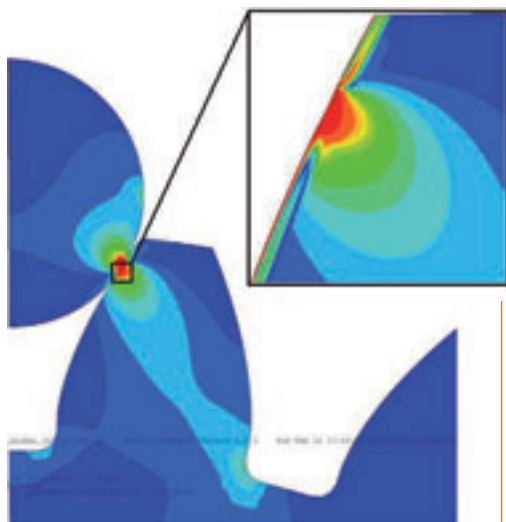
La macchina di prova in questione è di tipo assiale per prove di trazione e compressione, sia statiche che dinamiche, con cella di carico KBM U10M a trasduttore magnetoresistivo; il carico massimo applicabile è pari a 250 kN in fase statica e 125 kN in fase dinamica, la frequenza massima è pari a 40 Hz.

Con queste prove si vuole determinare il limite di fatica del rivestimento, sollecitando le ruote con un

7. Macchina di prova BRT VT250 e attrezzatura di sostegno della ruota dentata.



6. Sforzi di VM global model e submodel ruote dentate automobilistiche.



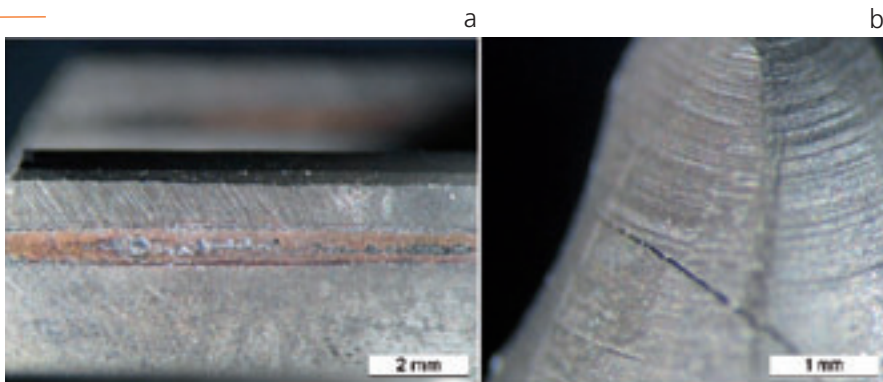
cli che portano all'innescio di una cricca nella zona di contatto, il modello teorico utilizzato si basa sulle relazioni di Coffin-Manson, Morrow e Smith-Watson-Topper [10], che consentono di legare la deformazione dovuta al carico sul dente al numero di cicli necessario all'innescio di una cricca. Dai modelli numerici è stato possibile ricavare i valori di deformazione massima per i carichi applicati da inserire nei modelli teorici. Le simulazioni sono state condotte per carichi applicati rispettivamente di 15 kN, 10 kN e 5 kN su ruota dentata rivestita. Simulazioni successive a carichi più bassi saranno realizzate per determinare il carico limite che porta a rottura il rivestimento.

ciclo di compressione sinusoidale pulsante dallo zero, mantenendo costante il numero di cicli variando il carico massimo applicato e a carico massimo costante variando il numero cicli. In questo modo è possibile costruire un diagramma che legghi il numero di cicli e il carico che portano a rottura il rivestimento.

Nelle prossime prove si vuole confrontare il comportamento della ruota rivestita con quello della ruota non rivestita per verificare se il rivestimento superficiale apporti effettivi benefici dal punto di vista della fatica da contatto.

Finora sono state effettuate prove sulla ruota rivestita a carichi decrescenti pari rispettivamente a 15 kN, 10 kN e 5 kN per un numero di cicli pari a 50000.

Come ci si poteva attendere, visti i risultati delle si-



8. Condizioni del dente
dopo la prova a 10 kN (a) e a 70 kN (b).

mulazioni numeriche, per tutti i carichi provati si è verificato un danneggiamento del rivestimento sui denti sollecitati. Si è quindi avuta una prima corrispondenza tra modello numerico ed evidenze sperimentali; tuttavia sono necessarie ulteriori prove per confermare l'accuratezza dei modelli numerici approntati. In particolare sono in programma prove con carico imposto inferiore a quelli provati (2.5 kN, 1.25 kN e 0.625 kN) per determinare il carico limite che porta a rottura il rivestimento superficiale. Una volta determinato tale carico limite si effettueranno ulteriori prove a carichi più bassi di questo e variando il numero di cicli.

Un'ulteriore possibile valutazione riguarda l'entità del danneggiamento che si verifica sul fianco del dente per condizioni di sollecitazione che superano il limite di resistenza del rivestimento; un'indicazione di tale parametro può essere determinata misurando l'area dell'impronta lasciata dal rullino sul rivestimento.

Per le prove effettuate si è notato che, come prevedibile, aumentando il carico massimo da 5 kN a 10 kN si ha un aumento dell'area frontale delle impronte lasciate sul dente (figura 8).

Sono state infine eseguite due prove statiche applicando un carico massimo pari a 70 kN. Dopo entrambe le prove si è notata la formazione di una cricca passante che si innesca sottopelle in corrispondenza della zona in cui è massima la pressione di contatto (figura 8).

Questo risultato è particolarmente interessante, poiché la rottura del dente non avviene alla base dello stesso come ci si poteva attendere.

Conclusioni

L'attività di ricerca finora condotta ha portato alla realizzazione di modelli numerici complessi attraverso cui è stata valutata sia la fatica alla base del

dente sia la fatica da contatto per ruote dentate rivestite.

Nel primo caso i modelli numerici hanno evidenziato come l'applicazione del rivestimento superficiale porti ad effettivi benefici dal punto di vista della propagazione dei difetti, aprendo la strada alla possibilità di utilizzo di materiali diversi rispetto agli acciai tipicamente usati. Le simulazioni condotte su ruote dentate in lega di titanio rivestite hanno dato buoni risultati, facendo ben sperare per l'utilizzo di questa e di altre leghe leggere, visto il vantaggio in termini di leggerezza che ne deriva.

Inoltre vi è l'intenzione di realizzare una campagna di prove sperimentali, in cui verranno simulate le condizioni di ingranamento tra pignone e ruota condotta al fine di validare i modelli numerici realizzati.

Per quando riguarda la fatica da contatto, l'approccio è stato quello di approntare una campagna di prove sperimentali e realizzare modelli numerici che ne riproducessero le condizioni in modo da verificare l'applicabilità del modello previsionale scelto.

I risultati ottenuti non possono ancora dirsi sufficienti per realizzare un confronto tra i risultati teorico-numerici e sperimentali. Per questa ragione il lavoro di ricerca proseguirà con ulteriori prove sperimentali e modelli numerici con lo scopo di determinare le condizioni limite di utilizzo delle ruote rivestite, operare un confronto tra ruote rivestite e non rivestite e validare i modelli numerici.

Una volta confermata l'accuratezza dei modelli Fem sarà inoltre possibile studiare l'influenza di ulteriori parametri come lo spessore del rivestimento, il modulo di elasticità e le caratteristiche del substrato.

Ringraziamenti

Si ringraziano l'ing. G. Vignaroli, CAE manager, Du-

cati Corse Srl Bologna, per aver fornito i disegni delle ruote dentate, e la BRT Srl (www.brt-srl.it) di Casei Gerola (PV) per aver messo a disposizione la macchina di prova su cui sono state condotte le prove sperimentali.

S. Baragetti, S. Cavalleri, A. Mannori, Dipartimento di Progettazione e Tecnologie, Università degli Studi di Bergamo.

A. Terranova, Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano.

Bibliografia

- [1] AA VV, *Manuale di trattamenti e finiture, Tecniche Nuove* (2003), Milano.
- [2] Su, Y. L., Yao, S. H., Wei, C. S., Wu, C. T., Kao, W. H., *Evaluation on wear, tension and fatigue behaviour of various PVD coated materials, Materials Letters*, 35 (1998), 255-260.
- [3] Murakami, Y., Endo, M., *Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength, International Journal of Fatigue*, Vol. 16, 1994, pp. 519-533
- [4] Baragetti, S., La Vecchia, G. M., Terranova, A., *Fatigue behaviour and FEM modelling of thin-coated components, Int. J. of Fatigue*, 25 (2003), 1229-1238.
- [5] Gelfi, M., La Vecchia, G.M., Lecis, N., Troglio, S., *Relationship between through thickness residual stress of CrNPVD coatings and fatigue nucleation sites, Surface and Coating Technology*, 192 (2005), 263-268.
- [6] ABAQUS Online Documentation: Version 6.6-1, ABAQUS, Inc., 2006
- [7] Miller, K.J., *The short crack problem, Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 5(3), 1982, pp. 223-232.
- [8] El-Haddad, M.H., Smith, K.N., Topper, T.H., *Fatigue crack propagation of short cracks, ASME J. Engng. Mater. Technol.*, Vol. 101, 1979, pp.42-46.
- [9] Kato, M., Deng, G., Inoue, K., Takatsu, N., *Evaluation of the strength of carburized spur gears teeth based on fracture mechanics, JSME International Journal, Series C. Vol. 36. No. 2. 1993.*
- [10] Šraml, M., Flašker, J., *Computational approach to contact fatigue damage initiation analysis of gear teeth flanks, Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2007) 31:1066-1075.
- [11] Stewart, S., Ahmed, R., *Rolling contact fatigue of surface coatings - A review, Wear*, 235 (2002), 1132-1144.