

**O PRAĆENJU INICIJALNIH OŠTEĆENJA DISKOVA
TURBOMLAZNIH MOTORA I MOGUĆNOSTIMA
ODLAGANJA NJIHOVE POJAVE**

**ON TRACKING OF INITIAL DAMAGES OF TURBOJET ENGINE
DISKS AND POSIBILITIES OF PROLONGATION OF THEIR
APPEARANCE**

Dr Strain Posavljak
Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet
Banja Luka

REZIME

U ovom radu je, kao kritična komponenta, posmatran disk prvog stepena rotora kompresora niskog pritiska jednog turbomlaznog motora. Zbog prijevremenih inicijalnih oštećenja (inicijalnih naprslina) ovog diska i posljedičnih intervencija, troškovi održavanja motora su uvećani. Vjerovatnoća pojave inicijalnih naprslina na dva tipa posmatranog diska, u radu je opisana Weibull-ovim izrazima koji su iskorišćeni za određivanje vremenskih intervala ultrazvučne kontrole. U radu je još na osnovu rezultata proračuna oštećenja za jedan motorski start-stop ciklus, pokazano kako bi se i za koliko pojava inicijalnih oštećenja diskova mogla odložiti i zamjena diskova u radnom vijeku motora eliminisati.

Ključne riječi: diskovi turbomlaznih motora, inicijalno oštećenje, proračun oštećenja

ABSTRACT

The first stage low pressure compressor rotor disk of one turbojet engine, as critical component, observed in this paper. Because of premature initial damages (initial cracks) of this disk and resultant interventions, engine maintenance costs are increased. Probability of appearance of initial cracks on two types of observed disk, in the paper described by Weibull's expressions that have used for determining of time intervals of ultrasonic inspection. On the base of results of damages computation for one engine start-stop cycle, in the paper is showed how and for how much appearance of initial damages of disks could prolong and disks substitution in the engine working life, eliminate.

Key words: turbojet engine disks, initial damage, damage computation

1. UVOD

Pod inicijalnim oštećenjem diskova turbomlaznih motora podrazumjevamo inicijalnu naprslinu do približne dužine 0.8 mm, a koja bi se na konkretnom disku posle određenog broja časova leta pojavila sa vjerovatnoćom $P(t)=0.001$ (na jednom od 1000 diskova) [1]. Ovako definisano inicijalno oštećenje uglavnom je posljedica malociklusnog zamora (MCZ) izazvanog centrifugalnim silama lopatica i sopstvenim centrifugalnim silama, sa ili bez uticaja temperature. U praksi se na osnovu proračuna i eksperimentalnih ispitivanja, radni vijek ili bolje rečeno malociklusni zamorni vijek (MCZV) diskova turbomlaznih motora, propisuje.

Ako se inicijalno oštećenje na nekom od diskova na vrijeme otkrije, najjednostavnije je izvršiti zamjenu oštećenog diska neoštećenim. Ovim se na duže povećavaju troškovi održavanja motora. U suprotnom se na osnovu pozitivnih analiza može pokrenuti projekat osvajanja potpuno novog diska kod kojeg bi se pojava inicijalnih oštećenja odložila. Kao predstavnik diskova turbomlaznih motora ovdje je izabran i posmatran disk prvog stepena rotora kompresora niskog pritiska (RKNP) motora R25-300.

2. DISK PRVOG STEPENA ROTORA KOMPRESORA NISKOGR PRITISKA TURBOMLAZNOG MOTORA R25-300

2.1. Praćenje inicijalnih oštećenja

Postojeći disk prvog stepena RKNP turbomlaznog motora R25-300 dobijen je rekonstrukcijom diska prethodnika koji je zbog prijevremenih inicijalnih oštećenja (prijevremenih inicijalnih naprslina) u oblasti veze sa lopaticama, bio povučen iz eksploatacije. Rekonstrukcija se sastojala u povećanju zadnjeg dijela oboda i stim u vezi promjenjen je oblik čivija i način fiksiranja lopatica. Očekivalo se da će se sa postojećim diskom dostići propisani radni vijek od 1200 časova leta [2]. Međutim, to se nije dogodilo. Prijevremene inicijalne naprsline u oblasti veze sa lopaticama pojavljivale su se i na postojećem disku. Znajući za ovaj problem, proizvođač motora R25-300 je predložio da se svi postojeći diskovi prvog stepena RKNP i preostali diskovi prethodnici, metodom ultrazvuka kontrolišu poslije svakih 25 ± 5 časova leta. Na osnovu prihvaćenog prijedloga prikupljeno dovoljno podataka o ultrazvučno otkrivenim naprslinama (prslinama, pukotinama). Ti podaci su statistički obradeni. Kao završni rezultat obrade, dobijeni su Weibull-ovi izrazi [3]

$$P_1(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{356}\right)^{3.6172}} \dots (1)$$

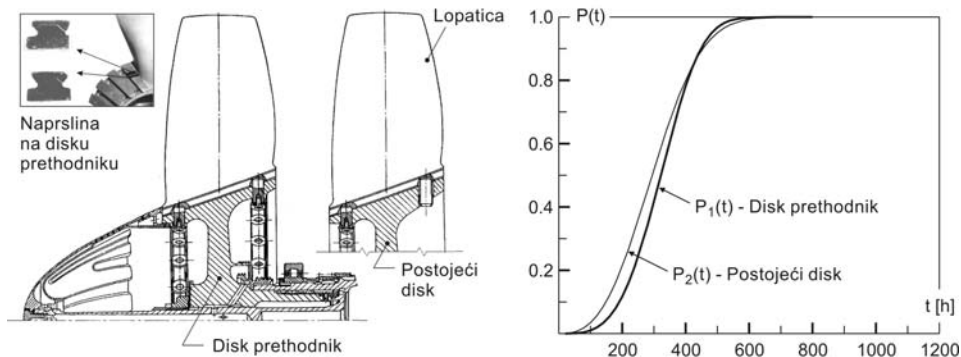
$$P_2(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{336}\right)^{2.764}}$$

gdje su: $P_1(t)$ – vjerovatnoća pojave inicijalnih naprslina na disku prethodniku (obrađen uzorak od 83 diska), $P_2(t)$ – vjerovatnoća pojave inicijalnih naprslina na postojećem disku (obrađen uzorak od 79 diskova) i t – vrijeme izraženo u časovima leta.

Karakteristične vjerovatnoće pojave inicijalnih naprslina na disku prethodniku i na postojećem disku su vjerovatnoće $P_1(t)=0.001$ i $P_2(t)=0.001$. Sa ovim vjerovatnoćama, na disku prethodniku može se očekivati pojava inicijalne naprsline posle 52.7 časova leta, a na postojećem disku posle 27.6 časova leta.

Postojeći diskovi i diskovi prethodnici se iz bezbjednosnih razloga i dalje podvrgavaju ultrazvučnoj kontroli poslije svakih 25 ± 5 časova leta. Ovaj vremenski interval, korišćen i pri prikupljanju podataka o pojavi inicijalnih naprslina, praktično je na osnovu vjerovatnoće $P_2(t) = 0.001$, potvrđen. Kod preostalih diskova prethodnika ne mora se koristiti ovaj interval. Na osnovu vjerovatnoće $P_1(t) = 0.001$, za vremenski interval njihove kontrole može uzeti interval od 50 ± 5 časova leta.

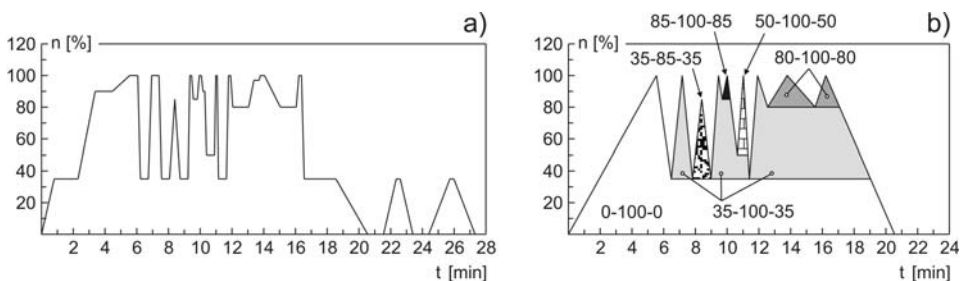
Razlika u konstrukciji postojećeg diska i diska prethodnika sa ilustracijom vjerovatnoća pojave inicijalnih naprslina na njima i sa primjerom naprsline otkrivene na jednom disku prethodniku, prikazana je na slici 1.



Slika 1. Prikaz razlike u konstrukciji postojećeg diska i diska prethodnika sa ilustracijom vjerovatnoća pojave inicijalnih naprslina na njima i sa primjerom naprsline otkrivene na jednom disku prethodniku

2.2. Mogućnost odlaganja pojave inicijalnih oštećenja

Jedini način da se pojava inicijalnih oštećenja (inicijalnih naprslina) na disku prvog stepena RKNP motora R25-300 odloži, tj. da se disku radni vijek poveća, je da se pokrene projekat osvajanja trećeg diska (diska naslednika). To je svojevremeno i učinjeno, ali je projekat prekinut u trenutku kad je umjesto originalnog materijala, čelika 13H11N2V2MF, za izradu probne partije otkovaka diska naslednika izabrana niklova legura Inconel 718. Ovdje je sa određene vremenske distance postavljeno pitanje, da li bi se i za koliko, pojava inicijalnih oštećenja sa diskom naslednikom, proizvedenim od navedene niklove legure, mogla odložiti. U traganju za odgovorom poslužila su saznanja i metodologija iz [3]. Pošlo se od pretpostavke da su centrifugalne sile lopatica i sopstvene centrifugalne sile glavna opterećenja (uticaj svih ostalih opterećenja uključujući i temperaturu je zanemaren). Još se pretpostavilo da su prijevremene inicijalne naprsline na predmetnom disku, posledica MCZ kojem se analiza zasniva na cikličnim karakteristikama materijala koji se koriste za izradu diskova turbomlaznih motora. Za parametar na osnovu kojeg je donosen zaključak o mogućnosti odlaganja pojave inicijalnih oštećenja na izabranom disku, uzeto je oštećenje D (damage) postojećeg diska i diska naslednika izazvano start-stop ciklusom provjere motora R25-300 nakon ugradnje u avion. Ovaj start-stop ciklus, definisan kao blok učestanosti obrtanja n RKNP je u svrhu proračuna oštećenja, metodom rezervoara dekomponovan na proste X-Y-X cikluse učestanosti obrtanja (slika 2).



Slika 2. Start-stop ciklus provjere motora R25-300 nakon ugradnje u avion, definisan kao blok učestanosti obrtanja (a) i isti start-stop ciklus dekomponovan na proste cikluse učestanosti obrtanja (b)

Proste X-Y-X cikluse učestanosti obrtanja, sortirane prema nivou (i) i broju pojavljivanja N_i unutar zadatog start-stop ciklusa, sadrži tabela 1.

Tabela 1. Prosti X-Y-X ciklusi sortirani po nivou /i/ i broju pojavljivanja N_i unutar motorskog start-stop ciklusa

i	X_i - Y_i - X_i	N_i
1	0-100-0	1
2	35-100-35	3
3	50-100-50	1
4	80-100-80	2
5	85-100-85	1
6	35-85-35	1

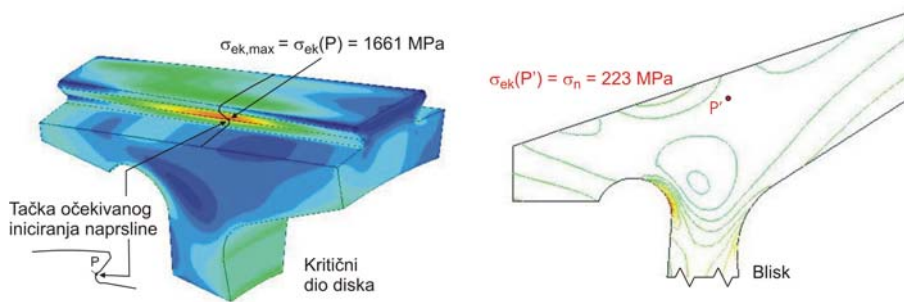
Ciklične karakteristike čelika 13H11N2V2MF u isporučenom stanju, od kojeg se proizvode postojeći diskovi RKNP motora R25-300, i pretpostavljene ciklične karakteristike niklove legure Incinel 718, od koje su proizvedeni otkovci diska nasljednika, uključene su u tabelu 2.

Tabela 2. Ciklične karakteristike čelika 13H11N2V2MF u isporučenom stanju i pretpostavljene ciklične karakteristike niklove legure Inconel 718

Karakteristika	Vrijednost	
	13H11N2V2MF [3]	Inconel 718 [4]
Modul elastičnosti, E [MPa]	206682	208500
Koeficijent ciklične čvrstoće, K' [MPa]	1103	1530
Eksponent cikličnog deformacionog ojačavanja, n'	0.118	0.07
Koeficijent zamorne čvrstoće, σ'_f [MPa]	1818.8	1640
Eksponent zamorne čvrstoće, b	-0.144	-0.06
Koeficijent zamorne duktilnosti, ϵ'_f	0.5351	2.67
Eksponent zamorne duktilnosti, c	-0.6619	-0.82

Da bi proračunali oštećenje postojećeg diska prvog stepena RKNP motora R25-300, izazvano start-stop ciklusom prikazanim na slici 2, bilo je potrebno odrediti njegov naponsko-deformacioni odziv u tački očekivanog iniciranja naprsline. Zbog ovoga su lopatica i kritični dio diska najprije posmatrani kao odvojena idealno elastične tijela. Linearni naponski odziv lopatice i čvrne reakcije na kontaktnim površinama njenog korena, za maksimalnu učestanosti obrtanja $n=186 \text{ s}^{-1}$, dobijeni su primjenom metoda konačnih elemenata (MKE). Za dobijanje naponskog odziva kritičnog dijela diska, primjenom MKE, pri istoj učestanosti obrtanja, pomenute reakcije su u transformisanom obliku korišćene kao aktivne čvrne sile. Osnosimetrični naponski odziv postojećeg diska, kad je isti posmatran kao blisk (**bladed disk**, disk sa integrisanim lopaticama), takođe je dobijen primjenom MKE (slika 3). Maksimalni Mises-ov ekvivalentni napon $\sigma_{ek,max}$, u tački očekivanog iniciranja naprsline P (kritičnoj tački) postojećeg diska, kao i pripadajuća deformacija, su nerealni. Ekvivalentni napon u tački P' bliska, koja odgovara kritičnoj tački P postojećeg diska, uzet kao nominalni napon, poslužio je za sračunavanje tzv. ekvivalentnog faktora koncentracije napona K_{ek} ($K_{ek}=7.45$) pomoću prostog izraza

$$K_{ek} = \frac{\sigma_{ek}(P)}{\sigma_n} \quad \dots (2)$$



Slika 3. Linearni naponski odziv kritičnog dijela postojećeg diska (lijevo) sa osnosimetričnim linearnim naponskim odzivom kad je isti posmatran kao blisk (desno)

Realni naponsko-deformacioni odziv u kritičnoj tački postojećeg diska (uzeta u obzir memorija metala) definisan je stabilizovanim histerezama pridruženim svim prostim ciklusima učestanosti obrtanja unutar motorskog start-stop ciklusa. Prva tačka realnog naponsko-deformacionog odziva za $i=1$ i za maksimalnu učestanosti obrtanja ($n = 100 \%$), dobijena je rješavanjem sistema jednačina

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{K_{ek}^2 \sigma_{ni}^2}{\sigma E} + \frac{K_{ek} \sigma_{ni}}{E} \right) \quad i=1, \dots, 6. \quad \dots (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'} \right)^{1/n'}$$

Dimenzije stabilizovanih histereza ($\Delta \varepsilon \times \Delta \sigma$), za $i=1,2, \dots, 6$, određene su rješavanjem sljedećeg sistema

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{K_{ek}^2 \Delta \sigma_{ni}^2}{\Delta \sigma E} + \frac{K_{ek} \Delta \sigma_{ni}}{E} \right) \quad i=1, \dots, 6. \quad \dots (4)$$

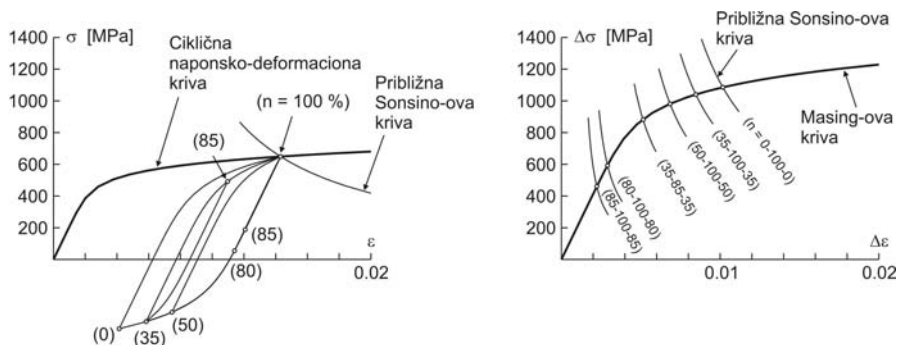
$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'}$$

Sistemi jednačina (3) i (4) riješeni su grafički na način opisan u [3]. Prvim jednačinama u tim sistemima definisana su dva oblika približne Sinsino-ove krive. Druga jednačina u sistemu (3) je jednačina ciklične naponsko-deformacione krive, a druga jednačina u sistemu (4) je jednačina Masing-ove krive. Osim što je poslužila za određivanje dimenzija stabilizovanih histereza, Masing-ova kriva je poslužila i za njihovo modeliranje. Vrijednosti nominalnih napona σ_{ni} , kao i vrijednosti raspona ovih napona $\Delta \sigma_{ni}$ za i -te X_i - Y_i - X_i cikluse učestanosti obrtanja, korišćene pri rješavanju sistema jednačina (3) i (4), sračunate su pomoću izraza

$$\sigma_{ni} = 223 \left(\frac{Y_i}{100} \right)^2$$

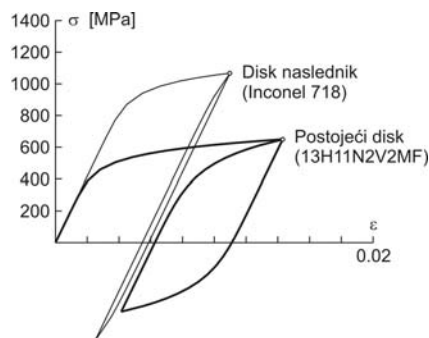
$$\Delta \sigma_{ni} = 223 \left[\left(\frac{Y_i}{100} \right)^2 - \left(\frac{X_i}{100} \right)^2 \right] \quad i=1, \dots, 6 \quad \dots (5)$$

Potrebne ciklične karakteristike u sistemima jednačina (3) i (4), sa već poznatim ekvivalentnim faktorom koncentracije napona $K_{ek} = 7.45$, uzete su iz tabele 2. Grafičko rješenje sistema jednačina (3) i (4) prikazano je na slici 4.



Slika 4. Grafičko rješenje sistema jednačina (3) i (4)

Realni naponsko-deformacioni odziv u kritičnoj tački diska nasljednika određen je slično kao i naponsko-deformacioni odziv u kritičnoj tački postojećeg diska. Prihvaćeno je da su Poasonovi koeficijenti niklove legure Inconel 718 i čelika 13H11N2V2MF približno isti ($\nu=0.29$). Ekvivalentni faktor koncentracije napona $K_{ek}=7.45$ je zbog istog oblika oba diska ostao isti. Nominalni napon u iznosu od 223 MPa, koji je prema (2) iskorišćen za sračunavanje ekvivalentnog faktora koncentracije napona kod postojećeg diska, ovdje je pomnožen odnosom specifične mase niklove legure Inconel 718 (8200 kg/m^3) i specifične mase čelika 13H11N2V2MF (7820 kg/m^3). Tako se dobila vrijednost nominalnog napona kod diska nasljednika u iznosu od 233.8 MPa. Potrebne ciklične karakteristike niklove legure Inconel 718 u sistemima (3) i (4) takođe su uzete iz tabele 2. U izrazima (5) je činilac 223 zamenjen sa činiocem 233.8. Naponsko-deformacioni odziv u kritičnoj tački postojećeg diska i diska nasljednika, za 0-100-0 ciklus učestanosti obrtanja, prikazan je na slici 5.



Slika 5. Naponsko-deformacioni odziv u kritičnoj tački postojećeg diska i diska nasljednika, za 0-100-0 ciklus učestanosti obrtanja

Komplet numeričkih podataka o naponsko-deformacionom odzivu u kritičnoj tački postojećeg diska i diska nasljednika, za sve i-te X_i - Y_i - X_i cikluse učestanosti obrtanja, sadrži tabela 3.

Tabela 3. Numerički rezultati naponsko-deformacionog odziva u kritičnoj tački postojećeg diska i diska nasljednika, za sve i -te X_i - Y_i - X_i cikluse učestanosti obrtanja

i	X_i - Y_i - X_i	Postojeći disk			Disk nasljednik		
		σ_{mi} [MPa]	$\Delta\sigma_i/2$ [MPa]	$\Delta\varepsilon_i/2$	σ_{mi} [MPa]	$\Delta\sigma_i/2$ [MPa]	$\Delta\varepsilon_i/2$
1	0-100-0	106.149	542.84	0.00508466	244.343	813.92	0.00402507
2	35-100-35	128.664	520.32	0.00423427	332.555	725.71	0.00350418
3	50-100-50	158.157	490.83	0.00342179	435.443	622.82	0.00298981
4	80-100-80	351.909	297.08	0.00145221	759.147	299.12	0.00143461
5	85-100-85	418.642	230.34	0.00111619	827.686	230.58	0.00110588
6	35-85-35	50.092	454.84	0.00274980	133.529	526.68	0.00252630

Oštećenje D u kritičnoj tački postojećeg diska prvog stepena RKNP motora R25-300, izazvano start-stop ciklusom provjere tog motora nakon ugradnje u avion, ovdje je sračnato pomoću Palmgren-Miner-ovog pravila linearne akumulacije oštećenja [3,5], matematski predstavljenog izrazom

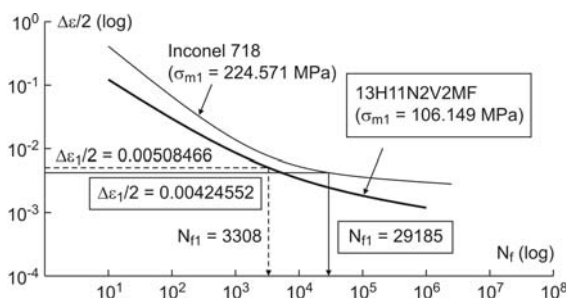
$$D = \sum_{i=1}^6 D_i = \sum_{i=1}^6 \frac{N_i}{N_{fi}} \quad \dots (6)$$

U gornjem izrazu su sa D_i označena elementarna oštećenja izazvana prostim X_i - Y_i - X_i ciklusima učestanosti obrtanja. Ova oštećenja predstavljaju odnos broja pojavljivanja N_i i -tih prostih ciklusa u start-stop ciklusu i broja N_{fi} istih prostih ciklusa koje materijal diska može izdržati do pojave inicijalne naprsline. Brojevi N_i su sadržani u tabeli 1, a brojevi N_{fi} su određeni rješavanjem sistema jednačina

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_{mi}}{E} N_f^b + \varepsilon'_f N_f^c \quad i=1, \dots, 6. \quad \dots (7)$$

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_i}{2}$$

u kojem prva jednačina predstavlja jednačinu Morrow-ove krive MCZ u kojoj su sa σ_{mi} označeni srednji naponi. Ovaj sistem je slično kao i sistemi (3) i (4), riješen grafički. I Morrow-ove krive MCZ preslikane su u odgovarajuće B-spline krive. Vrijednosti $\Delta\varepsilon_i/2$ u drugoj jednačini sistema (7) uzete su iz table 3. Grafičko rješenje sistema (7) za 0-100-0 ($i=1$) ciklus učestanosti obrtanja je na slici 6. Skup podataka o N_i , N_{fi} , D_i i D je u tabeli 4.



Slika 6. Grafičko rješenje sistema jednačina (7) za 0-100-0 ($i=1$) ciklus učestanosti obrtanja

Tabela 4. Skup podataka o N_i , N_{fi} , D_i i D

i	$X_i - Y_i - X_i$	N_i	Postojeći disk		Disk naslednik	
			N_{fi}	D_i	N_{fi}	D_i
1	0-100-0	1	3308	0.00030230	37949	0.00002635
2	35-100-35	3	5226	0.00057405	68505	0.00004379
3	50-100-50	1	9278	0.00010778	144124	0.00000694
4	80-100-80	2	162040	0.00001234	66507863	0.00000003
5	85-100-85	1	495345	0.00000202	1305326034	0.00000000
6	35-85-35	1	28078	0.00003562	40791906	0.00000002
D			0.00103411		0.00007714	

Lako je utvrditi da je proračunom dobijeno oštećenje D , postojećeg diska prvog stepena RKNP motora R25-300, izazvano start-stop ciklusom provjere motora nakon ugradnje u avion, 13.4 puta veće od oštećenja diska naslednika. Ovo govori da bi MCZV (malociklusni zamorni vijek ili vijek do pojave inicijalne naprsline), za isto toliko puta bio veći kod diska naslednika ako bi se npr. i jedan i drugi disk podvrgli ispitivanju blokovima učestanosti obrtanja kojima je definisan start-stop ciklus na slici 2. Time je dokazano da bi se pojava inicijalnih oštećenja (inicijalnih naprslina) na disku prvog stepena RKNP motora R25-300, sa diskom naslednikom proizvedenim od niklove legure Inconel 718, pretpostavljenih cikličnih karakteristika datih u tabeli 2, mogla itekako odložiti.

3. ZAKLJUČAK

Na osnovu svega što je naprijed izloženo može se zaključiti da se odlaganje pojave inicijalnih oštećenja na konkretnim diskovima turbomlaznih motora može izvršiti zamjenom istih novim diskovima za čiju će se izradu koristiti legure boljih cikličnih karakteristika. Međutim, može se razmišljati da se samo promjenom režima termičke obrade dođe do novog diska. U tu svrhu treba za razne režime termičke obrade provesti ispitivanje otpornosti izabranog materijala na malociklusni zamor i otkriti režim koji daje najbolje ciklične karakteristike. U nekim slučajevima je dovoljno da se samo na kritičnim mjestima promjenom oblika, ublaži koncentracija napona i koncentracija deformacija i time odloži pojava inicijalnih oštećenja. Moguće je i da se odlaganje pojave inicijalnih oštećenja ostvari samo promjenom oblika diska ili promjenom oblika i promjenom cikličnih karakteristika izabranog materijala. Bilo kako bilo, svako odlaganje pojave inicijalnih oštećenja umanjuje troškove održavanja turbomlaznih motora.

4. LITERATURA

- [1] Sattar S. A., Sundt C. V.: Gas Turbine Engine Disk Cyclic Life Prediction, Journal of Aircraft, 1975, Vol. 12, No. 4, pp 360-365,
- [2] Krčedinac D.: Dinamička izdržljivost na niskociklični zamor i procena veka rada obrtnih delova TMM, Specijalistički rad, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 1993.,
- [3] Posavljak S.: Istraživanje zamornog veka rotacionih diskova avionskih motora, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd 2008.,
- [4] Atzory B., Meneghetti G., Susmel L.: On the Use of the Modified Manson-Coffin Curves to Predict Fatigue Lifetime in the Low-Cycle Fatigue Regime, (www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/gigf/gogf2005/paper/viewFile/641/498),
- [5] Fatemy A., Yang L.: Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories: A Survey of the State of the Art for Homogeneous Materials, International Journal of Fatigue, Vol. 20, No. 1, pp 9-34, January 1998.