

LÉPCSŐSEN NÖVELT AMPLITÚDÓ ÉRTÉKŰ TERHELÉSNEK KITETT PRÓBATESTEK VÁRHATÓ ÉLETTARTAM BECSLÉSE

BERKE Péter

Budapesti Műszaki Egyetem, Közlekedésmérnöki Kar
Gépipari Technológia Tanszék

Lépcsősen növelt amplitúdó értékű fárasztó igénybevétel esetén a valamely terhelésszinten kialakult fáradtan repedt felület bizonyos esetekben át tud alakulni egy növelt értékű terhelésre jellemző alakú és nagyságú felületté, amely felület már erre a terhelésre jellemző sebességgel növekedik tovább.

A fáradtan repedt felületek egymásba átalakulása és a terhelésszintekhez tartozó repedésnövekedési függvény ismeretében az igénybevételi számok számolhatók.

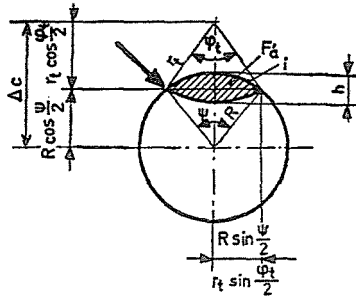
A repedésterjedés közelítő modellje

Forgó-hajtógató fárasztó vizsgálatoknál a fáradtan átrepedt, illetve tört felület (F_a , illetve F_i) olyan körrel jellemezhető, amelynek sugara és középpontja változik a ciklusszámmal, és a repedt keresztmetszet körsugara (r_i) görbülete előjelet is vált. Ez azt jelenti, hogy a repedt felület középpontja a repedés előrehaladtával az eredeti keresztmetszet középpontjának másik „oldalára” kerül. Az 1., 2., 3., 4. ábra bemutatja a lehetséges, és megfigyelt repedés kombinációkat.

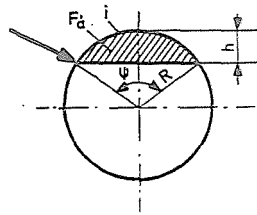
Az ábrákon használt jelölések:

- T_r az R sugarú eredeti, repedésmentes keresztmetszet területe,
- F_a a fáradtan tört keresztmetszet területe,
- φ_i törési szög, a „kör alakú” töret középponti szöge,
- ψ az eredeti keresztmetszet geometriai középpontjából a repedésvégekhez húzott sugarak által meghatározott középponti szög,
- r_i repedési sugár, a körívvel helyettesített repedési ív sugara,
- Δc középpont eltolódás, az eredeti keresztmetszet geometriai középpontja és a törési ív középpontja közötti távolság,
- h repedés mélység,
- i a repedés próbatest felületén mérhető ívhossza.

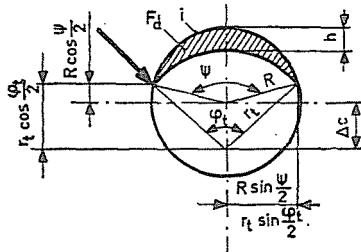
A repedésterjedés közelítő modellje a következő: a repedt keresztmetszet kezdeti növekedését az r_i sugár progresszív növekedése és az O középpont „ki-



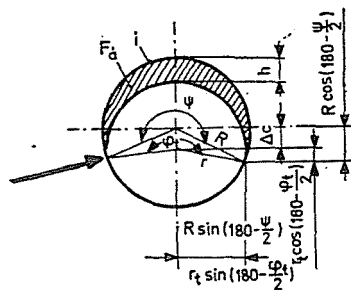
1 ábra



2. ábra



3. ábra



4. ábra

1. táblázat

Igénybevételi szám	Igénybevételi szám törtséig	N_0	r_l (mm)	Δc (mm)	ψ (°)	φ_l (°)	h (mm)	F_d (mm ²)	F_l (mm ²)
<i>Fárasztó terhelés: $166,7 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2}$</i>									
\bar{x}	$1,9 \times 10^6$		-3,15	-7,70	46,22	-125,78	2,36	9,03	
s			0,72	0,61	8,33	18,34	0,37	3,18	
\bar{x}	$2,0 \times 10^6$		-12,60	-16,68	84,44	-51,56	2,92	19,12	
s			6,54	6,43	13,18	17,94	0,53	5,86	
\bar{x}	$2,25 \times 10^6$		+17,36	+21,25	116,22	+52,0	4,70	38,87	
s			9,18	9,21	10,84	25,85	0,28	3,63	
\bar{x}		2,577 222	1 756 111	+5,96	+4,53	251,33	+174,89	5,58	83,81
s		279 923	164 630	1,47	1,14	34,47	50,90	0,63	15,54
<i>Fárasztó terhelés: $185,2 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2}$</i>									
\bar{x}	$8,0 \times 10^5$		-5,27	-9,04	55,56	-111,11	2,49	11,48	
s			3,50	2,20	19,77	50,82	0,47	5,48	
\bar{x}	9×10^5		-16,90	-20,27	98,0	-50,67	3,62	27,88	
s			12,16	11,53	30,55	28,14	1,23	14,45	
\bar{x}		1 044 444	648 333	+8,55	+5,85	197,33	+112,44	4,30	56,02
s		149 859	108 540	1,15	1,53	9,33	23,38	0,46	4,44
<i>Fárasztó terhelés: $222,2 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2}$</i>									
\bar{x}	$2,9 \times 10^5$		-7,12	-12,13	58,00	-73,78	2,0	9,34	
s			4,21	4,27	10,39	33,35	0,26	2,21	
\bar{x}		360 444	228 000	+13,24	+8,99	140,22	+62,67	2,76	28,26
s		41 994	29 012	2,71	2,84	13,51	17,09	0,37	5,59
<i>Fárasztó terhelés: $250 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2}$</i>									
\bar{x}		188 222	94 333	25,90	20,87	104,00	30,22	1,97	15,60
s		25 232	11 135	11,63	11,78	8,12	15,76	2,56	2,56

F_d a fáradtan átrepedt felületet,
 F_l a fáradtan tört felületet jelöli.

2. táblázat

Sorozat- szám	Terhelő feszültség	Igénybevételi szám	r_T (mm)	z_c (mm)	ν (°)	ν_T (°)	h (mm)	$F_{T_2}^*$ (mm ²)	N_0	N_0 σ_T -re át- számítva	N_T	N_T σ_T -re át- számítva	
1	σ_1	8×10^5	\bar{x}	8,6	5,97	197,11	111,11	4,37	56,11	1 148 333	678 907	1 463 000	1 048 241
	σ_2		s	1,04	1,55	7,94	20,33	0,63	7,11	82 469	84 291	165 374	165 374
2	σ_1	$1,2 \times 10^6$	\bar{x}	8,82	6,25	195,33	106,44	4,42	56,68	1 318 666	695 527	1 711 000	1 088 750
	σ_2		s	1,01	1,29	7,75	16,61	0,43	5,17	87 696	87 696	205 750	205 750
3	σ_1	$1,2 \times 10^6$	\bar{x}	11,88	7,48	141,56	70,0	2,61	26,92	1 263 666	226 039	1 411 444	373 817
	σ_3		s	1,84	1,80	11,48	15,59	0,19	3,26	39 623	39 623	58 998	58 998
4	σ_1	$1,2 \times 10^6$	\bar{x}	20,41	15,18	103,33	36,44	1,77	14,06	1 237 666	109 147	1 314 578	187 258
	σ_4		s	9,09	9,14	7,55	14,03	0,14	1,43	18 980	18 980	29 269	30 556
5	σ_1	8×10^5	\bar{x}	10,32	6,1	153	81	2,87	27,98			1 240 667	276 736
	σ_2	$2,5 \times 10^5$	s	0,54	0,22	11,0	6,9	0,36	7,28			48 347	42 899
	σ_3												
6	σ_1	8×10^5	\bar{x}	11,1	6,1	129	73	1,92	17,85			994 444	199 342
	σ_3	1×10^5	s	0,51	0,26	8,8	6,5	0,77	7,48			31 024	25 184
	σ_4												
7	σ_1	$1,8 \times 10^6$	\bar{x}	5,79	2,16	261	228	3,42	61,39			2 118 111	1 220 397
	σ_2		s	0,24	0,16	9,8	7,2	0,49	6,63			139 653	110 940
8	σ_1	2×10^6	\bar{x}	5,80	2,14	262	232	3,32	57,08			2 101 667	1 120 991
	σ_2		s	0,23	0,19	9,1	7,5	0,41	4,82			69 202	41 156
9	σ_2	8×10^5	\bar{x}	10,33	6,15	158	86	2,84	27,39			879 888	341 644
	σ_3		s	0,47	0,18	9,7	6,9	0,34	6,31			43 684	34 845
10	σ_1	8×10^5	\bar{x}	10,36	6,22	154	83,7	2,92	28,16			1 281 111	342 626
	σ_2	4×10^5	s	0,49	0,20	10,5	8,2	0,35	7,75			37 710	33 442
	σ_3												

$$\sigma_1 = 166,7 \times 10^6, \sigma_2 = 185,2 \times 10^6, \sigma_3 = 222,2 \times 10^6, \sigma_4 = 250 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2}$$

3. táblázat

Sorozat- szám	r_t	Δc	ψ	φ_t	h	F_t	N_0	N_t
1 t	0,10	0,17	0,05	0,13	0,27	0,03	0,67	0,05
F	1,22	1,03	1,38	1,32	1,88	2,56	1,64	1,22
2 t	0,53	0,60	0,49	0,63	0,62	0,29	1,02	0,57
F	1,30	1,41	1,45	1,98	1,14	1,36	1,52	1,89
3 t	1,25	1,35	0,23	0,95	1,128	0,62	0,12	0,55
F	2,17	2,49	1,38	1,20	3,79	2,94	1,87	1,97
4 t	1,12	1,15	0,18	0,88	2,095	1,58	2,02	0,07
F	1,64	1,66	1,16	1,26	3,19	3,20	2,91	1,46
5 t	0,122	1,032	0,600	0,909	0,184	0,132		0,81
F	1,166	1,341	1,163	1,059	1,190	1,758		1,04
6 t	0,433	1,728	0,748	0,987	0,057	0,757		1,04
F	1,177	1,278	1,152	1,031	1,176	9,024		0,00
7 t	0,369	0,374	0,222	0,565	0,506	1,782		2,832
F	1,190	1,266	1,110	1,174	1,299	2,142		1,82
8 t	0,283	0,115	0,461	0,554	0,050	0,209		0,49
F	1,093	1,114	1,044	1,082	1,100	1,132		13,25
9 t	0,087	0,573	0,426	0,606	0,380	0,355		1,45
F	1,132	1,114	1,106	1,059	1,062	1,321		0,81
10 t	0,043	0,217	0,410	0,083	0,125	0,069	0,19	0,99
F	1,041	1,108	1,060	1,334	1,125	1,993	3,33	1,58

95%-os kétoldali, illetve 97,5%-os egyoldali szignifikanciaszinten $t_{\alpha;rit} = 2,120$

95%-os egyoldali, illetve 90%-os kétoldali szignifikanciaszinten $F_{krit} = 3,44$

Az aláhúzott értékek szignifikánsan különbözöek.

tolódása” okozza, miközben a h repedésmélység viszonylag lassan növekszik. A kerületen mérhető i repedéshossz szintén progresszíven növekszik, ennek következménye a repedés belső körívének kiegyenesedése, illetve domborúból homorúba fordulása. A repedés mindenkori sarka — az ábrákon nyíllal jelöltük — körül jelentős feszültségkoncentráció alakul ki, amely a próbatest körbeforgása révén minden ciklusban a helyi maximális feszültséget kapja.

$$\begin{aligned} \text{A } \sigma &= 166,7 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2}, & \sigma &= 185,2 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2}, \\ & \sigma &= 222,2 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2}, & \sigma &= 250,0 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2} \text{ értékű állandó} \end{aligned}$$

amplitúdójú és frekvenciájú forgó-hajtogató fárasztó terheléssel az élettartam adott szakaszáig, illetve törésig fárasztott próbatestek — feszültség szintenként 9 próbatest fárasztásából kapott — adatainak átlagértéke és szórása az 1. táblázatban található.

φ_t szögérték és Δc középpont-eltolódás negatív előjelű akkor, amikor a törési felület alulról nézve konvex, pozitív előjelűek pedig akkor, amikor a törési felület alulról nézve konkáv.

A makrorepedés megjelenését megelőző fáradási folyamat időtartama

Az előzőekben a kifáradási folyamatnak csak azt a részét jellemeztem, amelyben már kialakult a fáradásos repedés, azaz tapasztalható volt F_a fáradtan átrepedt keresztmetszet. A tönkremeneteli folyamat ezt megelőző szakasza viszont egy olyan szakasz, amelyben még nem érzékelhető repedés, fáradtan repedt felület. Ennek a szakasznak a felső határát, azaz azt az igénybevételi számot, amelynél kisebb igénybevételi számnál még nem, illetve amelynél nagyobb igénybevételi számnál már észleltem repedést, N_0 -al jelöltem.

Maga a repedésterjedés, illetve a fáradtan átrepedt felület növekedése ezek szerint N_0 -tól N_f -ig, azaz a törési igénybevételi számig folyik. Ennek megfelelően a fáradtan tört felület növekedést N_0 -tól N_f -ig terjedő intervallumra kell vetíteni. Az állandó amplitúdójú terhelés hatására történő fáradásos tönkremenetel fáradtan átrepedt felület növekedése tehát $F_a = f(N - N_0)$ függvény formájában keresendő.

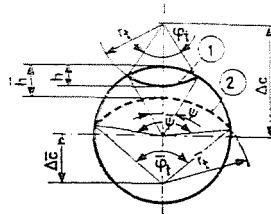
A $\sigma = 166,7 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2}$, $\sigma = 185,2 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2}$, $\sigma = 222,2 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2}$ terhelő feszültségeknél mért F_a értékekre illesztett függvények rendre a következők:

$$\begin{aligned} F_a &= 5,33 \times 10^6 (N - N_0)^{1,22} \\ F_a &= 5,22 \times 10^6 (N - N_0)^{1,25} \\ F_a &= 4,81 \times 10^6 (N - N_0)^{1,32} \end{aligned}$$

Az élettartam meghatározott szakasza után — az előző terheléssel megegyező frekvenciájú — növelt terheléssel történt fásasztások

A lépcsőzetesen növelt terheléssel történt fásasztási kísérletsorozatot két fő csoportban végeztem, mégpedig:

1. A kezdő (σ_i) terhelésszinten az igénybevételi szám (N_i) kisebb volt, mint a terhelésszintnél mért N_0 , igénybevételi szám, azaz a kezdő terhelésszinten még nem jött létre repedés.



5. ábra

$h, r, \varphi, \psi, \Delta K$: a σ_i terhelésszinten kialakult repedési vonal jellemzői.

$h, r, \varphi, \psi, \Delta K$: a lépcsős terhelés utolsó, azaz törést okozó terhelésszintjével megegyező értékű állandó amplitúdójú terheléssel történt fásasztások törési vonala jellemzőinek átlagértéke.

1. a σ_i terhelésszinten kialakult repedési vonal; 2. a lépcsős terhelés utolsó, azaz törést okozó terhelésszintjével megegyező értékű állandó amplitúdójú terheléssel történt fásasztások átlagos törési vonala.

2. Vagy a kezdő, vagy a második terhelésszinten már kialakult repedés, amely a követő, egyben törést okozó terhelésszinten a törésig növekedett. Erre a csoportra egyben az is jellemző, hogy a kezdő vagy a második terhelésszinten kialakult, alulról nézve konvex repedési alakzat jellemzői nem haladták meg a követő és egyben törést okozó terhelésszinttel megegyező értékű állandó amplitúdójú terheléssel történt fárasztások konkáv törési vonala geometriai jellemzőinek átlagát, amelyet az 5. ábra szemléltet.

A lépcsős terheléssel végzett vizsgálatok eredményei

1. A terhelésszint változásának a hatása a fáradtan repedt felület nagyságára és alakjára

Mértem 9 próbatestből álló sorozatokon a lépcsős fárasztással kapott fáradt töretek felületeinek geometriai jellemzőit, kiszámoltam a fáradtan tört felületek nagyságát, és ezeket statisztikai „ F ” és „ t ” próbával összehasonlítottam a lépcsős fárasztás utolsó, azaz törést okozó terhelésszintjével megegyező értékű állandó amplitúdójú fárasztással kapott törések geometriai jellemzőivel és fáradtan tört felületeinek nagyságával. Az „ F ” és „ t ” próba eredményei a 2. táblázatban vannak összefoglalva.

A próbatestek felületjellemzői és felületi átlagértékének a választott szignifikanciaszinten a törést okozó terhelésszinttel megegyező értékű állandó amplitúdójú terhelésnél mért felület geometriai jellemzői és nagysága átlagértékek azonossága alapján, az adott sorozatba eső próbatesteknél megvizsgáltam az állandó amplitúdójú terheléshez tartozó és a lépcsős terhelésnél mért N_0 igénybevételi számok és N_i törési igénybevételi számok közötti összefüggés lehetőségét.

A várható törési élettartam

A σ_i terhelésszinten $N_i < N_{0i}$ (a σ_i terhelésszinten még nincs repedés) igénybevételi számot a $\sigma_j > \sigma_i$ terhelésszintre az állandó amplitúdójú fárasztás során kapott $N_0 = f(\sigma)$ összefüggéssel számoltam át, majd az így kapott igénybevételi számhoz adtam hozzá a σ_j terhelésszinten a repedés megjelenéséig mért igénybevételi számot. Az ily módon kiszámolt igénybevételi számot — a 2. táblázat „ $N_0\sigma_j$ -re átszámítva” oszlopot — hasonlítottam össze, a már említett szignifikanciaszinten a repedés megjelenésének terhelésszintjével megegyező értékű állandó amplitúdójú terhelésnél mért N_0 értékekkel. Az összehasonlítás eredménye a 3. táblázat N_0 oszlopában található.

Az előzőekből kiindulva — ismerve tehát az $N_0 = f(\sigma)$ és a terhelésszintenkénti $F_a = f(N - N_0)$ összefüggéseket — a lépcsősen növelt terhelésű fárasztásnál a próbatest várható élettartamát az alábbiak szerint becsültem:

σ_i terhelésszinten $F_{\dot{a}_i} = f_i(N_i - N_{0i})$. Ugyanez az $F_{\dot{a}}$ fáradtan átrepedt keresztmetszet σ_j terhelésszinten $F_{\dot{a}_j} = f_j(N_j - N_{0j})$. $F_{\dot{a}_i} = F_{\dot{a}_j}$, így N_i σ_j terhelésszinti megfelelője kiszámolható.

Ha σ_j terhelésszinten további N^j igénybevételi számig fásasztóigénybevételnek tesszük ki a próbatestet, akkor a fáradtan átrepedt keresztmetszet tovább növekedik, nagysága $F_{\dot{a}_j} = f_j(N_j + N^j - N_{0j})$ lesz.

Ha $N_j + N^j$ igénybevételi szám után az igénybevétel nagyságát σ_k -ra növeljük, és az eddigi fáradtan átrepedt felület át tud alakulni a σ_k -ra jellemző alakú és méretű felületté, akkor az eddigi fáradtan átrepedt keresztmetszet már σ_k -ra jellemző módon fog tovább növekedni. Ha a σ_k terhelésszinten folytatjuk tovább a fásasztást további N^k igénybevételi számig, akkor az eddigi fáradtan átrepedt keresztmetszet tovább növekedik, nagysága $F_{\dot{a}_k} = a_k(N_k + N^k - N_{0k})$.

Az átszámolt törési igénybevételi számok a választott szignifikanciaszinten megegyeztek — kivéve a 7. sorozat átlagértékét és a 8. sorozat szórását — mind szórás, mind pedig átlagérték tekintetében (3. táblázat „ N_i ” oszlopának adatai) az utolsó terhelésszinttel megegyező értékű állandó amplitúdójú fásasztásnál kapott törési igénybevételi számok szórás- és átlagérték-adataival.

Összefoglalás

1. A fáradtan repedt, illetve tört felület nagyságának az igénybevételi szám függvényében történő változása $F_d = (F_i) = a(N - N_0)^m$ alakú, ahol N_0 egy, az adott próbatest geometriai és kísérleti körülmények mellett az igénybevétel nagyságától függő olyan küszöbszám, amely alatt fáradtan repedt felület meghatározott valószínűséggel nem fordul elő. („ a ” a függvény alakparaméter, „ m ” a fáradtan repedt felület növekedésére jellemző kitevő.)

2. A lépcsősen növelt amplitúdójú terheléssel fásasztva, ha a kezdő terhelésszinten $N_i < N_0$ igénybevételi számig, vagy ha addig történik a fásasztás, amíg az előző terhelésszinten kialakult repedési alakzat át tud alakulni a követő, illetve a törést okozó terhelésszint jellemző törési alakzatává, akkor a végső törési felület nagysága és alakja az utolsó, törést okozó terhelésszintre jellemzően alakul, és megegyezik ezzel a törést okozó terhelésszinttel egyező értékű, de állandó amplitúdójú fásasztásnál mért törési felületekkel mind alak, mind nagyság tekintetében. Ezekben az esetekben az utolsó törést okozó terhelésszintre $N_0 = c\sigma^{-u}$ és a terhelésszintekhez tartozó $F_d = a(N - N_0)^m$ összefüggések felhasználásával átszámolt igénybevételi számok megfelelő egyezést mutattak a lépcsősen növelt amplitúdójú forgó-hajtogató fásasztás utolsó terhelésszintjével megegyező értékű, de állandó amplitúdójú fásasztásnál mért törési igénybevételi számokkal.

Dr. Berke Péter egy. adjunktus