

UDK 539.016.2+539.219.2

Povečanje trdnosti rotacijskih zarez s pomočjo povaljanja

JAN SYČ-MILÝ

Iz slovaščine prevedel in priredil mgr. JULIJ BERTONCELJ

UVOD

Trdnost je pri strojnih delih, ki so izpostavljeni dinamičnim obremenitvam, v bistvu določena z lastnostjo površinskega sloja materiala. Utrujenostni lomi, kakor je znano, se pojavljajo skoraj vedno na površini strojnih delov z začetkom na mestih koncentracije napetosti, ki so lahko posledica hitre spremembe geometrijske oblike, nekvadratne površinske obdelave, mehanskih poškodb, ali takih mest, kjer je prizadeta homogenost materiala. Razen tega pa je pri najbolj pogostih drugih obremenitvah (upogibu, torziji) površinski sloj izpostavljen maksimalnim napetostim, ki jih povzroča zunanje obremenitve.

Povaljanje je v bistvu hladna mehanska obdelava zunanje površine in povzroča v območju napetostnih konic, ki nastajajo zaradi zunanje obremenitve, trajno deformacijo površinskega sloja. Ta deformacija povzroča utrđitev sloja, kar pomeni porast trdnosti in meje plastičnosti.

Povečanje trdnosti dosežemo že z rahlim utrđanjem površinskega sloja, zelo dobri rezultati pa so se pokazali pri povaljanju žleba valjaste zareze. Tako se je povečala trdnost sicer ostre, a nato povaljane zareze na površinskem sloju za 200 in več odstotkov.

Doseženo povečanje trdnosti je treba pripisati tako mehanskemu utrđanju kakor tudi boljši porazdelitvi notranjih napetosti. Podrobnejši opis vplivov notranjih napetosti je opisan v literaturi [1, 2, 3, 4].

Za boljše izkoriščanje pozitivnih lastnosti, ki jih prinaša utrđanje kovinske površine s povaljanjem, je potrebno temeljiteje poznavanje vplivov, ker le tako lahko predvidimo optimalne parametre povaljanja površinskega sloja. Izvedene so bile mnoge študije (posebno pri delih z zarezo) pri poljubni izbiri parametrov. Tako je iz dostopne literature [5, 6, 7, 8], ki obravnava to problematiko, znano mnogo delnih ugotovitev, skoraj nobena študija pa ne pokaže, kako vpliva debelina utrđevalnega sloja predmeta pri dani geometriji na povečanje meje utrđenosti.

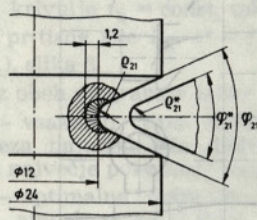
Ta raziskava je poskus pojasniti vpliv debeline utrđevalnega sloja na povečanje meje utrđenja zarez na okroglih delih, pri čemer smo izbrali hiperboloidno geometrijsko obliko profilov zarez, da bodo obveljale Neuberjeve enačbe [10]. Nadaljnji pomembni faktor, ki smo ga želeli v obravnavani problematiki zasledovati, je vpliv vrste materiala. Tako smo pred začetkom raziskovalnega programa izbrali vzorce jekel z majhno, srednjo in veliko statično trdnostjo, ker pa so preizkusi na utrđanje zelo dolgotrajni, se je pokazalo, da se je porušitev pojavila samo pri jeklu srednje trdnosti.

PREIZKUSNI VZORCI

Iz izhodnega materiala smo izdelali gladke preizkusne palice z enotnim notranjim osnovnim premerom zarez na palici $2a = 12$ mm ter take površinske hrupavosti, da je bilo srednje odstopanje profila $R_a \approx 0,15 \mu\text{m}$.

Profil zareze je ustrezal hiperboloidni obliki le v zaokrožitvi žleba, ki se izteka v stožčasto površino (kakor je to tudi v [11]), da je bilo mogoče izdelati obdelovalni pripomoček. S tem smo se praktično izognili napakam, ker sta za izračun oblikovnega faktorja že tako odločujoča velikost polmera zaokrožitve žleba in najmanjši premer vzorca na mestu zareze.

Pri preizkusnih vzorcih smo predvideli tri tipe zarez, katerih geometrija je razvidna s slike 1 in tabele I, ki vsebuje tudi velikost oblikovnega faktorja posamezne zareze α_k .



Slika 1

Tabela I

Tip zarez	ϱ_{21} mm	ϱ_{21}^* mm	φ_{21}^0	φ_{21}^{*0}	α_k
I	2,4	2,3	66°	63°	1,63
II	1,2	1,1	50°	47°	2,13
III	0,6	0,5	36°	33°	2,63

Ugotovljena kemijska sestava uporabljenega materiala je prikazana v tabeli II in srednje mehanske vrednosti 12 merenj v tabeli III.

Tabela II

C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cu %	Ni %	Cr %
0,57	0,61	0,23	0,019	0,016	0,015	0,04	0,70

Tabela III

σ_M kp/mm ²	σ_v kp/mm ²	δ %	ψ %	HB kp/mm ²
70,25	39,68	20,5	38,42	216

UTRĐANJE S POVALJANJEM

Za izvedbo utrđanja površinskega sloja s povaljanjem smo uporabili napravo, ki je bila uporabna pri vseh treh tipih zarez. Tako smo vsakokrat namestili po obodu tri ustrezne valjčke pod kotom 120° (slika 1), ki so pritiskali z enako pritiskno silo F_k k osi preizkušanca.

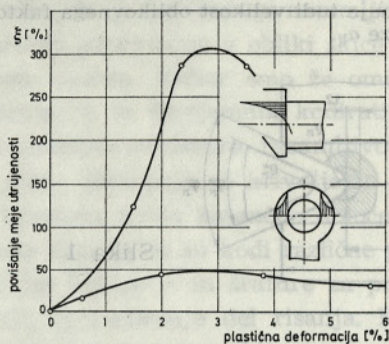
Valjčna kolesa so bila izdelana iz jekla za poboljšanje in toplotno obdelana na trdoto HRC 60 tako, da ni bilo nevarnosti za deformacijo profila valjčka. Dotikalna površina je bila natančno brušena in nato polirana, tako da je bilo doseženo srednje odstopanje $R_a \approx 0,15 \mu\text{m}$. Pri povaljanju smo računali s tem, da se bo površinska hrupavost valjčkov vtisnila v dotikalno površino žleba zareze.

Parametra ϱ_{21} in φ_{21} sta bila pri valjčku nekoliko manjša od velikosti parametrov na preizkušancu (slika 1, tabela I), sicer se ne bi mogel pojaviti zaželeni utrđevalni sloj v žlebu zareze.

Utrđevalni proces s povaljanjem je bil izveden na stružnici pri vrtilni hitrosti 22 vrtljajev v minuti.

PRIREDITEV PRITISNE SILE POVALJANJA PRI ZAHTEVANI DEBELINI UTRJEVALNEGA SLOJA

Če upoštevamo sliko 2 [12], je učinek povaljanja, tj. velikost povečanja trdnosti, odvisna od velikosti plastične deformacije, tj. od debeline plastično deformiranega površinskega sloja. Debelina te plasti je odvisna od pritiskne sile, ki deluje na valjček. Pri ostrih zarezah je pravilna izbira te sile še posebno pomembna, če želimo doseči zaželeni učinek.



Slika 2

Že iz dosedanjih rezultatov, npr. [6, 8], se da soditi o vplivu utrjevanja s povaljanjem pri delih z rotacijskimi zarezami, kjer zadošča za enak rezultat manjša pritiskna sila povaljanja kakor pri gladkem drogu. Lahko domnevamo, da je tudi tu odločilna debelina plastično deformiranega sloja, ki naj bo sorazmerna obsegu koncentracije napetosti, povzročene z zarezo.

Te ugotovitve kažejo, da ni mogoče vnaprej določiti optimalne debeline utrjevalnega sloja, zato smo se odločili, da bomo izbrali določene debeline plastično deformiranih slojev (tabela IV). Potrebno pritiskno silo smo izračunali iz Hertzovih enačb za dotik dveh valjastih teles, kakor jih navaja literatura [12, 14] oziroma grafične rešitve [15]. Pri tem smo izhajali iz domneve, da plastična sprememba vrhnje plasti predmeta zaradi sorazmerno majhne debeline utrjevalnega sloja t_k bistveno ne vpliva na elastične napetosti, ki vladajo v preostalem prerezu. Nadalje smo predvideli še, da v utrjevalnem sloju vlada strižna napetost, katere velikost je enaka meji plastičnosti τ_v .

Tabela IV

α_k	1,63			2,13			2,63		
t_k [mm]	1,6	1,2	0,8	1,6	1,2	0,8	1,6	1,2	0,8
F_k [kp]	355	210	100	275	155	75	245	145	60

Debelino utrjevalnega sloja lahko določamo eksperimentalno, in sicer z meritvami napetostnega stanja lastnih napetosti v vzorcih, npr. z rentgenografsko metodo ali Sachsovo metodo, ali pa z meritvami sprememb mikrotrdnosti v utrjevalnem sloju in primerjavo z neutrimenim področjem; mogoče pa je tudi sklepati iz metalografske analize.

Izkazalo se je, da rentgenografska in Sachsova metoda nista primerni za vzorec z rotacijsko zarezo. Odločili smo se za meritev mikrotrdnosti v sloju, čeprav nismo dobili zaželenih rezultatov, ker je imelo uporabljeno jeklo pretežno perlitno strukturo ($\approx 70\%$), za katero je značilno, da je komaj mogoče opaziti in tudi meriti spremembo mikrostrukture utrjenega sloja glede na osnovni prerez.

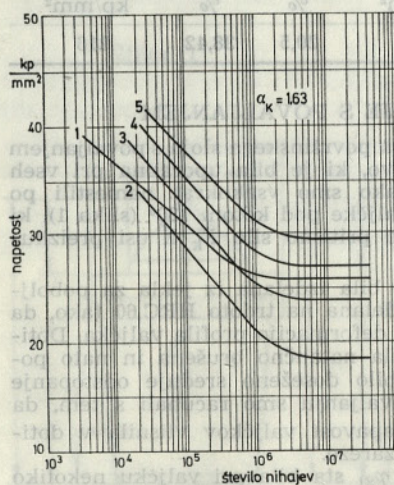
Žal tudi neposredno opazovanje strukture v korenu zareze ni prineslo povsem zanesljivega rezultata, ker je prehod iz utrjenega sloja v osnovni prerez preveč nezizrazit.

Poznejše izkušnje so pokazale, da je smiselno, če v takih primerih upoštevamo tisto debelino sloja, ki jo dobimo iz kotalnega tlaka pritisknega valja, kajti do, sedanji rezultati potrjujejo, da je ta parameter najpomembnejši in ga lahko vnaprej računsko določamo.

REZULTATI IN ANALIZE PREIZKUŠANJEV

Preizkušanje gladkih in zarezanih epruvet — utrjenih in neutrimenih — je bilo opravljeno na treh strojih za preizkušanje na utrujanje z upogibno obremenitvijo, in sicer na dveh strojih tipa MUI (6000 vrt/min) z maksimalnim upogibnim momentom 6500 kp mm in enim tipa NU (2800 vrt/min) z upogibnim momentom 7500 kp mm.

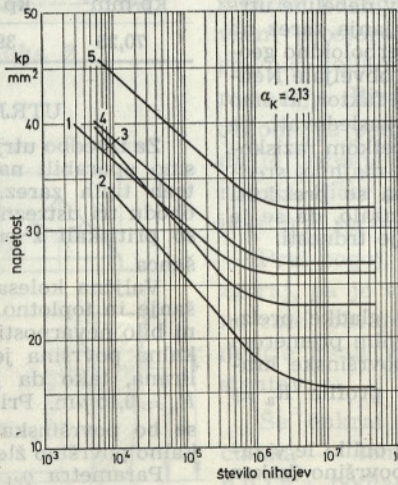
Rezultati preizkusov so prikazani v obliki Wöhlerjevih diagramov, in sicer na sliki 3 za preizkušance s koeficientom oblike $\alpha_k = 1,63$, na sliki 4 z $\alpha_k = 2,13$ in na sliki 5 z $\alpha_k = 2,63$. Za primerjavo je na vsaki sliki zarisana še Wöhlerjeva krivulja gladke epruvete.



Slika 3

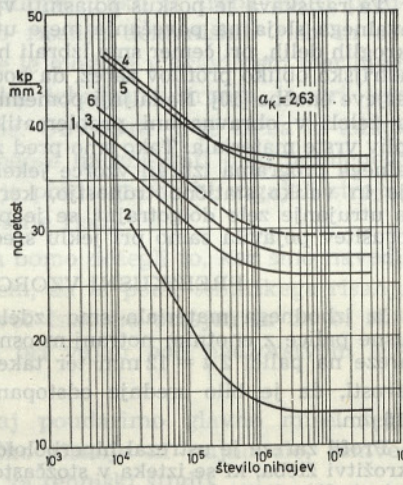
3: $F_k = 100$ kp, 4: $F_k = 210$ kp,
5: $F_k = 355$ kp

1 — gladka epruveta; 2 — epruveta z zarezo in $F_k = 0$; 3, 4, 5 in 6 — epruvete z zarezo in označenim F_k



Slika 4

3: $F_k = 75$ kp, 4: $F_k = 155$ kp,
5: $F_k = 275$ kp

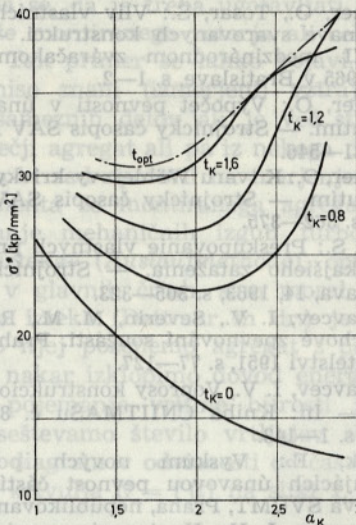


Slika 5

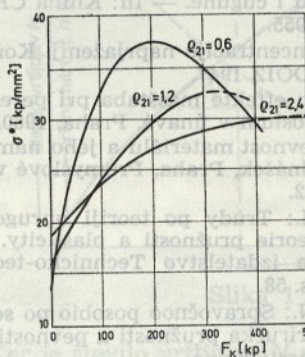
3: $F_k = 60$ kp, 4: $F_k = 145$ kp,
5: $F_k = 245$ kp, 6: $F_k = 400$ kp

Tabela V

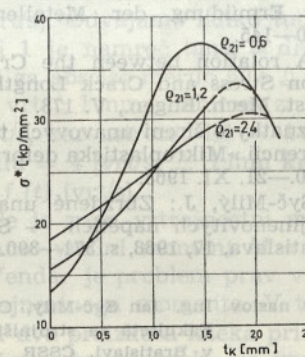
α_k	1,63			2,13			2,63		
t_k mm	F_k kp	σ^* kp/mm ²		F_k kp	σ^* kp/mm ²		F_k kp	σ^* kp/mm ²	
0	0	18,5		0	15,5		0	13,3	
0,8	100	24,0		75	23,0		60	27,5	
1,2	210	27,0		155	27,0		145	36,0	
1,6	355	29,5		275	32,0		245	37,0	



Slika 6



Slika 7



Slika 8

Z namenom, da bi ta analiza omogočila splošnejšo ugotovitev, smo vse vrednosti meje utrujanja uredili v tabeli V in narisali na sliki 6 tako, da je dinamična trdnost σ^* prikazana kot funkcija α_k za izbrano debelino sloja t_k . Na sliki 6 je prav tako prikazan rezultat gladke palice z $\alpha_k = 1$. Pokazalo se je, da se rezultati M. Roša ([16], ki so bili izmerjeni z jeklom St 50, Cr-Ni-Mo jeklom in Ni-jeklom (5 % Ni) dobro usklajujejo, kar potrjuje pravilnost raziskave.

Za ugotovitev vpliva debeline utrjevalnega sloja na mejo utrujanja, je velikega pomena poznavanja poteka krivulje $t_k = \text{const}$, tako da se σ^* izrazi kot funkcija pritisne sile F_k , $\sigma^* = f_1(F_k)$, slika 7 oziroma $\sigma^* = f_2(t_k)$, slika 8.

Iz obeh diagramov lahko sklepamo:

— vsakemu tipu zareze (oblikovnemu faktorju ustreza najugodnejša debelina utrjevalnega sloja, ki daje največje povečanje meje utrujanja,

— optimalna debelina sloja ni konstantna vrednost, ampak se zmanjšuje z ostrino zareze (s povečanjem α_k) in

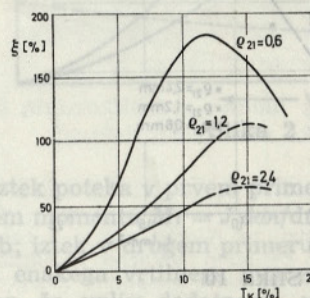
— maksimalno povečanje meje utrujenosti katerekoli zareze — kar ustreza optimalni debelini sloja — je tem večje, čim ostrejša je zarez (čim večji je α_k).

Za nadaljnje posplošitve in možnosti primerjanja s podatki iz literature smo uvedli še brezdimenzijske označbe, in sicer razmerje debeline utrjevalnega sloja t_k in $2a$; T_k ter vsakokratno povečanje meje utrujanja ξ glede na σ^* , kakor izhaja iz

$$T_k = \frac{t_k}{2a} \cdot 100 [\%]$$

$$\xi = \frac{\sigma_x^* - \sigma^*}{\sigma^*} \cdot 100 [\%]$$

Funkcijska odvisnost med ξ in T_k je za posamezne zareze narisana na sliki 9, pri čemer so rezultati podobni onim na sliki 2. Smiselnost povaljanja žlebov ostrih zarez je v obeh primerih še posebej vidna.



Slika 9

Če ocenimo sliko 8 in upoštevamo vrednost optimalne debeline $t_{k, \text{opt}}$ oziroma $T_{k, \text{opt}}$ (slika 9) ter pripadajoče meje utrujanja σ^* , dobimo vrednosti, ki jih prikazuje tabela VI.

Tabela VI

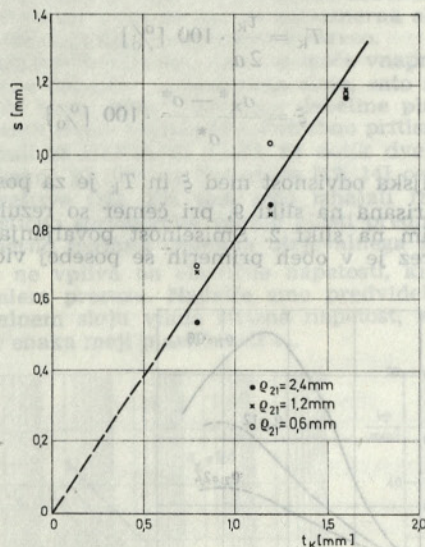
α_k	$t_{k, \text{opt}}$ mm	$T_{k, \text{opt}}$ %	σ_{opt}^* kp/mm ²	ξ_{opt} %
1,63	1,95	16,3	20,25	63,5
2,13	1,80	15,0	33,25	114,5
2,63	1,45	12,0	37,50	182

S tako dobljenimi rezultati smo lahko na sliki 6 narisali črto — pikčasto krivuljo $t_{k, opt}$, ki tvori ovoj familijam krivulj $t_k = \text{const}$ in se npr. pri debelini utrjevalnega sloja $t_k = 1,6$ mm dotika te krivulje približno pri vrednosti $\alpha_k = 2,3$.

Že iz literature je znano, da lahko pričakujemo znaten vpliv povaljanja žleba zareze na povečanje trdnosti, povsem nepričakovana in presenetljiva pa je ugotovitev, da so že absolutne vrednosti pri optimalni debelini sloja toliko večje, kolikor ostrejši so žlebovi zareze (slika 8).

Pri izvajanju preizkusa smo naleteli na primere, da se nekateri preizkušanci niso porušili tudi po več ko 10 milijonih obremenitvenih nihajev, celo razpoke, ki so nastale, so se ustavile. Iz literature [17, 18, 19] je znan pojav zaustavljanja razpok, ki so pogoste predvsem pri velikem oblikovnem faktorju, $\alpha_k \geq 3$ in majhnih imenskih napetostih, približno ± 5 kp/mm². Obremenitvene razmere v našem primeru so znatno odstopale od takih okoliščin, saj je znašal $\alpha_k = 1,63 \dots 2,63$, imenske napetosti pa celo ± 37 kp/mm².

Da bi dobili dodatno informacijo o takih razpokah, smo neporušene epruvete dodatno pretrgali in izmerili globino razpoke s . Te vrednosti smo vnesli v diagram (slika 10) skupaj s teoretično debelino utrjevalnega sloja t_k . Slika je pokazala dobro medsebojno odvisnost obeh parametrov, tako da je mogoče v prvem približku oceniti za vse tri tipe zarez globino razpoke $s \approx 0,75 t_k$, kar potrjuje pravilnost naše odločitve, da pri preizkusih lahko računamo s teoretično debelino utrjevalnega sloja t_k .



Slika 10

SKLEP

Večjo uporabo povaljanja v praksi ovirata predvsem dve okoliščini. Prva je ta, da je proces povaljanja zelo težko kontrolirati, drugi vzrok pa je v tem, da je težko zanesljivo napovedati uspeh povaljanja tako pri različnih materialih kakor obliki strojnih delov.

Z namenom, da bi dobili jasnejšo sliko o uporabnosti utrjevanja površinskega sloja s povaljanjem, bi morali razširiti raziskave tako v eksperimentalnem kakor tudi teoretičnem pomenu, in sicer tako, da bi dobili jasnejšo fizikalno utemeljitev. To še posebej velja za zaustavljene razpoke, kjer bi bilo treba temeljiteje raziskati:

— lokalno tečenje materiala na prerezu z zarezo,
— napetostno stanje lastnih napetosti in — še posebej

— analizirati vpliv lastnih napetosti pri delovanju zunanjih obremenitev.

Pri poznavanju teh vplivov bi dobili boljši vpogled v napetostna dogajanja zarez zlasti še, če bi izvedli raziskave poljubnega materiala, dimenzij preizkušancev, oblike zareze in poljubne debeline utrjevalnega sloja.

LITERATURA

- [1] Puchner, O., Tosar, S.: Vliv vlastních pnutí na pevnost v únavě svarovaných konstrukcí. — Prednesené na XII. medzinárodnom zväračakom kongrese 14.—16. IX. 1965 v Bratislave, s. 1—2.
- [2] Puchner, O.: Výpočet pevnosti v únavě částí s vlastním pnutím. — Strojnícky časopis SAV Bratislava, 14, 1963, s. 521—546.
- [3] Puchner, O.: K tvaru Wöhlerovy krivky součástí s vlastním pnutím. — Strojnícky časopis SAV Bratislava, 11, 1960, s. 362—375.
- [4] Tesar, S.: Preskupovanie vlastných pnutí za posobenja vonkajšieho zataženia. — Strojnícky časopis SAV, Bratislava, 14, 1963, s. 305—323.
- [5] Kudrjavcev, I. V., Severin, M. M., Rjabčenkova, A. V.: Povrchové zpevnování součástí. Praha, Průmyslové vydavatelství 1951, s. 77—127.
- [6] Kudrjavcev, I. V.: Voprosy konstrukcionnoj pročnosti stali. — In: Kniha CNIITMAŠu č. 85, Moskva Mašgiz 1975, s. 1—143.
- [7] Jelínek, E.: Vyskum nových povrchových úprav zvyšujících únavovou pevnost částí. — Vyskumná zpráva SVÚMT, Praha, nepublikované.
- [8] Kudrjavcev, I. V.: Vnuterní naprężení jako rezervu pevnosti v stavbě strojů, Moskva, Mašgiz 1951.
- [9] Kudrjavcev, I. V.: Ustaločeneja pročnost i ostatočnyje naprężenia v stali i čugune. — In: Kniha CHIITMAŠu, Č. 70, Moskva 1955.
- [10] Neuber, G.: Koncentracije naprężenij. Koncentracija napatí. Moskva OOIŽ 1947.
- [11] Užík, G. V.: Ob efektye masšaba pri peremennykh nagrękach. Sympósiu v únavě, Praha, 1960, s. 4.
- [12] Puchner, O.: Pevnost materiálu a jeho namáhání. — In: Sborník přednášek, Praha, Průmyslové vydavatelství 1951, s. 65—122.
- [13] Beljajev, N. M.: Trudy po teoriji uprugosti i plastičnosti. Práce z teorie pružnosti a plasticity. Moskva, Gosudarstvennoe izdatelstvo Technicko-teoretickésoj literatury 1957, s. 58.
- [14] Rudincyn, M. N.: Spravočnoe posobio po soprotivleniju materialov. Příručka pružnosti a pevnosti materiálův. Minsk, Gosudarstvennoe.
- [15] Höschl, C. a kol.: Tabulky pro konstruktéry. — Praha, SNTL, 1961, tab. C. 74.
- [16] Roš, M.: Die Ermüdung der Metallen — »ZAMM« 32, 1952, s. 130—145.
- [17] Frost, N. E.: A relation between the Critical Alternating Propagation Stress and Crack Length for Mild Steel. — Proc. Inst. Mech. Eng., V. 173.
- [18] Linhart, V.: Poznatky o šíření unavových trhlin — Prednesená konferencii »Mikroplastická deformace a únava kovu«, Brno, 20.—21. XI. 1963.
- [19] Puchner, O., Syč-Milý, J.: Zbrzděné unavové trhliny při vysokých jmenovitých napětích. — Strojnícky časopis SAV, Bratislava, 17, 1968, s. 371—390.

Avtorjev naslov: Ing. Jan Syč-Milý, Csc.,
Fakulteta za strojništvo
v Bratislavi, CSSR