

LITERATURA

trans = Transactions of the ASME, Journal of dynamic systems, Measurement, and Control.

[1] H. Chestnut, Systems engineering tools, John Wiley & Sons, 1966.

[2] L. Gyergyek, Teorija vezij in sistemov, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1978.

[3] H. M. Paynter, Analysis and design of engineering systems, MIT Press, Cambridge, Mass., 1961.

[4] R. C. Rosenberg, A user's guide to Enport-4, John Wiley & Sons, July 1974.

[5] D. Karnopp, R. Rosenberg, System dynamics: a unified approach, John Wiley & Sons, 1975.

[6] J. U. Thoma, Introduction to bond graphs and their applications, Pergamon Press, Oxford, 1975.

[7] P. E. Wellstead, Introduction to physical system modelling, Academic Press, 1979.

[8] V. D. Gebben, Bond graph bibliography for 1961—1976, trans, Vol. 99, series G, No. 2, jun. 1977, 9—14.

[9] R. C. Rosenberg, State-space formulation for bond graph models of multiport systems, trans, Vol. 93, series G, No. 1, mar. 1971, 35—40.

[10] J. U. Thoma, Bond graphs for thermal energy transport and entropy flow, J. of the Franklin Institute, Vol. 292, No. 2, Aug. 1971, 109—120.

[11] R. C. Rosenberg, D. C. Karnopp, A definition of the bond graph language, trans, Vol. 94, series G, No. 3, sep. 1972, 179—182.

[12] H. R. Martens, A. C. Bell, A logical procedure for the construction of bond graphs in systems modeling, trans, Vol. 94, series G, No. 3, sep. 1972, 183—188.

[13] R. C. Rosenberg, Multiport models in mechanics, trans, Vol. 94, series G, No. 3, sep. 1972, 206—212.

[14] F. T. Brown, Lagrangian bond graphs, trans, Vol. 94, series G, No. 3, sep. 1972, 213—221.

[15] G. F. Oster, D. M. Auslander, The memristor: a new bond graph element, trans, Vol. 94, series G, No. 3, sep. 1972, 249—252.

[16] F. T. Brown, Direct application of the loop rule to bond graphs, trans, Vol. 94, series G, No. 3, sep. 1972, 253—261.

[17] J. R. Ort, H. R. Martens, The properties of bond graph junction structure matrices, trans, Vol. 95, series G, No. 4, dec. 1973, 362—367.

[18] J. U. Thoma, Entropy and mass flow for energy conversion, J. of the Franklin Institute, Vol. 299, No. 2, feb. 1975, 89—96.

[19] D. Karnopp, Some bond graph identities involving junction structures, trans, Vol. 97, series G, No. 4, dec. 1975, 439—441.

[20] K. R. Young, L. L. Hoberock, J. G. Thompson, An algorithm for automatic reduction of complex signal flow graphs, trans, Vol. 98, series G, No. 4, dec. 1976, 367—374.

[21] B. W. Barnard, P. Dransfield, Predicting response of a proposed hydraulic control system using bond graphs, trans, Vol. 99, series G, No. 1, mar. 1977, 1—8.

[22] J. J. Dixhoorn, Simulation of bond graphs on mini-computers, trans, Vol. 99, series G, No. 1, mar. 1977, 7—14.

[23] D. Karnopp, A bond graph modeling philosophy for thermofluid systems, trans, Vol. 100, No. 1, mar. 1978, 70—75.

[24] R. C. Rosenberg, On gyrobondgraphs and their uses, trans, Vol. 100, No. 1, mar. 1978, 76—82.

[25] D. Karnopp, Pseudo bond graphs for thermal energy transport, trans, Vol. 100, No. 3, sep. 1978, 165—169.

[26] D. L. Margolis, D. C. Karnopp, Bond graphs for flexible multibody systems, trans, Vol. 101, No. 1, mar. 1979, 50—57.

[27] F. T. Brown, Energy-based modeling guasi coordinates, trans, Vol. 103, No. 1, mar. 1981, 5—13.

[28] R. Liebner, F. Abdullah, L. Finkelstein, Structure graphs: a new approach for interactive computer modelling of multi-energy domain systems, trans, Vol. 104, No. 2, jun. 1982, 143—150.

[29] P. C. Breedveld, Proposition for an unambiguous vector bond graph notation, trans, Vol. 104, No. 3, sep. 1982, 267—270.

[30] J. Thoma, Computer und Bondgraphen, Tech. Rundschau, J. 74, n. 43, 26. okt. 1982.

[31] D. Karnopp, Alternative bond graph causal patterns and equation formulations for dynamic systems, trans, Vol. 105, No. 2, jun. 1983, 58—63.

[32] A. Hussu, Modeliranje in simulacija s povezovalnimi grafi, Interklima, Zagreb, junij 1985.

Avtorjev naslov: doc. dr. Alojz Hussu, dipl. inž.,
Fakulteta za strojništvo,
Ljubljana

UDK 539.4:669.131.7

Trajna dinamična trdnost nodularne litine*

IGOR JANEŽIČ — FELIKS ČERNAK

1. UVOD

Železarna Štore ima v svojem izdelovalnem programu izdelavo nodularnih litin NL 42, NL 50 in NL 60. Nodularna litina je primerna za izdelavo različnih strojnih elementov, vendar jo konstrukterji malo uporabljajo, ker niso znane nekatere mehanske lastnosti. To je bil eden od glavnih vzrokov, da so se začele v Laboratoriju za strojne elemente na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani in Železarni Štore raziskave trajne dinamične trdnosti σ_D nodularnih litin NL 42, NL 50 in NL 60. Način preizkušanja in prikazovanja trajne dinamične trdnosti določa JUS C.A4.035.

Izdelali smo diagrame dinamične trdnosti (Smithove diagrame) za natezno-tlačno, upogibno in tor-

* Označbe v članku niso usklajene z novima standardoma JUS C.A4.001 in 002 (o katerih smo poročali v SV 1985/11—12), ker je bil članek pripravljen za tisk že pred izidom omenjenih standardov in bi vnovično popraviljanje stavka in izdelava novih klišejev povzročili preobčutne stroške. Prosimo bralce, da to upoštevajo.

Uredništvo

zijsko dinamično obremenitev. Pri vrednotenju trajne dinamične trdnosti smo uporabili statistično metodo.

2. KAKOVOST IN UPORABNOST NODULARNE LITINE

Nodularna litina je gradivo, v kateri se zaradi obdelave taline z magnezijem izloči grafit v obliki kroglic (nodulov), pri sicer približno enaki sestavi, kakršna je pri sivi litini (nekoliko višji odstotek C in Si). Po trdnostnih lastnostih je nad sivo litino in je podobna jekleni litini. Ugodna je za ulivanje, dodatkov za obdelavo je manj, obdelovalnost pa boljša kakor pri jekleni litini. Zaradi teh lastnosti nodularna litina hitro pridobiva pri uporabnosti na najrazličnejših področjih strojne tehnike, predvsem pa na področju delov za vozila, delov za hidravliko, kmetijskih strojev, armatur, gradbenih strojev in podobno. NL je določena po standardu JUS C.J2.022 (od leta 1974) glede na zagotovljene trdnostne lastnosti (meja plastičnosti, natezna trdnost, razteznost) in sestavo osnovnega gradiva. Imenovane vrednosti so podane v razpredelnici 1.

Razpredelnica 1

| Označba | Meja plastičnosti $\sigma_{0,2}$ N/mm ² | Natezna trdnost σ_M N/mm ² | Razteznost δ_5 % | Trdota HB | Struktura |
|---------|--|--|-------------------------|-----------|--------------|
| NL 38 | 240 | 380 | 17 | 140—180 | feritna |
| NL-42* | 280 | 420 | 12 | 150—200 | feritna |
| NL-50* | 350 | 500 | 7 | 170—240 | fer.-perlit. |
| NL-60* | 400 | 600 | 2 | 190—390 | perl.-ferit. |
| NL-70 | 450 | 700 | 2 | 290—300 | perlitna |

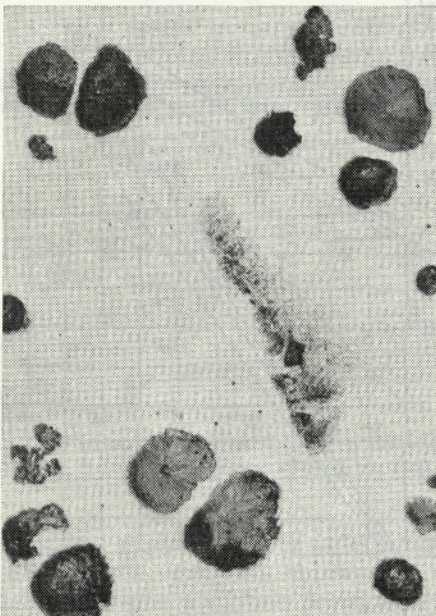
* Označene vrste so bile predmet raziskav.

3. MIKROSTRUKTURA NODULARNE LITINE

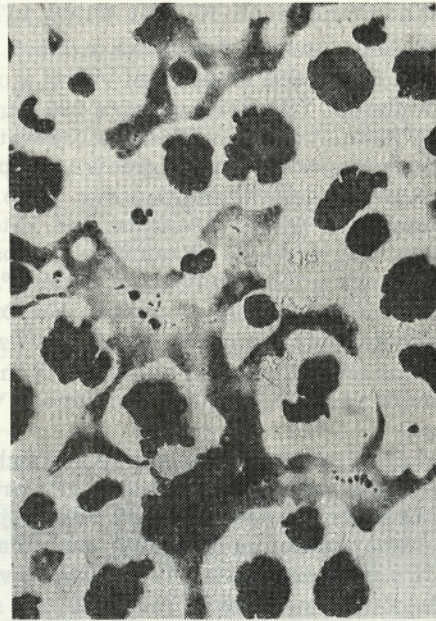
Lastnosti NL so določene z njeno strukturo. Za oceno mikrostrukture NL rabi predlog standarda JUS, ki obsega oceno oblike nodularnega grafitu in oceno mikrostrukturnih komponent osnovnega gradiva.

Ocena nodularnega grafitu obsega določitev grafitnih nodulov, stopnjo nodulacije in velikost ter število nodulov na mm². Nodularni grafit ocenjuje mo s primerjanjem stokratne povečave poliranega metalografskega vzorca s standardnimi vzorci. Standardni vzorci so razporejeni glede na uspešnost nodulacije po tipih v skupine K, L, M, N in O, kjer pomenijo: tip K — popolne nodule, tip L — nepopolne nodule, tip M — razbite nodule, tip N — razpršene nodule in tip O — odebeljene lamele. Tipi K, L in M predstavljajo uspelo nodulacijo. Stopnja nodulacije je definirana z deležem ogljika v odstotkih, ki je izločen v obliki nodulov (sl. 1, 2, 3). Velikost nodularnega grafitu je določena s premerom nodulov v μm in s številom nodulov na mm².

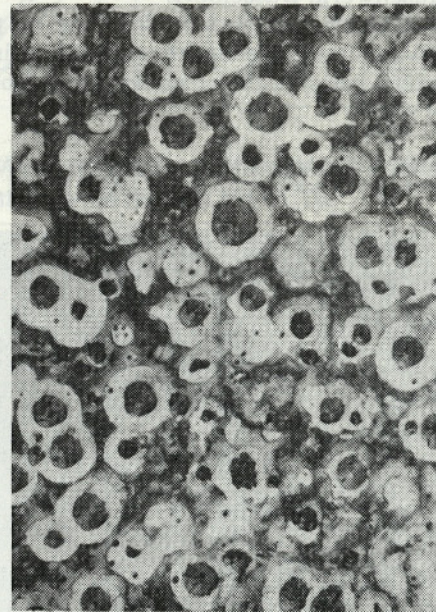
Oboje ocenjujemo prav tako glede na standardne vzorce.



Sl. 1. Struktura NL 42
ferit 100 % (100 : 1)



Sl. 2. Struktura NL 50
perlit 50 %, ferit 50 % (100 : 1)



Sl. 3. Struktura NL 60
perlit 80 %, ferit 20 % (100 : 1)

Doseči želimo, da bodo v NL grafitni vključki v popolni okrogli obliki, to je v obliki tipa K. V praksi takšno obliko težko dosežemo, prihaja pa do tipov L, M in N. Osnovna mikrostruktura določa kakovost NL. Za NL 42 je zaželeno, da vsebuje nad 70 % ferita. Pri naših vzorcih je bilo ferita 95 do 100 %, grafit je bil izločen v obliki tipov K in L. Za NL 50 želimo, da vsebuje nad 45 % ferita, preostalo pa perlit. V našem primeru vsebuje NL 50, 75 % ferita, grafit je v obliki tipov K in L. Za NL 60 je zaželeno, da ima pretežno perlitno strukturo, ki je imela v naših vzorcih 60 % grafitnih nodulov v oblikah K, L in M, cementita pa ni bilo.

4. PREIZKUŠANCI IZ NODULARNE LITINE

Za določanje trajne dinamične trdnosti NL 42, NL 50 in NL 60 so uliti standardni vzorci z označbo Y 2 po standardih TGL 8189, skupina 290 (standardi DDR, april 1962). Vzorci so vlivani iz laboratorijsko pripravljene gradiva in iz gradiva, pripravljene v rednem izdelovalnem procesu. Tako so dejansko opravljeni dvojni preizkusi, pri katerih je ugotovljeno, da je trajna dinamična trdnost gradiva, dobljena v laboratorijih, za okoli 5 % višja od gradiva, pripravljene v praksi. Vsi preizkušanci enake kakovosti gradiva so bili uliti iz istega vložka. V nadaljevanju bomo obravnavali in prikazali rezultate raziskav gradiva, dobljene v Železarni Štore.

Iz enakega gradiva so izdelani tudi preizkušanci za ugotavljanje mehanskih lastnosti NL pri statični obremenitvi. Določeni so bili naslednji parametri: natezna trdnost σ_M v N/mm^2 , meja plastičnosti $\sigma_{0,2}$, v N/mm^2 , raztezek δ_5 v % in Brinellova trdota. Za določitev mehanskih lastnosti pri statični obremenitvi je bil uporabljen trgalni stroj podjetja Lossenhausenwerk, Düsseldorf.

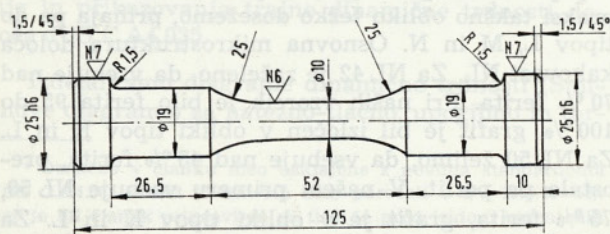
Metalografska struktura je določena na podlagi standardnih vzorcev. Mehanske lastnosti raziskovalnega gradiva pri statični obremenitvi so podane v razpredelnici 2.

Razpredelnica 2: Mehanske lastnosti NL 42, NL 50 in NL 60 pri statični obremenitvi

| Natezni preizkus | | NL 42 | NL 50 | NL 60 |
|--|----------|---------|---------|---------|
| Natezna trdnost σ_M | N/mm^2 | 420—450 | 510—580 | 630—670 |
| Meja plastičnosti $\sigma_{0,2} = \sigma_T$ | N/mm^2 | 350—400 | 420—480 | 490—580 |
| Raztezek | % | 12—20 | 9—13 | 3—6 |
| Trdota po Brinellu | HB | 150—170 | 180—210 | 210—240 |
| Upogibni preizkus $\sigma_{0,2} = \sigma_T$ | N/mm^2 | 440—460 | 560—580 | 630—640 |
| Torzijski preizkus $\sigma_{0,2} = \sigma_T$ | N/mm^2 | 240—245 | 310—320 | 350—360 |

5. DIAGRAMI TRAJNE DINAMIČNE TRDNOSTI ZA NL 42, NL 50 in NL 60 PRI NATEZNOTLAČNI OBREMENITVI

Za določitev diagramov trajne dinamične trdnosti so pripravljene preizkušanci iz NL po sliki 4.



Sl. 4. Velikost in oblika preizkušanca za ugotavljanje trajne dinamične trdnosti pri natezno-tlačni obremenitvi

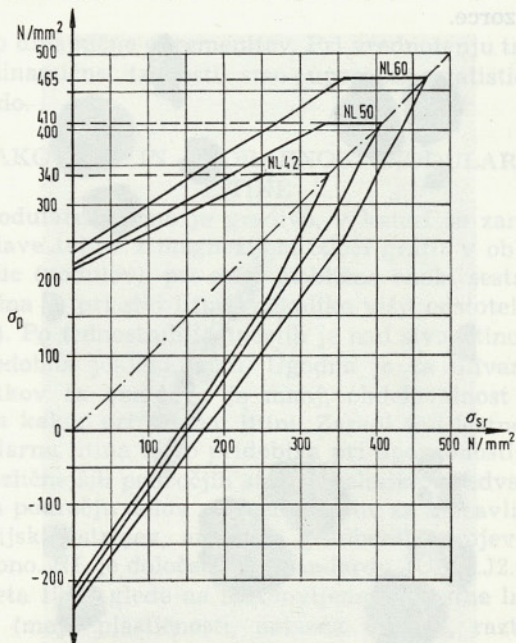
Preizkusi so izvedeni na resonančnem vibracijskem stroju $6 M_p \pm 3 M_p$, tovarne Schneck, pri frekvenci 33 do 35 Hz. Hrapavost površine na preizkušancu je $R_a = 1,5$ do $2 \mu m$, $R_{maks} = 10$ do $19 \mu m$.

Za določitev trajne dinamične trdnosti nodularne litine je uporabljena statistična metoda spremembe napetostnih nivojev. Pri tej metodi statistično določimo trajno dinamično trdnost pri določeni srednji napetosti in spreminjajoči amplitudni napetosti. Vsak preizkušaneec je obremenjen do $N = 5 \cdot 10^6$ nihajev, če se prej ne poruši.

Postopek preizkusa poteka takole:

Prvi preizkušaneec obremenimo z določeno srednjo in amplitudno silo, tako da se v njem pojavi napetost, ki je blizu napovedane trajne dinamične trdnosti za določeno napetostno področje. Če se preizkušaneec zlomi, znižamo obremenitev drugega preizkušanca za konstantno amplitudno napetostno stopnjo $\Delta\sigma(\Delta\tau_t)$. Napetost zmanjšujemo po stopnjah tolikokrat, da eden od preizkušancev zdrži $5 \cdot 10^6$ nihajev. Naslednji preizkušaneec ima zopet za $\Delta\sigma(\Delta\tau_t)$ večjo napetost. Napetost povečujemo po stopnjah tolikokrat, da se pri enem preizkušancu pojavi porušitev, preden dosežemo $5 \cdot 10^6$ nihajev. Trajno dinamično trdnost σ_D za izbrano vrsto in področje obremenitve izračunamo s spremembo napetostnih nivojev. Za zanesljivo statistično vrednotenje dobljenih rezultatov obremenimo 22 do 25 preizkušancev.

Za določitev krivulje trajne dinamične trdnosti v diagramu potrebujemo vsaj tri napetostna področja. Normalno izberemo čisto izmenično in utripno področje. Diagram dinamične trdnosti za NL pri natezno-tlačni in upogibni obremenitvi prikazujeta diagrama na slikah 5 in 8.



Sl. 5. Diagram trajne dinamične trdnosti za NL 42, NL 50 in NL 60 pri natezno-tlačni obremenitvi

Trajno dinamično trdnost σ_D izračunamo po obrazcu:

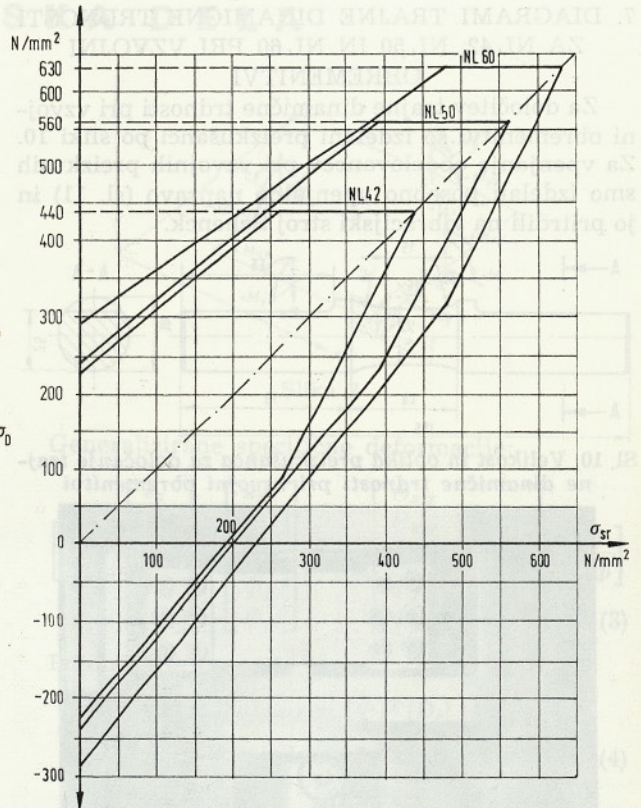
$$\sigma_D = \sigma_{sr} + \sigma_A - s, \text{ pri čemer pomenijo:}$$

σ_{sr} — srednjo napetost, σ_A — amplitudno napetost in s — standardni odklon napetosti.

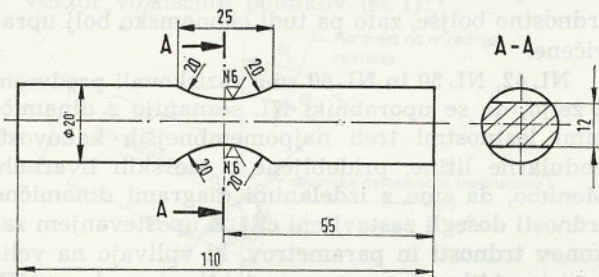
Za določitev diagrama trajne dinamične trdnosti pri natezno-tlačni obremenitvi (sl. 5) so s preizkusi določene tri vrednosti σ_D na različnih napetostnih področjih. NL 42 je preizkušena na napetostnih področjih pri $\sigma_{sr2} = 0$; 165,5 N/mm² in 250 N/mm², NL 50 pri $\sigma_{sr} = 0$; 191 N/mm² in 255 N/mm² ter NL 60 pri $\sigma_{sr} = 0$; 203,7 N/mm² in 273,7 N/mm². V vseh treh primerih pa se je spreminjala amplitudna napetost z napetostno stopnjo $\Delta\sigma = 12,7$ N/mm², tako da smo dobili več napetostnih nivojev.

6. DIAGRAMI TRAJNE DINAMIČNE TRDNOSTI ZA NL 42, NL 50 IN NL 60 PRI UPOGIBNI OBREMENITVI

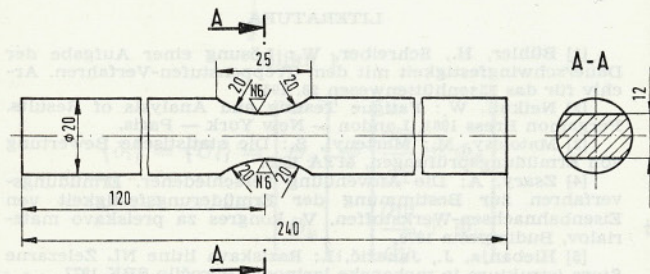
Za določitev upogibne trajne dinamične trdnosti so izdelani preizkušanci po sliki 6 za utripno obremenitev in po sliki 7 za izmenično upogibno obremenitev. Rezultat preizkusov so diagrami trajne dinamične trdnosti (sl. 8).



Sl. 8. Diagrami trajne dinamične trdnosti za NL 42, NL 50 in NL 60 pri upogibni obremenitvi

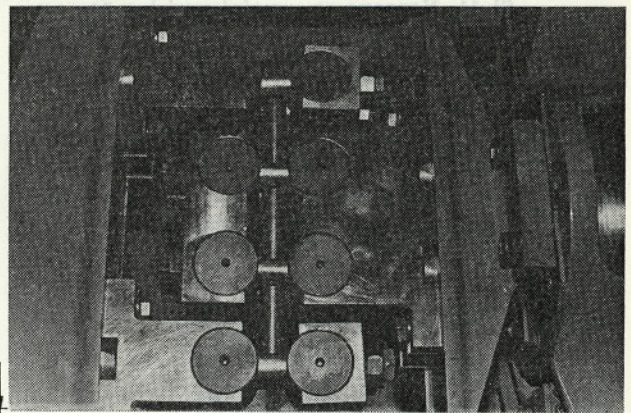


Sl. 6. Velikost in oblika preizkušanca za določanje trajne dinamične trdnosti pri utripno upogibni obremenitvi



Sl. 7. Velikost in oblika preizkušanca za določanje trajne dinamične trdnosti pri izmenično upogibni obremenitvi

Za upogibno preizkušanje je izdelana v laboratorijih FS posebna vpenjalna naprava, ki omogoča izmenično in utripno upogibno preizkušanje na vibracijskem stroju. Naprava in način vpetja preizkušanca v napravo je razvidna s slike 9.



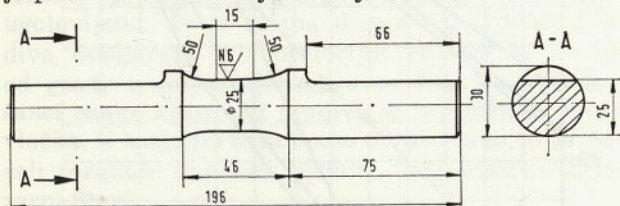
Sl. 9. Naprava za upogibno preizkušanje

NL 42 je preizkušena pri napetostnem področju $\sigma_{sr} = 0$ in spremenljivi amplitudni napetosti z napetostno stopnjo $\Delta\sigma = 15$ N/mm²; nadalje pri napetostnem področju $\sigma_{sr} = 101,5$ N/mm² in $\sigma_{sr} = 232$ N/mm² ter spremenljivi amplitudni napetosti z napetostno stopnjo $\Delta\sigma = 14,5$ N/mm².

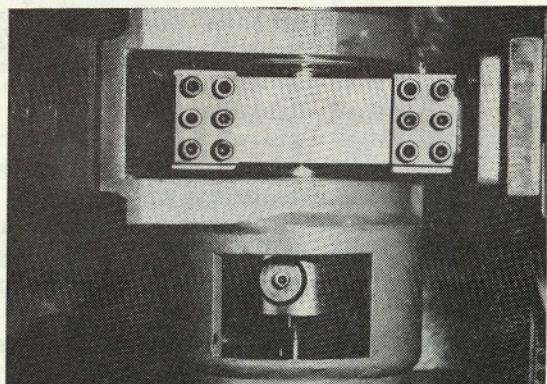
NL 50 je preizkušena pri $\sigma_{sr} = 0$; $\sigma_{sr} = 101,5$ N/mm² in $\sigma_{sr} = 290$ N/mm²; NL 60 je preizkušena pri $\sigma_{sr} = 0$; $\sigma_{sr} = 145$ N/mm² in $\sigma_{sr} = 290$ N/mm². V obeh primerih pa se je spreminjala amplitudna napetost z napetostno stopnjo $\Delta\sigma = 14,7$ N/mm², s čimer je dobljeno več napetostnih nivojev.

7. DIAGRAMI TRAJNE DINAMIČNE TRDNOSTI ZA NL 42, NL 50 IN NL 60 PRI VZVOJNI OBREMENITVI

Za določitev trajne dinamične trdnosti pri vzvojni obremenitvi so izdelani preizkušanci po sliki 10. Za vpenjanje obdelovancev pri vzvojnih preizkusih smo izdelali posebno vpenjalno napravo (sl. 11) in jo pritrdili na vibracijski stroj Schenck.



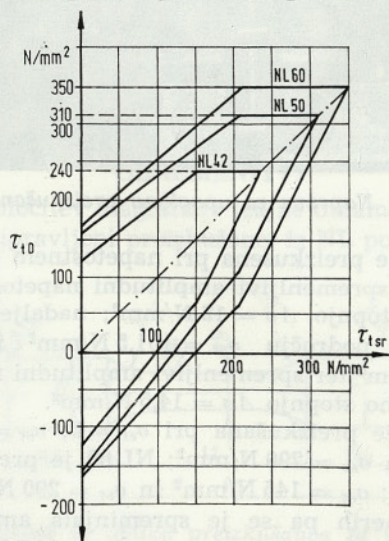
Sl. 10. Velikost in oblika preizkušanca za določanje trajne dinamične trdnosti pri vzvojni obremenitvi



Sl. 11. Naprava za vzvojni preizkus

Trajna dinamična vzvojna trdnost τ_{TD} je dobljena z uporabo statističnega vrednotenja rezultatov preizkusov in izračunana po obrazcu:

$\tau_{TD} = \tau_{tsr} + \tau_{tA} - s$, pri čemer so τ_{tsr} — srednja torzijska napetost, τ_{tA} — amplitudna torzijska napetost in s — standardna deviacija vzvojne napetosti. Slika 12 prikazuje take diagrame.



Sl. 12. Diagrami trajne dinamične trdnosti za NL 42, NL 50 in NL 60 pri vzvojni obremenitvi

Tudi pri torzijski obremenitvi so se preizkusi izvajali na treh napetostnih področjih, in sicer za NL 42 pri $\tau_{tsr} = 0$, $\tau_{tsr} = 70 \text{ N/mm}^2$ in $\tau_{tsr} = 125 \text{ N/mm}^2$; za NL 50 pri $\tau_{tsr} = 0$; $\tau_{tsr} = 102,7 \text{ N/mm}^2$ in $\tau_{tsr} = 182,5 \text{ N/mm}^2$; za NL 60 pri $\tau_{tsr} = 0$, $\tau_{tsr} = 102,7 \text{ N/mm}^2$ in $\tau_{tsr} = 205,4 \text{ N/mm}^2$. V vseh treh primerih pa se je spreminjala amplitudna napetost z napetostno stopnjo $\tau_{tA} = 11,4 \text{ N/mm}^2$.

8. SKLEP

Dobljeni rezultati kažejo, da kakovost raziskane NL ustreza standardom JUS kakor tudi DIN glede mehanskih lastnosti pri statični obremenitvi. Vrednosti pri dinamičnih obremenitvah NL v standardih JUS še niso podane, zato jih lahko primerjamo le z drugimi standardi. Trajno dinamično trdnost gradiva pri določeni obremenitvi preizkušanca je dobljena tako, da upoštevamo njeno spodnjo mejo. To pomeni, da je upoštevan tudi raztros napetosti »s« v izbranem napetostnem področju.

Navedeni rezultati raziskav nodularne litine so konstrukterju in uporabniku poglavitni podatek pri izbiri ustreznega gradiva za izdelavo strojnega dela. NL je po trdnostnih lastnostih podobna jekleni litini, po obdelovalnosti pa precej ugodnejša od nje. Zaradi svojih tehničnih in ekonomskih prednosti bo NL spremenila vrsto konstrukcijskih izvedb, ki bodo z njeno uporabo tehnološko manj zahtevne in trdnostno boljše, zato pa tudi ekonomska bolj upravičene.

NL 42, NL 50 in NL 60 smo raziskovali predvsem z željo, da se uporabniki NL seznanijo z dinamičnimi lastnostmi treh najpomembnejših kakovosti nodularne litine, pridobljene v štorskih livarnah. Menimo, da smo z izdelanimi diagrami dinamične trdnosti dosegli zastavljeni cilj. Z upoštevanjem zakonov trdnosti in parametrov, ki vplivajo na velikost in obliko elementov, so dobljene vrednosti NL uporabne pri dimenzioniranju in konstruiranju strojnih delov.

LITERATURA

- [1] Bühler, H., Schreiber, W.: Lösung einer Aufgabe der Dauerschwingfestigkeit mit dem Treppenstufen-Verfahren. Archiv für das Eisenhüttenwesen 28, 1957.
- [2] Neikull, W.: Fatigue Testing and Analysis of Results. Pergamon Press 1961, London — New York — Paris.
- [3] Matolcsy, M.; Martenyi, S.: Die statistische Bewertung von Ermüdungsprüfungen, MTA 1965.
- [4] Zsary, A.: Die Anwendung verschiedener Ermüdungsverfahren zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von Eisenbahnradschienen-Werkstoffen. V. kongress za preiskavo materialov, Budimpešta 1970.
- [5] Hlebanja, J., Janežič, I.: Raziskava litine NL Železarne Store (struktura in mehanske lastnosti) Poročilo SBK 1977.
- [6] Günter, W.: Schwingfestigkeit, VEB Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- [7] Janežič, I., Černak, F.: Raziskava statičnih in dinamičnih lastnosti nodularne litine, Poročilo RSS, 1979.
- [8] JUS standard C.A4.035 in C.J2.022.
- [9] Janežič, I., Černak, F.: Raziskava statičnih in dinamičnih lastnosti nodularne litine, Poročilo RSS, 1980 in Poročilo RSS 1981.

Naslava avtorjev: prof. dr. Igor Janežič, dipl. inž.,
FS LJUBLJANA,
Feliks Černak, dipl. inž. str.,
ZELEZARNA STORE