

KHM - NSVL

Tallinna Polütehniline Instituut

Masinaelementide kateeder

ABSOLUUTSETE MÕÖTMETE MÕJU ERINEVATEL KOORMAMISE

SAGEDUSTEL ÜLEPINGETE PIIRKONNAS

Teaduslik-tehniline aruanne

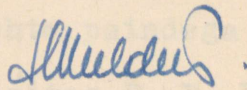
Tallinna
Polütehnilise Instituudi
Raamatukogu

T-637

Teaduslik juhendaja: -

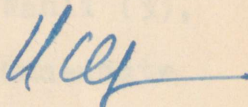
Vastutav teostaja:

tehn.tead.kand.


(H. Kuldma)

Teostajad: -

TPI direktori asetäit-
ja teadusliku töö alal


(H. Lepikson)

Tallinn, 1957.

1. S I S S E J U H A T U S

Materjalide väsimustugevuse tähtsus kaasaja masinaehituses on üldtuntud. Ainult väsimustugevuse võimalikult täpne teadmine võimaldab konstruktoril luua masinaid ja detaile, mis ettenähtud töötingimuste ja ea korral omaksid minimaalse gabariidi ja kaalu.

Enamikul juhtudel on konstruktoril materjali väsimustugevuse hindamiseks kasutada andmed, mis on saadud proovikehade proovimisel laboratoorsetes tingimustes. Proovikehade läbimõõt niisugustel proovimistel on harva suurem kui 5 kuni 12 mm.

Kuigi materjalide väsimuse küsimusi on uuritud rohkem kui saja aasta vältel, jõuti alles võrdlemisi hiljuti järelduseni, et üldkasutatav näitaja - väsimuspiir - sõltub suurel määral ka proovikeha läbimõõdust.

Esimesi andmeid väsimuspiiri alanemise kohta paindega koormatud proovikehade mõõtmete suurenemisel esitas R. E. Peterson (1) 1929.aastal. Koos edasiste andmete saamisega Faulhaberi, Buchholtzi ja Schultzi (2), Petersoni ja Wahli (3), Horgeri ja Neiferti (4) jt. töödest selgus kolmekümnendate aastate lõpuks, et eriti suur on väsimuspiiri vähenemine mõõtmete suurenemisel pingekontsentraatori olemasolul. Nii näiteks oli Petersoni (5) katsetel täheldatud pingekontsent-

raatoriga proovikehadel ($C = 0,57\%$) läbimõõdu suurenemisel vahemikus 5 kuni 76 mm väsimuspiiri alanemine 29,5 kuni 33%.

Väsimuspiiri alanemine proovikeha mõõtmete suurenemisel esineb ka väändel, kus (6) läbimõõdu suurenemine 14 kuni 45 mm-ni kutsus esile väsimuspiiri alanemise 29% võrra.

Esimesed süstematiseeritud ülevaated proovikehade absoluutsete mõõtmete mõju kohta väsimuspiirile annab NSV Liidus A. I. Petrussevitš (7, 8). Neljakümnendatel aastatel ilmuvad mitmed detaili absoluutsete mõõtmete mõju käsitavad huvitavad tööd, millest eelkõige tuleks nimetada N. N. Afanasjevi (6) ja I. A. Odingu (9) omi. Nende tööde analüüs esitatakse hiljem. Muuseas esitab S. V. Serensen (10) hulgaliste andmete läbitöötamise tulemusena üldistatud andmed absoluutsete mõõtmete mõju suuruse kohta (joon. 1); see graafik on jäänud üldkasutatavaks käsiraamatuliseks materjaliks tänapäevani.

Absoluutsete mõõtmete mõju siledatel proovikehadel hinnatakse normaal- või vst. tangentsiaalpingete puhul teguriga

$$\epsilon_{\sigma} = \frac{(\sigma_{-1})_d}{(\sigma_{-1})_{d_0}} \text{ või } \epsilon_{\tau} = \frac{(\tau_{-1})_d}{(\tau_{-1})_{d_0}}, \quad (1)$$

kus $(\sigma_{-1})_d$ ja $(\tau_{-1})_d$ on detaili, läbimõõduga d , väsimuspiir, $(\sigma_{-1})_{d_0}$ ja $(\tau_{-1})_{d_0}$ - laboratoorse, detailiga konfiguratsioonilt sarnase proovikeha väsimuspiir.

Pingekontsentraatoriga proovikehadele absoluutsete mõõtmete tegurid on

$$\varepsilon_{\sigma k} = \frac{(\sigma_{-1k})_d}{(\sigma_{-1k})_{d_0}} \quad \text{või} \quad \varepsilon_{\tau k} = \frac{(\tau_{-1k})_d}{(\tau_{-1k})_{d_0}}; \quad (2)$$

ka siin on detail läbimõõduga d ja proovikeha läbimõõduga d_0 geomeetriliselt sarnased.

2. EKSPERIMENTAALSETEST ANDMETEST SAADUD JÄREL- DUSED JA KATSED SELGITADA ABSOLUUTSETE MÕÖT- METE MÕJU

Peamised kvalitatiivsed seaduspärasused, mis põhinevad paljude uurijate poolt saadud eksperimentaalsete materjalide läbitöötamisel, oleksid kokkuvõetult järgmised:

1. Proovikehade (detailide) mõõtmete suurenemisel väsimuspiir paindel ja väändel alaneb. Vähenemine on eriti suur läbimõõduni kuni umbes 50 mm. Tõmbel-survel väsimuspiiri alanemist ei esine või esineb väga väikesel määral.

2. Pingekontsentraatori olemasolul esineb absoluutsete mõõtmete mõju teravamalt kui siledate proovikehade puhul.

3. Absoluutsete mõõtmete mõju tegur on suurem neil materjalidel, millistel esineb kõrgem kontsentratsioonitundlikkus (kõrgemate mehaaniliste omadustega terased, legeeritud terased).

4. Proovikehade mõõtmete suurendamine tingib väsimuskõvera kaldse osa jätkumist kõrgema tsüklite arvu piirkonda (kuni $300 \cdot 10^6$).

5. Pindkalestamise positiivne efekt väsimustugevusele nõrgeneb proovikeha mõõtmete suurendamisel.

6. Vähene hulk andmeid, mis on saadud absoluutsete mõõtmete mõju kohta korrodeerivas keskkonnas, näitavad proovikeha läbimõõdu suurenemisel väsimustugevuse tõusu.

Absoluutsete mõõtmete mõju põhjuste selgitamiseks on esitatud mitmeid hüpoteese.

1. A.Oding (9) toob esile viis peamist põhjust, millede abil on püütud selgitada absoluutsete mõõtmete mõju (masstaabi efekti) olemust. Need oleksid:

- 1) materjali kvaliteet;
- 2) pingete gradient;
- 3) metalli mikroruumalade pingestatuse ja mehaaniliste omaduste ebahühtlus (statistiline tugevusteorია);
- 4) metalli tsüklilise sitkuse ja tera mõõtmete koost mõju;
- 5) tehnoloogia (lõikerežiim proovikehade valmistamisel).

Et katsetulemused on suurel määral sõltuvad proovikehade valmistamise tehnoloogiast, on võetud vaidlusteta arvesse peaaegu kõikide uurijate poolt. Mehaaniline töötlemine põhjustab pindkihi tunduvat kalestumist, kutsudes esile pind-

kihis nimetamisväärseid jääksurvepingeid. Jääksurvepingete positiivne mõju väsimustugevusele on hästi tuntud (11). Jääkpinged pindkihis, liitudes mingi välisjõududest põhjustatud sümmeetrilise pingetsükli pingetega, annavad tulemusena asümmeetrilise pingetsükli, kus keskmine pinge on negatiivne. Järelikult võib piiramplituud niisuguses olukorras, võrreldes sümmeetrilise tsükli amplituudiga, olla kõrgem. Mehaanilise töötlemise sama režiimi mõju erinevate läbimõõdudega proovikehadele on erinev - tema suhteline mõju on suurem väiksemate läbimõõdude puhul. Siit on hõlpus järeldada, et mehaaniline lõiketöötlemine tõstab väiksema läbimõõduga proovikehadel väsimuspiiri rohkem kui suure läbimõõduga proovikehadel. Nii näiteks J. A. Odingu katsetes (9), kus mehaaniline töötlemine viidi erineva läbimõõduga proovikehadele (6 ja 13 mm) läbi ühel ja samal režiimil, olid väsimuspiirid vastavalt 17,5 ja 16,3 kg/mm². Samal režiimil töödeldud, kuid peale mehaanilist töötlemist vaakumis kõrgele noolutusele (600°) allutatud proovikehad näitasid mõlema läbimõõdu puhul võrdset väsimuspiiri 16,0 kg/mm².

Laiendatud programmi alusel tehtud järgmiste katseseriade läbitöötamise tulemusena peab I. A. Oding võimalikuks väita, et tal ei olnud võimalik kindlaks määrata absoluutsete mõõtmete mõju põhjustajatena ei materjali kvaliteeti, pingete gradienti ega ka metalli mikroruumalade mehaaniliste omaduste ebahühtlust. Igal juhul nende võimalik mõju kasutatud täpsuse juures ei ilmnenu.

Peamiseks põhjuseks mõõtmete absoluutse mõju esinemisel peab I. A. Oding aga metalli tsüklilise sitkuse ja tera suuruse koosmõju. Võttes aluseks oma hüpoteesi pingete kontsentratsiooni alanemisest plastiliselt deformeermisel, näitab autor, et proovikeha väsimuspiir sõltub plastiliselt deformeerunud kihi kaugusest neutraalteljest

$$r_w = r \cdot \frac{\sigma_w}{\sigma_w + \Delta_w E},$$

kus r_w on plastiliselt deformeerunud kihi kaugus neutraalteljest;

r - proovikeha raadius;

σ_w - proovikeha materjali väsimuspiir tõmbel-survel;

Δ_w - hüstereesise sõlme laius väsimuspiiril, mõõdetud esimestel tsüklitel;

E - proovikeha materjali elastsusmoodul.

Kuna aga plastiline deformatsioon haarab alati tera teravikuna, siis plastiliselt deformeerunud kihi kauguse määramisel tuleb kasutada suurust $r_w - \Delta r$, kus Δr on tera ristlõike keskmine suurus (antud materjalile antud termilise töötuse puhul $r = \text{const}$). Seega jääb väsimuspiir sõltuma seosest

$$n = \frac{r_w - \Delta r}{r} = \frac{r_w}{r} - \frac{\Delta r}{r}, \quad (3)$$

kus teine liige sõltub proovikeha läbimõõdust, vähenedes läbimõõdu suurenemisega. Tera suuruse mõju väsimuspiirile on suur neil juhtudel, kus see on samas suurusjärgus defor-

meerunud kihi paksusega. Seega proovikeha suuremate läbimõõtude puhul osutub tera suuruse mõju väga väikeseks.

Seoses I. A. Odingu hüpoteesiga tera suuruse mõjust on huvipakkuv ka R. E. Petersoni (12) töö. Autor seob proovikeha väsimuspiiri proovikeha teatud ruumalas olevate terade arvuga. Niisuguse ruumala määrab Peterson meelevaldselt, võttes selleks ala, kus pinge maksimaalne väärtus alaneb 5% võrra. Joonisel 2 on toodud Petersoni poolt esitatud katseandmed. Ordinaatteljele on kantud kontsentratsioonitundlikkuse tegur

$$q = \frac{\beta - 1}{\alpha - 1},$$

kus β on efektiivne pingete kontsentratsiooni tegur, s.t.

sileda proovikeha ja detaili väsimuspiiride suhe;

α - teoreetiline pingete kontsentratsiooni tegur (eeldades ainult elastsete deformatsioonide olemasolu).

Võib järeldada, et sama maksimaalne pinge, sama pingajaotuse ja sama terasuuruse juures on proovikeha väiksemate läbimõõtude puhul 5%-lise pingete alanemisega määratud ala, järelikult ka selles alas olev terade arv, väiksem kui suurema läbimõõdulises proovikehas. Väiksemale terade arvule vastab madalam q väärtus, mis omakorda viitab proovikeha väsimuspiiri tõusule. Tera suuruse vähenemine kutsudesile q suurenemise, s.t. väsimuspiiri alanemise.

Siin on väsimustugevus viidud seosesse otseselt pingete gradiendiga.

Enamikul juhtudel ongi tööde autorid püüdnud absoluutsete mõõtmete mõju selgitada, lähtudes pingete gradiendist, võttes seejuures arvesse metalli mikroruumalade pingestatuse ja mehaaniliste omaduste ebaühtlust, samuti ka metalli sisemise ehituse võimalikke defekte.

Kõige täielikumalt on seni nimetatud mõjusid käsitletud N. N. Afanasjevi poolt esitatud metallide väsimuse teoorias (6). N. N. Afanasjev märgib, et reaalses metallis esinevad terad (kristaliidid) on erinevalt orienteeritud, mille tõttu üksikute terade voolavuspiir jõu mõjumise suunas osutub erinevaks. Koormamisel osutuvad terad ka erinevalt pingestatuks, kuna struktuuris esinevad ka mitmesugused ebaühtlused (poorid, lisandid, terade servade mõju). Autor näitab, et edasiseks käsitluseks võib ülesannet lihtsustada, kas eeldades, et kõikide terade voolavuspiirid mõjuva jõu suunas on võrdsed, kuid terad on erinevalt pingestatud, või eeldades, et pinged terades on erinevate voolavuspiiride puhul samad.

Metalli terade voolavuspiiride sageduskõver

$$f\left(\frac{\sigma}{a}\right) = f(z) = - \frac{\varepsilon^3 E}{2 \sigma_T} \cdot \frac{d^2 \sigma_\varepsilon}{d\varepsilon^2}, \quad (5)$$

kus ε on pikenemine,

E - elastsusmoodul,

σ_T - voolavuspiir,

on määratud proovikeha tõmbediagrammi võrrandi 2. tuletisega.

Kalestuse arvesse võtmisel eeldab autor voolavuspiiri suuruse ja plastilise deformatsiooni vahel lineaarset sõltuvust. Sümmeetrilise koormustsükli (deformatsiooni järgi) jaoks

saadakse võrrand

$$\sigma_{-2} = -\sigma_{\varepsilon_0} - \frac{b}{1+b} (\varepsilon_0 E - \sigma_{\varepsilon_0}), \quad (6)$$

milles b on proportsionaalsuse tegur kalestusel. Esitatud võrrandi teine liige määrab pinge juurdekasvu esimese koormustsükli poolperioodi lõpul deformatsiooni amplituudi jääva väärtuse ε_0 puhul. Pinge konstantsamplituudi puhul saadakse vastavalt deformatsiooni amplituudi sumbumine.

Vahelduval deformeerimisel tekib enam pingestatud terades plastiline deformatsioon juba siis, kui kogu proovikeha suhtes ei ole voolavuspiir veel saabunud. Niisuguste üksikute terade jaoks saab N. N. Afanasjev N -da poolperioodi lõpuks voolavuspiiri suuruseks

$$\sigma_{\tau_N} = \sigma_a - \frac{1}{(1+b)^N} (\sigma_a - \sigma_{\tau_0}); \quad (7)$$

siin σ_a on taandatud pinge antud teraspe; $\sigma_a = E \varepsilon_a$, kus on deformatsiooni amplituud;

σ_{τ_0} - esialgne voolavuspiir.

Purunemine teras toimub aga juhul, kui σ_{τ} saavutab väärtuse, mis on võrdne lahkmurrutugevusega σ_{ℓ} . Vastava poolperioodide arvu N saame eelmise võrrandi ümberkujundamisel:

$$N \lg(1+b) = \lg \frac{\sigma_a - \sigma_{\tau_0}}{\sigma_a - \sigma_{\tau_N}}. \quad (8)$$

Juhul, kui b on ühega võrreldes küllalt väike, saame:

$$N = \frac{1}{b} \ln \frac{\sigma_a - \sigma_{\tau_0}}{\sigma_a - \sigma_{\tau_N}}. \quad (9)$$

Kui asetada võrrandisse (9) σ_{τ_N} asemele tema kriitiline väärtus

tus σ_c , siis saame väsimuskõvera võrrandi üksiku tera kohta.

Üksikutes terades kriitilise pinge ületamisel tekkinud praod ei põhjusta aga veel prao tekkimist proovikehas, sest teras tekkinud praod kujutavad endast struktuuri enese ebaühtlustega sama järgu ebaühtlusi. Proovikeha purunemiseks on vaja, et kõrvuti asuks küllaldane arv n teri, milles kriitilise pinge ületamise tõttu tekib pragu.

N. N. Afanasjev näitab, et pingete sageduskõver on otsustavalt esitada kujus

$$F(z) = \frac{z^k}{A^k + z^k}, \quad (10)$$

kus $F(z)$ on üksikute terade pingestatuse statistilise jaotuse tõenäosuse funktsioon,

$$z = \frac{\sigma}{a}; \quad a = \xi E,$$

A ja k - materjali konstandid.

Proovikeha väsimuspurunemise tõenäosus määratakse tõenäosusega, et kõrvuti asuksid n tera, milledes pinge sageduskõvera kohaselt ületaks kriitilise pinge. Vastavalt sellele väsimuspurunemise tingimus võtab kuju

$$W \frac{L}{n} \geq 1,$$

kus W on tõenäosus, et proovikeha mahus olevast L terast asuks kõrvuti n tera, sest L tera puhul võiks selliseid agregaatide n terast olla $L : n$.

Võttes

$$\frac{L}{n} = C_1 V,$$

kus V on proovikeha ruumala ja

C_1 - proportsionaalsuse tegur,

saame, et

$$C_1 V W = 1.$$

Peale lihtsustamist saame, et

$$C V^k = 1.$$

Valtsitud ja sepistatud metallide puhul eeldab N. N. Afanasjev, et nende kiulise struktuuri tõttu üleminek ühest ristlõikest teise ei too endaga kaasa uut pingete jaotust ja järelilikult võib niisugusel juhul piirduda ristlõike vaatlemisega:

$$C F^k = 1,$$

kus F on proovkeha ristlõike pindala.

Väsimuspiiri sümmeetrilisel tsüklil määrame proovikeha sel juhul võrdusega

$$C F_{-1}^k = 1. \quad (11)$$

V. P. Kogajev (13) näitab viimase võrrandi alusel seose tuletamist absoluutsete mõõtmete mõju teguri jaoks paindel ümmarguste siledade proovikehade pöörlemisel. Sel juhul pingete muutumist raadiuse suunas esitab seos

$$\sigma_{\rho} = \sigma_{\max} \cdot \frac{\rho}{r}, \quad (11)$$

kus ρ on jooksev raadius,

$\sigma_{\max}$ - paindepinge pinnal,

$r = \frac{d}{2}$ - proovikeha raadius.

Kuna purunemine võib toimuda ringjoone mistahes punktis, siis elementaarpinnana dF tuleb vaadelda rõngast, mille raadius on ρ ja laius $d\rho$:

$$dF = 2\pi\rho d\rho.$$

Integreerides üle kogu pinna võrdust (11),

$$\int_0^r c(\sigma_{\max} \cdot \frac{\rho}{n})^k \cdot 2\pi\rho d\rho = 1,$$

saame, et

$$cF \sigma_{-1}^k \cdot \frac{2}{k+2} = 1, \quad (12)$$

kus F on ristlõike pindala ja

$\sigma_{-1} = \sigma_{\max}$ - proovikeha väsimuspiir.

Võrrandi (12) võib kirjutada proovikehade jaoks, millede läbimõõdud on vastavalt d_1 ja d_2 :

$$c \cdot \frac{\pi d_1^2}{4} (\sigma_{-1})_{d_1}^k \cdot \frac{2}{k+2} = 1$$

$$c \cdot \frac{\pi d_2^2}{4} (\sigma_{-1})_{d_2}^k \cdot \frac{2}{k+2} = 1.$$

Jagades esimese võrduse teisega ja võttes juure, saame

$$\frac{(\epsilon_{-1})_{d_1}}{(\epsilon_{-1})_{d_2}} = \sqrt[k]{\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2} . \quad (13)$$

Saadud suhe on kehtiv ideaalselt siledade pindade puhuks. Kui pind on tugevalt defektne, siis

$$\frac{(\epsilon_{-1})_{d_1}}{(\epsilon_{-1})_{d_2}} = \sqrt[k]{\frac{d_2}{d_1}} . \quad (14)$$

N. N. Afanasjev näitab sellega, et tõmbediagramm on aluseks, mis määrab teguri k kaudu metalli kontsentratsioonitundlikkuse ja absoluutsete mõõtmete mõju. Suurus k on seotud prao tekkimiseks vajaliku kõrvuti asuvate terade arvuga n ; viimase hindamiseks ei ole aga praegu veel küllaldaselt andmeid. Katseandmete kohaselt suurus k omab väärtusi vahemikus $k = 15 - 30$.

Lähtudes pingete gradiendi mõjust, annab V. N. Pantelejev (14) seose proovikeha väsimuspiiri ja läbimõõdu vahel. Seose tuletamise aluseks on eeldus, et väsimuspurunemise tõenäosus Ω on proportsionaalne ohtlikult pingestatud pinnaühiku ohtlike defektide arvuga k , s.t.

$$\Omega = \lambda k \pi (r_x^2 - \rho_x^2), \quad (15)$$

kus λ on proportsionaalsuse tegur,

r_x - proovikeha välisraadius

ρ_x - kaugus proovikeha teljest, mis piirab ohtliku piirkonna (defektide asetuse suhtes).

Lõpmata suure läbimõõduga (d_∞) proovikeha väsimuspiir σ_∞ vastab N. N. Pantelejevi eeldusel pingele, millele ei kutsu esile purunemist $5 \cdot 10^6$ tsükli tagajärjel ka siis, kui tõenäosus ohtlike defektide esinemiseks on võrdne ühega. Seega

$$\sigma_x = \sigma_\infty + \alpha \frac{\sigma_0 - \sigma_\infty}{\Omega},$$

kus α on proportsionaalsuse tegur,

σ_0 - väsimuspiir proovikehal, läbimõõduga null.

Kui eeldada, et ohtliku ala moodustab proovikehast see osa, mis on piiratud telje poolt mingi ohtliku pinge väärtusega (kaugus teljest ρ) (joon.3), siis erinevate läbimõõdudega proovikehadele

$$\frac{\rho_1^2}{r_1^2} = \frac{\rho_2^2}{r_2^2} = \frac{\rho_x^2}{r_x^2} = \dots = \text{const.}$$

Siis

$$\sigma_x - \sigma_\infty = \frac{\alpha}{\lambda k \pi} \cdot \frac{\sigma_0 - \sigma_\infty}{(1 - c)r_x^2}. \quad (16)$$

Eeldades nüüd, et

$$\frac{\alpha}{\lambda k \pi} = \beta = \text{const.}$$

võib kirjutada erinevate läbimõõdudega proovikehade kohta:

$$\sigma_1 - \sigma_\infty = \beta \frac{\sigma_0 - \sigma_\infty}{r_1^2};$$

$$\sigma_2 - \sigma_\infty = \beta \frac{\sigma_0 - \sigma_\infty}{r_2^2} ;$$

siit

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \beta (\sigma_0 - \sigma_\infty) \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) ,$$

millest

$$\sigma_0 - \sigma_\infty = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{1}{\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2}} .$$

Asetades saaduse võrdusesse (16), saame et

$$\sigma_x - \sigma_\infty = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\frac{d_x^2}{d_1^2} - \frac{d_x^2}{d_2^2}} . \quad (17)$$

Tundmatute väsimuspiiride σ_x ja σ_∞ määramiseks peab teadma kahe eri mõõtmete proovikeha väsimuspiiri σ_1 ja σ_2 . Sel juhul (võttes $d_x = d_1$)

$$\sigma_\infty = \sigma_1 - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}}$$

ja mistahes läbimõõduga proovikehale, teades σ_∞ väärtust,

$$\sigma_x = \sigma_\infty + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\frac{d_x^2}{d_1^2} - \frac{d_x^2}{d_2^2}} . \quad (18)$$

V. N. Pantelejevi poolt arvutatud ja eksperimentaalselt saadud (läbimõõduni 70 mm) väsimuspiiride väärtused ühtivad

küllaltki hästi. Materjaliks oli teljeteras (C - 0,37%, Mn - 0,70%, Si - 0,23%).

S. V. Serensen (10) annab, lähtudes mitmete autorite ja oma katseandmete läbitöötamise tulemustest absoluutsete mõõtmete mõju teguri väärtuse leidmiseks poolegampiirilise seose:

$$\varepsilon_{\sigma k} = 1 - \left(1 - \frac{\beta_{\sigma} \varepsilon_{\min}}{\alpha}\right) \cdot \left(\frac{D - d}{D_k - d}\right)^m, \quad (19)$$

kus $\beta_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1k}}$ on efektiivne pingete kontsentratsiooni tegur (σ_{-1} - laboratoorse sileda proovikeha väsimuspiir, σ_{-1k} - laboratoorse, pingajaotuselt detailiga sarnase proovikeha väsimuspiir);

$\varepsilon_{\min}$ - absoluutsete mõõtmete mõju teguri minimaalne väärtus, kui puudub pingete kontsentratsioon;

D - vaadeldava ristlõike läbimõõt;

d - laboratoorse proovikeha läbimõõt; sellel läbimõõdul leitud β_{σ} ;

m - astmenäitaja, mis terastele paindel on piirides 0,5 + 0,7 ;

D_k - mõõde, mille puhul absoluutsete mõõtmete mõju on maksimaalne.

S. V. Serensen märgib, et madala pingete kontsentratsiooni ja pehmemate teraste jaoks D_k on piirides 100 - 250 mm, kõrgema pingete kontsentratsiooni ja kõvemate teraste puhul aga piirides 50 - 100 mm.

Vastavalt seosele (19) saame avaldada oodatava väsimuspiiri detailile, mille läbimõõt on D , teoreetiline ja efektiivne pingete kontsentratsiooni tegur vastavalt α ja β_σ :

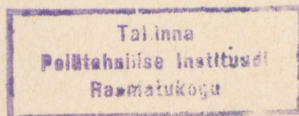
$$(\sigma_{-1})_{dk} = \frac{\sigma_{-1}}{\beta_\sigma} \left[1 - \left(1 - \frac{\beta_\sigma \varepsilon_{\min}}{\alpha} \right) \right] \cdot \left(\frac{D - d}{D_k - d} \right)^m. \quad (20)$$

Seose (20) analüüs näitab, et suhte $\frac{\beta_\sigma}{\alpha}$ vähenemisega (mis vastab kõrgemale teoreetilisele pingete kontsentratsiooni tegurile α) suureneb absoluutsete mõõtmete mõju.

Ka juhul, kui tegemist on kõrge kontsentratsiooni tundlikkusega materjalidega, kus β_σ võib tunduvalt suurened, avaldub absoluutsete mõõtmete mõju tugevamalt - astmenäitaja m -i suurenemise arvel. Väga kõrgete α väärtuste puhul ei ole toodud seos kasutatav.

Esitatud uurimuste üheks ühiseks lähtepunktiks on uuritavate proovikehade geomeetrilise sarnasuse tagamine. N. N. Afanasjevi metallide väsimuse teooria on aluseks, mis haarab küsimust metallide ehituse erisusi arvestades, on füüsikaliselt põhjendatud teooria ja võimaldab hinnata mastaabi mõju. Võib arvata, et statistiliste teooriate edasisel arendamisel osutub võimalikuks luua töökindel meetod materjalide ebaühtluse mõju uurimiseks detailide absoluutsete mõõtmete muutmisel.

Tähelepanuväärsele järeldusele mastaabi mõju uurimisel tuleb G. V. Užik (15). Vaadelnud mastaabi mõju tehnoloogilist (töötlemisega seotud), füüsikalis-statistilist ja me-



T-637

haanilist aspekti, saab autor teha järelduse, et osutub võimalikuks tagada samaaegselt geomeetrilist sarnasust koos materjali koormamise sarnasusega pindkihtides. On selge, et pingekontsentraatori lähimas ümbruses pingelukorra sarnasuse puududes on erinevate mõõtmatega proovikehade tugevustingimused ilmselt erinevad. Materjali koormamise sarnasuse tagamiseks peavad pindkihis olema võrdsed nii maksimaalsed pinged kui ka pingete gradiendid. Sellise peamist mõju omava pindkihi paksust hinnatakse suurusega kuni 0,5 - 1,0 mm.

Koormamise sarnasuse tagamiseks vajalikud teise proovikeha mõõtmed on leitavad proovikeha ristlõike iseloomustava mõõtme a ja kontsentraatori põhja kõverus ρ raadiuse kaudu funktsiooni $\frac{N \sin v_0}{k_t}$ abil. Funktsioon on esitatud töös (15) graafiku kujul.

$$N = \frac{A_1 \sigma_w}{(1 + y^2)} \left\{ A_2 + A_3 \cdot \frac{1 + 2y^2}{1 - y^2} \right\},$$

$$A_1 = \frac{3(\sin v_0)^3}{8(1 - \cos v_0)^2 [3 + 4(1 + \mu) \cos v_0 + (1 + 4\mu) \cos^2 v_0 + (1 + \mu) \cos^3 v_0]},$$

$$A_2 = 3 - 2(1 - 2\mu) \cos v_0 + 2(1 + \mu) \cos^2 v_0,$$

$$A_3 = 3 \cos^2 v_0,$$

$$y = c \sin v; \quad c = \frac{a}{\sin v_0}; \quad \sin v_0 = \sqrt{\frac{a/p}{a/p + 1}}; \quad \cos v_0 = \frac{1}{\sqrt{a/p + 1}},$$

$$y = \frac{a \sin v}{\sin v_0};$$

v on teljelise pinge avaldamiseks kasutatud elliptiline koordinaat;

σ_n - nimipinge.

Selline proovikehade mõõtmete kujundamine võimaldab, erinevalt juhust geomeetrilise sarnasuse tagamiseta, selgitada välja puht-statistiliste efekti osatähtsust tugevuse langemises proovikeha mõõtmete suurenemisel.

x x
 x

Käesoleva töö eesmärgiks on uurida väsimuskõverate muutumist sõltuvalt proovikehade absoluutsetest mõõtmetest erinevatel sagedustel. Seejuures on mõõtmete valikul kontsentraatoriga proovikehadele püütud tagada koormamise sarnasus. Kuna vastavalt seisukohtadele, mis on toodud töös (16), koormamise sagedus on üheks määrava tähtsusega faktori väsimuskõvera asukoha suhtes (näit. koordinaatides $\sigma - \lg N$), siis on uurimuses kasutatud kahte koormamise sagedust - 340 ja 3000 $1/\text{min}$. Otseseid andmeid väsimuskõvera kaldse osa muutumise kohta sõltuvalt proovikeha absoluutsetest mõõtmetest on võimalik saada ainult üksikutest töödest - seejuures koormamisviisid ei ole omavahel võrreldavad. Näiteks C. E. Phillipsi ja R. B. Heywoodi tööst (17) selgub, et pehme terase RLY koormamisel vahelduval tõmbel-survel nihkub väsimuskõver siledate proovikehade puhul vasakule proovikehade väiksema läbimõõdu korral ja suuremal

koormamise sagedusel; kontsentraatoriga (auk) proovikehade koormamisel ei ole väsimuskõvera asendit läbimõõdu muutumisel 4,75 - 42,7 mm praktiliselt võimalik iseloomustada

3. PROOVIKEHAD JA KATSEMETOODIKA

Eksperimentaalne osa tööst viidi läbi Moskva Proovimismasinate ja Kaalude Eksperimentaaltehase poolt seeriaviisiliselt toodetavatel masinatel HY, milledest üks võimaldas ümberehitamise tulemusena (16) proovida proovikehi erinevatel sagedustel. Käesolevas töös piirduti sagedustega 340 ja 3000 $1/\text{min}$.

Katsed teostati normaliseeritud terasega 45, mille keemiline koostis oli järgmine: C - 0,48%, Si - 0,21%, Mn - 0,78%, P - 0,04%, S - 0,04%.

Proovikehad valmistati ümarterasest 18 mm. Lattide omaduste võrdlemiseks määrati voolavuspiir, tõmbetugevus ja pinnakõvadus. Teraste mehaanilised näitajad peale normaliseerimist olid järgmised: voolavuspiir $\sigma_T = 46,0 \text{ kg/mm}^2$, tõmbetugevus $\sigma_L = 71,1 \text{ kg/mm}^2$, suhteline pikenemine $\delta_{10} = 18,8\%$, Brinelli kõvadus $H_B = 196 - 204$.

Proovikehade läbimõõdud olid 8,00 ja 12,00 mm, kusjuures kontsentraatori kujud oli valitud võrdkõlgne kolm-

nurk, raadiusega tipunurga juures 0,1 mm. Peene sisselõike puhul, kui $t/D > 0,05$ (t - sisselõike sügavus, D - proovikeha läbimõõt), sisselõike sügavus kontsentratsioonile praktiliselt mõju ei avalda (18) ja arvutuslikuks pingete kontsentratsiooni teguriks kujuneb seega (19)

$$\alpha = 1 + 2 \sqrt{\frac{t}{\rho}} = 1 + 2 \sqrt{\frac{0,4}{0,1}} = 5,0.$$

Proovikehade mõõtmised kontrolliti instrumentaalmikroskoobi all.

Eksperimentaalne osa viidi läbi vastavalt töös (16) kirjeldatud metoodikale. Teostati: a) väsimuspiiride määramine; b) väsimustugevuse määramine ülepinge piirkonnas; c) proovikehade temperatuuri muutumise uurimine katsete vältel. Väsimustugevuse uurimise diapaseon sõltus masinate H_Y konstruktsiooniga määratud piiridest. Proovikehadel läbimõõduga 8,00 mm kasutati ülepingeid kuni ~1,45₁, siledatel proovikehadel ja ülepingeid kuni ~1,85_{1k}. Proovikehadel läbimõõduga 12,00 mm olid ülepinged vastavalt 1,35₁ ja 1,96_{1k}. Temperatuuri uurimine viidi läbi kogu katse vältel 12. proovikeha puhul (siledada proovikehad), mitmetel juhtudel saadi peale selle aga kasutada ainult osalisi andmeid, mis olid tingitud termopaaride vähesest töökindlusest.

Saadud andmed väsimustugevuse kohta töödeldi Mitropolski-Šašini meetodi järgi (20), mis sobib väikese arvu statistiliste suuruste töötlemiseks.

4. PROOVIKEHADE VÄSIMUSTUGEVUS

Proovikehade väsimustugevuse määramiseks saadud andmed on toodud lisas 1. Väsimuspiirid osutusid järgmisteks (tabel 1).

Tabel 1.

Väsimuspiirid kg/mm^2 .

	P r o o v i k e h a d			
	Siledad		Kontsentraatoriga	
	n = 340 p/min	n = 3000 p/min	n = 340 p/min	n = 3000 p/min
ϕ 8,00	31,0	31,0	19,9	19,9
ϕ 12,00	30,0	30,0	19,9	19,9

Kuna eesmärgiks oli eelkõige väsimustugevuse uurimine ülepingete piirkonnas, siis määrati väsimuspiir madala koormamise sageduse puhul, võttes arvesse ka töös (16) saadud andmed, baasiarvu $5 \cdot 10^6$ juures. Tähelepanu väärib antud juhul siledade proovikehade väsimuspiiri märgatav alanemine läbimõõdu suurenemisel.

Katseandmete läbitöötamisel saadi korrelatsioonivõrrandid, millede alusel on kujundatud joonised 4 - 7.

Korrelatsioonivõrrandid, mis seovad maksimaalset pinget tsüklite arvu logaritmiga, on toodud tabelis 2 (y_i on maksimaalne pinge, X_y - sellele vastava purunemiseni talu-

tud tsüklite arvu N logaritm).

Korrelatsioonivõrrandid

Tabel 2.

	P r o o v i k e h a d			
	siledad		kontsentraatoriga	
	$n = 340$ p/min	$n = 3000$ p/min	$n = 340$ p/min	$n = 3000$ p/min
$\phi 8,00$	$\bar{x}_y = -0,208\bar{y}_1 + 13,079$	$\bar{x}_y = -0,186\bar{y}_1 + 11,568$	$\bar{x}_y = -0,105\bar{y}_1 + 7,823$	$\bar{x}_y = -0,202\bar{y}_1 + 10,864$
$\phi 12,00$	$\bar{x}_y = -0,205\bar{y}_1 + 12,899$	$\bar{x}_y = -0,131\bar{y}_1 + 9,727$	$\bar{x}_y = -0,125\bar{y}_1 + 8,504$	$\bar{x}_y = -0,185\bar{y}_1 + 10,251$

Proovikehadele läbimõõduga 8,00 mm saadud väsimuskõverad (joon.4 - 7) on nii sõltuvalt koormamise sageduse muutumisest kui ka kujust (siledad või kontsentraatoriga) täiesti analoogilised eelnevas töös (16) terasele 45 saadutega ((16), joon.30). Tunduvalt suurem väsimustugevuste lähene mine kõrgemate ülepingete juures koormamise sageduse muutumisel vahemikus 340 - 3000 p/min toimub aga siledatel proovikehadel, millede läbimõõt on 12,00 mm.

Iseloomulik on ka käesolevas töös saadud andmetele asjaolu, et madalam koormamise sagedus nihutab väsimuskõvera kaldse osa lõpp-punkti N_0 siledatel proovikehadel tunduvalt paremale (piiridesse 3 - 5 miljonit tsüklit), kontsentraatoriga proovikehadel aga madalamate tsüklite arvu piir-

konda (umbes 1 miljon tsükli).

Teine konstruktoriarvutuses vajalik näitaja, astmenäitaja m väsimuskõvera võrrandis

$$\sigma^m N = \text{const}$$

muutus ka käesolevas töös (nagu ka töös (16)) väga suurtes piirides. Saadud väärtused on koondatud tabelisse 3.

Tabel 3.

m väärtused sõltuvalt proovikeha läbimõõdust ja koormamise sagedusest.

Proovikehad	ϕ 8 mm		ϕ 12 mm	
	n = 340 p/min	n = 3000 p/min	n = 340 p/min	n = 3000 p/min
Siledad	18,3	15,5	16,7	10,7
Kontsentraatoriga	6,8	12,8	8,0	12,5

Võrreldes saadud väärtusi praegu arvutustes kasutatava keskmise väärtusega $m \approx 9$, tuleb järeldada, et kasutusel olev arvutusmetoodika on veel küllaltki puudulik. Väsimusvigastuste arvutuslikul summeerimisel (ekvivalentse koormuse määramisel) tuleb kindlasti arvesse võtta m võimalikku kõikumist, sõltuvalt koormamise sagedusest, proovikeha kujust ja mõõtmetest, piirides $m = 6 - 19$. Siin on vajalik sobiva arvutusmetoodika väljatöötamine. Katseandmete kohalt tuleb

järeldada, et antud materjali puhul on kasutatavate ülepingtongete piirkonnas:

siledate proovikehade korral kõige ebasoodsamas olukorras kõrgemad koormamise sagedused;

kontsentraatoriga proovikehade puhul kõige ebasoodsamas olukorras väiksemad läbimõõdud madalamatel koormamise sagedustel;

kontsentraatoriga proovikehade puhul kõige soodsamas olukorras väiksemad läbimõõdud kõrgematel koormamise sagedustel.

Koormamise sageduse mõju uurimisel väsimustugevusele erinevatel läbimõõtudel on käesolevas töös lähtutud kales-tumise ja taastumise kontseptsioonist, mida on erinevate sageduste puhuks rakendatud mõningal määral ka varem (21, 22, 16). Lähtudes kales-tumise ja taastumise komplitseeritud protsessist, võib aga oletada, et igal materjalil ja proovikeha kujul on ainult temale omane koormamise sagedus, millest ühele ja teisele poole on kales-tumise ja taastumise vastastikune mõju, sõltuvalt proovikehas valitsevast temperatuurirežiimist, erinevad. Vastavalt sellele kujuneb siis ka väsimuskõverate vastastikune asend.

Arutlustes samaläbimõõduliste, kontsentraatoriga proovikehade kohta, kus temperatuuride erinevused kontsentraatori piirkonnas ei tohiks olla nimetamisväärsed, võime tulla väsimusprotsessi käigu analüüsimisel, lähtudes N. N. Afanas-

jevi statistilisest teooriast, järgmistele seisukohtadele.

Väsimuspiiri lähedastel ülepingetel on nõrgemate (kas madalamate mehaaniliste omadustega või ebasoodsalt orienteeritud) terade arv, kus antud pinge puhul võivad tekkida plastilised deformatsioonid, suhtelised väike. Väsimusprotsessi kulgemisele on oluline aga voolavuspiiri ületamine nendes terades. Suuremate deformatsiooni kiiruste puhul on ühe tsükli kestus lühem ja seetõttu võimalused suhteliselt suuremate plastiliste deformatsioonide tekkimiseks väiksemad. Seega võib oodata, et teiste võrdsete tingimuste puhul aeglasemale koormamise sagedusele allutatud proovikehas esineb voolavuspiiri ületamine suuremas arvus terades kui kõrgemal sagedusel koormatud proovikehades. Lugeses edasiste plastiliste deformatsioonide käigus voolavuspiiri ületamisega määratud terades kalestumise suuruse sõltumatuks deformatsiooni kiirusest (23), jääb edasises plastiliselt deformeeritavates terades kujunevat pingete suurust mõjutama peamiselt ühe koormustsükli aeg, sest taastumise määr samal temperatuuril on sõltuv peamiselt ajast. Teisest küljest on aga teada, et taastumise protsess toimub toatemperatuuril väga väikese intensiivsusega. Seetõttu ei saa ühe koormustsükliga määratud aja vältel sageduste muutumine suhteliselt väikeses vahemikus nimetamisväärse erinevusega taastumist mõjutada. Peamiseks väsimusprotsessi määravaks teguriks jääb ikkagi erineva hulga terade voolavuspiiri ületamine erinevatel koormamise sagedustel.

Väsimusprotsessi edasises arenemises on oluliseks momendiks see, mil tekkinud mikroskoopilised vigastumised üksikutes alades, haarates teatud hulga lähedasi teri, kujunduvad niisugusteks, mis oma mõõtmatega väljuvad materjalis esinevate ebaühtluste mõõtmete piiridest. Sel juhul kontsentreerub protsess lõpliku makroprao arenemisele. Et voolavuspiiri ületamiseks terades on soodsamad tingimused madalamal sagedusel koormatud proovikehades ja kuna võimalused protsessi arenemiseks edasiste plastiliste deformatsioonide käigus on ligikaudu võrdsed, siis tuleb ka proovikeha purunemist oodata esmajoones just madalama koormamise sagedusega töötanud proovikehade puhul.

Proovikeha koormamisel kõrgemate ülepingetega suureneb tunduvalt nende suhteliselt nõrgemate terade arv, millede voolavuspiir ületatakse esimeste koormustsüklite vältel. Kui madalamate pingete juures tõenäosus selleks, et kõrvuti asuks sellisel hulgal voolavuspiiri ületanud teri, mis kutsuksid edasise deformeerimise käigus esile küllaltki suure, arenevõimelise kohaliku vigastumise, on suurem madalama koormamise sageduse puhul, siis proovikehale rakendatud pingete suurenemisel see vahe erinevate koormamise sageduste kasutamisel väheneb. Kõrgematel pingetel on, sõltumata sagedusest, koormamise algperioodil voolavuspiiri ületanud ja edasistele plastilistele deformatsioonidele allutatud terade hulk tunduvalt suurem. Seetõttu on siin esinevatel koormamise sagedustel võimalused arenemiskindla prao tekkimiseks lähedasemad.

Minnes pingetega veelgi kõrgemale, tuleb protsessi käiku mõjutava tegurina arvestada ka tekkivat soojust. Koos taastumise protsessi intensiivistumisega kõrgema temperatuuri mõjul alaneb ka kalestumise ja taastumise resultaadinna lõplikult täheldatav kalestumise määr. Kõrgemal koormamise sagedusel töötavad proovikehad kalestuvad järelilikult vähem. Samuti võib mõningal määral alaneda ka veel mitte plastiliselt deformeeritud terade voolavuspiir. Niisugune vastupanu vähenemine viib kõrgemate ülepingete piirkonnas kõrgemal koormamise sagedusel töötavad proovikehad seega kiiremale purunemisele.

Suurematel läbimõõtudel toimub eespoolkirjeldatud faktorite osatähtsuse muutumine varem. Suuremate läbimõõtude puhul madalate ülekoormuste piirkonnas käesolevas töös kasutatud sagedusel nähtavasti nimetamisväärseid erinevusi eas ei esine.

Nagu näidatud töös (16), esineb siledade proovikehade töös, võrreldes ringkontsentraatoriga proovikehade töötamise tingimustega, olulisi erinevusi. Koormamisel tekkiva väsimuspurunemise käigule peab tekkiv soojus avaldama tunduvalt suuremat toimet.

Nagu nähtub saadud katseandmeist (joon. 9 ja 10 ja tabelid lisas 2), ulatuvad proovikehade temperatuurid madalama koormamise sageduse puhul kuni 90°C -ni, kõrgema koormamise sageduse puhul aga umbes 300° -ni.

Katseandmed lubavad kinnitada, et proovikeha suurema

läbimõõdu puhul toimub kõrgemal sagedusel temperatuuri tõus oma maksimaalse (konstantse) väärtuseni hiljem, väiksematel läbimõõtudel aga suhteliselt varem. Eespool esitatud arutluste kohaselt peaks see looma soodsamad tingimused suurema läbimõõduga proovikehadele.

Kuna kõrgematel ülepingetel, mis põhjustavad proovikehadel muutevärvuste tekkimist, tekib purunemine sinihapruse piirkonnale vastavas proovikeha osas (24), siis määravad proovikeha purunemise momendi prao arenemise kiirus ja proovikeha ristlõige.

Madalamatel sagedustel määravad purunemise käigu töös (16) esitatud kaalutlused. Erinevust ea lühenemise osas suurema läbimõõdu puhul põhjustab osaliselt arvatavasti ka väiksem pingete gradient suurema läbimõõduga proovikehadel. Küsimus soojuse tekkimisest, ärajuhtimisest ja temperatuuri jaotusest proovikeha ristlõikes vajab täiendavat uurimist.

5. K O K K U V Õ T E

1. Käesolevas töös osutus võimalikuks näidata, et vahelduval koormamisel töötavate proovikehade koormamise sagedus mõjutab väsimuskõvera kaldse osa asendit erinevalt, sõltuvalt proovikeha läbimõõdust. Proovikehade läbimõõdul 8 - 12_{mm}

muutub astmenäitaja m väsimuskõvera võrrandis $\sigma^m N = \text{const}$:
siledatel proovikehadel vahemikus $m = 10,7 - 18,3$ ($n = 340 -$
 $- 3000$ p/min), kontsentraatoriga proovikehadel vahemikus $m =$
 $= 6,8 - 12,5$.

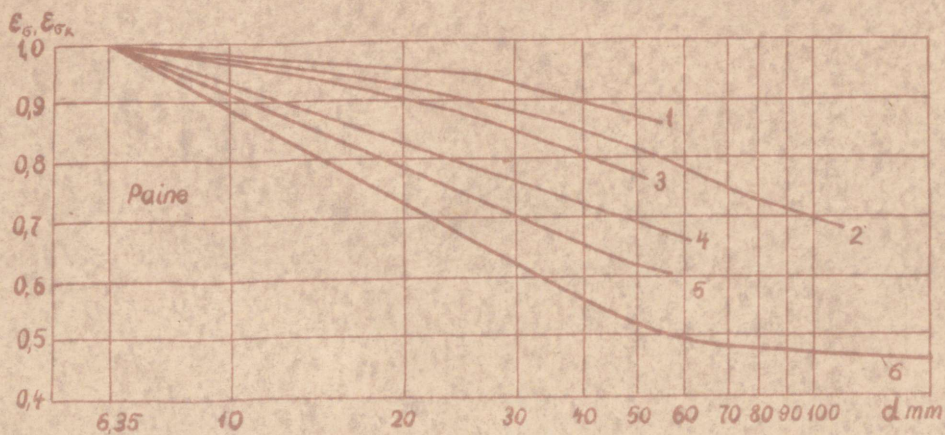
2. Koormamise sageduse mõju väsimuskõvera kaldsele osale on sõltuv proovikeha konstruktiivsest kujust, läbimõõdust ja kontsentraatorist (selle olemasolust või puudumisest).

3. Kõrge tsüklilise sitkusega terastel avaldub koormuse sageduse mõju kõige teravamalt suurema läbimõõduga siledatel proovikehadel.

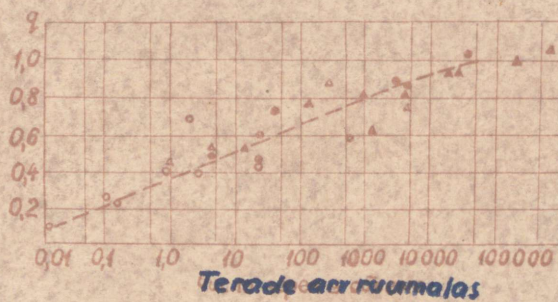
4. Koormamise sageduse mõju uurimisel esinevate läbimõõtmiste puhul võib protsessi kirjeldamisel kasutada kaletumise ja taastumise kontseptsiooni.

5. Siledade proovikehade pinna temperatuuri mõõtmised võimaldavad hinnata väsimusprotsessi üksikute iseloomulike etappide kestust.

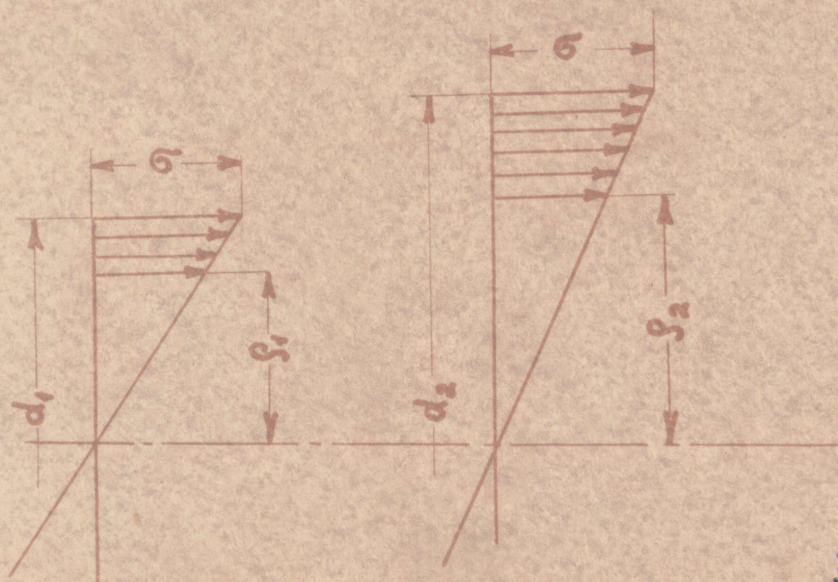
6. Vajalikud on edaspidised uurimused soojuse tekkimisest, ärajuhtimisest ja temperatuuri jaotusest proovikeharistlõikes, samuti arvutusmetoodika täiendamine suunas, mis lubaks arvesse võtta erinevatel sagedustel ja läbimõõtetel saadud väsimuskõverate erinevaid asendeid.



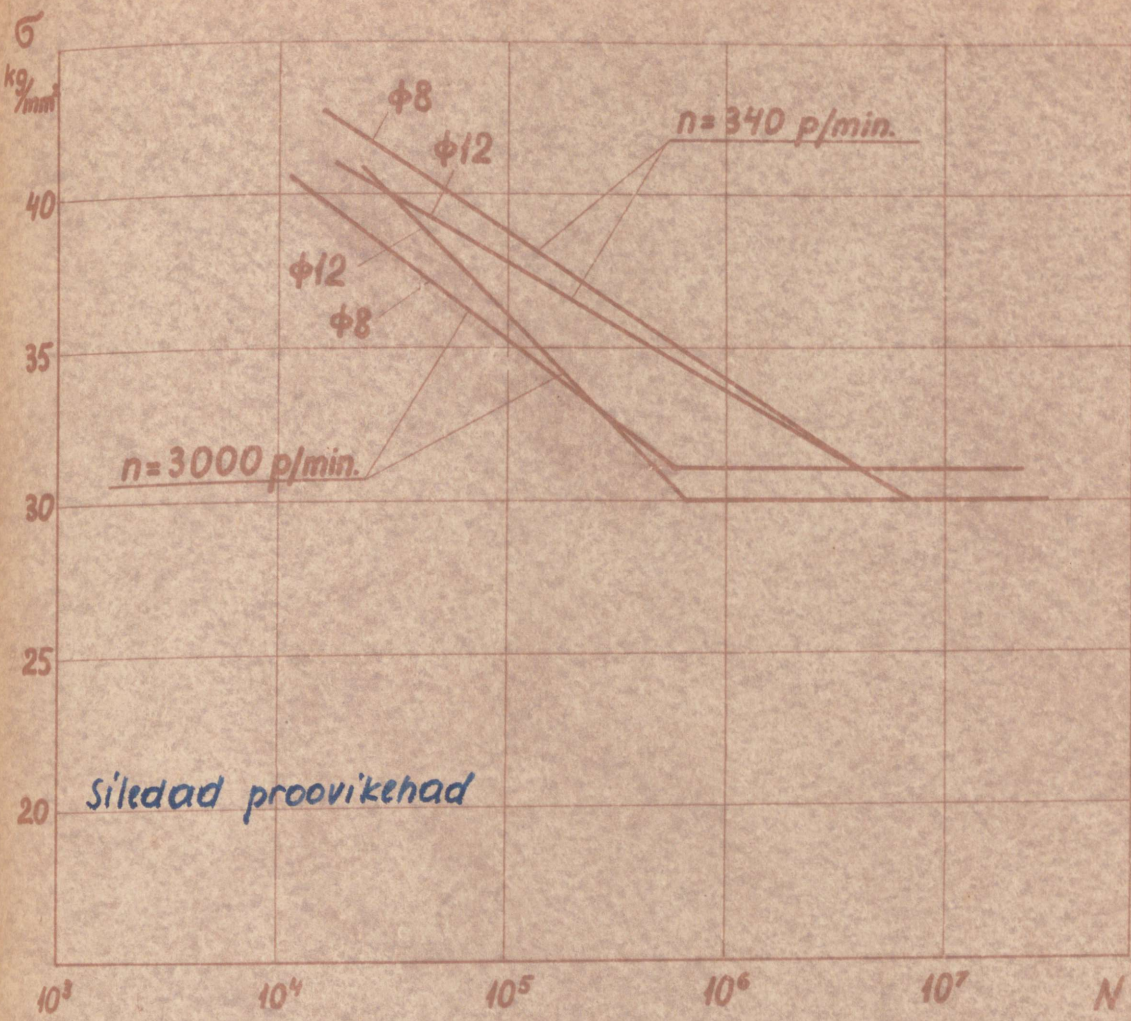
foon. 1.



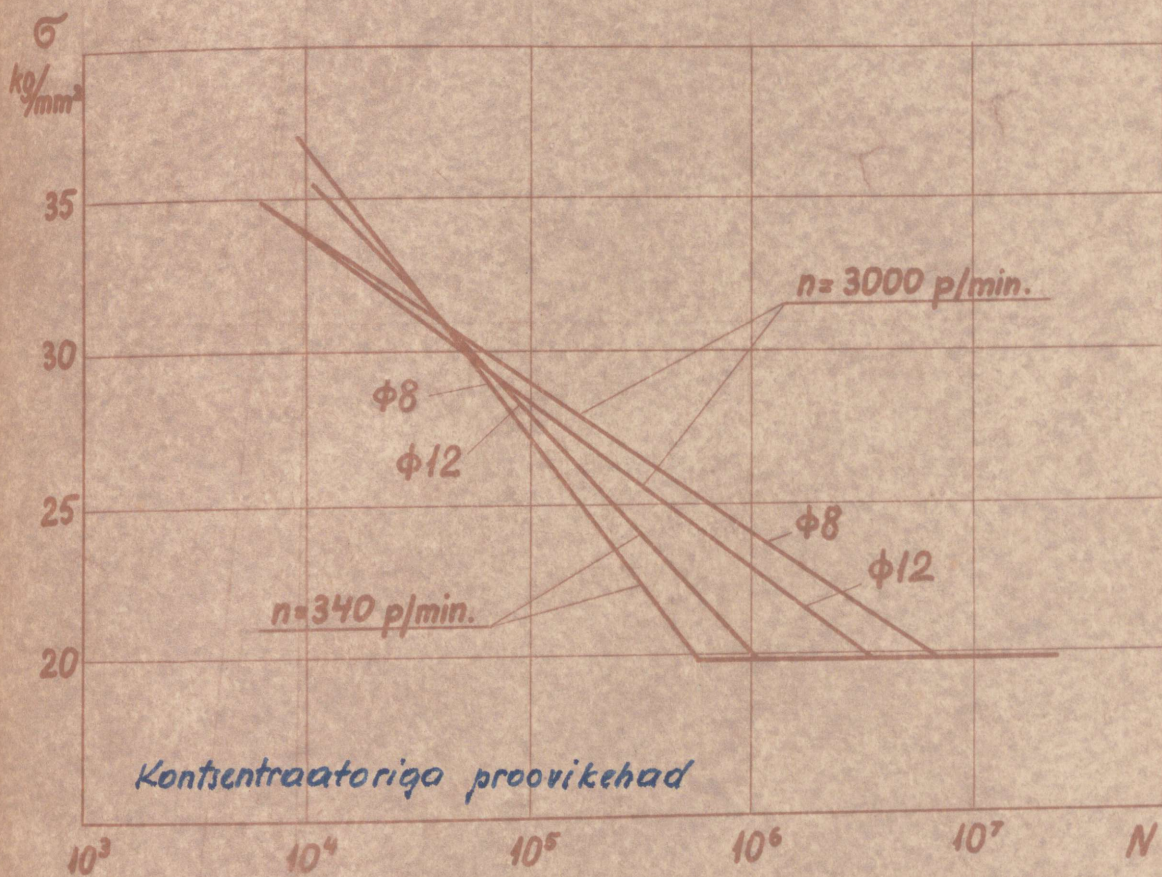
foon. 2.



foon. 3.

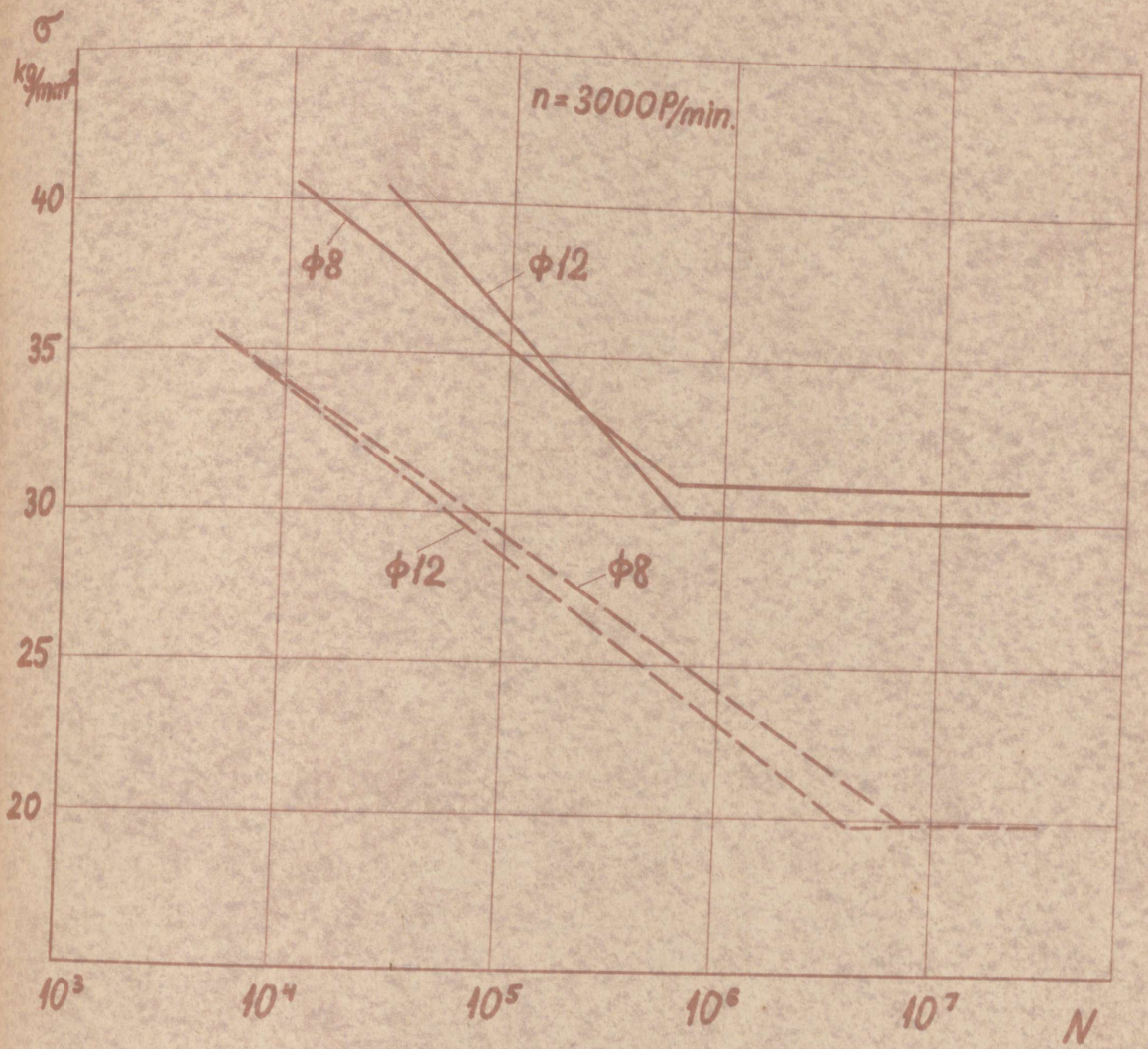


joon. 4.



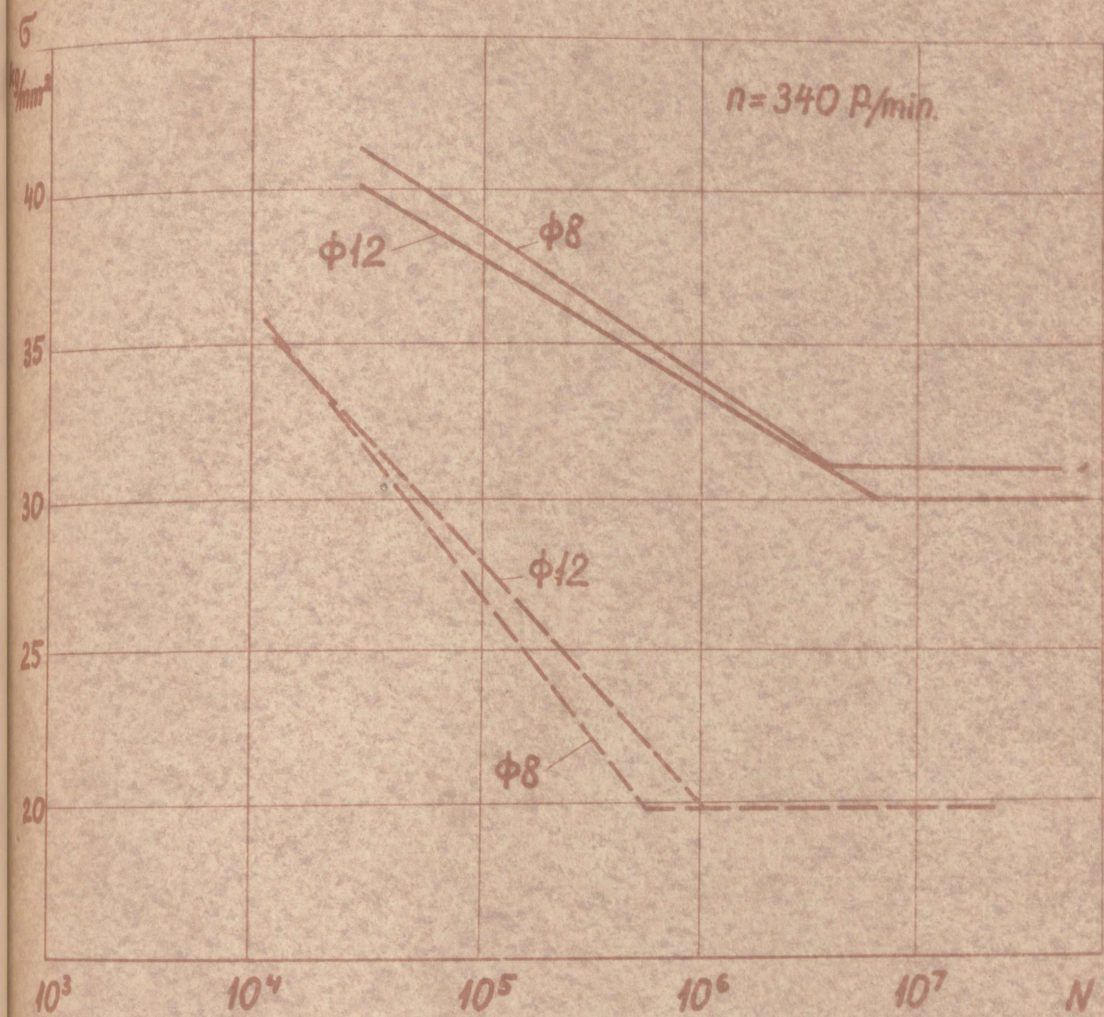
Kontsentraatoriga proovikehad

Joon. 5.



Joon. 6.

— siledad
--- kontsentraatoriga

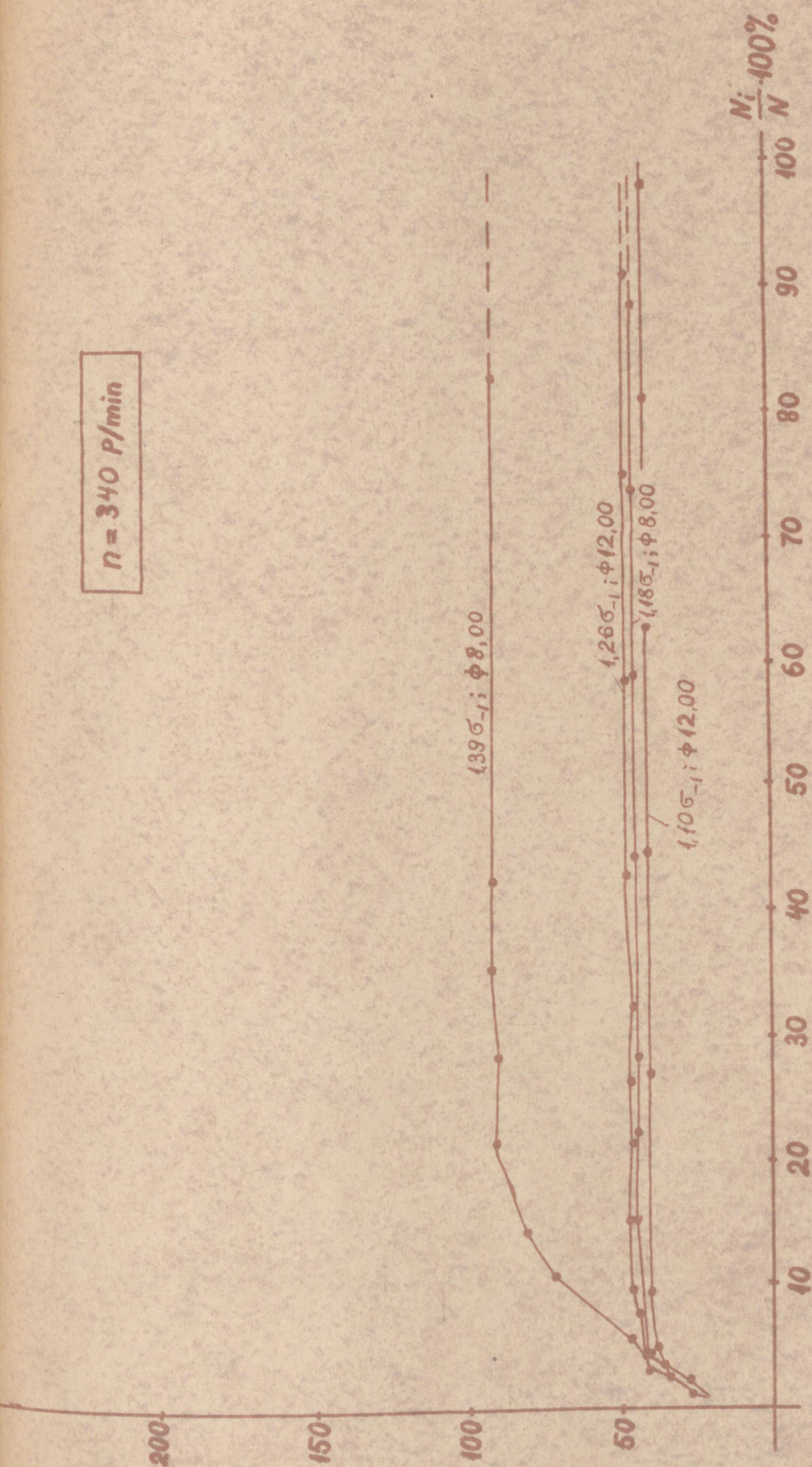


Joona 7.

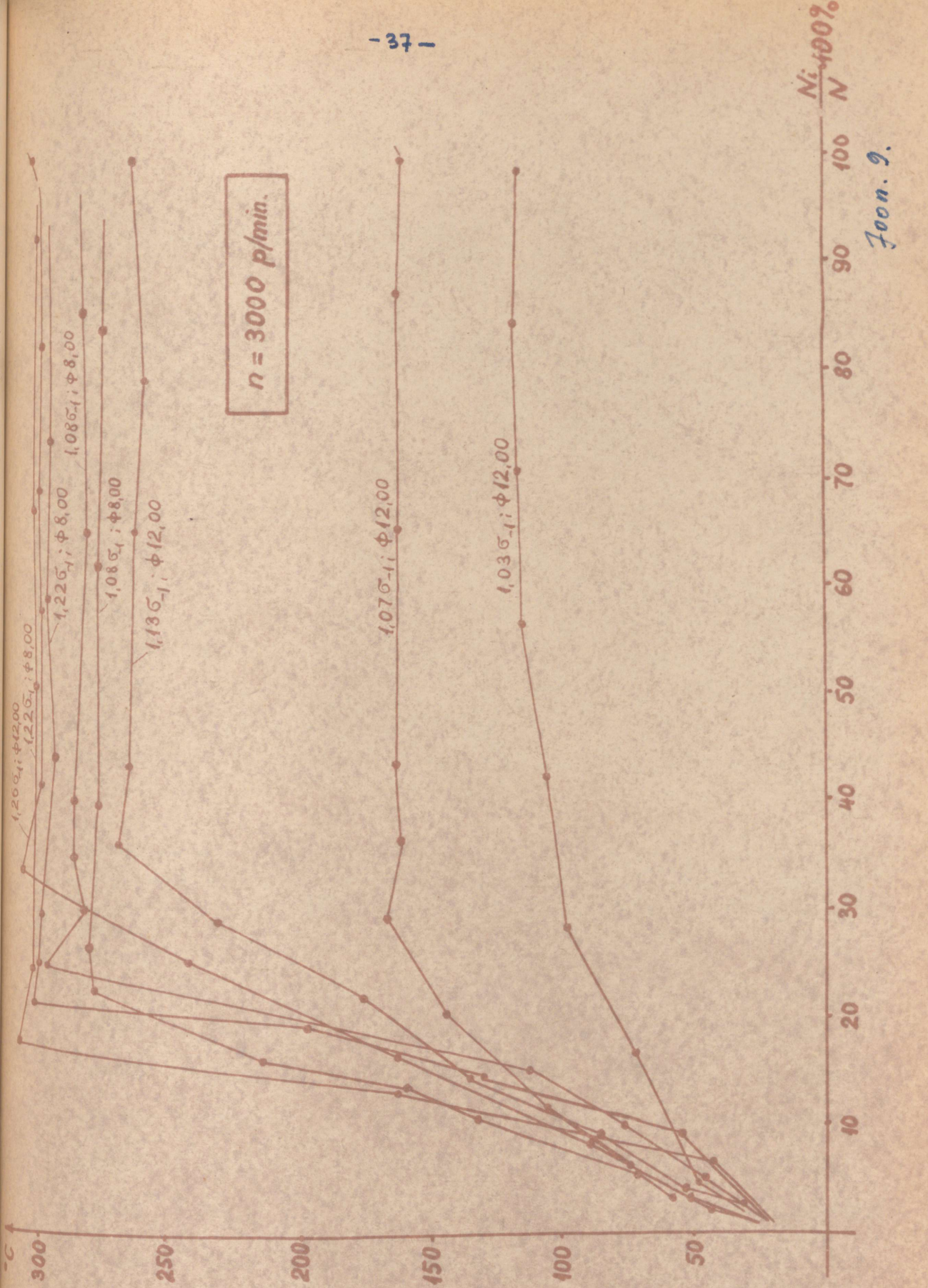
— siledad

--- kontsentraatoriga

$n = 340 \text{ P/min}$



Зон.8.



Зонн. 2.

L i s a 1.

Katseandmed proovikehade väsimustugevuse
määramisel.

Siledad proovikehad, $d = 8\text{mm}$ $n = 340\text{ p/min}$			Kontsentraatoriga proovikehad, $d = 8\text{ mm}$, $n = 340\text{p/min}$		
Proovi-keha nr.	Pinge kg/mm^2	N	Proovi-keha nr.	Pinge kg/mm^2	N
0756	43,1	14 300	0722	36,6	75 000
0759	40,7	40 100	0714	32,0	30 100
0768	37,8	152 700	0716	27,2	173 500
0758	36,6	341 900	0725	25,2	190 500
0757	36,6	301 700	0712	22,3	171 700
0763	33,4	1 392 600	0717	19,9	5 · 10 000 000
0770	31,0	5 · 10 000 000 →			→

Siledad proovikehad, $d = 8\text{mm}$, $n = 3\ 000\text{ p/min}$			Kontsentraatoriga proovikehad, $d = 8\text{ mm}$, $n = 3000\text{ p/min}$		
Proovi-keha nr.	Pinge kg/mm^2	N	Proovi-keha nr.	Pinge kg/mm^2	N
0764	40,7	11 200	0719	33,4	10 100
0770	37,8	45 600	0711	32,0	42 100
0762	37,8	34 600	0721	27,2	148 300
0765	33,4	101 500	0705	22,3	2 752 200
0766	33,4	115 100	0710	19,9	13 · 10 000 000
0760	32,4	484 200			→
0769	32,0	1 322 000			
0767	31,0	10 · 10 000 000 →			
0757	31,0	5 · 10 000 000 →			

Siledada proovikehad, d =
= 12 mm, n = 340 p/min

Proovi- keha nr.	Pinge kg/mm ²	N
0741	40,5	40 200
0744	38,8	87 000
0752	37,8	175 500
0747	37,8	94 000
0743	33,9	926 000
0746	33,0	1 121 000
0751	31,8	1 654 300
0750	30,0	5 · 10 000 000

Kontsentraatoriga proovi-
kehad, d = 12 mm, n = 340
p/min

Proovi- keha nr.	Pinge kg/mm ²	N
0702	33,0	36 000
0715	27,2	45 000
0709	28,9	94 100
0713	24,0	290 400
0718	22,3	953 100
0723	19,9	4 · 10 000 000

Siledada proovikehad, d =
= 12 mm, n = 3000 p/min

Proovi- keha nr.	Pinge kg/mm ²	N
0745	40,5	24 600
0742	37,8	60 400
0748	33,9	281 600
0749	32,1	347 600
0753	31,0	215 400
0740	30,0	1 020 000
0755	30,0	10 · 10 000 000

Kontsentraatoriga proovi-
kehad, d = 12 mm, n = 3000
p/min

Proovi- keha nr.	Pinge kg/mm ²	N
0703	37,8	1 400
0706	33,0	13 100
0704	31,8	23 000
0707	27,2	202 400
0701	22,3	1 490 700
0708	20,8	2 946 200
0724	19,9	10 · 10 000 000

L i s a 2.

Katseandmed proovikehade pinna
temperatuuri määramisel.

Proovikeha nr. 0753

12,00mm, n = 3 000 p/min.

31,0 kg/mm²(1,036₋₁)

Proovikeha nr. 0749

12,00mm, n = 3 000 p/min.

32,1 kg/mm²(1,076₋₁)

Ni	$\frac{Ni}{N} \cdot 100\%$	°C
10 000	4,6	48
35 000	16,3	72
60 000	27,9	98
90 000	41,8	106
120 000	55,8	116
150 000	69,8	118
180 000	83,6	119
210 000	97,6	118
N = = 215 400	100,0	-

Ni	$\frac{Ni}{N} \cdot 100\%$	°C
9 000	2,9	58
20 000	5,8	74
40 000	11,5	106
70 000	20,2	144
100 000	28,8	168
125 000	36,0	162
150 000	43,2	164
220 000	64,4	163
290 000	83,6	164
340 000	98,0	162
N = = 347 600	100,0	-

Proovikeha nr. 0748

12,00 mm, $n = 3000$ p/min.

33,9 kg/mm² (1,136₋₁)

Proovikeha nr. 0742

12,00 mm, $n = 3000$ p/min.

37,8 kg/mm² (1,266₋₁)

N_i	$\frac{N_i}{N} \cdot 100\%$	$^{\circ}\text{C}$
5 000	1,8	43
10 000	3,6	54
25 000	8,9	85
40 000	14,2	136
60 000	21,5	176
80 000	28,4	230
100 000	35,6	266
120 000	42,8	262
180 000	64,0	260
220 000	78,3	256
275 000	97,8	261
$N=281\ 600$	100,0	-

N_i	$\frac{N_i}{N} \cdot 100\%$	$^{\circ}\text{C}$
2 000	3,3	52
5 000	8,3	90
10 000	16,6	163
15 000	24,8	241
20 000	33,2	308
25 000	41,4	298
30 000	49,7	301
40 000	66,2	302
55 000	91,2	300
$N =$ $= 60\ 400$	100,0	-

Proovikeha nr. 0766

8,00 mm, $n = 3000$ p/min.

$33,4 \text{ kg/mm}^2 (1,08 \underline{6}_1)$

N_i	$\frac{N_i}{N} \cdot 100\%$	$^{\circ}\text{C}$
3 000	2,6	41
6 000	5,2	71
12 000	10,4	132
15 000	13,0	160
18 500	16,1	214
25 500	21,7	276
30 000	26,1	278
45 000	39,1	274
70 000	60,8	274
95 000	82,3	272
$N = 115\ 100$	100,0	-

Proovikeha nr. 0765

8,00 mm, $n = 3000$ p/min.

$33,4 \text{ kg/mm}^2 (1,08 \underline{5}_1)$

N_i	$\frac{N_i}{N} \cdot 100\%$	$^{\circ}\text{C}$
2 000	2,0	25,5
5 000	4,9	45
10 000	9,8	76
15 000	14,8	112,5
20 000	19,7	131
25 000	24,6	296
30 000	29,6	280
35 000	34,4	284
40 000	39,3	284
65 000	63,8	278
85 000	84,2	280
$N = 101\ 500$	100,0	-

Proovikeha nr. 0762

8,00 mm, $n = 3000$ p/min.

37,8 kg/mm² (1,226,1)

N_i	$\frac{N_i}{N} \cdot 100\%$	$^{\circ}\text{C}$
3 000	8,7	54
5 000	14,4	130
6 500	18,8	197
7 500	21,6	302
8 500	24,6	300
10 000	28,9	298
15 000	43,4	292
20 000	58,0	298
25 000	72,4	294
$N = 34\ 600$	100,0	-

Proovikeha nr. 0770

8,00 mm, $n = 3000$ p/min.

37,8 kg/mm² (1,226,1)

N_i	$\frac{N_i}{N} \cdot 100\%$	$^{\circ}\text{C}$
3 000	6,6	43
6 000	13,1	163
8 000	17,5	310
11 000	24,1	302
26 000	57,0	298
31 000	68,0	299
37 000	81,1	298
45 000	98,6	304
$N = 45\ 600$	100,0	-

Proovikeha nr. 0746

12,00 mm, $n = 340$ p/min.

33,0 kg/mm² (1,106₁)

N_i	$\frac{N_i}{N} \cdot 10\%$	$^{\circ}\text{C}$
20 000	1,8	28
50 000	4,5	40
100 000	8,9	41
300 000	26,8	40
500 000	44,6	40
700 000	62,5	40
900 000	80,3	41
1 100 000	98,0	40
N = 1 121 000	100,0	-

Proovikeha nr. 0747

12,00 mm, $n = 340$ p/min.

37,8 kg/mm² (1,266₁)

N_i	$\frac{N_i}{N} \cdot 10\%$	$^{\circ}\text{C}$
3 000	3,2	42
4 000	4,3	41
9 000	9,6	47
14 000	14,9	47,5
16 000	17,0	47,5
20 000	21,3	46
25 000	26,6	46
30 000	31,9	45
40 000	42,6	47
55 000	58,5	47
70 000	74,5	47
85 000	90,5	47
N = 94 000	100,0	-

Proovikeha nr. 0758

8,00 mm, n = 340 p/min.

36,6 kg/mm² (1,18_{5,1})

Proovikeha nr. 0756

8,00 mm, n = 340 p/min.

43,1 kg/mm² (1,39_{5,1})

N_i	$\frac{N_i}{N} \cdot 100\%$	$^{\circ}\text{C}$
5 000	1,4	26
10 000	2,8	34
25 000	7,3	45
50 000	14,6	46
75 000	22,0	45
100 000	28,2	45
150 000	43,9	45
200 000	58,6	44
250 000	73,0	45
300 000	88,0	45
N = 341 900	100,0	-

N_i	$\frac{N_i}{N} \cdot 100\%$	$^{\circ}\text{C}$
500	3,5	36,5
600	4,2	43
800	5,6	47,5
1 500	10,5	72
2 000	14,0	81
3 000	21,0	90,5
4 000	28,0	90
5 000	35,0	92
6 000	42,0	91
12 000	84,0	91
N = 14 000	100,0	-

K I R J A N D U S

1. R. E. Peterson, Proc. ASTM, 1929.
2. Faulhaber, R. , Buchholtz, H. u. Schalter, E.,
St. u. Eis. 1933.
3. R. Peterson and A.Wahl, Journ.Appl.Mechan. Nr. 1, 1936.
4. Horger, O. J. und Neifert, H. R. St. u. Eisen, 1939, 51.
5. R. E. Peterson, Trans. ASME, APM 55 - 11, 1933.
6. Н. Н. Афанасьев, Статистическая теория усталостной
прочности металлов, Киев, 1953.
7. Петрусевич А.И., Расчет и конструирование деталей машин.
"Вестник машиностроения", № 3-4, 1944.
8. Петрусевич А.И./ Влияние размера образцов и перегрузок
на усталостную прочность сталей, Вестник машиностроения,
№ 5-6, 1946.
9. И.А. Одинг, Допускаемые напряжения в машиностроении и
циклическая прочность металлов, Машгиз, 1947.
10. Серенсен С.В., Концентрация напряжений и масштабный
фактор в связи с расчетом деталей на прочность, Вестник
машиностроения, № 5-6, 1946.
11. И.В. Кудрявцев, Внутренние напряжения как резерв прочно-
сти в машиностроении, Машгиз, 1951.
12. R. E. Peterson, Contributions to the Mechanics of solids
dedicated to St. Timochenko anniversary, 1938.
13. С.В. Серенсен ит., Несущая способность и расчеты деталей
машин, Машгиз, 1954.

14. Пантелеев В.Н., Когумикус "Свойства и термическая обработка металлов, Металлургиздат, 1947.
15. Г.В. Утик, Масштабный фактор в связи с оценкой прочности металлов и расчетом деталей машин, Изд. АН СССР, Отд. техн. наук, № 11, 1955.
16. H. Kuldma, Koormamise sageduse mõju teraste väsimustugevusele ülepingtonetel, Tallinn, 1954 (dissertatsioon).
17. C. E. Phillips and R. B. Heywood, The Size Effect in Fatigue of Plain and Notched Steel Specimens Loaded under Reversed Direct Stress, "The Institution of Mechanical Engineers, Applied Mechanics. Proceedings", vol.165, 1951, Nr.65
18. Г. В. Утик, Методы испытаний металлов и деталей машин на выносливость, Изд. АН СССР, 1948.
19. Г. Нейбер, Концентрация напряжений, ОГИЗ, 1947.
20. М. Я. Шашин, Методика определения средних вероятных значений циклической долговечности, Заводская лаборатория, № 6, 1952.
21. H. Kuldma, Väsimuskõverate iseloomust kõrgete ülepingtonete piirkonnas, TPI IX Teaduslikul konverentsil peetud ettekande teesid, 1954.
22. Г. В. Карпенко, Влияние частоты нагружения на выносливость стали, Когумикус Вопросы прочности конструкций и динамики машин АН УССР, Киев, 1954г.
23. М. А. Большанина, Упрочнение и отдых как основные явления пластической деформации, Известия АН СССР, Сер. физическая, т. XIV, № 2, 1950.

24. X. A. Кулдма, Некоторые вопросы усталостной прочности сталей при перенапряжениях, Труды ТПИ, № 76. Таллин, 1956.

1. Sissejuhatus	1
2. Eksperimentaalsest andmest saadud järeldused ja katsete selgitada absoluutsest tugevusest	3
3. Proovikahad ja katsemetoodika	20
4. Proovikahade väsimustugevus	22
5. Kokkuvõtte	29
Lisa 1. Katseandmed proovikahade väsimustugevuse suhtes	33
Lisa 2. Katseandmed proovikahade pinga temperatuuri suhtes	40
Kirjandus	45

S I S U K O R D

	Lk.
1. Sissejuhatus	1
2. Eksperimentaalsetest andmetest saadud järeldused ja katsed selgitada absoluutsete mõõtmete mõju .	3
3. Proovikehad ja katsemetoodika	20
4. Proovikehade väsimustugevus	22
5. Kokkuvõte	29
 Lisa 1. Katseandmed proovikehade väsimustugevuse määramisel	 38
 Lisa 2. Katseandmed proovikehade pinna temperatuu- ri määramisel	 40
 Kirjandus	 46