

26. FÁRASZTÓVIZSGÁLAT

26.1. A fémek kifáradásának jelensége ismételt igénybevételeknél

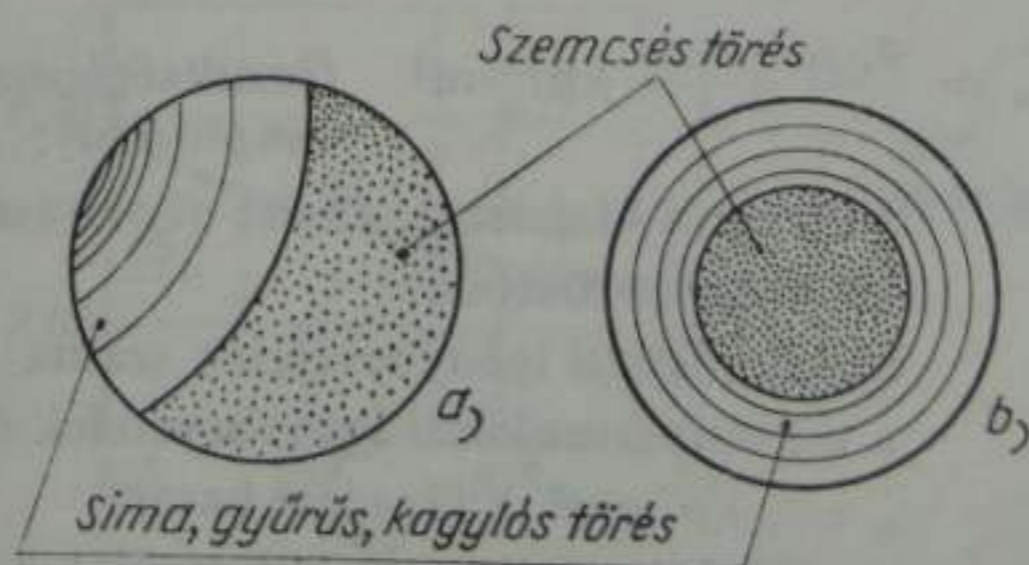
A szerkezeti alkatrész gyakran olyan változó nagyságú, sokszor ismétlődő igénybevételnek van kitéve, melynek felső határértéke a folyáshatárát, sőt az annál jóval kisebb megengedett igénybevételt sem éri el, és mégis az alkatrész egy bizonyos nagyszámú ismételt terhelés után eltörik. Ilyenkor azt mondják, hogy az anyag kifáradt. A fáradt törés jellege mindig teljesen más, mint a sztatikai igénybevétel során bekövetkezett törés. Szívós és képlékeny anyag fáradt törése is a rideg törésre emlékeztet.

Az ilyen jellegű törésekre a vasúti kocsitengelyek látszólag minden ok nélküli törése hívta fel a figyelmet. A sztatikai vizsgálattal meghatározott megengedett igénybevételre méretezett azonos anyagú és gyártású tengelyek közel azonos, mintegy 12 éves üzemidő elteltével egymásután törtek.

A 337a ábra olyan törést mutat, amely a felület egy pontja körül gyűrűsen tovaterjedő sima törésfelületet mutat koncentrikus gyűrűkkel, míg a tengelykeresztmetszet másik felén szemcsés a töret. A sima gyűrűs törésfelület egy felületi feszültségelhelyeződés helyéről kiinduló és a terhelés ismétlődése folytán szemcséket átszelve tovaterjedő, intrakrisztallin fáradt törés. Amikor az ilyen folyton mélyülő berepedés után a megmaradó keresztmetszet már nem bírja el a sztatikai igénybevételt, egyetlen ütéshatásra ridegen, szemcsehatárok mentén, interkrisztallin törnek.

A 337b ábra olyan fáradt törést mutat, melynél a feszültségelhelyeződés a tengely egész kerületén megvolt, pl. egy éles esztergakés-barázda mentén, és így az intrakrisztallin fáradt törés az egész kerületen egyidőben indult meg és terjedt a tengely közepe felé. A fáradt töréseket a fent leírt jellegzetességekről mindenkor könnyen és biztosan felismerhetjük.

A gyakorlati tapasztalat és az anyagvizsgálati kutatás eredménye szerint is sok nagyon fontos szerkezeti anyagnak

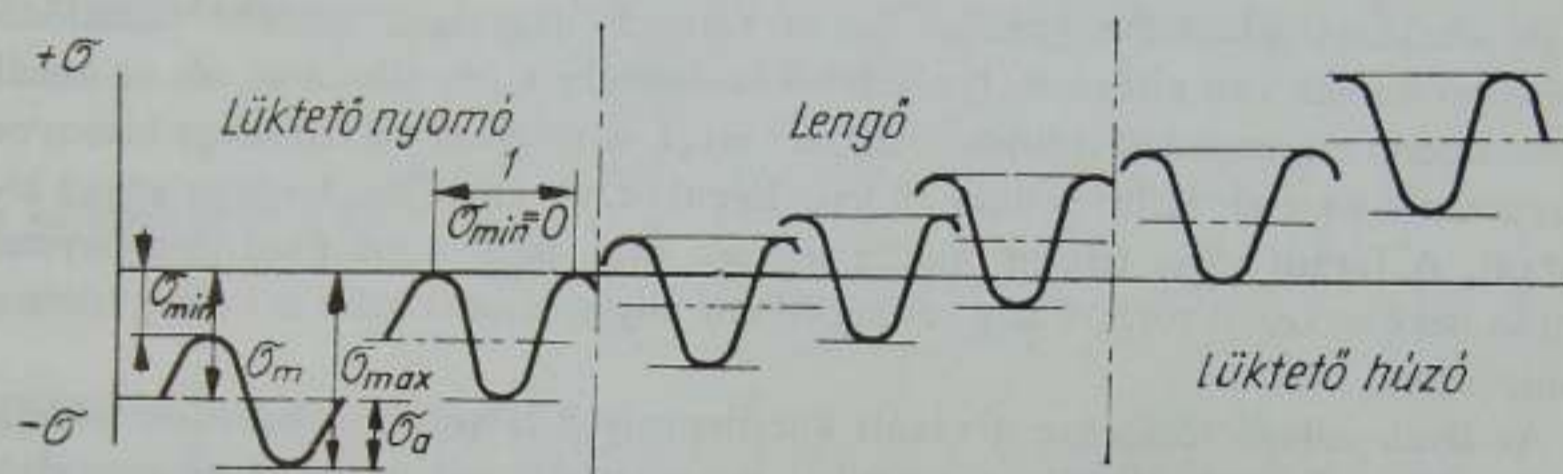


337. ábra. Tengelyek jellegzetes fáradt törése

van egy olyan határfeszültsége, amelyet a belőle készült szerkezeti alkatrész bármilyen nagyszámú terhelés ismétlésekor is törés nélkül elvisel. Ezt a határfeszültséget nevezik kifáradási határnak.

A *kifáradási határ* a folyási határnál mindig kisebb feszültség, amelynél valamivel nagyobb ismételt igénybevétel egy bizonyos ismétlési szám (N) után törést okoz, amelynél kisebb feszültség hatására azonban a törés gyakorlatilag sohasem következik be.

Az ismételt igénybevételek lehetnek ismételt normális feszültségűek, amilyen a húzás és nyomás, vagy ismételt csúsztató feszültségűek. A normális feszültségű



338. ábra. Ismételt igénybevételek jellegzetes feszültségváltozásai

igénybevételek lehetnek ismételt tiszta húzó, tiszta nyomó, húzó-nyomó, hajlító és forgó-hajtogató igénybevételek. Változásuk időbeni lefolyása a sinusgörbéhez hasonlít.

Az ismételt igénybevételeknél előforduló fogalmak és elnevezései a 338. ábra szerint:

σ_{\max} ismétlődő legnagyobb húzó-, nyomó- vagy hajlítófeszültség, kp/mm^2 ;

σ_{\min} ismétlődő legkisebb normális feszültség;

τ_{\max} ismétlődő legnagyobb csavaró- vagy nyírófeszültség, kp/mm^2 ;

$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$ kp/mm^2 ismétlődő közép feszültség;

$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$ kp/mm^2 feszültséglengés a közép feszültség körül (feszültség-amplitúdó);

N a fárasztó kísérletnél törést okozó ismételt igénybevételek száma rendszerint 10^6 többszörösében;

n a percenkénti igénybevételek száma;

f a másodpercenkénti igénybevételek száma;

$\sigma_f = \sigma_m + \sigma_a$ kp/mm^2 kifáradási határ;

σ_v lengőszilárdság, kp/mm^2 . Jellemzője: $\sigma_m = 0$, $\sigma_v = \pm \sigma_a$;

$\sigma_r = +2\sigma_a$ vagy $-2\sigma_a$: lüktetőszilárdság. Jellemzője $\sigma_m = \sigma_a$

A σ feszültségekre megadott jelölések értelemszerűen a τ feszültségekre is érvényesek.

A *lengőszilárdság* az ismételt lengő igénybevételek határesetében keletkező kifáradási határ, amikor a közép feszültség = 0. A *lökítő szilárdság* ugyanilyen határesetre az ismételt lökítő igénybevételeknek: az a kifáradási határ, amelynél a közép feszültség éppen a feszültségflengéssel egyezik.

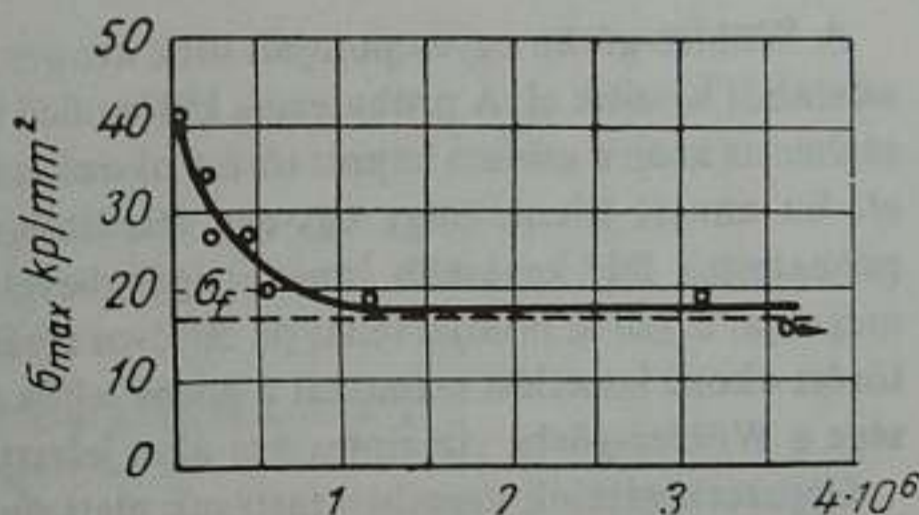
A kifáradási határra jellemző ismétlések száma $N = \infty$. A gyakorlat szempontjából nem folytatható a terhelés végtelen számú ismétléssel, ezért helyette elég nagy véges számot adnak meg ama ismétlődő igénybevételek számaként, amely mellett a kifáradási határral való terheléskor törésnek még nem szabad bekövetkeznie. Acéloknál $N = 10^7$, fémeknél $N = 5 \cdot 10^7$. Gyors vizsgálattal közelítőleg meghatározott kifáradási határnak számít az a feszültség, amely acéloknál $2 \cdot 10^6$ ismétlésre, fémeknél $10 \cdot 10^6$ ismétlésre még nem okoz törést.

Néha szükség lehet az igénybevétel fajának pontosabb megadására. Húzásra „h”, nyomásra „ny”, hajlításra „hj”, forgó hajtogatásra „fht” indexeket szokták használni.

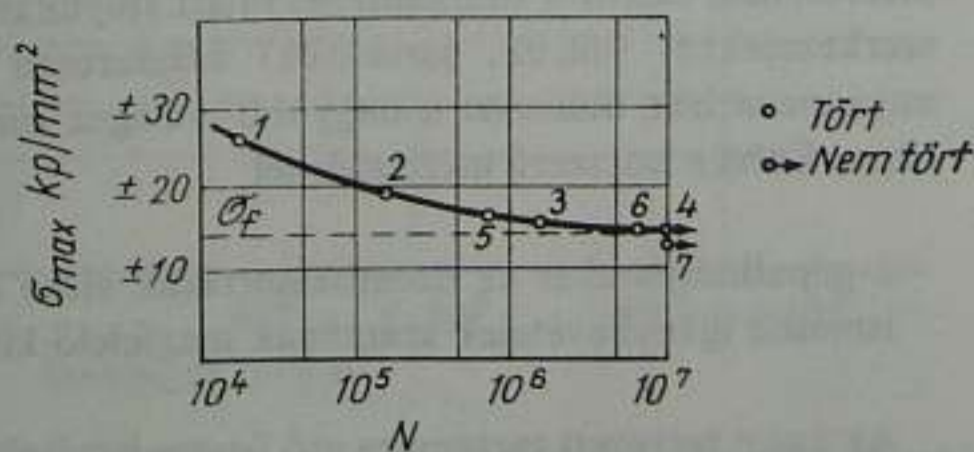
26.2. Wöhler-diagram

A kifáradási határ meghatározására a múlt évszázad közepén *A. Wöhler* dolgozott ki eljárást, amely még ma is használatban van. Eljárása szerint fárasztó kísérletnek vetnek alá 6–10 azonos méretű próbatestet, melyeknek igénybevett felületét a lehető leg-simábbra készítik ki (polírozzák). A teljesen sima felületre azért van szükség, mert a legkisebb felületi hiba, karc stb. lényegesen csökkenti a kifáradási határt. Ha pl. a próbatesten az l_0 mérőhosszúságot karcólótűvel bármilyen gyengén bejelöljük, a fáradt törés mindig a jel által megjelölt keresztmetszetben következik be, hacsak nem fordul elő a fárasztott rész felületén ennél mélyebb felületi hiba.

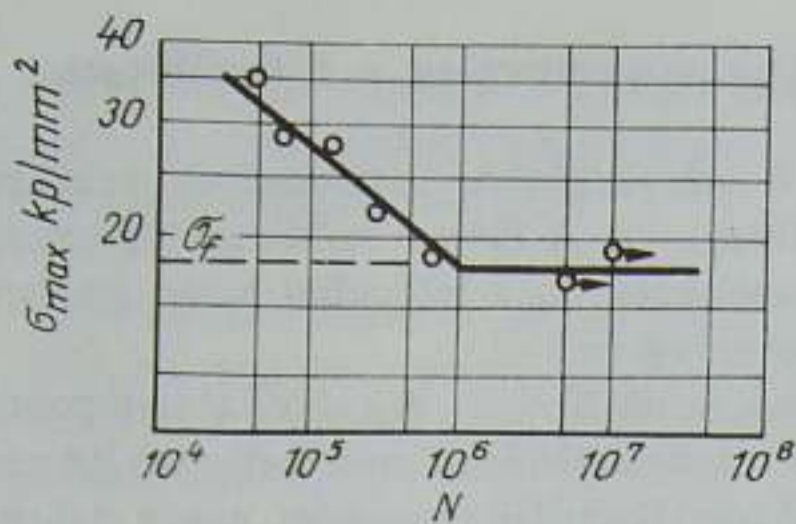
Mindegyik próbatestet más nagyságú ismétlődő igénybevételnek teszik ki. A terheléseket helyesen úgy választják, hogy a legnagyobb igénybevételtől közelednek



339. ábra. Lineáris léptékű Wöhler-diagram



340. ábra. Féllogaritmusos Wöhler-diagram



341. ábra. Kettős logaritmikus Wöhler-diagram

diagramban úgy, hogy a törési számokat tartalmazó vízszintes tengely léptéke logaritmikus, és kettős logaritmikus léptékű ábrázolásban. E háromféle ábrázolást mutatja a 339., 340. és 341. ábra.

A Wöhler-diagramnak alsó vízszintes érintője metszi ki a feszültségtengelyből a kifáradási határt. A 3 diagram alakja azt mutatja, hogy az utolsó két ábrázolási mód adja meg legfeltűnőbbben a kifáradás határát.

26.3. A fárasztókísérlet eredményeinek értékelése méretezésnél

A Wöhler-görbe egyes pontjait több azonos feszültségen végzett fárasztókísérlet adatából készítik el. A próbatetek különböző ismétlés után törnek. Egy-egy feszültséghez az azon a szinten kapott törést okozó ismétlési számok középértékét fogadják el. Ez annyit jelent, hogy egy-egy feszültség szinten végzett fárasztókísérletnél a próbatetek fele kevesebb ismételt igénybevételt bír ki, mint azt a Wöhler-görbe megadja. E görbe pontjai tehát pl. 50%-os törési valószínűséggel adják meg a fáradt törést okozó ismétlési számokat a görbe lejtős ágán. De ugyanez a törési valószínűsége a Wöhler-görbe vízszintes ága által jelzett kifáradási határnak is.

Gépszerkezeteink üzemben tartásuk alatt nincsenek minden esetben kitéve 10⁷-szer ismétlődő egyformán maximális terhelésnek. Ha tehát a kifáradási határra méreteznék, akkor a túlméretezés miatt súlyukat feleslegesen növelnék, ami mozgó szerkezeteknél (daruk, járművek) kétszeresen káros, mert egyrészt szerkezeti anyagpazarlást, másrészt a nagyobb tömegek mozgása miatt üzemanyag-pazarlást okoz. Ezért a korszerű méretezésnél

a gépalkatrészeket az üzembentartásuk előre tervezett tartama alatt előforduló ismételt igénybevételek számának megfelelő kifáradásra kell méretezni.

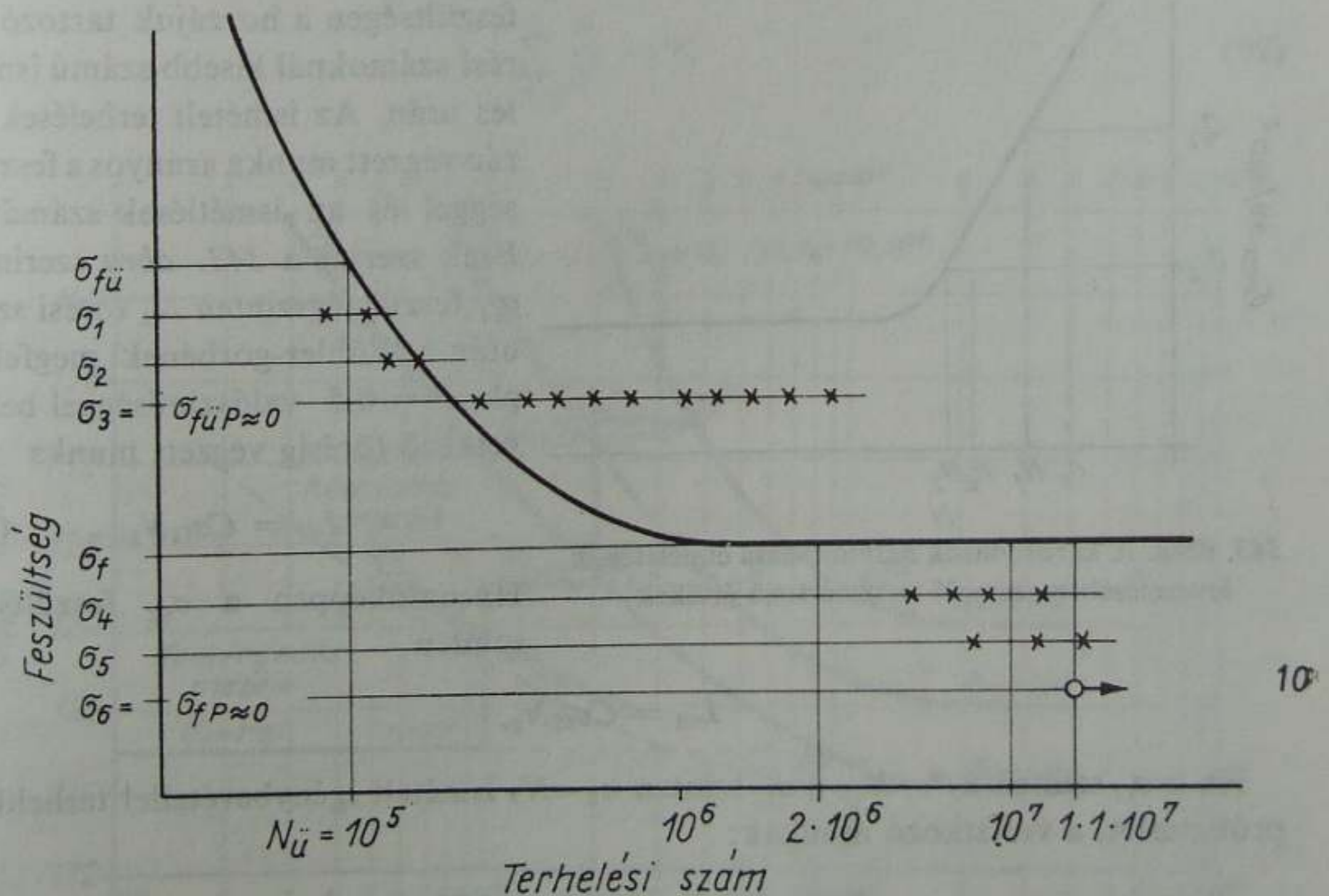
Az üzem tervezett tartamára eső összes ismételt igénybevételi szám, N_u a Wöhler-görbén olyan feszültséget ad meg (σ_{fu}), amely a mérési eredmények átlagát képviseli,

és így törés ellen nem ad teljes biztonságot. A törés elhárítására eddig egy bizonyos biztonsági tényezővel való szorzással csökkentették a $\sigma_{f\bar{u}}$ értékét a megengedett ismételt igénybevétel meghatározására. Ez az eljárás nem korszerű, mert a biztonsági tényező megállapítása szubjektív becsléseken alapszik.

Az elegendő biztonságos tartamméretezés alapját képező $N_{\bar{u}}$ ismétlési számhoz tartozó elenyészően kis, $P \approx 0$ törési valószínűséget biztosító ismételt igénybevételt, $\sigma_{f\bar{u}P \approx 0}$ -t lehet kísérletileg is meghatározni. Ennek módszerét a 342. ábra szemlélteti.

Kevés, 5–8 próbatest fárasztásával, vagy esetleg a 26.4. pontban ismertetett Locati-módszer segítségével egyetlen próbatest fárasztásával elkészítjük a Wöhler-görbét. Az $N_{\bar{u}}$ üzemi igénybevételi számhoz (pl. 10^5) vetítéssel meghatározzuk a $\sigma_{f\bar{u}}$ kifáradási határt. A $P \approx 0$ törési valószínűséget biztosító $\sigma_{f\bar{u}P \approx 0}$ kifáradási határ ennél biztosan kisebb. Ezért a fárasztó kísérleteket tovább folytatjuk $\sigma_{f\bar{u}}$ -nél kisebb $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots$ feszültség szinteken. Az egyes feszültség szinteken takarékoskosságból csak 1–2 próbatestet fárasztunk mindaddig, míg azok törési számai a Wöhler-görbe bal oldalára esnek. Ha az egyik szinten az első törés a görbe jobb oldalára kerülő ismétlési számnál következik be, akkor a fárasztást több, 10–20 próbatesttel megismételjük. $\sigma_{f\bar{u}P \approx 0}$ biztonságos kifáradási határ az a feszültség, melynél minden törés a görbe jobb oldalára esik.

Egészen hasonlóan határozható meg a $N = 10^7$ ismétlési számhoz tartozó kifáradási határnak $P \approx 0$ valószínűségű törést okozó $\sigma_{fP \approx 0} < \sigma_f$ kp/mm² értékei is.



342. ábra. A $p \approx 0$ törési valószínűséghez tartozó $\sigma_{f\bar{u}P \approx 0}$ kísérleti meghatározása $N_{\bar{u}} = 10^5$ igénybevételi számnál (tartamméretezésnél). A $\sigma_{fP \approx 0}$ kísérleti meghatározása

A szerkesztés menetét a 342. ábra mutatja. A nyilas kör mellé írt szám a feszültség-szinten el nem tört próbatetek számát jelzi.

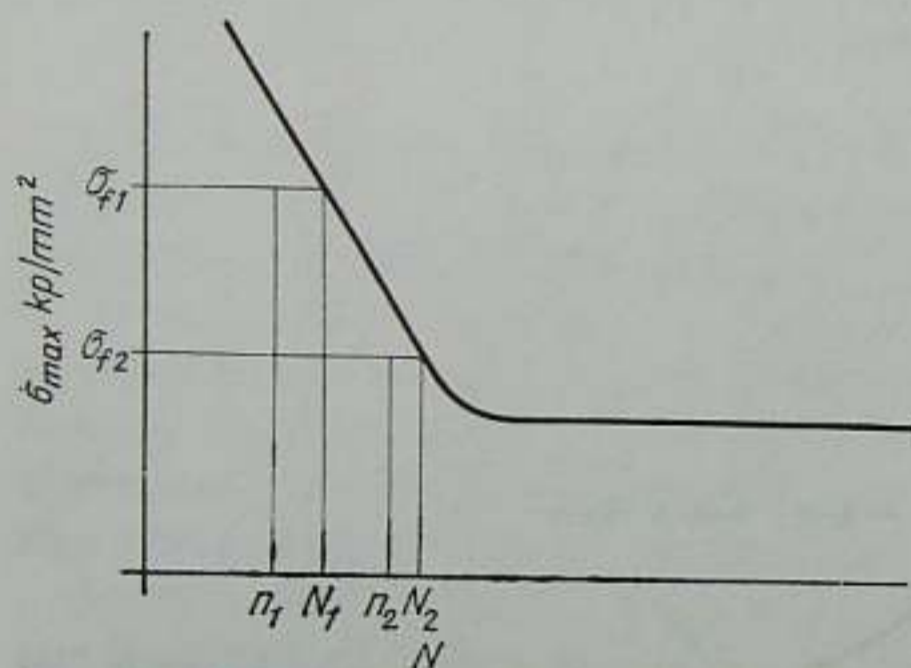
A leírt kísérleti módszerrel csökkenteni lehet, esetleg meg is lehet szüntetni a kifáradási határra való méretezés bizonytalanságát. Ez a módszer annál biztosabb eredményt ad, minél több próbatetet fárasztanak egy-egy feszültség-szinten és minél több szinten végzik a kísérletet. A tömeggyártás biztosítja a vizsgálati módszer gazdaságosságát. Az életbiztonság gyakran megköveteli alkalmazását.

26.4. Gyorsított fárasztókísérletek

a) A károsodások halmozódásának elmélete

A kifáradási határ meghatározása a Wöhler-görbe felvétele útján sok próba-
testen hosszantartó kísérletet igényel. Az ipari fejlődés gyorsuló iramában érthető
az a törekvés, hogy a kifáradási határ legalább közelítő meghatározására gyorsabb
módszert dolgozzanak ki. A rövidített fárasztókísérletek alapja legtöbb esetben
Palmgren és *Miner* a károsodások halmozódására vonatkozó hipotézise.

Palmgren és *Miner* elmélete szerint a fáradt törés előidézéséhez szükséges munka
mindig azonos, akár egy feszültségen következik be a hozzátartozó törést okozó



343. ábra. A károsodások halmozódása elméletének
levezetésében szereplő összetartozó értékek

ismételt terhelés után, akár többféle
feszültségen a hozzájuk tartozó tö-
rési számoknál kisebb számú ismét-
lés után. Az ismételt terhelések so-
rán végzett munka arányos a feszült-
séggel és az ismétlések számával.
Ezek szerint a 343. ábra szerint a
 σ_{f1} feszültség-szinten N_1 törési szám
után a Wöhler-görbének megfelelő
pl. $P = 0,5$ valószínűséggel bekö-
vetkező törésig végzett munka

$$L_{t1} = C\sigma_{f1}N_1. \quad (91)$$

Hasonlóképpen a σ_{f2} feszültség-
szinten

$$L_{t2} = C\sigma_{f2}N_2.$$

Ha a σ_{f1} szinten $n_1^* < N_1$, a σ_{f2} szinten $n_2 < N_2$ ismételt igénybevétellel terhelik a
próbatestet, a vonatkozó munkák:

$$L_1 = C\sigma_{f1}n_1 \quad \text{és} \quad L_2 = C\sigma_{f2}n_2.$$

* A következőkben $n_1, n_2 \dots n_i$ nem percenkénti, hanem az $N_1, N_2 \dots N_i$ -nél kisebb ismétlési
számot jelent.

Azonos szintű munkák viszonya:

$$\frac{L_1}{L_{t1}} = \frac{C\sigma_{f1}n_1}{C\sigma_{f1}N_1} = \frac{n_1}{N_1} \quad \text{és} \quad \frac{L_2}{L_{t2}} = \frac{n_2}{N_2}.$$

E két utolsó egyenletet összegezve

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = \frac{L_1}{L_{t1}} + \frac{L_2}{L_{t2}}.$$

Azonos anyagnál a törési munka állandó, tehát $L_{t1} = L_{t2} = L_t$, ezzel

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = \frac{L_1 + L_2}{L_t}.$$

Az n_1 -szer ismétlődő σ_{f1} és n_2 -szer ismétlődő σ_{f2} feszültségű terhelések akkor okoznak törést, ha

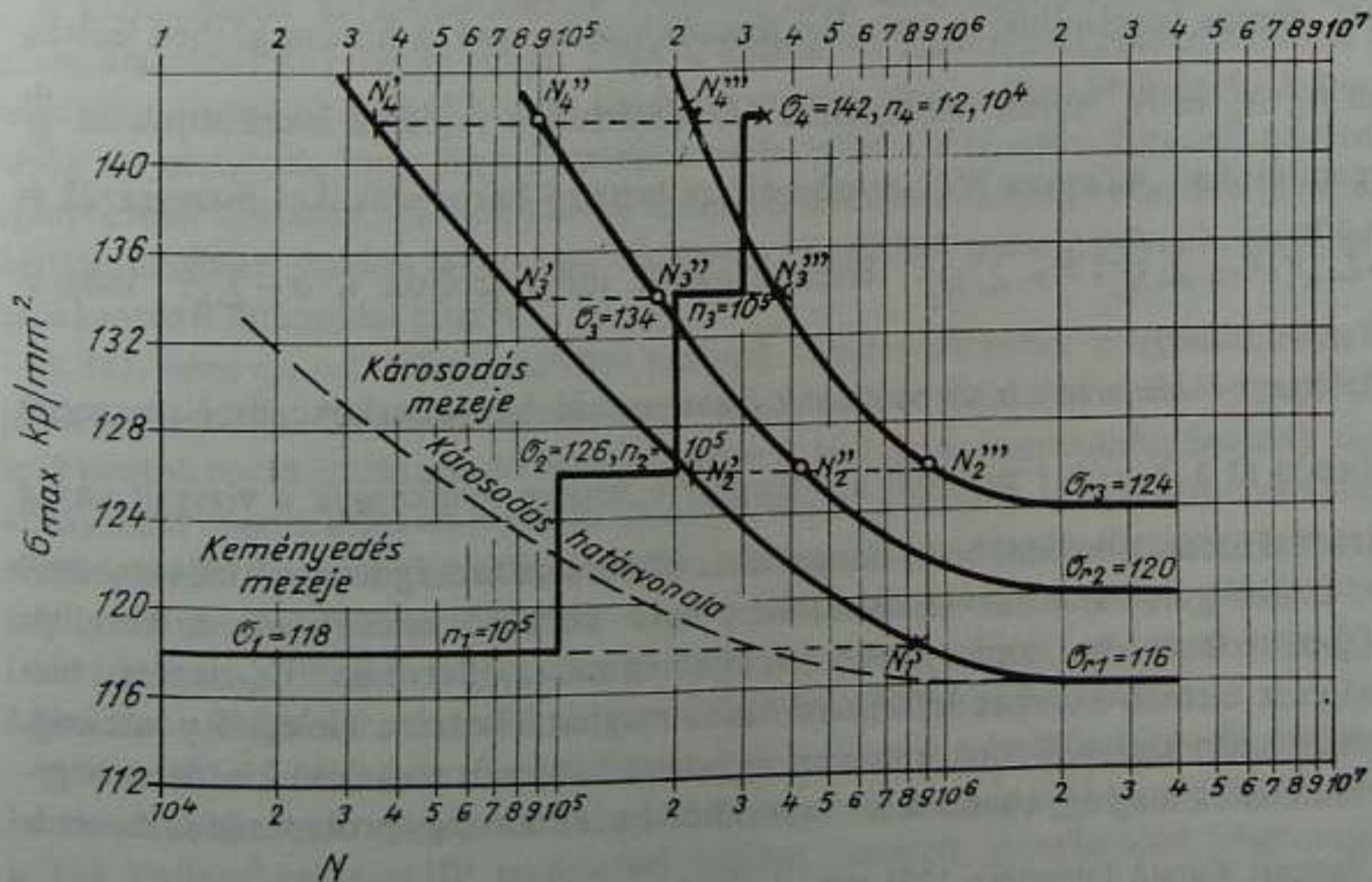
$$L_1 + L_2 = L_t.$$

A károsodások halmozódásának elmélete szerint tehát a törés a különböző szintű terhelések következtében akkor következik be, ha

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1,$$

illetve általánosítva $\sigma_1, \sigma_2 \dots \sigma_k$ feszültség szintre

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1. \quad (92)$$

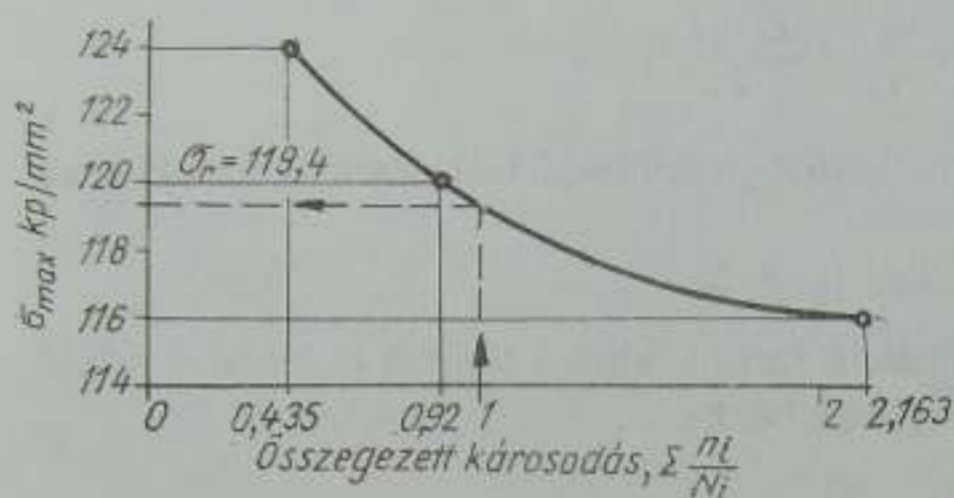


344. ábra. Zongorahúr gyorsfárasztása Lokati-módszerrel

b) A gyors fárasztás Locati-féle módszere

A károsodások halmozódásának hipotézisét *Locati* olyan gyorsfárasztó módszer kidolgozására használta fel, mellyel egyetlen próbatesttel, lépcsősen növekvő terheléssel, $5 \cdot 10^5$ — $10 \cdot 10^5$ terhelési számnak megfelelő idő alatt, $\pm 5 \div 6\%$ megközelítéssel, lehet a kifáradási határt meghatározni. Módszerét egy konkrét példa kapcsán ismertetjük.*

Felrajzolunk három Wöhler-görbét, melyek egyike a vizsgálandó anyag becsült kifáradási határának, a másik kettő valamivel nagyobb és kisebb kifáradási határ-



345. ábra. A kifáradási határ meghatározása Lokati-módszerrel

nak felel meg. A 345. ábra ilyen görbéket mutat egy $\sigma_B = 220$ kp/mm² szakítószilárdságú 2,5 mm átmérőjű zongorahúr-acélhuzal lüktető szilárdságára, amelyet középértékben $\sigma_r = 120$ kp/mm²-re becsültek.

Egy próbatestet lépcsősen fárasztunk úgy, hogy az első terhelési lépcső 118 kp/mm² és a terhelés száma $n_1 = 10^5$. A terhelést ezután $118 + 8 = 126$ kp/mm²-

re növelve tovább fárasztjuk a próbatestet $n_2 = 10^5$ ismétlésével. A 3. lépcső $126 + 8 = 134$ kp/mm² $n_3 = 10^5$, a negyedik lépcső terhelése 142 kp/mm², az ismétlési száma azonban már csak $n_4 = 1,2 \cdot 10^4$, mert ekkor a próbatest eltört. A terhelési lépcsőket a 345. ábrába berajzoljuk. A terhelési lépcsőkhöz tartozó, a három görbén leolvas-

ható N'_i , N''_i és N'''_i törési számokat a 21. táblázatban foglalva kiszámítjuk az $\frac{n_i}{N_i}$ károsodásokat. Az egyes Wöhler-görbékhez tartozó károsodásokat összegezzük és $\sigma_{r1}, \sum \frac{n_i}{N'_i}; \sigma_{r2}, \sum \frac{n_i}{N''_i}; \sigma_{r3}, \sum \frac{n_i}{N'''_i}$ értékpárokból megrajzoljuk a $\sigma - \sum \frac{n_i}{N_i}$ diagramot (346. ábra).

Palmgren—Minernek a károsodások összegeződésére vonatkozó elmélete szerint a görbén át a $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$ pontból a σ -tengelyre vetítve megkapjuk a vizsgált anyag kifáradási határát, esetünkben a zongorahúr lüktetőszilárdságát: $\sigma_r = 119,4$ kp/mm².

A Locati-gyorsfárasztás természetesen csak közelítő értéket ad. A közelítés $\pm 5\%$ -os szokott lenni, ami a gyakorlati tájékoztatásra, illetve az 50%-os törési biztonsághoz tartozó közepes kifáradási határ meghatározására kielégítő pontosság. A példánkban szereplő zongorahúrral ugyanezt a lépcsős terhelésű kísérletet négyszer ismételték meg ugyanannak a zongorahúr-huzalnak négy próbatestjén. Az ered-

* A Vasipari Kutató Intézetben 1963-ban végzett kutató munkából. Végezte dr. Szombatfalvy Árpád.

Kísérleti adatok		Károsodások számítása					
$\sigma_{i\max}$ kp/mm ²	n_i	$\sigma_{r1} = 116$ kp/mm ² görbén		$\sigma_{r2} = 120$ kp/mm ² görbe		$\sigma_{r3} = 124$ kp/mm ² görbén	
		N_i'	$\frac{n_i}{N_i'}$	N_i''	$\frac{n_i}{N_i''}$	N_i'''	$\frac{n_i}{N_i'''}$
$\sigma_1 = 118$	10^5	$860 \cdot 10^3$	0,116	0	0	0	0
$\sigma_2 = 126$	10^5	$220 \cdot 10^3$	0,454	$430 \cdot 10^3$	0,232	$900 \cdot 10^3$	0,111
$\sigma_3 = 134$	10^5	$80 \cdot 10^3$	1,250	$180 \cdot 10^3$	0,555	$370 \cdot 10^3$	0,270
$\sigma_4 = 142$	$1,2 \cdot 10^4$	$35 \cdot 10^3$	0,343	$90 \cdot 10^3$	0,133	$220 \cdot 10^3$	0,054
Összegezett károsodás		$\Sigma \frac{n_i}{N_i'} = 2,163$		$\Sigma \frac{n_i}{N_i''} = 0,920$		$\Sigma \frac{n_i}{N_i'''} = 0,435$	

mények: $\sigma_r = 114, 119,4, 126, 122$ kp/mm². A Wöhler-görbével klasszikus módon meghatározott lüktetőszilárdsága $\sigma_r = 119,2$ kp/mm². A szórás tehát, amely az anyag inhomogenitását is tartalmazza: +5,75%, -4,2%. A módszer tehát a kifáradási határ közelítő meghatározására alkalmas.

A károsodások halmozódásának elmélete nem veszi figyelembe azt a Wöhler-görbe alakjából következő tény, hogy a kifáradási határnál nagyobb terhelést az anyagok a törést okozónál kisebb ismétlési számig törés nélkül elviselnek. A kutatások azt mutatták, hogy ha a fárasztó kísérlet előtt a kifáradási határnál nagyobb igénybevétel korlátolt, 10^6 -nál kisebb számú ismétlése az anyag kifáradási határára kétféle, ellentétes hatású lehet: egy bizonyos ismétlési számig növelik, azon felül csökkentik a kifáradási határt.

A 345. ábra $\sigma_{r1} = 116$ kp/mm²-hez tartozó Wöhler-görbéhez szaggatott vonallal jelölt görbe az ún. *károsodás határvonala*. E görbe és a Wöhler-görbe eső ága között levő pontok olyan összetartozó feszültségeket és terhelési számokat határoznak meg, amelyekkel végzett előzetes ismételt igénybevétel a próbatest anyagában olyan káros elváltozásokat (szubmikroszkópos vagy mikroszkópos repedéseket) okoz, ami az anyag kifáradási határát csökkenti. *A károsodás határvonala alatt levő pontok olyan ismétlési számait adják a feszültségeknek, amelyek mellett az anyag repedések képződése nélkül felkeményedik, és ennek folytán kifáradási határa nő.*

A lépcsős terhelésű gyorsfárasztásnál tehát csak azok a terhelési lépcsők okoznak károsodást, amelyeknek végpontjai a károsodás határvonala fölé esnek. Példánkban a 118 kp/mm²-rel $n_1 = 10^5$ terheléssel végzett ismételt igénybevétel végpontja a károsodás vonala alá esik. Ez az előterhelés tehát nem csökkenti, hanem növeli a

kifáradási határt. Ebből következik, hogy az $\frac{n_1}{N_1} = 0,116$ károsodás helyett szilárdulás keletkezik. Ezt úgy vehetjük számba, hogy a 0,116-ot ellenkező előjellel vesszük. A $\sigma_{r1} = 116 \text{ kp/mm}^2$ görbéjére számított összegezett károsodás így 1,92-re csökken. A 346. ábra azt mutatja, hogy ez a görbe alakját alig változtatja, így a σ_r értékére nem hat.

26.5. Kifáradási határdiagramok (biztonsági területek)

Az ismételt igénybevételek változatossága azzal a következménnyel jár, hogy nem beszélhetünk „az acél kifáradási határáról”. A szerkezeti anyagoknak nagyon sokféle kifáradási határunk van. Méretezésnél szükség van arra, hogy a szerkezeti anyagoknak kifáradási határértékeit áttekinthető diagramban ábrázolják, hogy a konstruktőrök az ismételt igénybevételnek megfelelő terhelés szerint a szerkezet számára legmegfelelőbb anyagot választhassák. A gépszerkesztők munkáját könnyítik meg a szerkezeti acélok kifáradási határtípusairól készült összefoglaló diagramok, az ún. *biztonsági területek*.

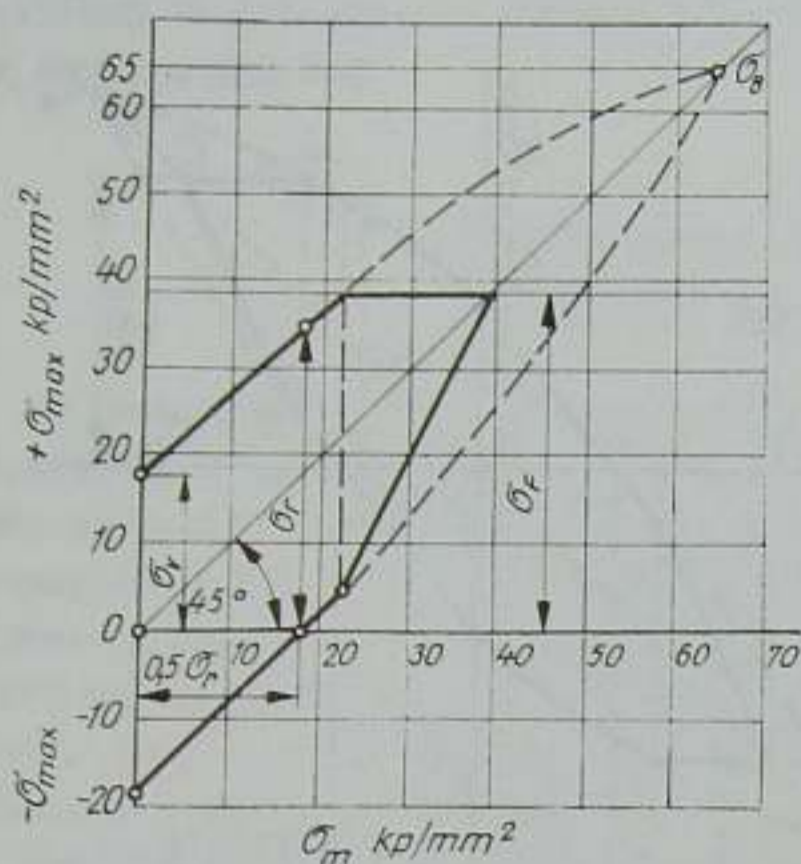
Kifáradási határra vonatkozó diagramokat azonos jellegű fárasztó igénybevételekre külön-külön készítenek. Így vannak normális feszültségű, ismételt húzó-nyomó igénybevétellel meghatározott kifáradási határokat összefoglaló diagramok, ismételt hajlító és ismételt csavaró igénybevételekre meghatározott biztonsági területek.

A kifáradási határokat összefoglaló diagramok úgy készülnek, hogy a σ_{\max} , illetve σ_{\min} értékeket a σ_m középfeszültség függvényében ábrázolják. A diagram tengelykeresztjének vízszintes tengelyén tehát a középfeszültség, függélyes tengelyén pedig a legnagyobb feszültségek értékei szerepelnek. A vízszintes tengely a kezdőponttól jobb felé, a függélyes tengely a kezdőponttól felfelé pozitív, húzó igénybevételt jelez. Az ellenkező irányú tengelyek negatív, nyomó igénybevételt jelentenek.

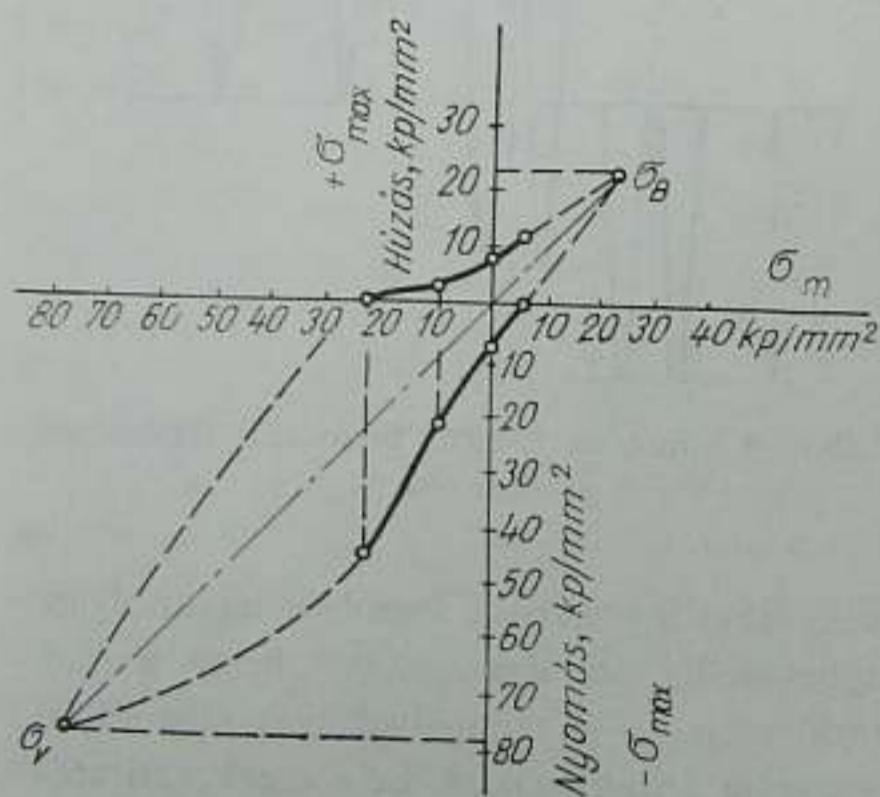
Az egyes szerkezeti anyagok biztonsági területeinek meghatározása kísérletileg rendkívül sok Wöhler-görbe felvételét követeli meg. A műszaki gyakorlatban azonban kialakult a biztonsági területeknek olyan szerkesztési módszere, amely a minimális számú fárasztó kísérlet elvégzésével teszi lehetővé olyan biztonsági terület felrajzolását, amelyet a gépszerkesztők kielégítő biztonsággal használhatnak fel. Ismételt húzó-nyomó fárasztásra érvényes biztonsági területet meg lehet szerkeszteni egy szakítókísérlet és két Wöhler-görbe felvételével. Ha ismert a szerkezeti anyag folyáshatára, lüktetőszilárdsága és lengőszilárdsága, akkor a *húzó-nyomó fárasztó igénybevételre érvényes biztonsági terület* a 346. ábra szerint a következőképpen szerkeszthető meg:

A 0 pontból 45° alatt hajló egyenest húznak. Ez az egyenes jelöli a σ_m középfeszültséget éppúgy, mint a vízszintes tengely. A 0 ponttól felfelé és lefelé felméri a

Ez a diagram szemlélteti az öntöttvasnak azt a jellegzetes tulajdonságát, hogy nyomásra lényegesen nagyobb igénybevétellel terhelhető ismételten, mint húzásra. Húzóigénybevételt az öntöttvas a grafitkristályok keresztmetszet-csökkentő és



347. ábra. Egyszerűsített biztonsági terület



348. ábra. Az öntöttvas teljes biztonsági területe

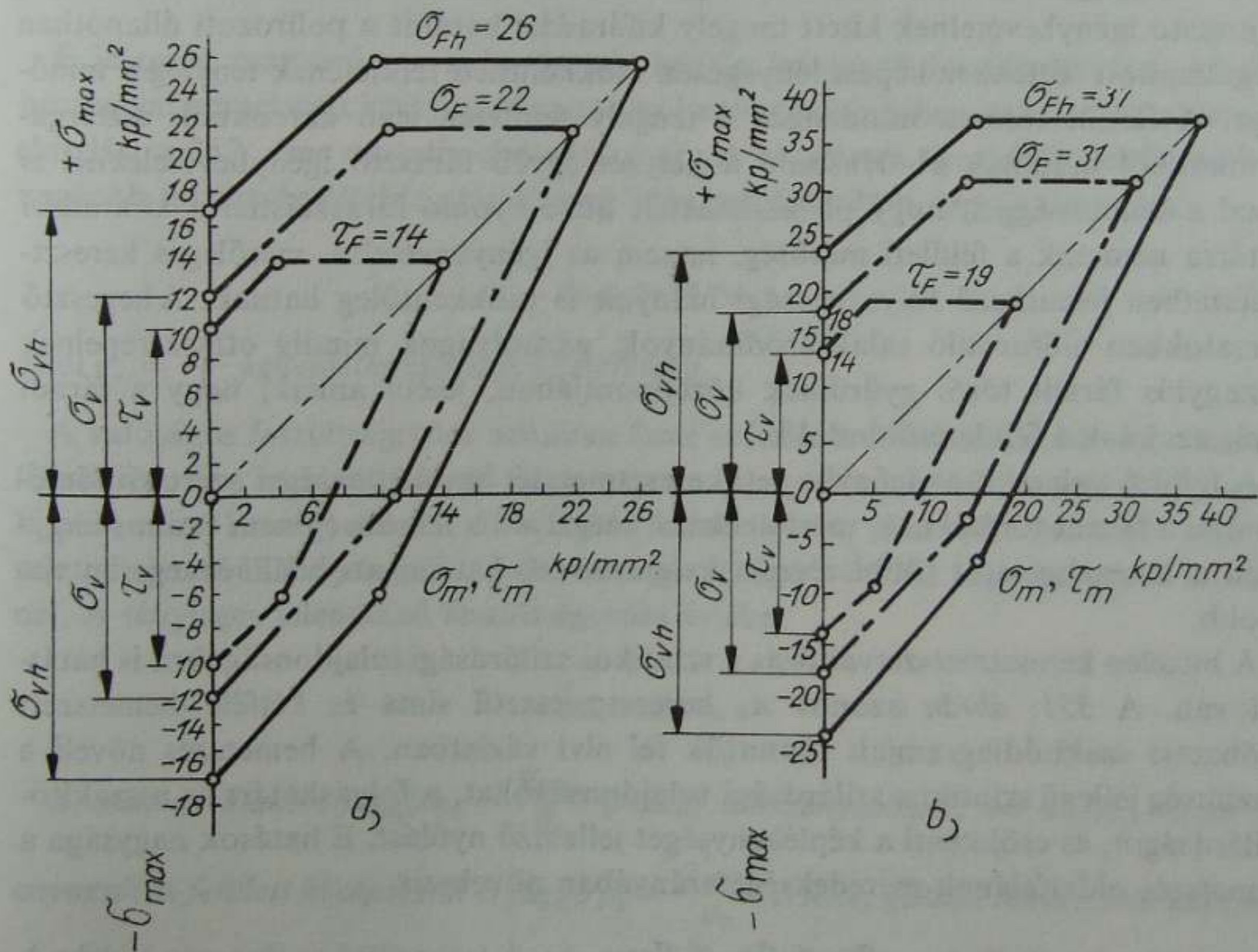
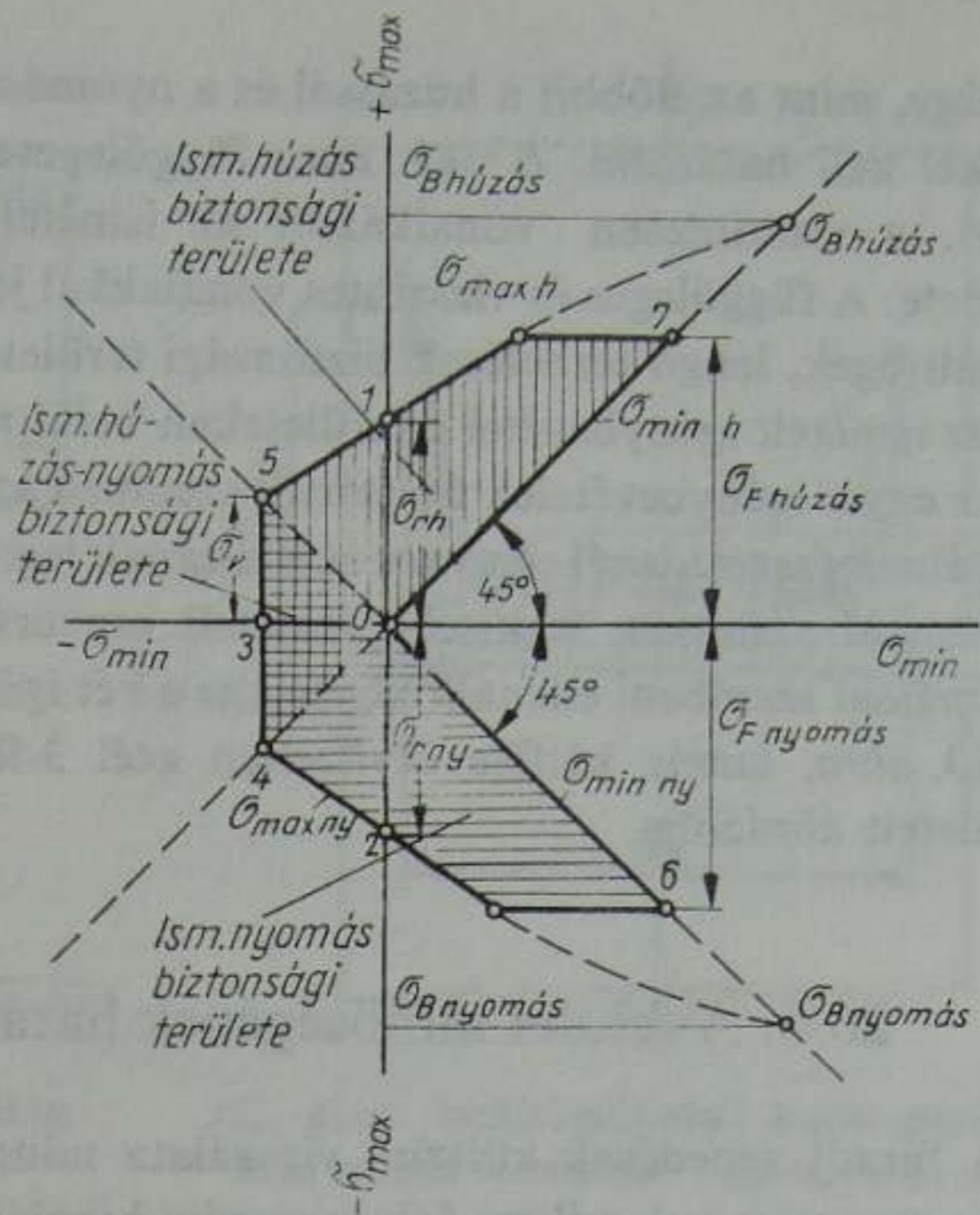
pontok. Az 5—1 pontokat összekötő egyenest meghosszabbítva kapják a felső határgörbét a húzó ismételt igénybevételeknek. Ugyanígy a 4 és 2 pontot összekötő egyenest meghosszabbítva kapják a nyomásra vonatkozó σ_{max} felső határgörbét a biztonsági területnek. Az alsó határgörbét a 45°-os egyenesek adják. E diagramot

bemetszéseként feszültségcsúcsokat létesítő hatásuknál fogva lényegesen kisebb mértékben bír el ismételten, mint a nyomó igénybevételt.

Az ismételt húzás és nyomás biztonsági területeit lehet megszerkeszteni más módon is: például úgy, mint azt a 349. ábra mutatja, amely a módosított Goodman-ábrát, tünteti fel. Ez az ábra egy húzókísérlet és egy nyomókísérlet útján megállapított folyáshatárok, valamint egy lengőfárasztó kísérlet sorozattal meghatározott lengőszilárdság, az ismételt húzóterheléssel megállapított lüktetőszilárdság, valamint az ismételt nyomóterheléssel megállapított nyomólüktető-szilárdság segítségével szerkeszthető meg.

A Goodman-ábrában a vízszintes tengely az ismételt alsó feszültségeket, a függőleges tengely az ismételt felső feszültségeket (σ_{max}), a 45°-os egyenesek ugyancsak az ismételt alsó feszültségeket (σ_{min}) jelölik. Szerkesztésénél úgy járnak el, hogy a 0 ponttól felfelé a húzással megállapított lüktetőszilárdságot, lefelé a nyomással megállapított lüktetőszilárdságot mérik fel. Így kapják a diagram 1 és 2 pontjait. A 0 ponttól negatív irányban felrakják a lengőszilárdságértékét (3) és ebből a pontból lefelé és felfelé felrakják ugyancsak a lengőszilárdságokat: (4), (5)

349. ábra. A teljes biztonsági területek Goodmann-ábrája



350. ábra. Hajlító (teljes vonal), húzó-nyomó (eredményvonal) és csavaró kifáradási határ (szaggatott vonal) biztonsági területei a) $\sigma_B = 37$ kp/mm², b) $\sigma_B = 52$ kp/mm² szakítószilárdságú ötvöztelen acélra

éppúgy, mint az előbbit a húzással és a nyomással megállapított folyási határ értékekkel kell határolni. A 349. ábra függőlegesen vonalkázott területe az ismételt húzó, a vízszintesen vonalkázott az ismételt nyomóigénybevételek biztonsági területe. A függőleges és vízszintes vonalakkal jelölt terület az ismételt húzó-nyomó feszültségek, lengő terhelések biztonsági területe. Fáradt törés nem következik be, ha az ismételt igénybevétel e területeken belül marad.

Az egyes igénybevételek típusaival szemben az anyagok általában nem egyformán reagálnak fárasztásnál. Azonos acélfajtának legnagyobb a kifáradási határa ismételt hajlítással szemben, legkisebb ismételt csavarással szemben. Az ismételt húzás-nyomással szembeni ellenállóképessége e két igénybevétel között áll. Ezt szemlélteti a 350. ábra, amely kétféle ötvözetlen acél 3-féle terhelésre vonatkozó biztonsági területeit ábrázolja.

26.6. A felület minőségének hatása a kifáradási határra

A fáradt repedések külszíni vizsgálata mindenkor azt mutatja, hogy a fáradt törés az anyag valamilyen folytonossági hibájának körzetéből indul ki. Egy forgóhajtogató igénybevételnek kitett tengely kifáradási határát a polírozott állapotban megállapított értékhez képest lényegesen csökkentheti felületének tényleges minősége. A fáradt törések mindenkor a tengely felületén levő karcokból, eszterganyomokból indulnak ki. Hasonló a helyzet egyéb fárasztó igénybevételeknél is azzal a különbséggel, hogy pl. az ismételt húzó-nyomó fárasztásnál a kifáradási határra nemcsak a felületi minőség, hanem az igénybevételre merőleges keresztmetszetben jelentkező folytonossági hiányok is csökkentőleg hatnak. A hegesztő varratokban előforduló salakzáródmányok, gázhólyagok mindig ott szerepelnek a kagylós fáradt törés gyűrűinek középpontjában, jeléül annak, hogy a fáradt törés azoknak a felületéről indul ki.

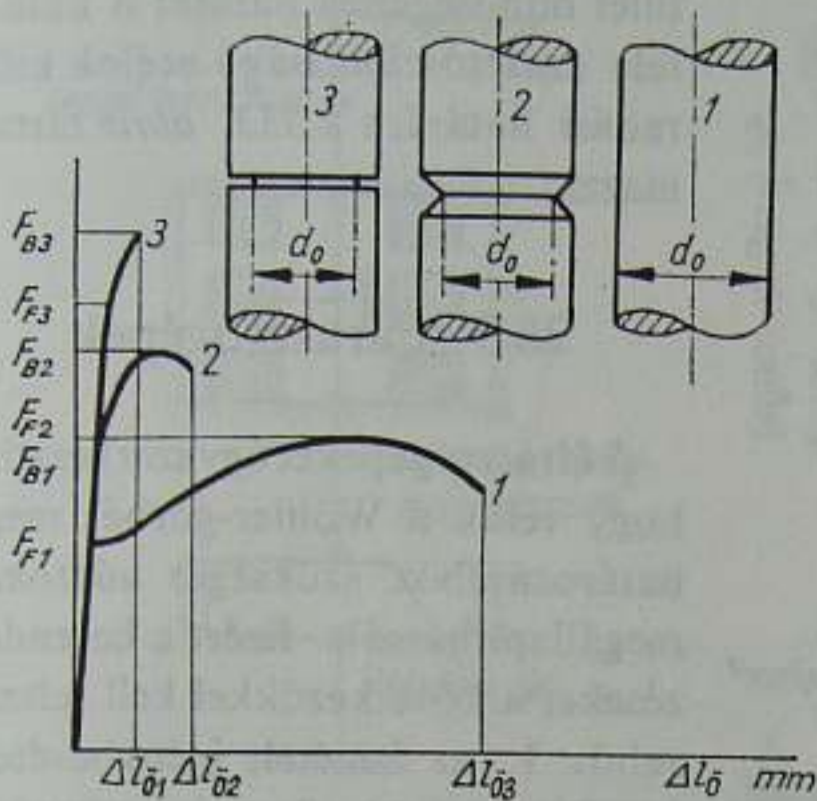
A felület, valamint az igénybe vett keresztmetszet egyenetlenségei azért kiindulópontjai a fáradt töréseknek, mert azoknak szegélyén a feszültség nem azonos nagyságú a keresztmetszet többi részein keletkezővel, hanem azoknál lényegesen nagyobb.

A hirtelen keresztmetszetváltozás a sztatikus szilárdsági tulajdonságokra is hatással van. A 351. ábrán azonos A_0 keresztmetszetű sima és kétféle bemetszett próbatest szakítódiagramjait tüntettük fel elvi vázlatban. A bemetszés növeli a feszültség jellegű sztatikus szilárdsági tulajdonságokat, a folyáshatárt és a szakítószilárdságot, és csökkenti a képlékenységet jellemző nyúlást. E hatások nagysága a bemetszés oldalfalának meredeksége arányában növekszik

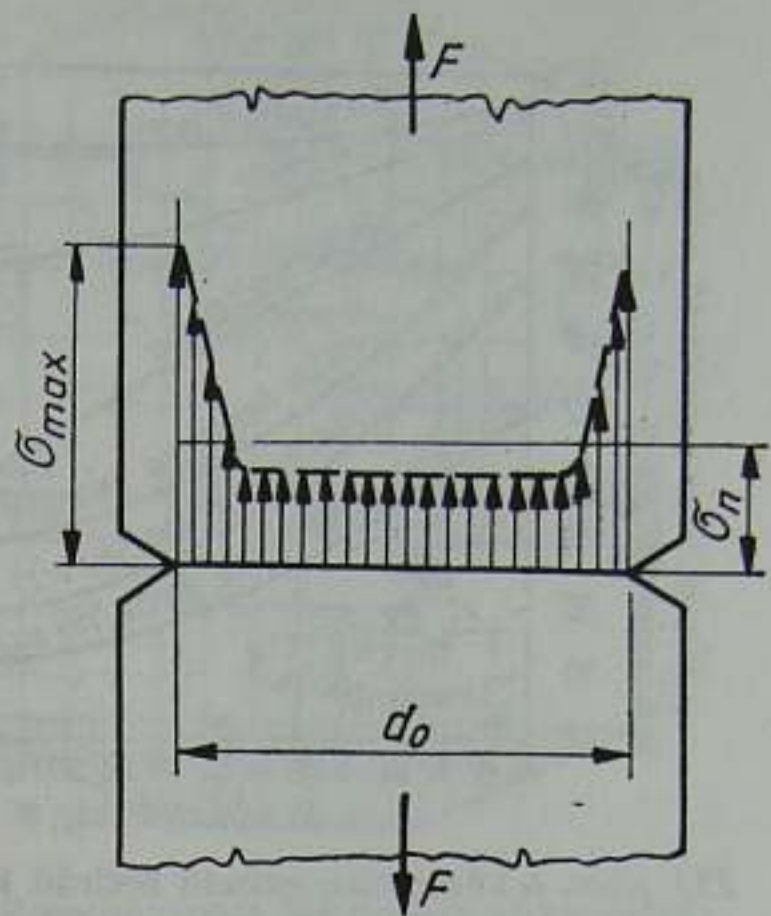
$$\sigma_{F1} < \sigma_{F2} < \sigma_{F3};$$

$$\sigma_{B1} < \sigma_{B2} < \sigma_{B3};$$

$$\delta_1 > \delta_2 > \delta_3.$$



351. ábra. Bemetszések hatása a sztatikus szilárdsági tulajdonságokra



352. ábra. Szakítópróbatest feszültségeloszlása az éles horonnyal bemetszett helyen

E jelenség magyarázata a bemetszés helyén keletkező feszültségcsúcs. Az éles horonnyal bemetszett szakítópróbatest ép keresztmetszetében keletkező feszültségeloszlást a 352. ábra mutatja elvi vázlatban. A bemetszés sarokélén keletkező legnagyobb feszültség értékét számítással lehet megállapítani, ennek nagysága

$$\sigma_{\max} = \alpha_k \sigma_n, \quad (93)$$

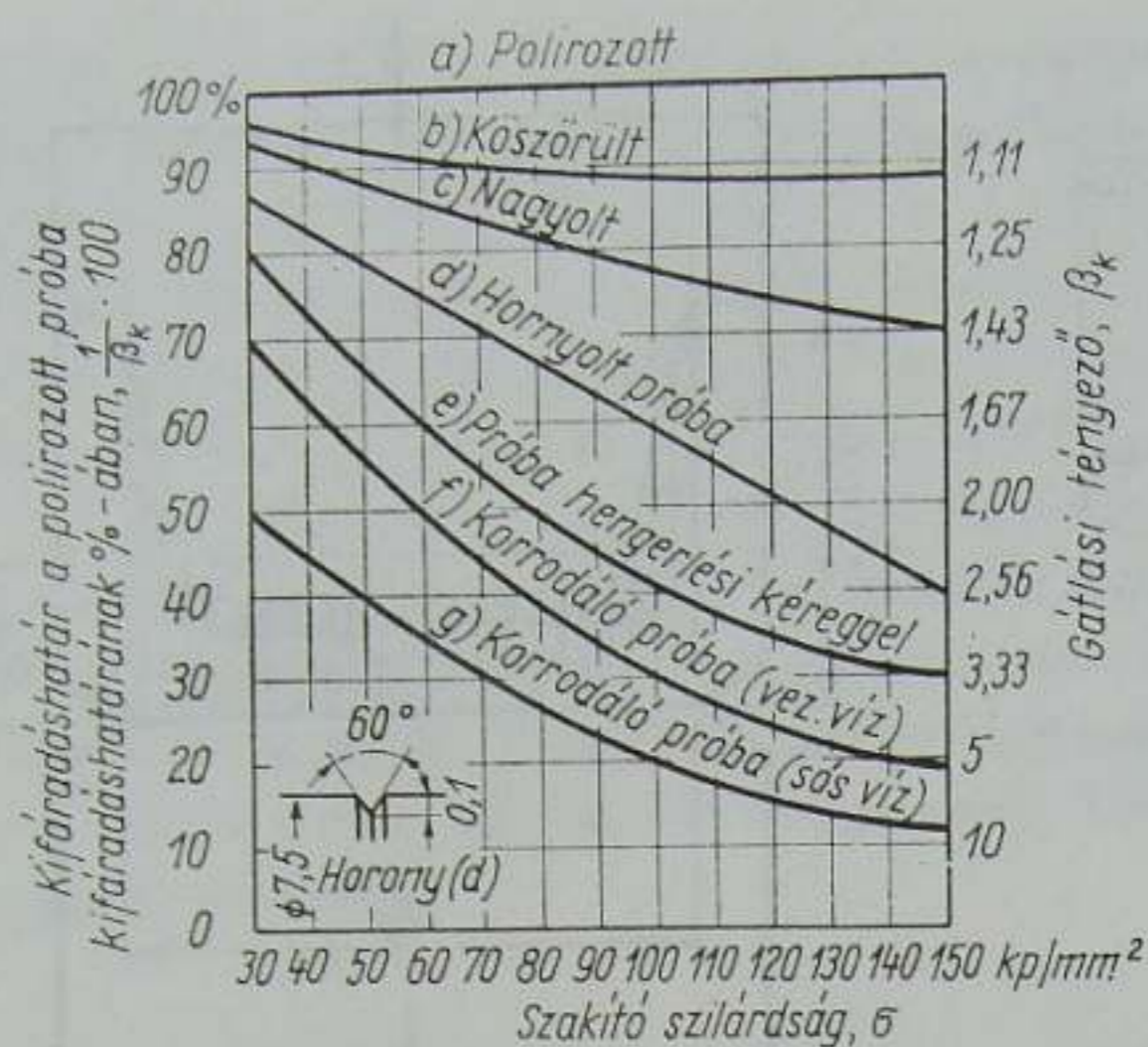
ahol $\sigma_n = \frac{F}{A_0}$ egyenletes eloszlású feszültség.

A valóságos feszültségcsúcs azonban fenti számított értéknél kisebb. Ez a valódi feszültségcsúcs az alakon kívül függ még az anyag minőségétől; lágyabb anyagnál kisebb, mint keményebbnél; és a felület minőségétől: köszörült felületnél kisebb, mint simítottnál. Legnagyobb a durva nagyolt, nyers öntött vagy hengerelt felületnél. A tényleges jelentkező feszültségcsúcs értéke

$$\sigma'_{\max} = \beta_k \sigma_n \quad (94)$$

A csak az alaktól függő $\alpha_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}$ értéket alaktényezőnek, az alakon kívül az anyagtól és felületi kiképzéstől is függő $\beta_k = \frac{\sigma'_{\max}}{\sigma_n}$ értéket gátlási tényezőnek nevezik.

A gátlási tényezőt a kifáradási határ megállapításánál úgy kell figyelembe venni, hogy a sima, fényesített felületű próbatesttel megállapított kifáradási határ értéket a gátlási tényezővel osztják. Az így kapott érték a számításnál figyelembe veendő

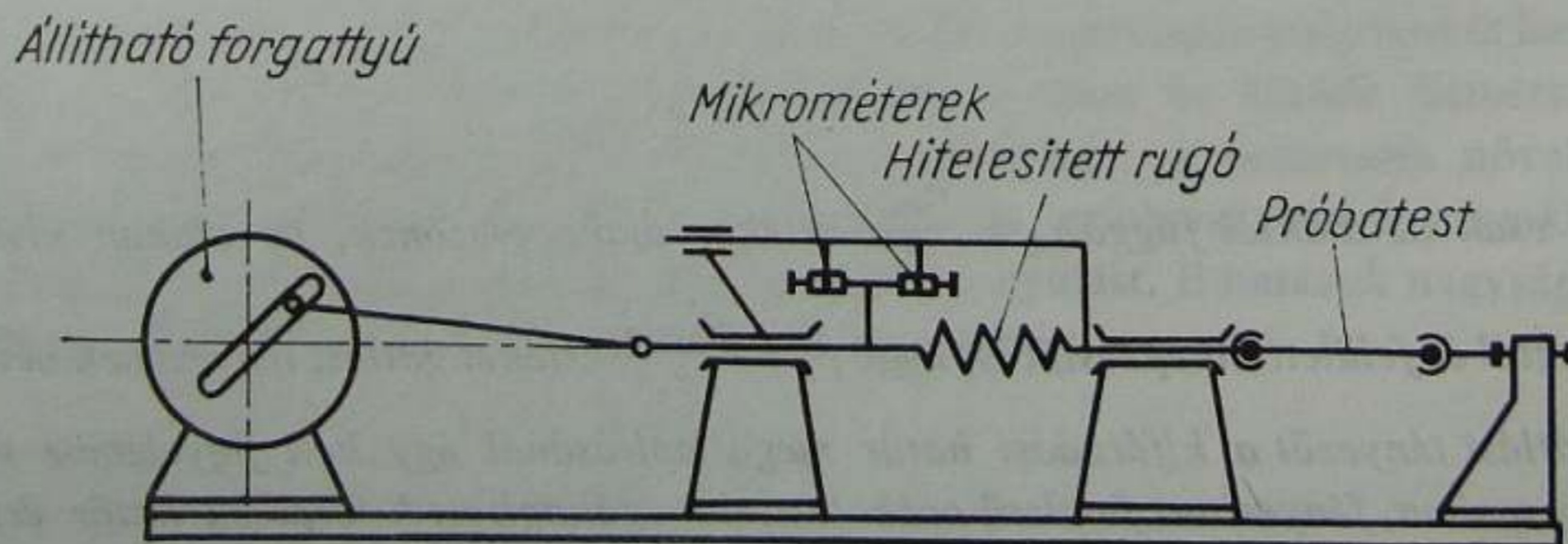


353. ábra. A körkeresztmetszetű acélrúd kifáradási határának változása a szilárdsággal különböző felületi minőség és közeg hatására

tárok betartására $\pm 2\%$ pontosságig, 4. a próbadarab befogására alkalmas befogó szerkezet, amely az igénybevételt megbízhatóan átadja, 5. olyan számláló-szerkezet, mely a terhelésváltozások számát önműködően mutatja és töréskor a gépet leállítja.

A gépek azonos rugalmas alakváltozást, illetve azonos terhelést adnak a próbatestnek egy alsó és egy felső határ között. Típusaik az igénybevétel fajtái szerint: húzó-nyomó fárasztógépek, pulzátorok; forgó-hajtogató; hajlító; csavaró fárasztógépek. A nagyon sokféle fárasztógép-típus közül néhány legegyszerűbbnek vázlatát adjuk.

A mechanikus terhelésű fárasztógép legegyszerűbb, régi típusa a forgattyús hajtású, amelyet a 354. ábra mutat. Az amplitúdó változtatására a forgattyú nagysága változtatható kulisszás eltolással. A terhelés mérésére hitelesített rugót iktatnak a próbatest és a forgattyú közé. Az erő mérése a rugó megnyúlásának és összenyomódásának mikrométerekkel való mérésével történik, e megnyúlás arányos az erővel, és

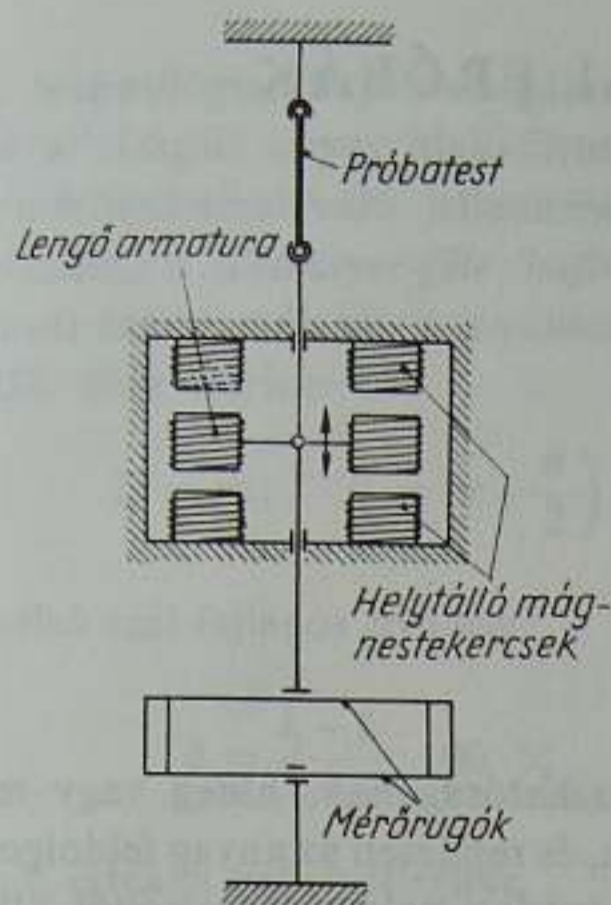


354. ábra. Húzó-nyomó forgattyús fárasztógép

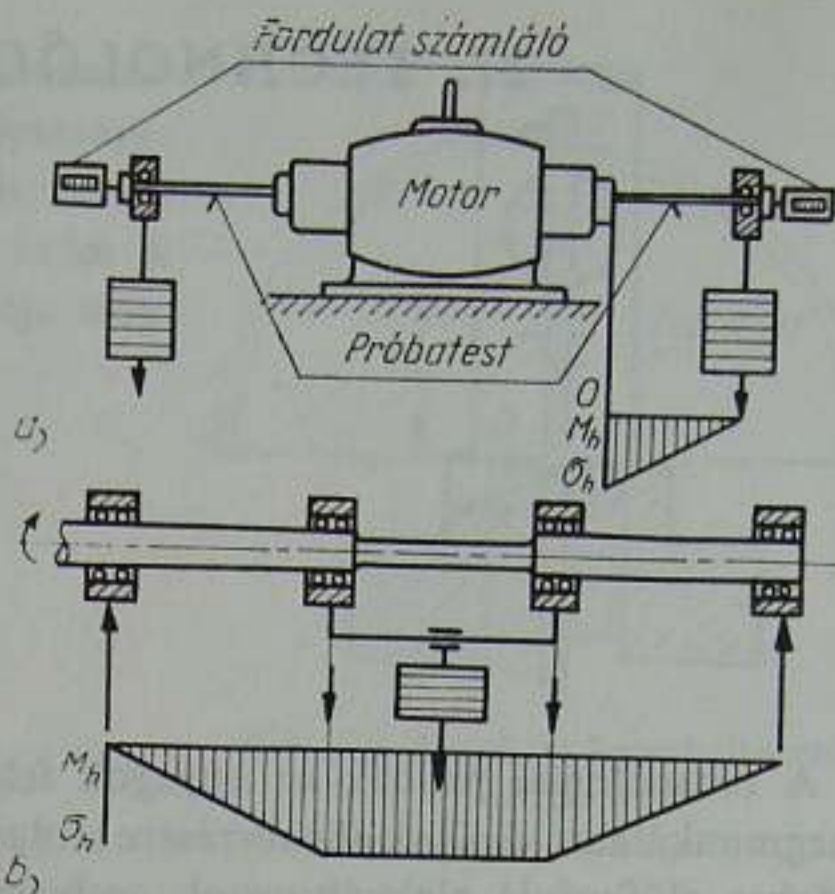
valóságos kifáradási határ. A felület minőségének hatását a különféle szakítószilárdságú acélok kifáradási határára a 353. ábra tartalmazza.

26.7. Fárasztógépek

A fárasztógépeket úgy szerkesztik, hogy velük a Wöhler-görbék meghatározásához szükséges adatokat megállapíthassák. Ezért e berendezéseket a következőkkel kell felszerelni: 1. az ismételt igénybevételt keltő berendezés, 2. az igénybevétel nagyságát mérő berendezés, 3. szabályozóberendezés a feszültség-



355. ábra. Az elektromágneses fárasztógép elve



356. ábra. Forgóhajtogató fárasztógép a) konzolos, b) kéttámaszú terheléssel

belőle a rugóállandó ismeretében az erő számítható. Ez a gép a tehetetlenségi erők és a rugó rezonanciája miatt spirálrugóval $n=200/\text{min}$ lapos rugónál $n=1000/\text{min}$ fordulattal, terhelőciklussal járatható. Ez azt jelenti, hogy még a rövidített $N=2 \cdot 10^6$ igénybevételi számig folytatandó fárasztókísérlet is $7-1\frac{1}{2}$ napig tart. Mivel a Wöhler-görbe felvételéhez legalább 6–8 próbatest fárasztása szükséges, a kísérlet nagyon elhúzódik. Ezért lehetőleg nagyobb fordulatu gépeket alkalmaznak.

Az elektromágneses fárasztógép egyfázisú váltóárammal gerjesztett helytálló tekercsek között tartja lengésben a próbatest befogórúdjára kötött lengő armatúrát (355. ábra). Az előterhelést az armatúra rúdjához kötött rugókkal, az amplitúdót a résméret beállításával lehet szabályozni. Az ilyen elektromágneses fárasztógép ciklusainak száma a tehetetlenségi tömegek csökkenése miatt $n=2000/\text{min}$ -től $8000/\text{min}$ között változik. Utóbbi ciklusszám a nagyfrekvenciás pulzatorokat jellemzi. Az ezekkel kapott kifáradási határok $n=5000/\text{min}$ ciklusszám fölött a ténylegesnél valamivel nagyobb értéket adnak. A különbség a ciklusszám nagyságától és a fárasztott anyag minőségétől függ.

Legegyszerűbb fárasztógépek a forgó-hajtogató fárasztógépek. Közvetlen villanymotor tengelyére egyik változatuknál konzolosan fogják be a próbatestet (356a ábra) és szabad végét terhelik golyós csapággal felfüggesztett súlyterheléssel. Előnye, hogy egyszerű, hátránya, hogy a próbatestnek a befogása helyén keletkezik a legnagyobb hajlítónyomaték. Egyenletes feszültség csak úgy ébred a próbatest egész hosszában, ha keresztmetszetét az egyenlő szilárdságot adó alak szerint változtatják a hossza mentén. Helyesebb és egyszerűbb viszonyokat adó elrendezés a 356b ábra szerint alkalmazott kéttámaszú tartós megoldás két helyen támadó erővel. Ennek nyomatéki és így feszültségi ábrája a fárasztott próbatest teljes hosszán egyenletes.