



MISKOLCI EGYETEM
MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNYI KAR
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT
3515 MISKOLC Egyetemváros



A fárasztó igénybevétel maradó feszültségre gyakorolt hatásának vizsgálata

Készítette:
Cseh Dávid

Konzulens:
Dr. Mertinger Valéria
docens

Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Tanszék
2012

Tartalomjegyzék

Bevezetés	3
Irodalmi összefoglaló	4
1. A maradó feszültség értelmezése, kialakulása és jelentősége	4
2. Szemcseszórás	9
3. Maradó feszültség mérése	12
4. A maradó feszültség meghatározása röntgen diffrakcióval	16
Elvégzett vizsgálatok és eredmények	21
1. A vizsgálat anyaga	21
2. A vizsgálati próbatestek előkészítése	21
3. A mérő berendezés és a mérési beállítások	23
4. A fárasztó igénybevétel	25
5. Mérési eredmények	27
Összefoglalás	35
Irodalomjegyzék	36
Köszönetnyilvánítás	36

Bevezetés

Minden szilárd anyag hordoz maradó feszültséget ez a szilárd halmazállapot sajátos jellemzője. Ha egy test hőmérséklete változik, az a darabban hőmérséklet gradiens kialakulását okozza, hiszen egy kiterjedt test minden pontját csak végtelen lassan tudjuk azonos sebességgel melegíteni illetve hűteni. Az eltérő hőmérsékletű részek eltérő mértékű hőtágulást szenvednek, ami a darabban belső feszültségeket ébreszt. Minden a darabban hőmérséklet különbséget előidéző technológiánál, számolnunk kell járulékos maradó hőfeszültséggel. A maradó feszültségnek számos egyéb forrása is lehet. A darabban munkáló belső feszültségek jelentősége abban áll, hogy a vektorok szuperpozíciójának elve szerint előjelesen összeadódnak a darabban ható külső igénybevétel által ébresztett feszültségekkel. Ha a belső feszültség előjele megegyezik a veszélyes terhelés ébresztette feszültség előjelével a két komponens eredőfeszültsége váratlanul lépheti át a kritikus értéket. Abban az esetben, ha belső és a külső feszültségek előjele eltér csak a kettő különbsége hat.

Az ipar felismerte a direkt alkalmazott maradó feszültség előnyét, és széles körben alkalmazza azt. Számos eljárással generálunk maradó nyomófeszültséget gépelemek felszín közeli anyagi rétegeibe, ezzel erősítve azt. Gépelemeinkre általában a húzó jellegű terhelés veszélyesebb, ezért csak maradó nyomófeszültség létrehozására alkalmas direkt eljárások alakultak ki. A felszíni maradó nyomófeszültséggel erősített alkatrészek fáradással szembeni ellenálló képessége javul, ám a fárasztó igénybevétel hatására a maradó nyomófeszültséget leépül.

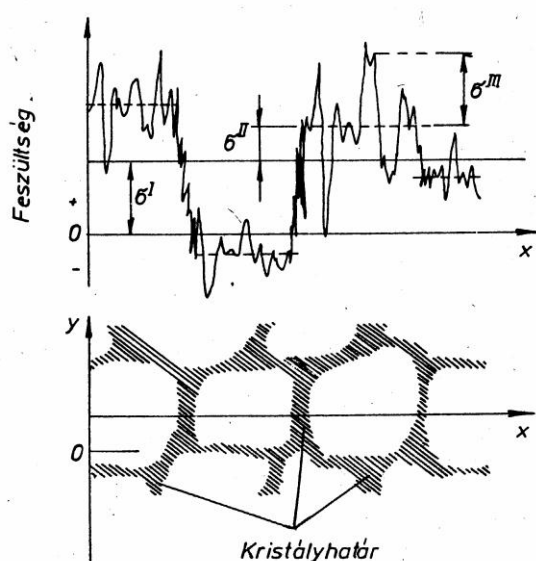
Munkám során direkt erre a célra készített fárasztó próbatestekben ható maradó feszültség állapotot vizsgáltam fárasztó igénybevétel közben. A próbatesteket a legelterjedtebb maradó feszültség létrehozó eljárással, szemcseszórással kezelték. Több feszültség szinten is végeztem fárasztó vizsgálatokat. Kísérleteim célja a fáradás sörétezett próbatestekben létrehozott maradó feszültség állapotra gyakorolt hatásának vizsgálata volt.

Irodalmi összefoglaló

1. A maradó feszültség értelmezése, kialakulása és jelentősége

Maradó feszültségről egy adott munkadarabban akkor beszélünk, ha a darabra semmilyen külső erő illetve nyomaték nem hat, külső ponthoz viszonyított inercia rendszerben egyensúlyban van, ám a darab belsejében különböző helyeken különböző nagyságú és irányú, de egymással egyensúlyt tartó feszültségek hatnak. Ezek a belső maradó feszültségek kiterjedésüket tekintve hagyományosan három csoportba sorolhatók, mely felosztás feltételezi, hogy fémes tulajdonságú anyagokról beszélünk [2,3].

I. rendű feszültségeknek nevezzük azokat a belső feszültségeket amelyek, kiterjedésüket tekintve a darab méreteivel azonos nagyságrendben vannak, összehasonlíthatóak vele. Ezeket másképpen makroszkópos feszültségeknek nevezzük. Ezeknek a feszültségeknek kialakulásában szerepet játszhat a darab képlékeny hideg alakítása, forgácsoló megmunkálás, hegesztés nagyobb kiterjedésű darabok esetén, ha a lehülést nem tudjuk szabályozott keretek között végbe vinni, bármiféle nagyhőmérsékletű technológia. (öntés, hőkezelés, meleg képlékenyalakítást követő hűlés). A hőnek kiterjedt testekben való terjedésére vonatkozó törvényszerűségek szerint, a darab keresztmetszetében a hőelvonás irányából a darab közepe felé haladva egyre kisebb lehülési sebességek okozta eltérő mértékű hő dilatáció ún. hő feszültséget idéz elő.

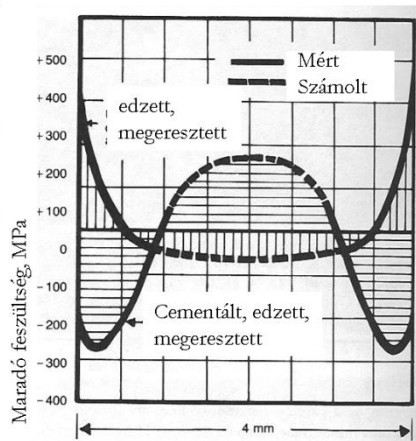


1. ábra A sokkristályos fémekben előforduló feszültségeket illusztráló vázlat[2,3]

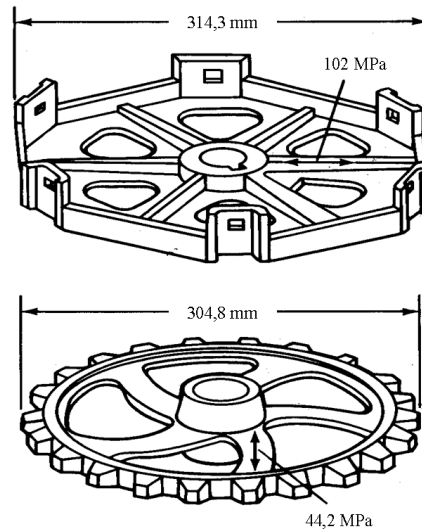
II. rendű vagy mikroszkópos feszültségeknek nevezzük azokat a feszültségeket melyek kiterjedésüket tekintve a szemcsék átmérőjének nagyságával vannak azonos nagyságrendben (1. ábra). Ezeknek a feszültségeknek értéke, előjele, azaz iránya szemcsehatárt átlépve megváltozhat. A jelenség oka az adott irányú alakító erőre különböző módon reagáló egymással határos eltérő kristálytani orientációjú vagy fázisú szemcsék eltérő mértékű alakváltozása. Az alakító erő hatására környezetüknél kisebb mértékben képlékenyen alakváltozó térfogat részekben s határaikon húzó feszültséget ébresztenek az alakváltozásaik mértékének különbségével arányosan. Ezzel ellentétes hatással van környezetére, de elviekben ugyan ezzel a jelenséggel magyarázható, hogy az adott feszültséggel terhelt heterogén anyagi térfogat részben az adott feszültségre nagyobb mértékben képlékenyen alakváltozó térfogat részben s határain nyomó feszültséget hoz létre. Ez a másodrendű feszültség az adott térfogat részben anizotróp módon ébreszt feszültségeket mely a képlékeny alakváltozás mechanizmusának kristálytani irányoktól való függéséből következik.

III. rendű vagy szubmikroszkópos feszültségnek nevezzük azokat a feszültségeket melyek kiterjedésüket tekintve néhány atom átmérő távolságon belül hatnak s melyeknek oka rendre valamely kristályrácsban belüli rendellenesség: vakancia, interstíciós vagy szubsztitúciós atom illetve minden kétdimenziós rácshiba azaz diszlokáció. Belátható, hogy adott (fém) kristályrácsba beépülő, idegen, az adott kristályrácsot alkotó atomoknál nagyobb átmérőjű atomok környezetükre nyomó feszültséget gyakorolnak, míg a kisebbek körül húzott térfogat rész alakul ki. Éldiszlokációk esetén az extra sík két oldala nyomott, míg az extra síkkal szembeni térrész húzó feszültséggel terhelt. A sörét szórással létre hozott maradó nyomó feszültség is a kristályrács atomjainak nyugalmi állapotukban mérhető távolságuknál (rácsparaméter) nagyobb közelségre kényszerítettségükből adódik. Az egyes technológiai műveletek első másod és harmadrendű feszültségeket egyaránt előidézhetnek.

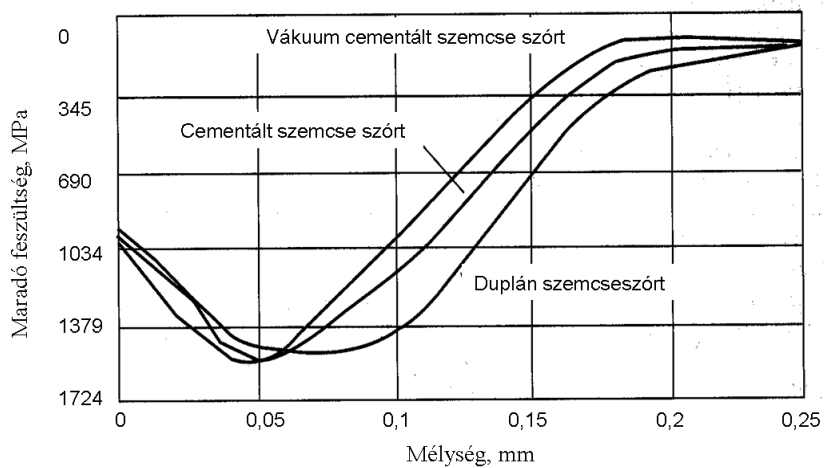
Technológiai feszültségekre mutat példát a 2. ábra. Az ábrán bemutatott technológiák során kialakuló feszültségállapot az eljárás tényszerű következménye, elkerülni nem lehet, csak jellegét, nagyságát változtatni a művelet paramétereinek változtatásával. Egy ilyen hatást mutat hidegen húzott acél drót esetére a 3. ábra.



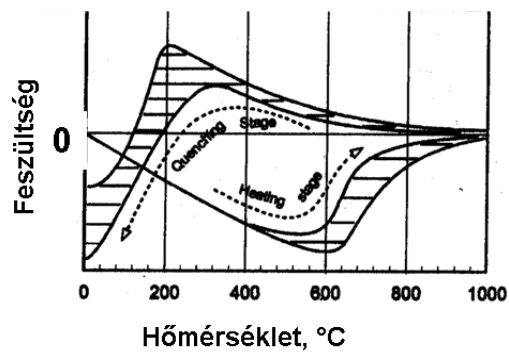
a) hőkezelés után [4]



b) Öntés után [6]



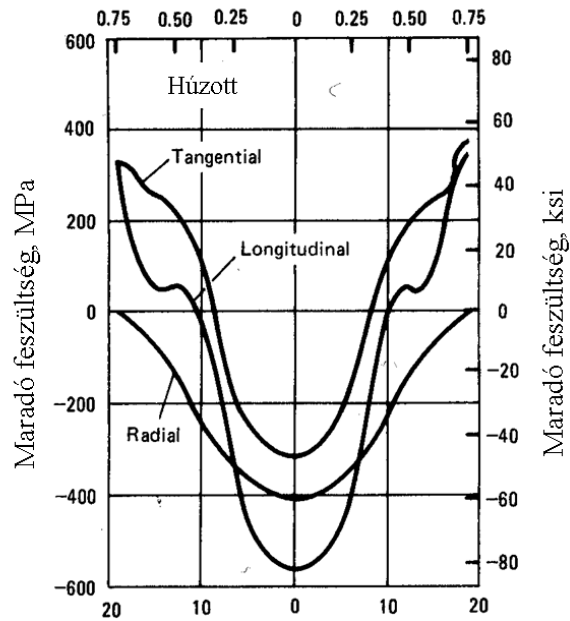
c) cementálás és szemcseszórás után [7]



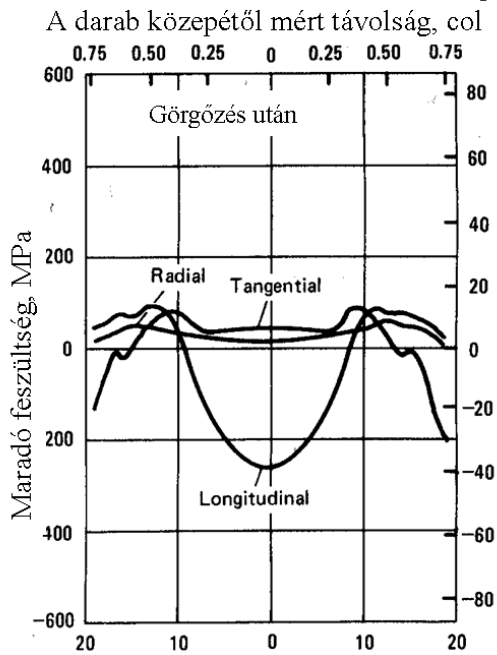
d) indukciós edzés során [5] Heating- fűtés, Quenching-edzés

2. ábra Technológiai feszültségek

A darab közepétől mért távolság, col

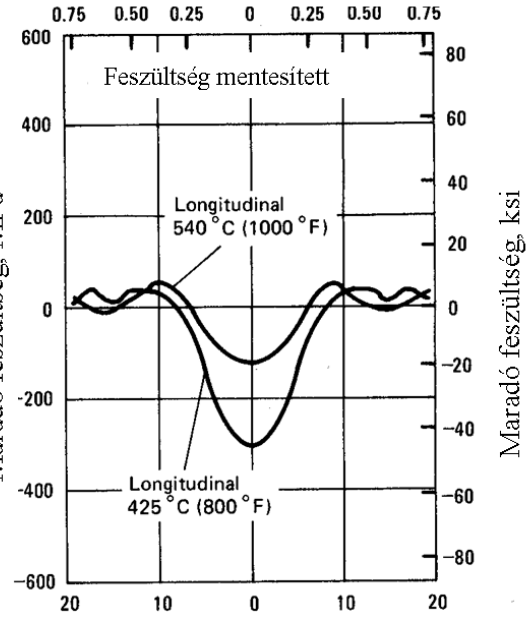


A darab közepétől mért távolság, mm



A darab közepétől mért távolság, mm

A darab közepétől mért távolság, col



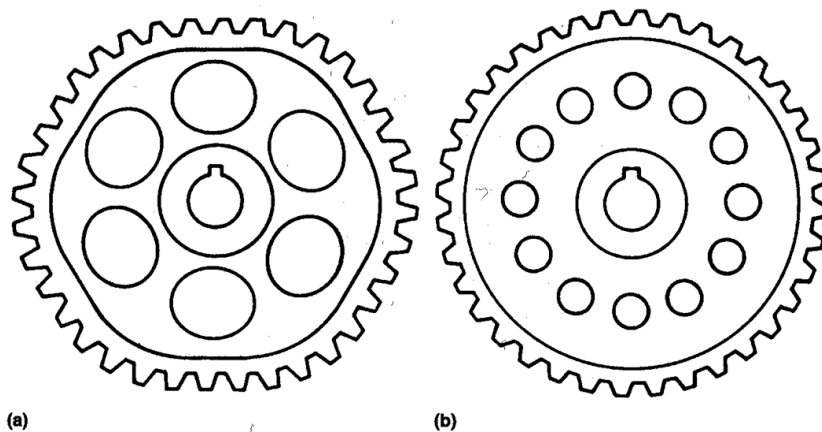
A darab közepétől mért távolság, mm

3. ábra Hengeres 1045-ös acél 20%-os hideghúzása, görgőzése és feszültségcsökkentő hőkezelése után kialakuló feszültségállapota [8]

A főbb műveletek, amelyek feszültségek kialakulásáért felelősek:

- ⊗ Képlékeny hidegalakítás
- ⊗ Hőkezelés
- ⊗ Minden olyan művelet, amely hőmérséklet gradiens kialakulásával
- ⊗ Fázisátalakulások

A maradó feszültségek jelentősége kettős. Kialakulását követően egyensúly áll be a darab belsejében, de ha bármi ezt az egyensúlyt megbontja, akkor a feszültségek relaxációja során makroszkopikus deformációk is kialakulhatnak. Ami a feszültségállapotot megváltoztathatja az például egy újabb hőhatás pl. hegesztés, de nagyon gyakori a hőkezeléseket követő forgácsoló megmunkálás is. Erre mutat példát a 4. ábra A fogaskerék tömegének csökkentése érdekében furatokat helyeztek el a darabon, mely a megbontott feszültségállapot hatására erőteljesen deformálódott, használhatatlanná vált (kép/a). Ha a furatok átmérőjét 1/3-ra csökkentették a deformáció nem alakult ki a fogaskerékben (kép/b) [8]. Ha az igénybevétel során kialakuló feszültségek a maradó feszültségekre szuperponálódnak, akkor helyileg meghaladhatják a folyáshatárt és így a darab nem várt tönkremenetelét okozhatják. Ennek az ellenkezője esetén a maradó feszültség előnyös is lehet egy alkatrészben, szerkezeti elemben, ha az igénybevételek hatására ébredő feszültség a maradó feszültséggel ellentétes előjelű. Ilyen esetekben a technológia direkt egy adott feszültségállapot létrehozására irányul.



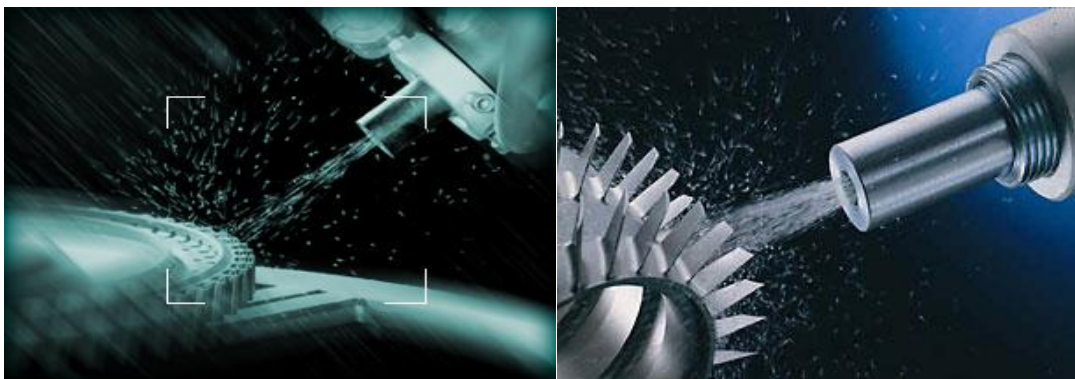
4. ábra Fogaskeréken kialakuló deformációk [8]

Számos gépelemünk számára a darab felszínéhez közeli a húzófeszültségek [értve ez alatt ciklikus terhelés során a húzott szálát, térrészt] jelentenek veszélyes terhelést, mivel ez

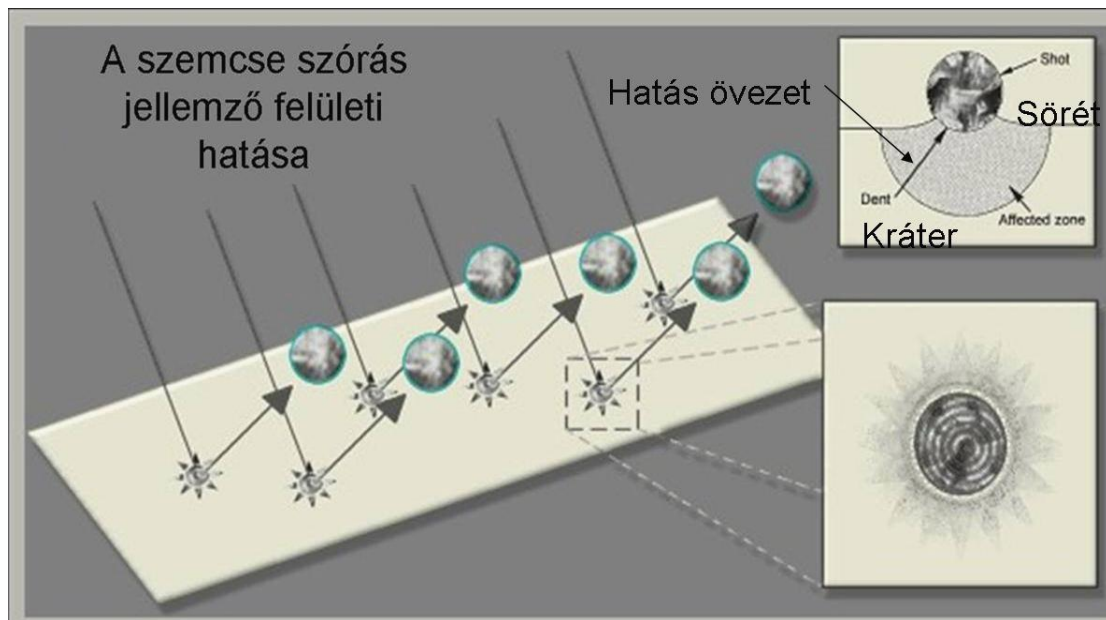
repedés kialakulásának kedvez. Ezeket az alkatrészeket direkt maradó nyomó feszültséggel erősíthetjük. Direkt maradó nyomó feszültség létrehozására az ipar számos eljárást alkalmaz. Leggyakoribb ilyen technológiák a szemcseszórás, görgőzés, cementálás és a lézersokkolás.

2. Szemcseszórás

Szemcseszórásnak azt az eljárást nevezzük, amely során egy céltárgyra nagy sebességgel, nagyszámú, néhány milliméter átmérőjű szilárd szemcsét röpítünk (5. ábra a). A szemcsék anyaga szerint osztályozva beszélünk acélszemcsékkel történő szemcseszórásról, homokszórásról illetve szárazjéggel történő szórásról.



a)

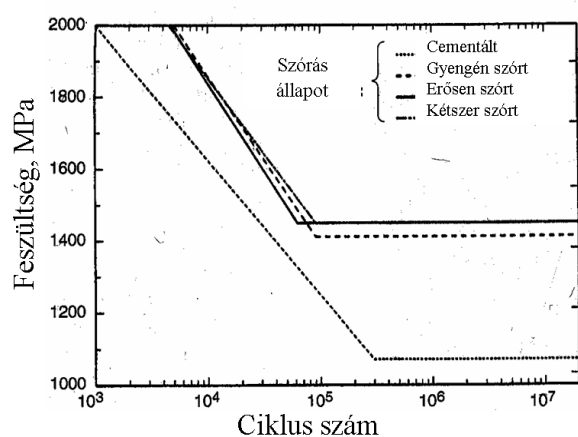


b)

5. ábra Pillanat képek a szórásról (a) a szórás hatás mechanizmusa (b)

Ez a technológia létrejöttekor nem a fémek anyagok kífáradási tulajdonságait volt hivatott javítani, hanem az adott gyártási folyamatban további megmunkálásra váró félkész termékek felületén mechanikusan tapadó szennyeződésektől való mentesítés volt eredeti feladata. Tipikusan a melegen képlékenyen alakított oxidációra hajlamos vasalapú ötvözetek védőatmoszférát nem biztosító hőkezelésekor felületükön keletkező reve réteg eltávolítása volt rendeltetése. Hiszen, a képlékenyalakítást végző szerszámokra gyakorolt erős koptató hatása, valamint az alakított termékek felületébe a megmunkálás során beágyazódva azt selejtessé téve, a gazdaságosság megköveteli a revementesítést.

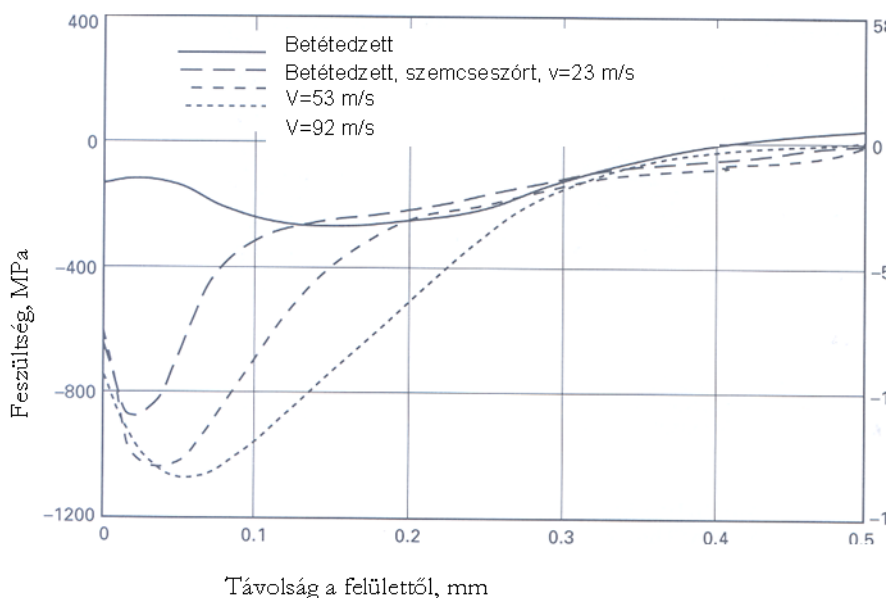
A revementesítés mellett ennek az eljárásnak egy másik jelentős ipari alkalmazása az az eljárás mely során az adott céltárgyat elsősorban acél golyókkal szórják (sörét szórás), olyan célból, hogy a darab felületén, felület közeli rétegeiben néhány mikron mélységben szubmikroszkopikus maradó nyomó feszültséget hozzanak létre. Az 5. ábra b képén látható a szemcse szórás mechanizmusa mi szerint a kezelt felületbe becsapódó szemcsék az anyagban részben képlékeny alakváltozást idéznek elő és a szemcse mozgási energiájának egy részét az anyag maradó feszültség formájában tárolja [1]. Ez a módszer elsősorban a fárasztó igénybevételnek kitett alkatrészek kífáradással szembeni ellenálló képességét növeli. Ugyanis a felületi rétegben a sörétezés hatására bekövetkezett képlékeny alakváltozás okozta keményedés és a kialakuló maradó nyomó feszültség a hajlító, illetve hajlító csavaró fárasztó igénybevételek során, a darab felületén ébredő húzó feszültségek ellen dolgoznak, azokat kioltják, vagy részben kompenzálják. A sörétszórásnak a kífáradási határra gyakorolt hatását mutatja az 6. ábra.



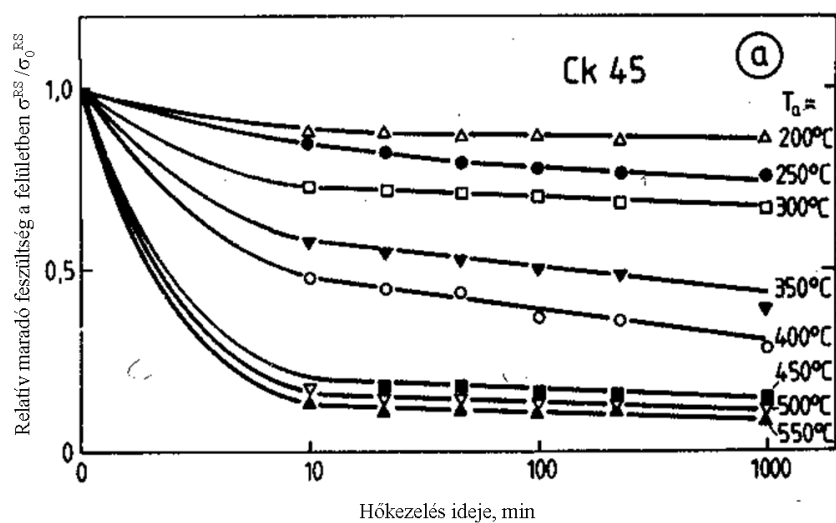
6. ábra Kífáradási határ változása a szemcseszórás hatására [7]

Az sörétszórás során ébredő maradó nyomó feszültségnek kitett réteg vastagsága és a maradó nyomó feszültség értékének alakulása a mélység függvényében a darabot bombázó sörétek

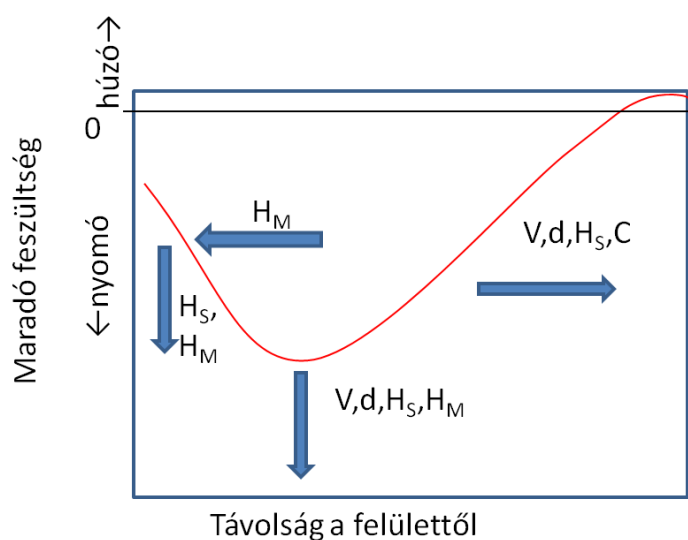
nagyságától, sebességétől és a szemcseszórt felület minőségétől nagymértékben függenek. A sebesség hatására mutat példát betétedzett acél felület alatti feszültségeloszlására a 7. ábra, a 8. ábra, pedig a lágyító hőkezelés hőmérsékletének hatását a darabban uralkodó feszültség állapotra. A legfontosabb paraméterek hatását a felület alatti feszültségprofil kialakulására a 9. ábra foglalja össze [13.] A paraméterek változtatásának hatását a görbe lefutására a nyílak mutatják. A paraméterek szinte mindegyikének hatása a nyomó feszültség kialakulásának kedvez a felületen, illetve a felület alatti nyomó feszültség maximum helyét határozza meg. Általános szempont, hogy lehetőleg kemény (45-52 HRC) , egyenletes méreteloszlású és gömbszerű szemcsével, nagy sebességgel és legalább 100%-os lefedettséggel dolgozzunk. A direkt maradó feszültséggel kapcsolatban néhány felmerülő problémát meg kell említenem. Az egyik az, hogy a maradó feszültség a kisebb szilárdságú anyagokban, nehezebben hozható létre, kisebb mértékű tulajdonság változásokat okoz és könnyebben relaxál. Szintén probléma a maradó feszültség fárasztó igénybevétel közbeni leépülése. Erről a folyamatról nincsenek ismereteink, a maradó feszültség leépülésének kinetikája, valamint a fárasztás paramétereitől való függése feltérképezetlen [13.]. Nem szabad szem előtt tévesztetni, hogy a szemcseszórás kísérő jelensége lehet, különösen, ha szemcsék alakja nem megfelelő, a felületi minőség erőteljes romlása, mely a kezdeti célkitűzések (a fáradási tulajdonságok javítása) megvalósítását is veszélyeztetheti.



7. ábra Mélységi feszültségeloszlás a szemcseszórás hatására [1]



8. ábra A lágyítás hőmérsékletének hatása a mélységi feszültség eloszlásra [9]



9. ábra A szemcseszórás paramétereinek elvi hatása a felület alatti feszültségprofil kialakulására [13]. V- a szórás sebessége, d a szemcsék mérete, C a szórás fedettsége %, H_s a szórószemcse keménysége, H_M a szórt anyag keménysége

3. Maradó feszültség mérése

A szemcseszórással vagy egyéb más módon létrehozott felületi maradó feszültség ipari alkalmazásának terjedésével, a minőség szabályzás és irányítás megköveteli a maradó feszültséget létrehozó eljárások mérhetőségét. A mérési módszerek alapvetően kétfélek lehetnek: mechanikai és fizikai módszerek. A mechanikai módszerek a feszültség relaxációjával együtt járó deformáció mértékéből következtetnek a feszültségállapotr, amíg a

fizikai módszerek a rácsszerkezetben bekövetkező változásokat határozzák meg valamely módon. Fizikai módszer lehet például röntgen vagy neutron diffrakció, akusztikus vagy mágneses módszer. A gyakoribb módszereket röviden ismertetem, majd az **1. Táblázatban** összefoglalom, végül a talán leginkább elterjedt, általam is használt röntgendiffrakációs módszert részletesen bemutatom.

Gyakoribb módszerek [10, 11]

1. Kifejezetten a szemcseszórás következtében létrejött maradó nyomó feszültségek mértékének jellemzésére használatos módszer, név szerint **Almen teszt**. Ennek során egy db. néhány 10 mm széles kb. háromszor olyan hosszú vékony szalagot vezetnek végig a technológiai folyamaton. Ennek következtében a felszínétől mért különböző mélységekben különböző mértékű feszültségek ébrednek. Ezek a feszültségek a darab kis méretének következtében a darabot deformálva relaxálnak, mely deformáció hossztengetyhez képesti kihajlásként jelentkezik. A kihajlás mértékéből következtetünk az ébredő feszültségekre, illetve a feszültség profilra a mélység függvényében.
2. A következő módszer azon az elven alapszik, hogy egy feszültséggel terhelt térfogatba lyukat fúrva (**hole drilling**) a feszültség relaxáció a lyukat deformálja. A deformáció mértékéből lehet a feszültségállapotra következtetni. A deformáció nagyságát például ellenállásmérésre lehet visszavezetni. Ehhez egy speciálisan kialakított, rozetta típusú nyúlásmérő ellenállást helyezünk a vizsgálandó felületre. A rozetta közepén kialakított kisméretű (1,0 mm) nyíláson keresztül az alkatrészbe furatot készítünk, amely segítségével a vizsgált pont környezetében felszabaduló feszültség a rozetta segítségével meghatározható. A furatot határoló anyagi részekben a maradó feszültségek relaxációja során torzul a furat, a szűk környezete.
3. Találunk olyan feszültség mérési eljárást is, mely során egy **optikai kettős réteget** viszünk fel a vizsgált modellre vagy alkatrészre. Ezzel a bevonattal szemben támasztott igényeink a jó tapadás, a csekély mértékű kúszás és zsugorodás. Ezzel a módszerrel lehetőségünk van a szerkezet valós terhelési körülményei között végzett vizsgálatára. A terhelés hatására a bevonat rétegben a darabban lévővel azonos feszültségek ébrednek, mely feszültségek hatására a felszíni optikai kettős réteg törésmutatója és vastagsága megváltozik. A terhelt körülmények között vizsgált, rögzített optikai tulajdonságait jellemző adatokból, összehasonlítva azokat a nyugalmi

állapotban lévő bevonat ismert jellemzőivel, számolható a felszínben uralkodó feszültség.

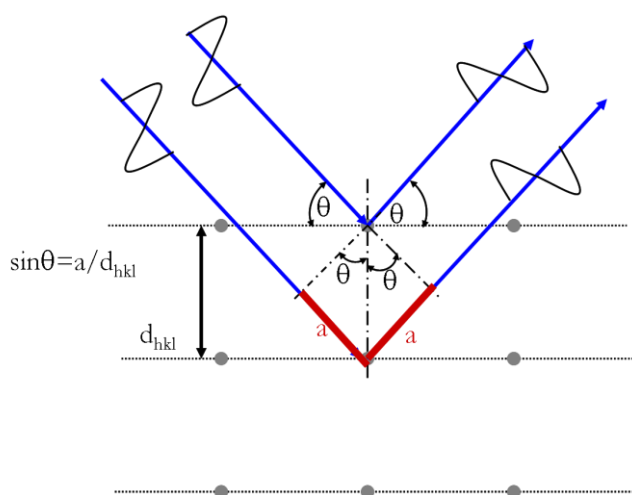
4. Magnetoelasztikus anyagok deformációja esetén a **mágneses doménszerkezet** anizotróp lesz, mely szintén jól mérhető paraméter.
5. Feszültséggel terhelt anyagokban az **ultrahang terjedési sebessége** a feszültségállapottól változik. Egy jó kalibrációs mintával olcsó, mobilis mérést lehet megvalósítani. Transzparens anyagok esetén a **fény terjedési sebességét** mérve lehet a feszültségállapotra következtetni.
6. Nagyfelbontású és érzékenységgű infra kamerával a rugalmas feszültség hatására kialakuló **hőmérséklet változás** is kimérhető pl acélokban 1 MPa feszültség megfelel 1 mK hőmérséklet változásnak.
7. A legnagyobb feszültség felbontást elektrondiffrakciós vizsgálattal lehet elérni, így a II és III rendű feszültségek mérésére alkalmas igazán.
8. A neutrontdiffrakciós mérés előnye a röntgendiffrakcióhoz képest, hogy nagyobb mélységbe hatol be az anyagba és ad információt.

1. Táblázat

Eljárás	A vizsgálat behatolási mélysége	Felbontás	Pontosság	Megjegyzés
Lyukképzés, a lyuk deformációjának vizsgálata (a környezetében relaxáló feszültségek következtében)	~1,2x furat átmérő	50µm mélység	±50 MPa a behatolási mélység korlátozza az érzékenységet	Síkbeli, elsőrendű feszültség állapot mérésére alkalmas, Fél roncsolásos technika
Almen teszt, próba darab elhajlásának mérésén alapuló feszültség meghatározási módszer (a fellépő ill. relaxáló feszültségek miatt)	0,1-0,5x vastagság	0,05x vastagság	A minimális görbület mérhetősége	Ismert növekvő feszültségű minden tekintetben azonos darabokhoz viszonyítva számítható a maradó feszültség, így is csak síkbeli elsőrendű feszültségek mérhetőek
Röntgen diffrakció (atomi léptékű feszültségek)	<50µm (Al); <5µm (Ti) <1mm felület leválasztás esetén	1 mm	±20 MPa nem lineárisan változik ($\sin^2\psi$ szerint) függ a felület érdességtől	Roncsolásmentes eljárás, csak a felület közeli rétegek vizsgálatára alkalmas. Érzékeny a felület minőségre, csúcs eltolódásra, I, II és III rendű feszültségeket is kimutat
Kemény röntgen diffrakció (atomi léptékű feszültségek)	150-50mm (Al)	20µm 1mm	±10x 10 ⁻⁶ alakváltozás. A szemcseméret eloszlástól meghatározott	~lágy röntgen, nagyobb mélységet sugároz be
Neutron diffrakció (atomi léptékű feszültségek)	200mm (Al); 25mm(Fe); 4mm(Ti)	500µm	±50x 10 ⁻⁶ alakváltozás, feszültségmentes etalon kell	A neutronok gyorsítása komoly nehézséget jelent, az adatgyűjtés is csekély hatásfokú, a röntgen diffrakciónál lényegesen költségesebb
Ultrahangos (a feszültség okozta rugalmasság megváltozás előidézte hanghullám terjedési sebesség változás)	>100mm	5 mm	10%	Szerkezet érzékeny
Barkhausen zaj vizsgálat, a mágneses (térfogat részekben doménekben uralkodó különböző feszültség okozta különböző mágneses tulajdonságok)	10mm	1mm	10%	Érzékeny a mikro szerkezet milyenségére, kizárólagosan ferromágneses anyagok vizsgálatára alkalmas, I II és III rendű feszültségek meghatározására is alkalmas
Raman spektroszkópia	<1 µm	<1µm megközelítőlegesen	$\Delta\lambda \approx 0,1\text{cm}^{-1} \approx 50 \text{ MPa}$	A vizsgált felületi réteg vastagsága ennél a módszernél a leg kisebb

4. A maradó feszültség meghatározása röntgen diffrakcióval

A röntgensugár hullám természete szolgál a röntgen diffrakciós mérési módszerek fizikai alapjául. Mind az elektromágneses mind a mechanikai hullámokra igaz az, hogy ha hullámhosszukkal összemérhető rácsállandójú rácson szóródnak a visszaverődő hullámok egymáshoz képest fázis eltolódást szenvednek. Ha a szóródó hullám eredetileg monokromatikus volt, akkor a szórt hullámok fázis különbsége állandó, ekkor koherens hullámokról beszélünk. A koherens hullámokra igaz, hogy a fázis eltolódásokból eredően a visszaverődő hullámok találkozásukkor a hullámok szuperpozíciójának törvényei alapján fáziseltolódásaik szerint erősíthetik és gyengíthetik egymás hatását. A hullámok összeadódását interferenciának nevezzük. Az azonos fázisban találkozó szóródott hullámok erősítik egymás hatását maximálisan, az egymással ellentétes fázisban találkozó szóródott hullámok kioltják egymást. A szóródott hullámokat tartalmazó hullámtérben így vannak, helyek ahol a hullámok megszűnni látszanak, illetve ahol felerősödnek. A koherens szórt hullámokat tartalmazó hullámtérre igaz, hogy az interferencia jellegzetes térbeli amplitúdó eloszlást, interferenciaképet hoz létre. Ezen interferenciaképek intenzitás eloszlása a szóródó hullám hullámhosszától és a rács rácsállandójától függ, így a jelenség alkalmas arra, hogy ismert hullámhossz esetén jellemezzük a rácsot. Maga a diffrakció a hullámoknak az útjukba kerülő akadályok miatt bekövetkező szóródását, elhajlását, azaz eltérést jelenti. Ebből eredően az interferenciaképnek egy másik elnevezése a diffrakciós kép.



10. ábra A röntgendiffrakció elvi alapja

Adott rács röntgennel történő megvilágítása esetén a röntgen behatolva a rácsba nem csak a felület síkjából verődik vissza (10. ábra). Ilyen esetben a visszaverődő, találkozó hullámok abban az esetben erősítik egymást teljes mértékben, hogy ha (az ábrán a-val jelölt) útkülönbségük azonos a hullámhosszuk egész számú többszörösével. Adott hullámhosszú, adott Miller indexű rács síksorozatról visszaverődő hullámok teljes erősítésének feltételét a Bragg egyenlet írja le.

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (1)$$

Mely egyenletben n: egész szám, λ a röntgen sugárzás hullámhossza, d_{hkl} adott hkl Miller indexű síkok rácssík távolsága, θ a diffrakció szöge. A diffrakciós mérések során a d távolságot keressük úgy, hogy ismert λ hullámhosszúságú röntgen hullámmal besugározva a vizsgálandó felületet mérjük azt a θ szöget, amelynél a szórt sugárzásnak intenzitás maximuma van. Adott felületi reflexióról alkotott diffrakciós kép, a különböző szögekben mért visszaverődő sugár intenzitásának mérése. Az adott szögeknél mérhető diffrakciós csúcsokból visszaszámolható a diffrakciót okozó síksorozat távolsága. Adott „a” rácsparaméterű kockarács tetszőleges (hkl) Miller indexű rácssíkjainak távolsága a következő összefüggésből számolható

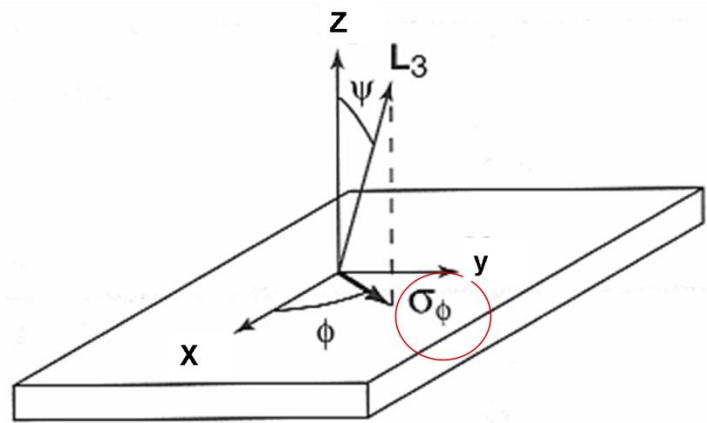
$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2)$$

Mivel az anyagban a rugalmas maradó rácsfeszültség hatására a rácssíkok távolsága megváltozik, a rácssík távolságok megváltozásának mérésével visszaszámolható a feszültség. Tehát maradó feszültség mérésekor az adott d_{hkl} rácssík távolság változás okozta Bragg szög eltolódását mérjük.

Ha a 11. ábra szerinti elrendezésben a tengelyek metszés pontjában a σ_ϕ feszültséget szeretnénk meghatározni, annak megmérése csak transzmissziós módon lenne lehetséges, de ezt a kompakt anyag nem teszi lehetővé. Ekkor a következő módon belátható mérés technikai eljárást alkalmazzuk.

Ha a test egy pontjában x, y és z irányokban ható feszültségek (11. ábra) σ_x , σ_y , σ_z , akkor ezekben az irányokban bekövetkező elmozdulások a Rugalmassági modulus(E) és a Poisson szám (ν) ismeretében:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\
\varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\
\varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]
\end{aligned}
\tag{3}$$

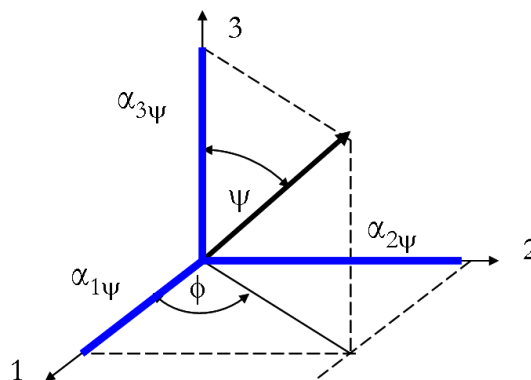


11. ábra Vázlat a σ_ϕ feszültség meghatározásához

Ekkor egy tetszőleges irányban ható feszültség értéke:

$$\sigma_n = \sigma_1 \alpha_{1n}^2 + \sigma_2 \alpha_{2n}^2 + \sigma_3 \alpha_{3n}^2 \tag{4}$$

Mely egyenletben a $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ főfeszültségek, $\alpha_{1n}, \alpha_{2n}, \alpha_{3n}$, pedig $\underline{n}$ vektor irány cosinusai az 1,2,3 tengelyekre nézve a 12. ábra alapján:



12. ábra Az irány cosinusok szemléltetése

$$\begin{aligned}
\alpha_1 &= \sin \psi \cos \phi \\
\alpha_2 &= \sin \psi \sin \phi \\
\alpha_3 &= \cos \psi
\end{aligned}
\tag{5}$$

Behelyettesítve a (4) egyenletbe:

$$\sigma_{\psi} = \sigma_1 (\sin \psi \cos \phi)^2 + \sigma_2 (\sin \psi \sin \phi)^2 + \sigma_3 \cos^2 \psi \quad (6)$$

Ha a $\Psi=90^\circ$, akkor ebből meg kapjuk σ_{ϕ} értékét

$$\sigma_{\phi} = \sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi \quad (7)$$

Az ε alakváltozásokra a (4) egyenlet analógiájára felírható

$$\varepsilon_{\psi} = \varepsilon_1 (\sin \psi \cos \phi)^2 + \varepsilon_2 (\sin \psi \sin \phi)^2 + \varepsilon_3 (\cos \psi)^2 \quad (8)$$

Helyettesítsünk be a (4) egyenletbe, figyelembe véve, hogy $\sigma_z = \sigma_3 = 0$

$$\varepsilon_{\psi} = \frac{1}{E} [(\sigma_1 - \nu \sigma_2) \cos^2 \phi \sin^2 \psi + (\sigma_2 - \nu \sigma_1) \sin^2 \phi \sin^2 \psi] + \varepsilon_3 \cos^2 \psi \quad (9)$$

Az egyenletet átrendezve, a $\sin^2 \Phi + \cos^2 \Phi = 1$ és az $\varepsilon_3 = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2)$ összefüggéseket felhasználva

$$\varepsilon_{\psi} = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi) \sin^2 \psi + \varepsilon_3 \quad (10)$$

adódik. Ha (10) egyenletbe behelyettesítjük (7)-et és átrendezzük, a

$$\sigma_{\phi} = (\varepsilon_{\psi} - \varepsilon_3) \frac{E}{(1+\nu) \sin^2 \psi} \quad (11)$$

egyenlőség adódik. Ezzel a feladatot megoldottuk. ε_{ψ} és ε_3 (ε_z) mérésével σ_{ϕ} meghatározható. A mérési gyakorlatban ehhez a következő eljárásokat alkalmazhatjuk a röntgennel besugárzott próbatestet döntjük (ψ) vagy elforgatjuk (ω) módszer. A 13. ábra mutatja a két módszer vázlatos rajzát ahol: S_0 a röntgen csőből kilépő sugárnyaláb, S a mintáról diffraktálódó sugárnyaláb és σ_{ϕ} a meghatározható irányú feszültség. A ψ módszer esetében a döntés tengelye a vizsgált minta röntgennel besugárzott pontja, a sugárforrás és a detektor által kijelölt síkban fekszik, míg az ω módszer esetében a forgatás tengelye erre a síkra merőleges helyzetű. [2,12]. Munkám során a $\sin^2 \Psi$ módszert használtam. A levezetést folytatva σ_{ϕ} (14) egyenlettel kifejezhető.

$$\varepsilon_3 = \frac{d_3 - d_0}{d_0} \quad \varepsilon_{\psi} - \varepsilon_3 \approx \frac{d_{\psi} - d_3}{d_3} = \frac{\Delta d}{d}$$

$$\varepsilon_{\psi} = \frac{d_{\psi} - d_0}{d_0}$$

Ekkor a (10) egyenlet a következő módon írható:

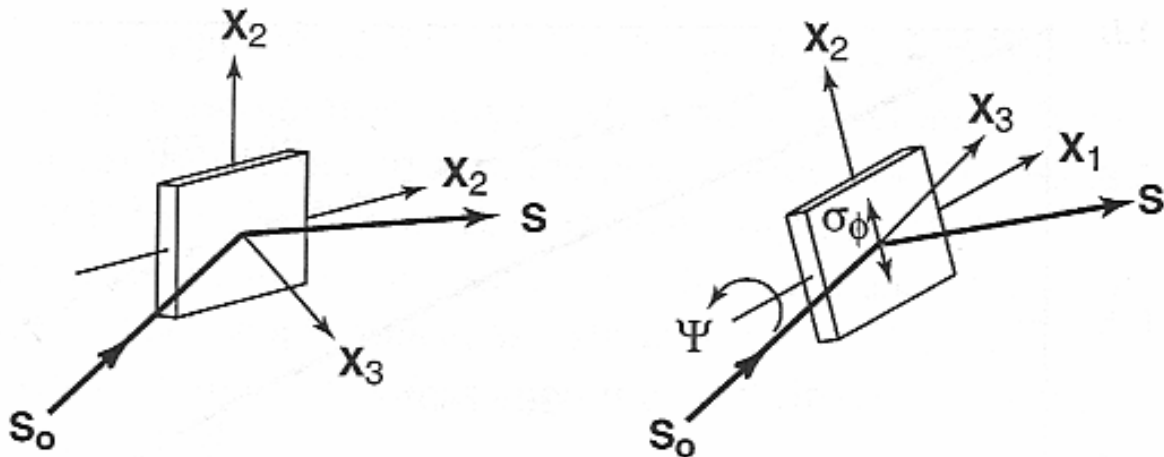
$$\sigma_{\phi} = \frac{d_{\psi} - d_3}{d_3} * \frac{E}{(1+\nu) \sin^2 \psi} \quad (12)$$

Mivel

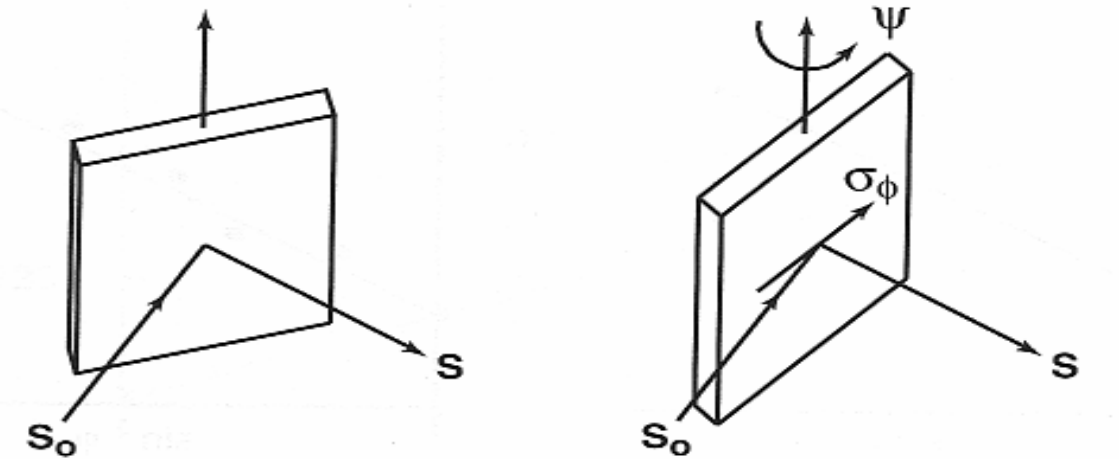
$$\frac{\Delta a}{a} = -\Delta\Theta \operatorname{ctg}\Theta \quad (13)$$

a feszültség a Bragg szög eltolódásából ebben az alakba írható fel.

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{(1+\nu) \sin^2 \psi} \frac{\Delta d}{d} = \frac{E}{1+\nu} \frac{\operatorname{ctg}\Theta}{\sin^2 \psi} \Delta\Theta \quad (14)$$



a) $\sin^2 \psi$



b) ω

13. ábra Az darab felszínével párhuzamosan, tetszőleges irányban ható maradó feszültség meghatározására használható két alapszámítás vázlatos rajza

Elvégzett vizsgálatok és eredmények

1. A vizsgálat anyaga

Korábbi munkáimból tudom, hogy a sörétezéssel előidézhető maradó feszültség nagyságát az anyag összetétele és hőkezeltégi állapota determinálja. Ezen eredményeimből megállapítható volt, hogy a legnagyobb maradó feszültséget a felületi dekarbonizációs hatás nélküli nemesített (edzett megeresztett) alapanyag képes felvenni. Mivel az itt leírt kísérleteim célja a sörétezéssel előidézett maradó nyomófeszültség állapot fárasztó igénybevétel közben mutatott viselkedésének nyomon követése, ezért a kísérlet sorozatom tervezésekor, nemesíthető ötvözet választása mellett döntöttem. Tettem ezt olyan elvi megfontolásból, hogy ha a fárasztott alapanyag kiinduló maradó feszültség állapota minél inkább karakteres legyen, ami az esetleges effektusok (a maradó feszültség állapotban fárasztó igénybevétel hatására bekövetkező változások) kimutathatósága megnő.

Vizsgálatai próbatesteim alapanyagául ezért egy a járműiparban használatos DIN17200-84 szabvány szerinti CM45MV jelű nemesíthető ötvözet választottam. A vizsgált ötvözetet a Rába Járműipari Holding Nyrt. bocsájtotta rendelkezésemre egy 96 x 96-os melegen hengerelt FAM buga formájában, amiből tehergépjárművekbe szerelt merev tengelyeket készítenek kovácshengerléssel. A CM45MV ötvözet összetételét a 2. Táblázat tartalmazza

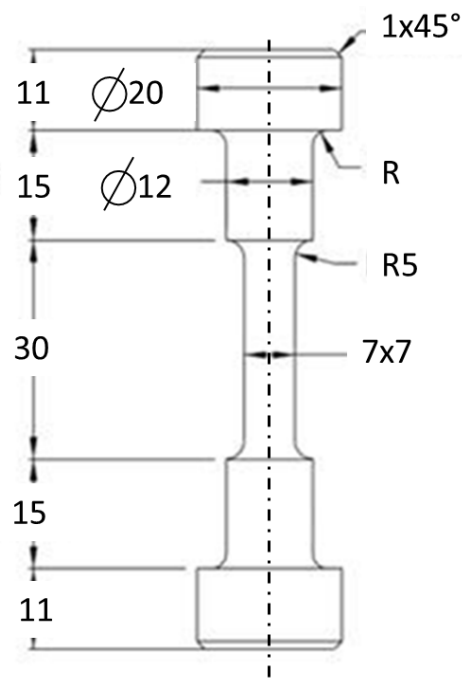
2. Táblázat

C	Si	Mn	P	S
0.42-0.5	<0.4	0.5-0.8	<0.035	0.02-0.035

2. A vizsgálati próbatestek előkészítése

A bugából fárasztási kísérletekhez alkalmas (a rendelkezésre álló fárasztó berendezések valamelyikében terhelhető) próbatesteket kellett előállítani. A fárasztó próbatestek geometriájának kiválasztása során azt is figyelembe kellett vennem, hogy a darabok felületén röntgen diffrakcióval maradó feszültség meghatározást szándékozom végezni. Kíváncsús a mérést minél jobb megismételhetőséggel a fárasztó igénybevételek közben többször elvégezni tudnom. A mérés reprodukálhatóságát, és pontosságát javítja, ha azt minél kisebb görbületű, ill. sík felszínen végezzük, ám a lemezből kialakított próbatest használatát elvettem, mivel a

vizsgált alapanyagnak nem ez a jellemző felhasználása. Fárasztási lehetőségeimet, mérési prioritásaimat és az ötvözet jellemző felhasználását egybevetve egy a közepén kvadratikus, egyébként forgás szimmetrikus próbatest (14. ábra) használata mellett döntöttem. A darabon így kettős fejrész található, melyek közötti belső lekerekítés sugarát R-el jelöltem. A rajzon azért nem adom meg R értékét, mert azt a kezdeti 0,8 mm-ről a próbafárasztások után azt 2 mm-re növeltem. A fárasztó labor egy korábbi kísérletében a 0,8-as lekerekítés megfelelőnek bizonyult egy ezzel azonos fejkiképzésű, ám teljesen forgás szimmetrikus próbatesteket és más ötvözetet vizsgáló programjában.



14. ábra A használt próbatestek méretei

A kiinduló nyerstermék melegen alakított, állapotban került hozzánk további megmunkálásra, így lágyító hőkezelés nélkül megtörténhetett a próbatestek forgácsolása, ami két csúcs közötti esztergálás, a kvadratikus rész kialakításakor pedig marózás volt.

Az ezután soron következő művelet a darabok nemesítése volt. Ehhez a dekarbonizációt elkerülendő a darabokat vákuumozható kapszulában, argon védőgáz, és az oxigént megkötő titán forgács jelenlétében 980 C°-ra állított kemencében 20 percig a berendezésben tartva ausztenitesítettem. A hőkezelő kapszulát a hőkezelés előtt benne a darabokkal és azokhoz erősített a kapszulából kivezetett Ni-NiCr termoelemmel valamint a titánforgáccsal kétszer vákuumoztam mechanikus vákuumszivattyúval, ezek között argonnal öblítettem, majd a második leszívás után védőgázzal feltöltöttem. A termoelem révén érzékelttem a darabok

tényleges felhevülését a 20 perces hőkezelés alatt. A darabok hőmérséklete a termoelemmel mért hőmérséklet adatok alapján a 20 perces hőkezelés utolsó öt percében 900 C°- volt. Az edzést áramló 5% polimer tartalmú emulzióban történt. A megeresztést 700 C°-ra állított kemencében, a darabokat 20 percig a berendezésben tartva végeztem. Azután a meleg darabokat a megeresztés során azok könnyű behelyezhetőségét segítő 10 x 160x 300 mm-es kerámia lappal együtt, azon szorosan egymás mellé helyezetten nyugvó levegőn hűtöttem. Ez alatt a hőkezelés alatt is használtam termoelemet a darabok tényleges hőmérsékletének meghatározására, ami a hőkezelés utolsó öt percében 600 C°- volt.

A próbatestek előkészítésének befejező művelete azok sörétszórása volt, amire a Rába gépgyárban került sor. A próbatestek szórási paraméterei megegyeztek a használt ötvözetből gyártott merevtengelyek szórási paramétereivel. Fontos, hogy a vizsgálatra használt egyes próbatestek kiinduló feszültség állapota minél inkább hasonló legyen, hiszen ez az eredmények összehasonlíthatóságának, alapja. A próbák szemceszórásához ezért egy azokat semmilyen irányba elmozdulni nem engedő szerszámot építettem, (15. ábra A sörétezéshez használt próba rögzítő szerszám) ezzel az volt a célom, hogy a darabokat azonos pozícióban szemcse szórják.



15. ábra A sörétezéshez használt próba rögzítő szerszám

3. A mérő berendezés és a mérési beállítások

Vizsgálataimat a Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Karának Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetének Lisa Laboratóriumában működő röntgen

diffrakciós laboratóriumában végeztem. A maradó feszültség meghatározáshoz egy az említett laborba 2012 augusztusában érkezett Stresstech G3R típusú röntgen diffraktométert használtam (16. ábra Stresstech G3R röntgendiffraktométer sugárvédelmi fülkében és állványon). Mind amellet, hogy jelen voltam a berendezés telepítése, és üzembe helyezése közben, magamnak tudhatom a szerencsét, hogy részt vehettem a berendezés gyártója által a laboratórium munkatársai számára német országban szervezett felhasználói tréningen. A berendezés egy (lefordítva: középpont nélküli, ám a szakma az angol megfelelőt használja) centerless elrendezésű célzottan maradó feszültség és maradék ausztenit meghatározására fejlesztett röntgen diffraktométer. A berendezés a centerless kiképzésnek köszönhetően alkalmas in situ maradó feszültség meghatározás, nincs szükség mintavételre, mint a hagyományos, többfunkciós Euler bölcsővel ellátott diffraktométerek esetében. A berendezés alapesetben sugárvédelmi fülkében található, ekkor a méret korlátokat a fizikai hely és nem a mintatartó teherbírása adja. Ha méreten felüli alkatrészen szeretnénk maradó feszültség meghatározást végezni lehetőségünk van a mérőberendezést a sugárvédelmi fülkéből kivéve állványra szerelni. Ilyen összeállításban a berendezés alkalmas akár üzemben lévő acél híd vizsgálatára is. Az eszköz a maradó feszültség mind két módon történő meghatározására alkalmas.



16. ábra Stresstech G3R röntgendiffraktométer sugárvédelmi fülkében és állványon

Mind a berendezés vezérlését, mind az adatok regisztrálását és feldolgozását a gyártó által fejlesztett XTronic software végzi.

A maradó feszültségértékeket Cr katódos röntgensóvel végeztem. Karakterisztikus K_{α} , $\lambda=229$ pm, röntgen sugárzást használtam így a ferrit (211) miller indexű síksorozatának $2\theta=156,4^{\circ}$ -ban jelentkező diffrakciós csúcsának eltolódásából számoltam maradó feszültséget módosított $\sin^2 \Psi$ módszerrel. A berendezés goniométer körének felépítése olyan, hogy a klasszikus sugármenettől eltérően a mintára eső és az arról a detektor irányába visszaverődő sugarak szögfelező egyenese nem merőleges a vizsgált minta síkjára. A klasszikus sugármenet esetén ez a szögfelező egyenes merőleges a $\psi=0^{\circ}$ döntésű vizsgálati minta felszínére. Ebből különbségből eredően a merőleges esetre a software korrigál, ezt nevezem módosított $\sin^2 \Psi$ módszernek. A mérés során $\psi = 0^{\circ}; \pm 20.7^{\circ}; \pm 30^{\circ}; \pm 37.8^{\circ}; \pm 45^{\circ}$ döntési pozíciókban 5 sec. gyűjtési idővel regisztráltam az adatokat.

4. A fárasztó igénybevétel

A próbatestek fárasztó igénybevételéhez a Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiák Tanszék Anyagvizsgáló laboratóriumának MTS típusú elektronikus vezérlésű hidraulikus fárasztó berendezést használtam 17. ábra A fárasztó berendezés.



17. ábra A fárasztó berendezés

A fárasztó igénybevétel holtjáték nélküli, $R_{\sigma}=-1$ feszültség aszimmetria tényezőjű, húzó-nyomó jellegű volt. A maradó feszültség vizsgálatok közbeni fárasztását megelőzően előfárasztásokat végeztem. Először $R=0,8\text{mm}$ es geometriájú darabokat fárasztottam 20 kN-os feszültség amplitúdóval, ami a legkisebb 7x7-es keresztmetszetben 408 MPa névleges feszültséget ébresztett. Ami a nemesített állapotú alapanyagának ennél a keresztmetszet tartományban vett szakító szilárdságának $\sim 50\%$ -a. Ezekkel a geometriai és fárasztási paraméterekkel törésig fárasztottam a 63-as és 33-as számú próbatestet. Ezek fejben törtek relative kevés ciklust elviselve. Ezután R értékét a sörétezett darabok újra forgácsolásával 2 mm-re növeltem. Az új geometriával próbafárasztást végeztem az előzővel azonos (12-es próbadarab) és két alacsonyabb 16 kN (22-es próbadarab) és 12 kN (32-es próbadarab) ébresztette névleges feszültség szinten is. A próbafárasztások eredményeit a **3.táblázatban** közlöm, fárasztó diagramban pedig vizsgálati eredményekkel együtt a **21. ábra Összesítő fárasztó** mutatom be.

3. Táblázat

próbatétel száma	terhelés ampl. [kN]	a terhelés frekvenciája [Hz]	feszültség ampl. [Mpa]	R	törésig elviselt ciklusok száma [db]
63	20	15	408	<1	69937
33	20	15	408	<1	86656
12	20	15	408	2	179892
22	16	20	327	2	373944
32	12	25	245	2	2023000<

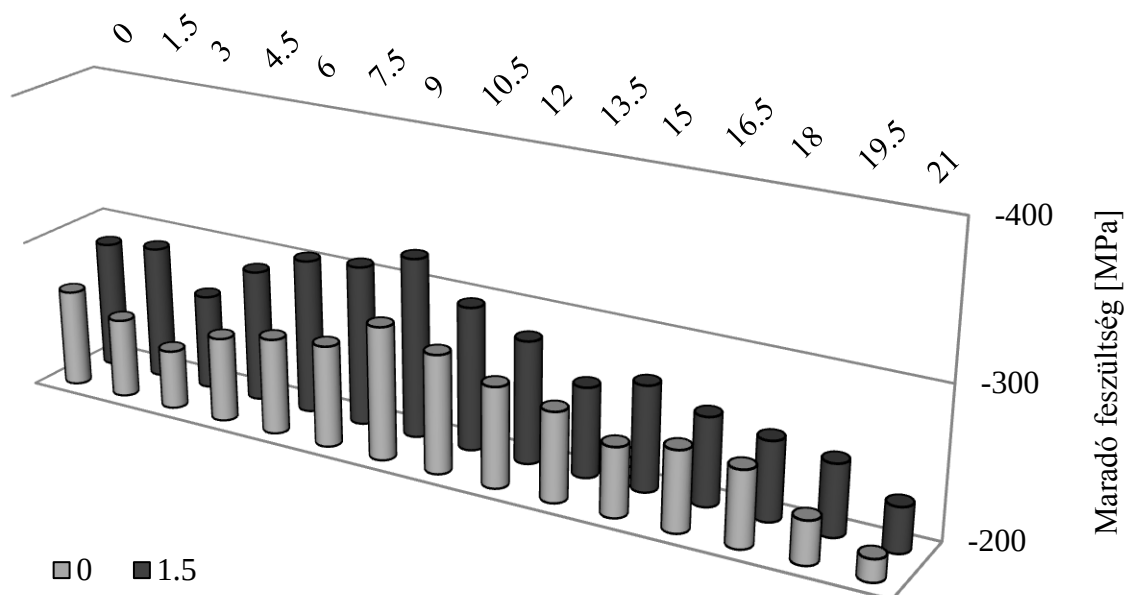
A próbafárasztások tükrében a **4. Táblázatban** ismertetett koncepcióban végeztem a fárasztó kísérleteket (továbbiakban fárasztási terv). Mind a három koncepcionálisan fárasztott mintán vizsgáltam a maradó feszültség állapotot fárasztás előtt és minden egyes fárasztási lépést követően.

4. Táblázat

p.t. száma	terhelés ampl. [kN]	terhelés frek. [Hz]	fesz. ampl. [Mpa]	1.fárasztási lépés (ciklus szám db)	2.f.lép. (c.sz. db)	3.f.lép. (c.sz. db)
44	12	25	245	$1.5 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^5$
62	16	20	327	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
64	20	15	408	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^3$ (törés!)

5. Mérési eredmények

Mielőtt a fárasztási koncepcióban végzett maradó feszültség vizsgálatokba kezdtem volna megvizsgáltam a kész darabok sörétszórás befolyásolta jellemzőit. Elsőképp jellemeztem a sörétezéssel előidézett maradó feszültség állapotot felületi eloszlását. Ehhez maradó feszültséget mértem egy mintának egyik oldalán két egymástól 1.5 mm-re fekvő 21 mm hosszú vonalban, azokat 15 db egymástól 1.5 mm-re fekvő pontokban. A kapott eredmények a 18. ábra A szórással előidézett maradó feszültség mező jellemzése láthatók.

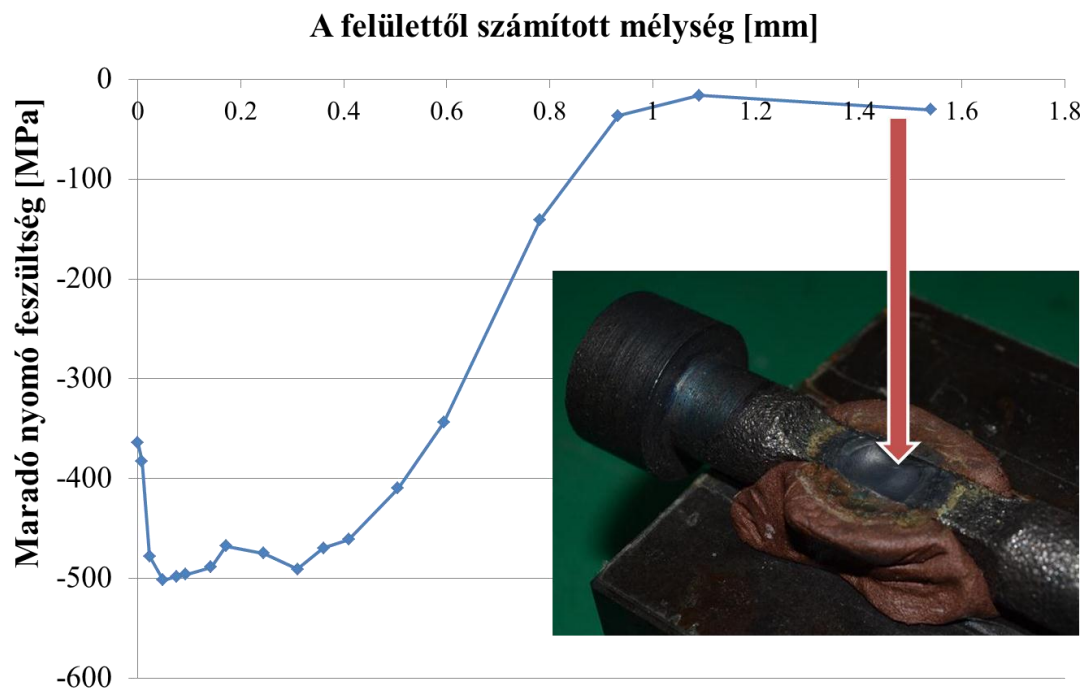


Vizsgált felületi pont hossz irányú helykoordinátája

18. ábra A szórással előidézett maradó feszültség mező jellemzése

Az 53-as számú darabon (ezt a későbbiekben fárasztó igénybevételnek nem tettem ki) megvizsgáltam a maradó feszültség mélységi eloszlását (19. ábra A maradó nyomófeszültség mélységi eloszlása). A felszíni réteg eltávolításához elektrolitos maratást használtam, mert ez a módszer elhanyagolható hatást gyakorol a maradó feszültség állapotra és mind ezek mellett jól szabályozható. A 19. ábra A maradó nyomófeszültség mélységi eloszlása a maratás nyomát

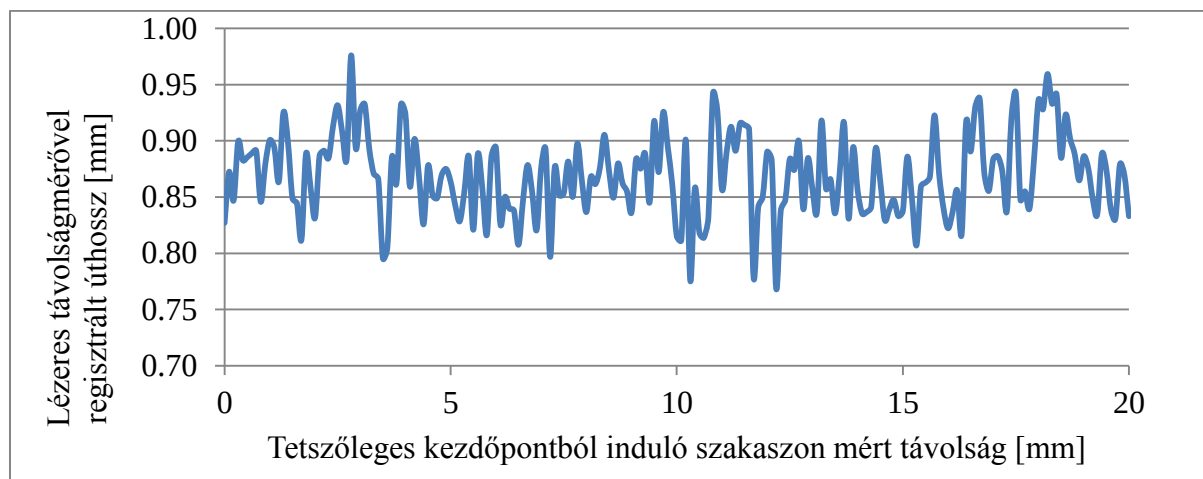
nyíllal jelölöm. A darabot több lépésben maratam a mélység és a maradó feszültség értékek regisztrálása mellett. A darab felületét gyorsan kötő, kétkomponensű, nagyszilárdságú epoxi gyantával növeltem meg, hogy a marató berendezést hézagmentesen ráilleszthessem. Erre azért volt szükség, mert mivel a marató berendezés vákuum szivattyúval keringeti elektrolitot. A maradó nyomófeszültség maximuma a mélységben elnyújtottan, lokális minimummal jelentkezik. A görbe megfelel az ipari gyakorlatban felvett hasonló profiloknak.



19. ábra A maradó nyomófeszültség mélységi eloszlása

Megvizsgáltam a sörékezés nyomán kialakuló felületi érdességet is, hiszen a röntgen diffrakciós maradó feszültség meghatározás fókusz érzékeny eljárás. Az érdesség jellemzésére, ezért kvantitatív módszert használtam, hogy megbecsülhessem a felületi érdességből fakadó fókusz eltérés maradó feszültség mérésre gyakorolt hatását. Ehhez egy egyénileg összeállított mérő eszközt használtam, ami egy foto állványra szerelt lézeres távolságmérőből és egy ez alá helyezett μm -es finomsággal mozgatható mikroszkóp tárgyasztalból állt. A próbatestet egy satuba fogva a tárgyasztalra helyeztem és 20mm hosszon 0,1 mm-enként a lézeres távolságmérővel mért úthosszt regisztráltam, ennek eredménye látható a 20. ábra A szemcseszórt darab felületi érdességének jellemzése. Az érdesség maximuma a 0,2 mm-t nem haladja meg. A gyártó e problematikával kapcsolatos tapasztalatai szerint az

általam használt berendezés ~1mm-es fókusztávolság eltérése esetén $\sim \pm 10\text{MPa}$ hibával dolgozik. Tehát a felület érdessége terheli a maradó feszültség mérést fókusztávolság eltéréseiből származó hibával.



20. ábra A szemcseszórt darab felületi érdességének jellemzése

Az összes fárasztó igénybevételnek kitett vizsgálati próbatest fárasztási adatai láthatók a

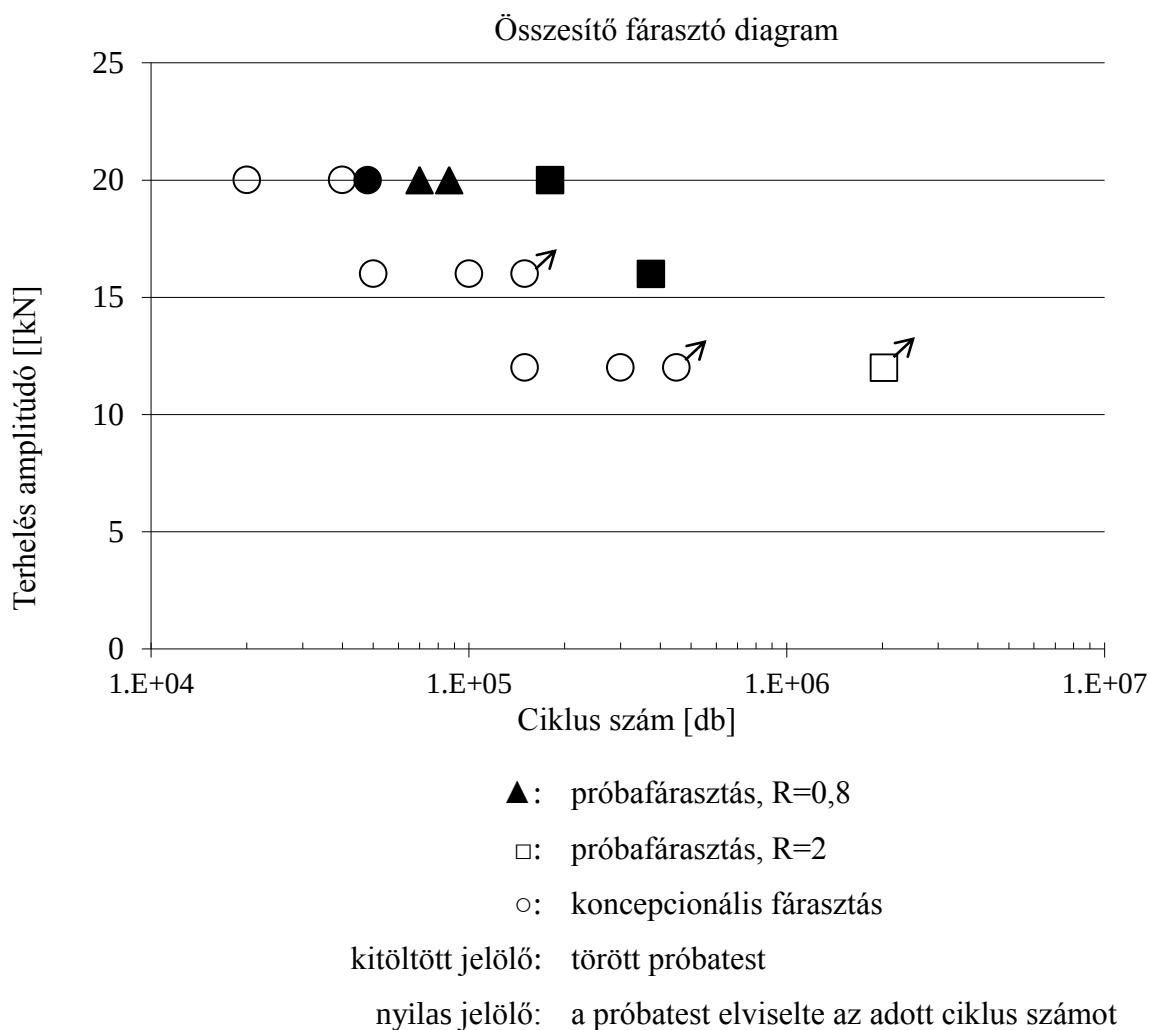
21. ábra Összesítő fárasztó .

A három fárasztási koncepcióban tervszerűen vizsgált próbatest regisztrált feszültség értékeit a 22. ábra A 44-es próbatest maradó feszültség értékei, 23. ábra A 62-es próbatest maradó feszültség értékei és 24. ábra A 64-es próbatest maradó feszültség értékei diagramjain mutatom be. A minták kvadrátikus részének mind a négy oldalán 3 pontban (a középvonalon, annak közepén és attól 10-10 mm-re) mértem a maradó feszültséget a fárasztások előtt és minden egyes fárasztási lépés után. Minden közölt maradó feszültség vektorának iránya a próbatestek hossz tengelyével párhuzamos. A maradó feszültség adatok értéke ~ -200 és $\sim -300\text{MPa}$ közöttiek voltak, a feszültség adatok szórása minden esetben $\pm 10\text{MPa}$ -on belül volt.

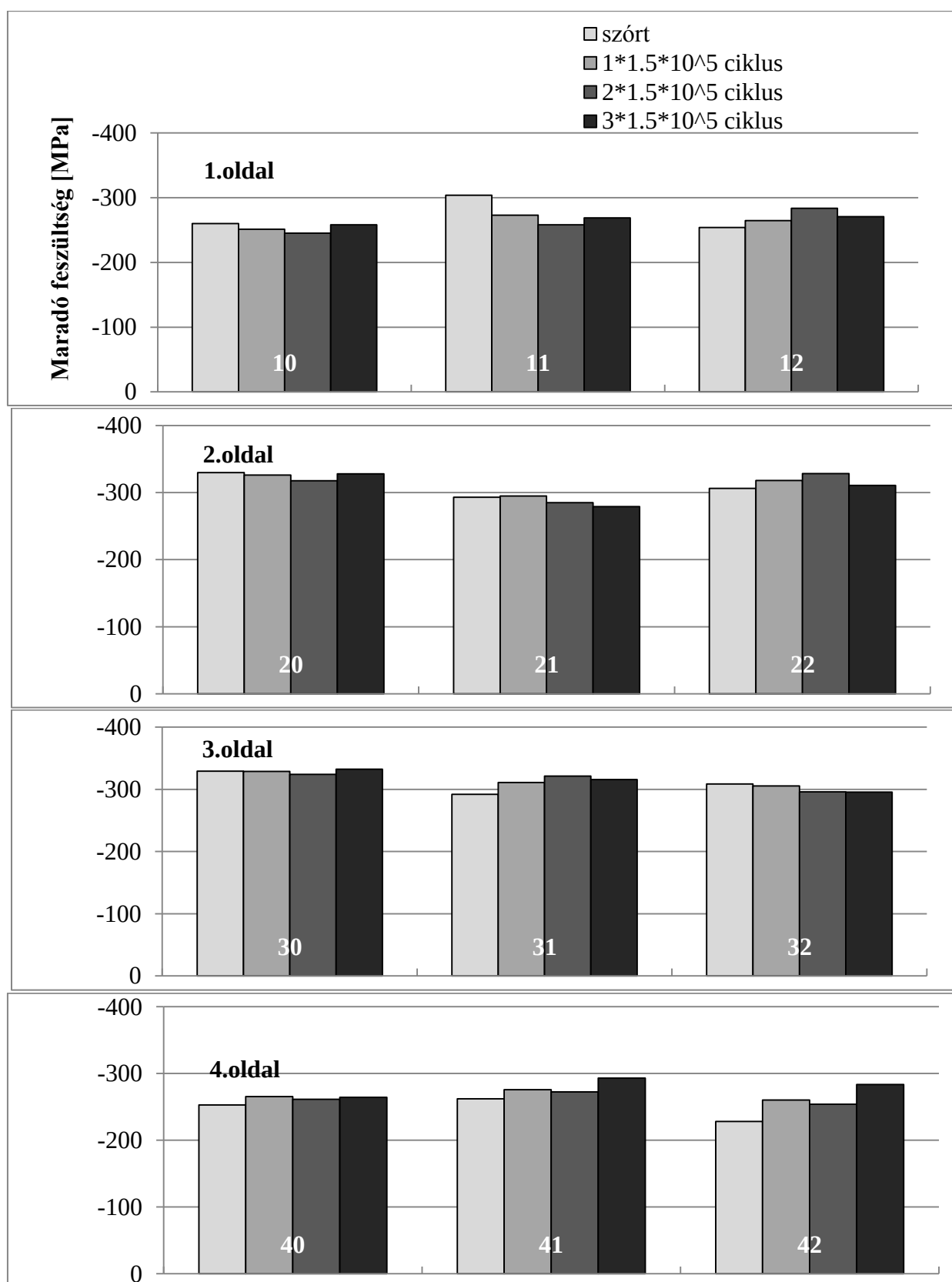
A lépésekben fárasztott próbatestek diagramjainak legvilágosabb színnel jelölt oszlopai mutatják a próbatestek kvadrátikus részének négy oldalán 3-3 pontban a szórás után kialakult a felszíni rétegekben a hossz tengely irányában ható maradó feszültség értékeket. Ezen értékek összehasonlítása alapján azt a következtetést vontam le, hogy a szórással előidézhető maradó feszültség állapot, inhomogén. Ennek magyarázata, hogy szemcseszórásakor a felület egyes rész területeibe csapódó szemcsék száma csak statisztikailag azonos. Így egyes részterületek intenzívebb kezelést kapnak, ez eredményezi az inhomogén maradó feszültség mezőt. Összehasonlítva a három tervszerűen fárasztott próbatest egyes mérési pontjaiban a

különböző fárasztási lépésekben mért maradó feszültség adatokat tendencia nem fedezhető fel. A maradó nyomó feszültség fárasztó igénybevétel közbeni leépülésének nem volt megfigyelhető. Tehát ez az ötvözet, ebben az állapotában, ezeknél a feszültség szinteknél és ciklusszámoknál tartja a maradó feszültség állapotát.

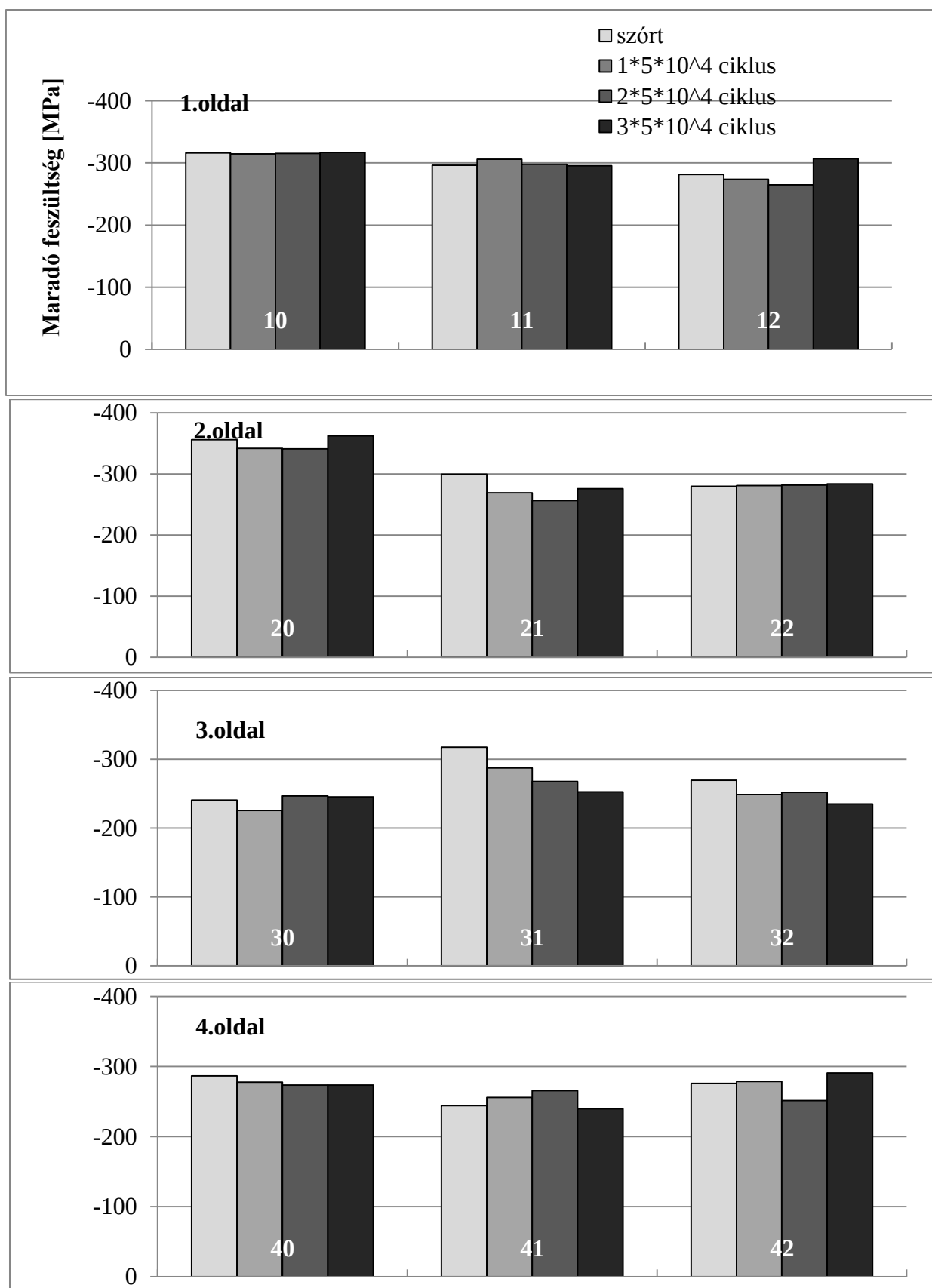
Az ismételt maradó feszültség mérések szórását a 18. ábra A szórással előidézett maradó feszültség mező jellemzésembemutatott diagram értelmében a felszíni maradó feszültség mező inhomogenitása okozza.



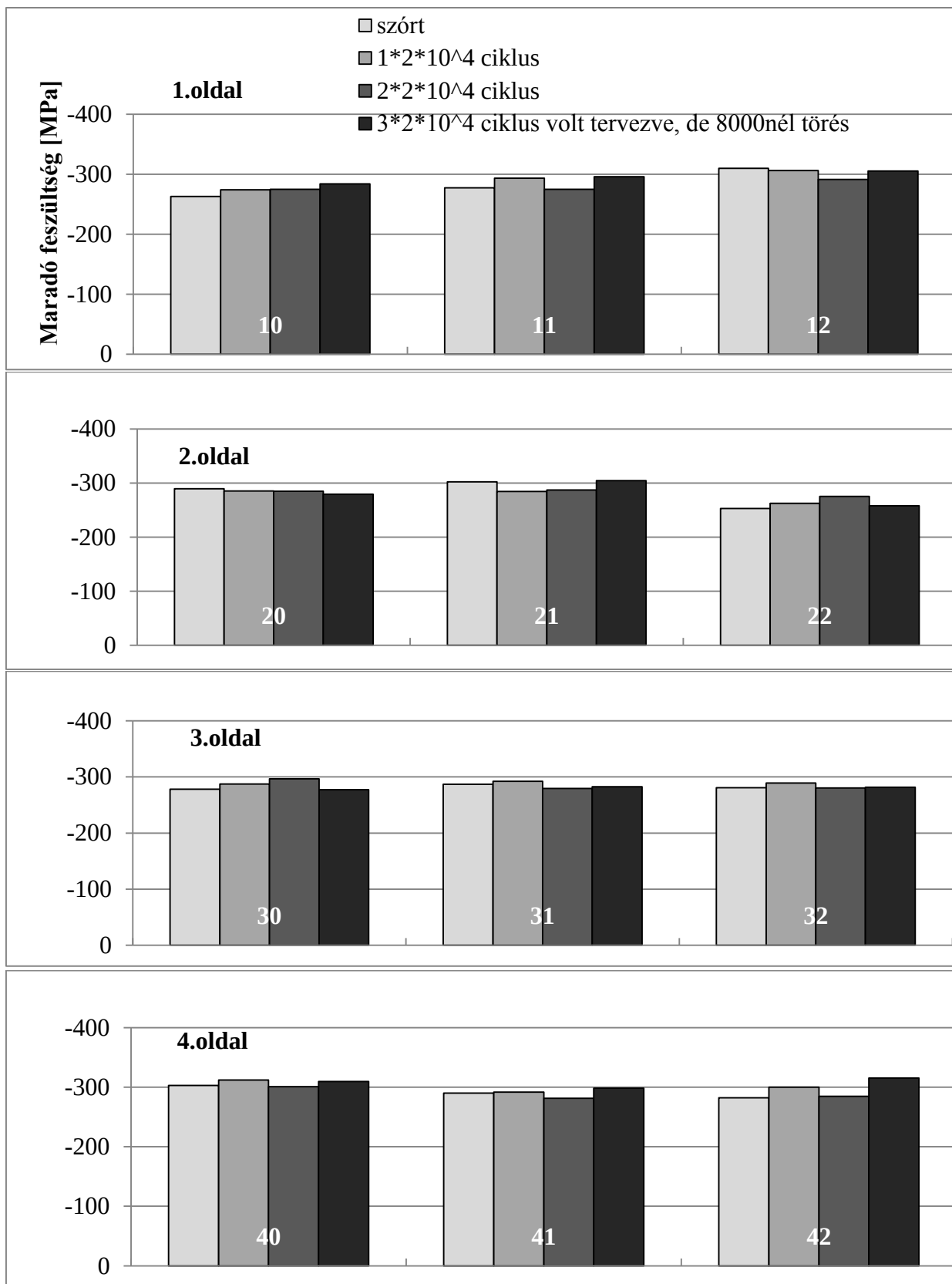
21. ábra Összesítő fárasztó diagram.



22. ábra A 44-es próbatest maradó feszültség értékei

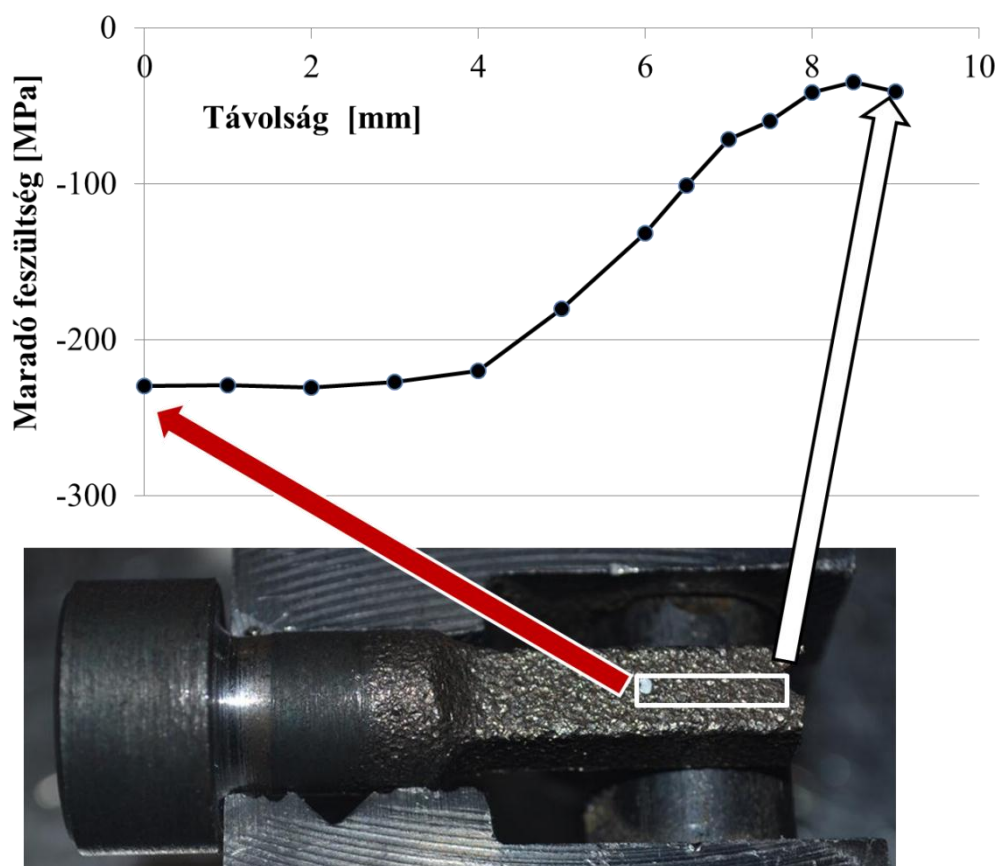


23. ábra A 62-es próbatest maradó feszültség értékei



24. ábra A 64-es próbatest maradó feszültség értékei

A töréses tönkremenetelt szenvedett fárasztott próbatestek a 12 es próbát kivéve, ahol a repedés kvadratikusan és a kisebb átmérőjű hengeres rész közötti átmenetben haladt keresztül, fejben törték. Ezen a darabon lehetőségünk volt a törés környezetében ható maradó feszültségek vizsgálatára. Ehhez a kvadratikusan rész egyik oldalának középpontjából (piros nyíl kezdőpontja) a törés felé (fehér nyíl kezdőpontja) kezdetben 1mm-es majd 0,5mm-es lépésközzel maradó feszültség mérést végeztem a felszín fehérrel bekeretezett részén, a középvonalon (25. ábra A 12 es törésig fárasztott próba oldalán mérhető maradó feszültség). A diagramon jól megfigyelhető a maradó feszültség leépülése a törés környezetében.



25. ábra A 12 es törésig fárasztott próba oldalán mérhető maradó feszültség

Összefoglalás

Dolgozatomban beszámolok egy kísérlet sorozatról, melyben különböző feszültség szintű fárasztó igénybevételekkel terhelt próbatestek sörétszórással ébresztett maradó feszültség állapotát vizsgáltam röntgen diffrakcióval. A kísérlet sorozathoz egyedi fárasztó próbatestet terveztem, melynek anyagául egy az iparban kedvelt ötvözetet választottam. A sörétezés ipari körülmények között a Rába Járműipari Holdin Nyrt. történt.

A maradó feszültség vizsgálatokhoz egy Stresstech G3R röntgen diffraktométert használtam. . Megvizsgáltam a sörétezés indukálta maradó feszültség mező felszíni és mélységi eloszlását. A kezdeti maradó feszültség értékeket vizsgálva arra a megállapításra jutottam, hogy törekvéseink ellenére a sörétezéssel generálható maradó feszültség állapot a módszer statisztikusságából eredően inhomogenitást mutat

A fárasztás közben mért maradó feszültség adatok alapján kijelenthető, hogy ez az ötvözet, ebben az állapotában, ezeken a feszültség szinteken és ennyi ciklus mellett tartja a maradó feszültségállapotát. A jövőben tervezem olyan mérési koncepció összeállítását ahol a maradó feszültség leépülésének effektusa, folyamatként megfigyelhető. Ehhez vizsgálni kell más alternatív próbatest geometriákat és ötvözeteket.

Irodalomjegyzék

- [1.] Heat treating ASM Handbook Vol. 4, ASM International 1991, USA pp
- [2.] Dr Bárczy, Dr Fuchs Erik: Metallográfia I, Tankönyvkiadó, Budapest 1981 pp119-126
- [3.] Sólyom Jenő: Maradó feszültség mérése röntgendiffrakciós módszerrel
gépkatrészekben, Tanulmány, Miskolc, 2007, kézirat
- [4.] Krauss: Principles of Heat treatment of steel, ASM Metals Park, Ohio 1980 pp 268
- [5.] Valery Rudnev: Handbook of Induction Heating, Library of Congress Cataloging –in-
Publication Data, USA 2003 pp:303
- [6.] Cast Irons ASM Specialty Handbook , ASM International 1996, USA pp:48
- [7.] J.R. Davis: Surface hardening of steels, ASM International 2002, USA, pp 79-103
- [8.] R.E. Haimbaugh: Induction Heat Treating, ASM International 2001, USA pp:106-117
- [9.] E. Macherauch and V. Hauk: Residual stress in Science Technology Vol 2, pp 697 1987
Németország
- [10.] P.J. Withers, H. Bhadeshia: Residual Stress Part1- Measurement techniques, Mat Sci
ann Technology, April 2001 Vol17 pp: 355-365
- [11.] http://www.jht.bme.hu/publ/borbas/Gepelemek_merese_.pdf
- [12.] A.D. Krawitz: Introduction to diffraction in materials science and engineering, John
Wiley 2001, pp119-143, 278-318
- [13.] Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International 2008, USA
pp:347-358

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék mondani Tancsics Ferenc Úrnak a Rába technológusának, az alapanyag a rendelkezésemre bocsátása és a sörétezésben nyújtott segítségért, Dr Lukács Jánosnak a próbatest kiválasztásában és fárasztó vizsgálatok elvégzésében nyújtott segítségért. És konzulensemnek a szakmai útmutatásokért. Dolgozatom elkészülését a TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0008 projekt támogatta.