

Beszámoló a

„Fém-polimer hibrid csövek élettartam gazdálkodása”

**című, OTKA T 049126 nyilvántartási számú
pályázat keretében végzett munkáról**

Résztvevő kutatóhelyek:

**Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszék (ME MTTsz)
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Polimertechnika Tanszék
(BME PTSz)
Széchenyi István Egyetem Alkalmazott Mechanika Tanszék (SZE AMTsz)**

Résztvevő kutatók:

**Dr. Czigány Tibor (BME PTSz)
Czél Gergely (BME PTSz)
Dr. Égert János (SZE AMTsz)
Dr. Gaál János (BME PTSz)
Dr. Lukács János (ME MTTsz)
Dr. Nagy Gyula (ME MTTsz)
Dr. Pere Balázs (SZE AMTsz)
Dr. Török Imre (ME MTTsz)**

Összeállította:

Dr. Lukács János (ME MTTsz)

**Miskolc – Budapest – Győr
2009.**

1. Bevezetés

A kutató munka célja a fém-polimer hibrid csövek ciklikus, a különböző terhelésekből adódó fárasztó igénybevétellel szembeni ellenállásának meghatározása, továbbá a csövek élettartamának becslése volt. Hibrid cső alatt az acél cső polimer mátrixú kompozit anyaggal történő megerősítésével létrejött komplex szerkezeteket értjük. A belülről (vagy kívülről) történő megerősítések mindig legalább két funkciót látnak el:

- egyrészt megakadályozzák a csővezetékkel szállított közeg szivárgását,
- másrészt növelik a bélelés (vagy a bandázsolás) segítségével létrehozott hibrid cső merevségét és szilárdságát.

Ahhoz hogy a megerősített polimer kompozit-acél hibrid csőszakaszok tulajdonságait elemezhessük, az újszerűbb (a két évszázada elterjedt acéllal szemben csak négy évtizedes múlttal rendelkező) kompozit csövek tulajdonságaival és gyártási eljárásaival is meg kell ismerkednünk.

1.1. Kompozit csövek

Kompozit csövek alatt a továbbiakban szálerősített, hőre nem lágyuló polimer mátrixú többfázisú, összetett anyagból készült csöveket értünk. A kompozit csövek legfontosabb előnye a fémből készült szerkezetekkel szemben, hogy egyáltalán nem, vagy sokkal kevésbé érzékenyek a korrózióra, nagyobb a szilárdság/tömeg arányuk és nagyon alacsony a karbantartási igényük. A korrózióval szemben mutatott ellenállás hosszabb élettartamot, a kis sűrűség nagy szilárdsággal párosulva olcsó szállítást és könnyű mozgatást, beépítést tesz lehetővé. A kompozit csöveket sokféle szempont szerint csoportosíthatjuk, például igénybevételük alapján léteznek belső nyomással terhelt, más szóval nyomás alatt, illetve légköri nyomáson üzemelő, vagy gravitációs csövek. Egy másik csoportosítási lehetőség szerint megkülönböztethetünk föld alatt vagy föld felett üzemelő csöveket. A szállított közeg általában a csövek anyagát határozza meg, ez alapján is számtalan fajtát különböztethetnénk meg. A kompozit csöveket csoportosíthatjuk gyártástechnológiájuk alapján is, amelyek közül csak a legfontosabbakkal foglalkozunk a továbbiakban. Természetesen a legtöbb, erősített műanyag termékek gyártására alkalmas technológiával elő lehet állítani hengeres héjakat, léteznek azonban termelékenyebb, speciális eljárások is.

1.2. Kompozit csövek gyártása

A kompozit csövek legelterjedtebb gyártástechnológiája a száltekerceselés, emellett fontos szerepet játszik a rotációs formázás, illetve tágabb értelemben ide sorolhatjuk a pultruzió és a fonatolás egyes változatait is.

A száltekerceselés során hőre nem lágyuló polimer mátrixanyaggal átítatott, folyamatos szálkötegeket juttatnak egy forgó magra. A cső tengelyének irányában mozgó szálvezető rendszer és a forgó mag relatív sebességének beállításával tág határok között változtatható a tekerceselési szög. A flexibilis technológiának köszönhetően a tekerceseléssel gyártott csövek szerkezete az anizotrópiát kihasználva a terhelésekhez illeszthető [1.1, 1.2], geometriájuk pedig az igénybevétel függvényében optimálható [1.3, 1.4]. A tekerceselési technológia szakaszos, ezért a termelékenysége korlátozott, de a késztermék kiváló mechanikai tulajdonságai és magas száltartalma miatt a nagy teljesítményű, nyomásálló kompozit csövek döntő többsége száltekerceseléssel készül.

A rotációs formázás során egy forgó külső héjba kerül a hőre nem lágyuló polimer mátrixanyag és a rendszerint vágott szál formájában alkalmazott erősítőanyag. Az így készült csövek esetén az anizotrópia nem tervezhető, azonban az alkotó komponensek sűrűségkülönbségéből adódó, a forgás

hatására kialakuló rétegzettség kihasználható. A rotációs formázásnak létezik alacsonyabb beruházási költségű szakaszos, és drágább, de termelékenyebb folyamatos változata is. Az így készült csövek szál tartalma viszonylag alacsony, ezért mechanikai tulajdonságaik gyengébbek a száltekerceselt csövekénél.

A pultrúzió és a fonatolás azért tekinthető tágabb értelemben csőgyártási eljárásnak, mert mindkettővel termelékenyen állíthatók elő hengerhéjak. A pultrúziót önmagában nem alkalmazzák csőgyártásra, inkább húzásra, hajlításra terhelt profilokat állítanak elő belőle, a technológia azonban kiválóan kombinálható a tekerceseléssel (pullwinding) vagy a fonatolással (pullbraiding). Fonatoláskor lehetőség van az erősítőstruktúra testre szabására, és alkalmasan megválasztott, szigetelő funkciót is betöltő mag, segítségével kiváló tulajdonságú hibrid csövek állíthatók elő, illetve axiális irányú szálbevezetés alkalmazásával a tengelyirányú húzási tulajdonságok is jelentősen javíthatók [1.5-1.7].

1.3. Csőbélelés kompozit anyagokkal

Csővek bélelése esetén előfordulhat, hogy a régi cső statikailag még megfelelő, csak a szállított közeget nem képes szivárgásmentesen célba juttatni, de az is lehetséges, hogy (általában a korrózió miatt) lecsökkent teherhordó képessége miatt szorul javításra. Léteznek lokális (például helyi korróziós hatásokra visszavezethető) és globális (hosszabb csőszakaszokat érintő) hibák, amelyeket más-más módon célszerű kijavítani.

A bélelési eljárások első sorban abban különböznek egymástól, hogy milyen módon juttatjuk a bélelő anyagokat a felújítandó csőbe.

Néhány globális károsodások javítására alkalmas bélelési eljárás során (shortliner, longliner) [8] görgőket szerelnek az 1-5 m hosszú rendszerint üvegszál erősítésű telítetlen poliészter kompozit béléscső szakaszokra, és azokat kézi vagy gépi erővel behúzzák, vagy betolják a régi csőbe. A bélés és az eredeti cső közti hézagot rendszerint híg cementhabarccsal töltik ki. Kisebb hézag esetén a görgők elmaradhatnak, ilyenkor nagyobb tengelyirányú szilárdságú béléscsővekre van szükség, melyeket például hidraulikus úton sajtolnak be a felújítandó csőbe. Ezeknél az eljárásoknál bizonyos szakaszonként meg kell bontani a folytonos csővezetékét, hogy bejuttassuk a béléscső darabokat.

A lokális és globális károsodások javítására egyaránt alkalmas, helyben keményedő bélések (cured in place liner) [1.8] alkalmazásakor összehajtott, feltekerceselt, reaktív műgyantával átítatott, poliészter és poliamid, üveg stb. szálakból körszövésrel, vagy más textiltechnológiával készített előgyártmányt (prepreg) juttatnak a bélelendő csőbe. Globális károsodás javítása esetén a tömlőhöz hasonló előgyártmányt forró gőzzel felfújva és a régi cső falához nyomva hő segítségével térhálósítják. Az így keletkezett bélés bármilyen belső felületű cső geometriáját képes felvenni. A kis kiterjedésű hibák javítása az előgyártmány méretre vágás után egy speciális, kerekeken guruló, felfújható gumitömlő segítségével nyomható a felújítandó cső falához, és helyben térhálósítható. A helyben keményedő bélelési technológiák intenzíven fejlődő területe a vákuuminjektálás alkalmazása prepregek helyett [1.9], illetve a természetes szálak [1.10] bevezetése a csőbélelési technológiákba.

2. Az alkalmazott polimer kompozit csőbélelő anyagok mechanikai tulajdonságai

A csőbélelések méretezéséhez, a javított csövek maradó élettartam becsléséhez és a hibrid szerkezet modellezéséhez szükséges a felhasznált alapanyagok (szálas erősítő anyag és polimer mátrix anyag) illetve a kész kompozit mechanikai tulajdonságainak megismerése. Kompozit anyagok tulajdonságainak elemzésekor célszerű az alapanyagok jellemzőiből kiindulni, mert ezek döntően

befolyásolják a kompozit termék jellemzőit, viszont keverési arányuk (szálak térfogathányada a kompozit termékben) változtatása számtalan különböző anyag előállítását teszi lehetővé. Az alapanyagok tulajdonságainak és a szálak térfogathányadának ismeretében a klasszikus kompozit mechanika „keverékszabályokként” („rules of mixture”) ismert összefüggései segítségével számíthatók a kompozit jellemzői. Lehetőség van azonban a kompozit anyag próbatestes vizsgálataira is. Ezt a módszert elsősorban akkor alkalmazzák ha nagyon pontos eredményekre van szükség és a gyártási technológia biztosítja a termék reprodukálható minőségét. A pályázat során a lehetséges alapanyagok (szál, mátrix) technikai adatlapjai és kézikönyvek útján hozzáférhető tipikus mechanikai tulajdonságait adatbázisokba rendeztük, így segítve a későbbi anyagpár választást. Ennek elsődleges célja a mechanikai modellezési feladatok megkönnyítése volt azzal, hogy bemenő adatokat gyűjtöttünk a felhasználható anyagokról. A legjobb tulajdonságú anyagpár kiválasztása után próbatesteket gyártottunk és mechanikai vizsgálatokat végeztünk rajtuk, hogy ellenőrizzük tényleges jellemzőiket, és összevessük azokat a keverékszabályokkal számítottakkal.

2.1. Kompozit alapanyagok mechanikai tulajdonságai

A kompozit alapanyagok tulajdonságait tartalmazó adatbázisok összeállításához a tanszéki, illetve egyetemi könyvtárakban található modern szakkönyvek adatait, illetve az interneten elérhető termék adatlapok adatait használtuk fel. Az adatbázisokba 44 polimer mátrix anyag 108 különböző tulajdonságát, illetve 98 erősítőszál típus 12 tulajdonságát építettük be az adatforrások részletes megjelölésével. Az adatbázist kiegészítettük a leggyakrabban használt 3 mátrix anyagcsalád (telítetlen poliészterek, epoxik, vinilészterek) és a 3 legelterjedtebb szálas erősítőanyag (üvegszál, szénszál, aramidyszál) irodalmi forrásokban [2.1-2.5] található legfontosabb tulajdonságainak felsorolásával.

2.2. Kompozit csőbélelő anyag mechanikai vizsgálatai

Az összeállított adatbázisokból véges elemes modellezés segítségével a szénszál-epoxy anyagpárt választottuk a csőbélelésre legalkalmasabb anyagnak, ezért ezen anyagból kompozit lemezeket gyártottunk és részletes próbatest szintű mechanikai vizsgálatoknak vetettük alá őket.

2.2.1. Szénszövet erősítésű kompozit lemez anyagvizsgálata 1.

A kompozit anyag sűrűségét az MSZ EN ISO 1183-1 szabvány bemerítéses módszerével határoztuk meg. A mérés során a próbatest tömegét először szárazon, majd pedig metilalkoholba merítve mértük meg.

Magas hőtűrésű szálakat (például szén- és üvegszálakat) tartalmazó kompozitok száltartalma meghatározható az MSZ EN ISO 3451-4:2001 alapján ha a rendszerint éghető mátrix anyagot 600-650 °C-os izzítókemencében eltávolítjuk, és a visszamaradó szálak tömegét viszonyítjuk a darabok eredeti tömegéhez. Az eljárással a szálak tömegaránya határozható meg, amelyet nagy sűrűségű szál (például üvegszál) esetén a mechanikailag fontosabb térfogatarányra célszerű átszámítani. Ehhez szükség van a feljebb ismertetett sűrűség meghatározásra.

A szénszállal erősített polimer kompozitok szakítóvizsgálatait az MSZ EN ISO 527-4:1999 szabvány előírásai szerint végeztük el. Szálerősített kompozit szakító próbatestek esetén a próbatestet a befogási helyeken a lemez vastagságához közeli vastagságú, hasonló vagy azonos anyagú fülek alkalmas ragasztóval történő rögzítésével erősítettük meg. Ilyen módon elkerülhető a befogópofák környezetében az összetett feszültségállapot dominanciája a tisztán húzott állapotban lévő középső részekhez képest és jól működő fülek esetén a szakadás nem a befogás közvetlen közelében következik be. A próbatestek előkészítésekor a leírtak alapján a lemezből kivágott próbatesteket saját anyagukkal vastagítottuk meg. A szakítóvizsgálatokat 2 mm/perc szakítási

sebességgel Zwick Z 050 típusú számítógép vezérlésű univerzális anyagvizsgáló gépen végeztük, videoextenzométeres nyúlásméréssel. Három különböző vastagságú lemezt vizsgáltunk, amelyek 3, 6, illetve 9 szénszövet réteg felhasználásával készültek.

A lemez belsejében jelentős méretű, több milliméteres légzárványokat fedeztünk fel, amelyek minden bizonnyal jelentősen rontották az anyag mechanikai tulajdonságait. A tapasztalt hiba miatt egy új lemezt gyártattunk, és a méréseket megismételtük.

A sűrűségmérést 3 db, a száltartalom mérést 6 db, a szakítóvizsgálatokat 3 x 6 db próbatesten végeztük el.

2.2.2. Szénszövet erősítésű kompozit lemez anyagvizsgálata 2.

A megismételt vizsgálatsorozat azonos eszközökkel, azonos vizsgálati paraméterek mellett történt ezért ezek leírását nem ismételjük. A méréseket 3 + 9 + 3 x 9 db próbatesten végeztük el.

2.2.3. Szénszövet erősítésű kompozit lemez anyagvizsgálata 3.

A harmadik vizsgálatsorozatban egyféle vastagságú szénszál erősítésű kompozit lemezt vizsgáltunk részletesebben annak érdekében hogy a további véges elemes vizsgálatokhoz bemenő adatokat szerezzünk.

A szakító vizsgálatokat ez esetben a szövet erősítés mindkét jellemző irányában (lánc- és vetülék irány) elvégeztük. A Poisson tényezőt speciális nyúlásmérő bélyegek segítségével mértük, amivel egy időben lehetőség van két egymásra merőleges irányú nyúlás mérésére. A bélyegek típusa: KMT-SIAD-06-1,5/350-5 volt és 45°-os szögben kerültek felragasztásra. A bélyegtényező: $k = 2,05$, a bélyeg ellenállása: $R = 350 \Omega$ értékű volt. 7 db próbatest vizsgálatainak átlaga alapján a Poisson tényező $\nu = 0.0356$ -ra adódott mind lánc, mind pedig vetülék irányban.

Nyomóvizsgálatokat is végeztünk a lemezből kivágott keskeny, hosszú rudakon (4x100 mm) a DIN 29971 szabvány szerint, ügyelve hogy a befogópofák egytengelyűek és jól megvezetettek legyenek. A befogás a rudak majdnem teljes felületén történt, csak egy rövid középső szakasz (10 mm) maradt szabadon, ide koncentrált a terhelés és az alakváltozás.

Síkbeli nyíróvizsgálatokat nem szabványos körülmények között végeztünk két oldalról bemetszett próbatesteken, ezért azok eredményei csak tájékoztató jellegűek.

A mérési módszerekkel és az eredményekkel kapcsolatos megjegyzések:

- A vetülékirányú szilárdságot csökkenthette, hogy a kompozit lemez hosszú, 100 mm széles láncirányú szalagokból készült, amelyek rétegenként eltolt helyzetekben kerültek egymás mellé. Így vetülékirányban vizsgálva a kompozitot, a szénszövet szalagok összetételeinél a szálak nem voltak folytonosak.
- A Poisson tényező a két egymásra merőleges irányban közel azonosnak tekinthető, kis értékét az okozza, hogy például a láncirányban történő húzás esetén a rá merőleges irányú kontrakciót a vetülék irányban bevezetett szálkötegek erősen gátolják.
- A húzó- és nyomó rugalmassági modulus közel azonosnak tekinthető, a nyomószilárdságok esetén valószínűleg azért adódott nagyobb érték vetülék irányban, mert a láncirányú szálak hullámosak, így hajlamosabbak a kihajlásra. A húzásnál említett hatás itt a kis befogási hossz (8 mm) miatt nem lép fel (figyeltünk rá, hogy ne legyen összetétel a lényeges helyeken).
- A nyírószilárdság értékek tájékoztató jellegűek, és annak ellenére hogy mérésből származnak, az összetett feszültségállapot miatt (nyírás-hajlítás) pontatlanok lehetnek.

A sűrűség mérést 3 db, a száltartalom mérést 3 db, a szakítóvizsgálatokat 7 db, a nyomóvizsgálatokat 5 db, a nyíróvizsgálatokat 4 db próbatesten végeztük el.

3. Kísérleti csőszakaszok és jellemzőik

3.1. A kísérleti csőszakaszok

A fásztó- és repesztő vizsgálatokhoz $D_k = 219$ mm külső átmérőjű ($DN200$), hosszvarratos csövekből készült kísérleti csőszakaszokat használtunk. Tekintettel a csövek alkalmazási sajátosságaira, a csőszakaszok egy része körvarratot is tartalmazott, amelyek bevont elektródás kézi ívhegesztéssel vagy kombinált technológiával (gyök: argon védőgázos wolfram elektródos ívhegesztés, töltő- és takaró rétegek: bevont elektródás kézi ívhegesztés) készültek. A csőszakaszok legfontosabb jellegzetességeit foglalja össze az 1. táblázat.

1. táblázat. A kísérleti csőszakaszok legfontosabb jellegzetességei.

Jel	Méret			Anyag-minőség	A cső típusa ^{1), 2)}	Hegesztés ³⁾
	DN [mm]	D_k [mm]	t [mm]			
a1	200	219	5	L 360 MB	hv (HFW)	nincs
a3						körvarrat (141/111) és körvarrat (111)
a4						körvarrat (111)
b1	200	219	5	L 360 MB	hv (HFW)	nincs
b2						körvarrat (141/111)
b3						körvarrat (141/111)
b4						körvarrat (141/111)
b5						körvarrat (141/111)
o1	200	219	5	L 360 MB	hv (HFW)	nincs
o2						nincs
o3						nincs
o4						nincs

¹⁾ vn = varrat nélküli; hv = hosszvarratos

²⁾ S = seamless; HFW = high frequency welded

³⁾ 111 = bevont elektródás kézi ívhegesztés; 141 = argon védőgázos wolfram elektródos ívhegesztés

A kísérleti csőszakaszok közül mindössze kettő volt olyan, amely nem tartalmazott eltéréseket, illetve hibákat. A hibák egyik része körvarratokban lévő eltérés (varrathiba) volt, a varratok – egy kivétellel – a vonatkozó előírások [3.1-3.2] alapján *NEM MEGFELELŐ* minősítést kaptak. A többi hiba forgácsolással készített műhiba (mesterséges hiba) volt, amelyeket méreteik és arányaik alapján szintén *NEM MEGFELELŐ* minősítésűre terveztünk, illetve készítettünk. A műhibák alakját és geometriáját egyrészt hiba statisztikákra [3.3-3.14], másrészt korábbi kísérleti tapasztalatainkra [3.15-3.16] alapoztuk. A hibákat tartalmazó csőszakaszok egy részét nem, egy másik részét viszont a hibahelyeken, polimer mátrixú, karbon szál erősítésű, illetve üveg szál erősítésű kompozittal, kívülről, illetve belülről megerősítettük, hibrid csőszakaszokat hozva létre

ezzel. Az így elkészített szerkezeti elemek ismétlődő igénybevételű (fárasztás), illetve kvázisztatikus igénybevételű (repszés) vizsgálatára kerül sor. A vizsgálatok céljától, még inkább részeredményeitől függően, egy-egy csőszakaszon több és többfajta vizsgálatot valósítottunk meg. A különböző változatokat a 2. táblázatban foglaltuk össze.

2. táblázat. A hibák (eltérések), a megerősítések, valamint a vizsgálatok összefoglalása, kísérleti csőszakaszonként.

Jel	Hibák		Megerősítés	Szerkezeti elem vizsgálat	
	jelenléte	értékelése		fárasztás	repszés
a1	nem	nem releváns	nincs	nem	✓
a3	varrathibák	MEGFELELŐ	nincs	✓	✓
a4	varrathibák	NEM MEGFELELŐ	nincs	✓	✓
b1	nem	nem releváns	nincs	✓	✓
b2	varrathibák	NEM MEGFELELŐ	nincs	✓	✓
b3	varrathibák	NEM MEGFELELŐ	✓	✓	✓
b4	varrathibák	NEM MEGFELELŐ	✓	✓	✓
b5	varrathibák	NEM MEGFELELŐ	✓	✓	✓
o1	műhibák	NEM MEGFELELŐ	✓	✓	✓
o2	műhibák	NEM MEGFELELŐ	✓	✓	✓
o3	műhibák	NEM MEGFELELŐ	✓	✓	✓
o4	műhibák	NEM MEGFELELŐ	nincs	✓	✓

3.2. Külső megerősítés: hibrid csőszálak kialakítása

A hibákat tartalmazó csőszálak külső megerősítésére (1. és 2. táblázatok kettős vonal feletti esetei) a Budaplast Műanyagipari és Kereskedelmi Zrt-nél, Rózsaszentmártonban került sor. A körvarratok megerősítésének felépítését az 1. ábra szemlélteti. A megerősítési technológia – amelyet egy gyári szigeteléstől teljes mértékben megfosztott DN 100-as csőszálon képek segítségével is bemutatunk – a következő lépésekből áll:

- tisztítás (2. ábra);
- alap gyantaréteg (*EPOREZIT FM-21i* + *EPOREZIT T 16/20*) felhordása (3. ábra);
- karbon szövetrel (*KDL-5002*) történő tekerceslés folyamatos gyanta felhordás mellett (a körvarrat egyik oldalán: 4. ábra, a körvarraton: 5. ábra);
- fátyol bevonat felvitele (6. ábra);
- kikeményítés (7. ábra).

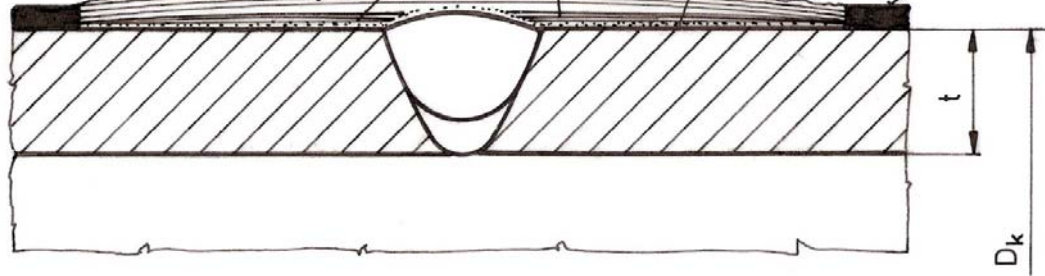
középen 8 réteg, a szélek felé csökkenő
számú réteg, 100 mm széles karbon szövet

3 réteg, 100 mm széles karbon szövet

fátyol bevonat

alap gyantaréteg

gyári szigetelés



1. ábra. A körvarratok külső megerősítésének felépítése.



2. ábra. Egy DN 100-as csőszál külső megerősítése: tisztítás.



3. ábra. Egy DN 100-as csőszál külső megerősítése: az alap gyantaréteg felhordása.



4. ábra. Egy DN 100-as csőszál külső megerősítése: karbon szövettel történő tekerés a körvarrat egyik oldalán, folyamatos gyanta felhordás mellett.



5. ábra. Egy DN 100-as csőszál külső megerősítése: karbon szövettel történő tekerés a körvarraton, folyamatos gyanta felhordás mellett.

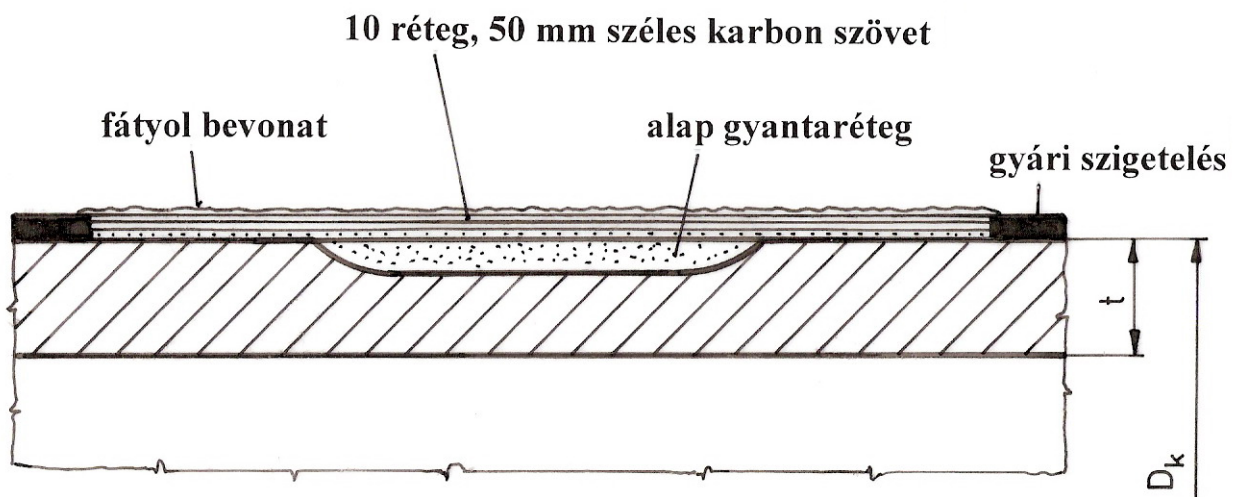


6. ábra. Egy DN 100-as csőszál külső megerősítése: a fátyol bevonat felvitele.



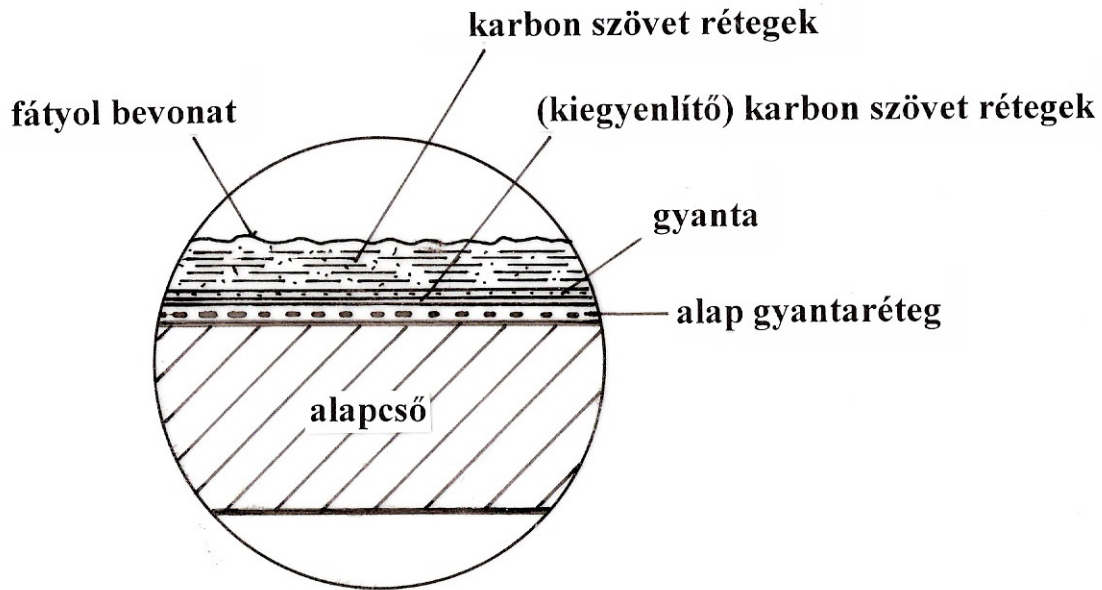
7. ábra. Egy DN 100-as csőszál külső megerősítése: kikeményítés.

A forgácsolással készített mesterséges hibák, a hosszirányú külső bemetszések, felépítését a 8. ábra szemlélteti. A bemetszések közvetlenül a végleges méretre készültek és kialakításuk esetében különös figyelmet fordítottunk arra, hogy a bemetszés és a cső tengelye a bemetszés teljes hosszán párhuzamos, a bemetszés mélysége pedig – eltekintve a bekezdő és a kifutó résztől – állandó maradjon.



8. ábra. A hosszirányú külső bemetszések külső megerősítésének felépítése.

A 9. ábra külön is bemutatja a megerősítés felépítését, az egymást követő rétegek jobb elkülöníthetősége érdekében.



9. ábra. A külső megerősítések rétegei.

3.3. Belső megerősítés: hibrid csőszálak kialakítása

A hibákat tartalmazó csőszálak belső megerősítésére (1. és 2. táblázatok kettős vonal alatti esetei) a Polinvent Kft-nél, Gyálon került sor. A megerősítési technológia (*short-liner* technológia) – amelyet egy DN 200-as csőszálon képek segítségével is bemutatunk – a következő lépésekből áll:

- a csőfelület előkészítése bélelésre: tisztítás (10. ábra), portalanítás, áttörlés acetonos ruhával;
- a vázanyag (*DIPEX KM900L600/M300-1250* típusú üvegszövet) impregnálása *3P* hibridgyantával (11. ábra);
- az impregnált szövet feltekerése pakkerra (12. ábra);
- a pakker pozicionálása (13. ábra);
- a belső nyomás biztosítása (14. ábra).



10. ábra. Egy DN200-as csőszál belső megerősítése: a csőfelület előkészítése.



11. ábra. Egy DN200-as csőszál belső megerősítése: a vázanyag impregnálása.



12. ábra. Egy DN200-as csőszál belső megerősítése: az impregnált szövet feltekerése pakkerra.



13. ábra. Egy DN200-as csőszál belső megerősítése: a pakkér pozicionálása.



14. ábra. Egy DN200-as csőszál belső megerősítése: a belső nyomás biztosítása.

Egy elkészült belső megerősítést a 15. ábra szemléltet.

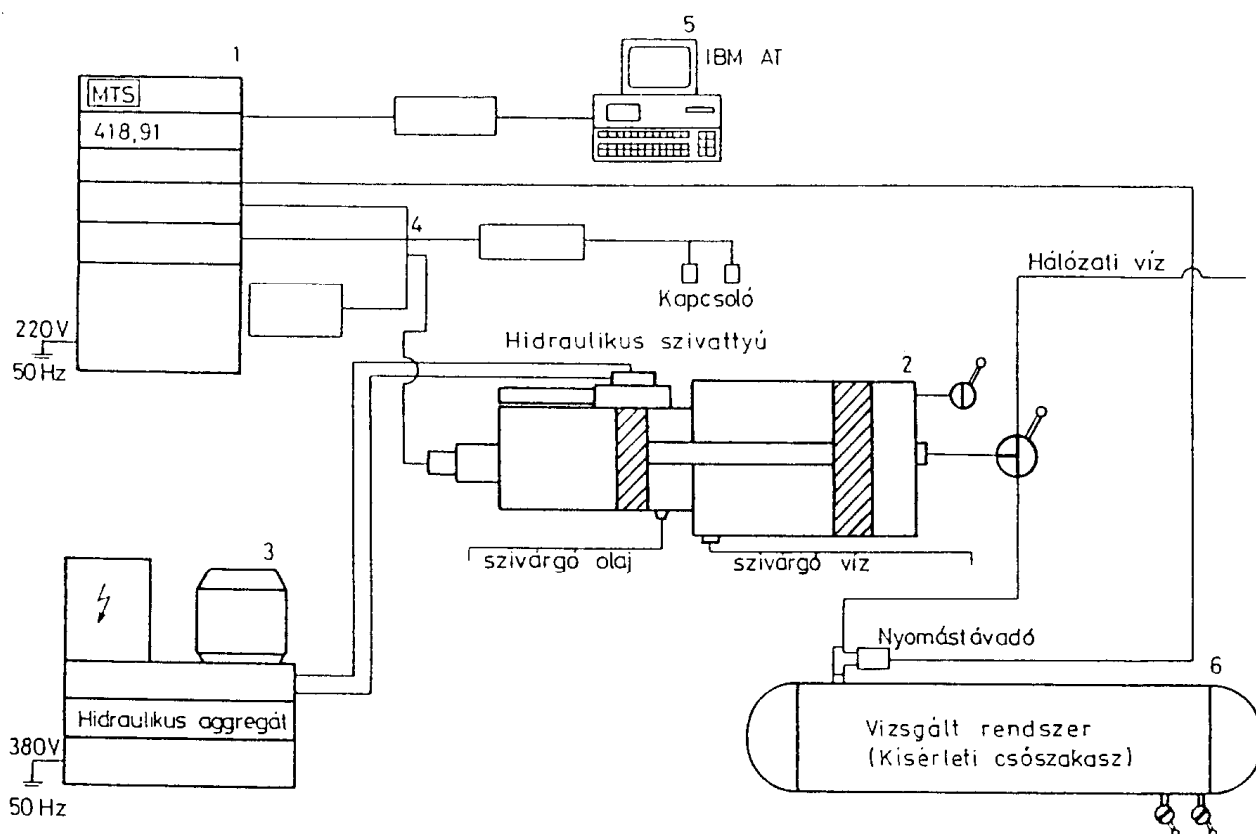


15. ábra. Egy belülről megerősített DN200-as csőszál.

3.4. A vizsgáló rendszer

A Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának Mechanikai Technológiai Tanszékén két berendezés is lehetőséget teremt csőszakaszok, nyomástartó berendezések belső nyomással, nyomásváltozással történő fárasztására és repesztésére. Az egyikkel 100 bar (10 MPa), a másikkal pedig 700 bar (70 MPa) maximális nyomás, illetve nyomásváltozás hozható létre.

A fárasztó vizsgálatok végzéséhez MTS gyártmányú, szabályozott körű olaj-víz kezegető munkahengerekkel, elektronikus vezérléssel és számítógépes adatgyűjtéssel felszerelt berendezést használtunk. A rendszer felépítése a 16. ábrán látható, fő egységei pedig a következők: elektronikus szabályozóegység (1); 10 MPa (100 bar) maximális, vízdali nyomású hidraulikus henger-rendszer (2); hidraulikus tápegység (3); kiépített, nagy nyomáson használható vezetékrendszer (4); számítógép és perifériái (5); kísérleti vagy vizsgált csőszakasz (6).

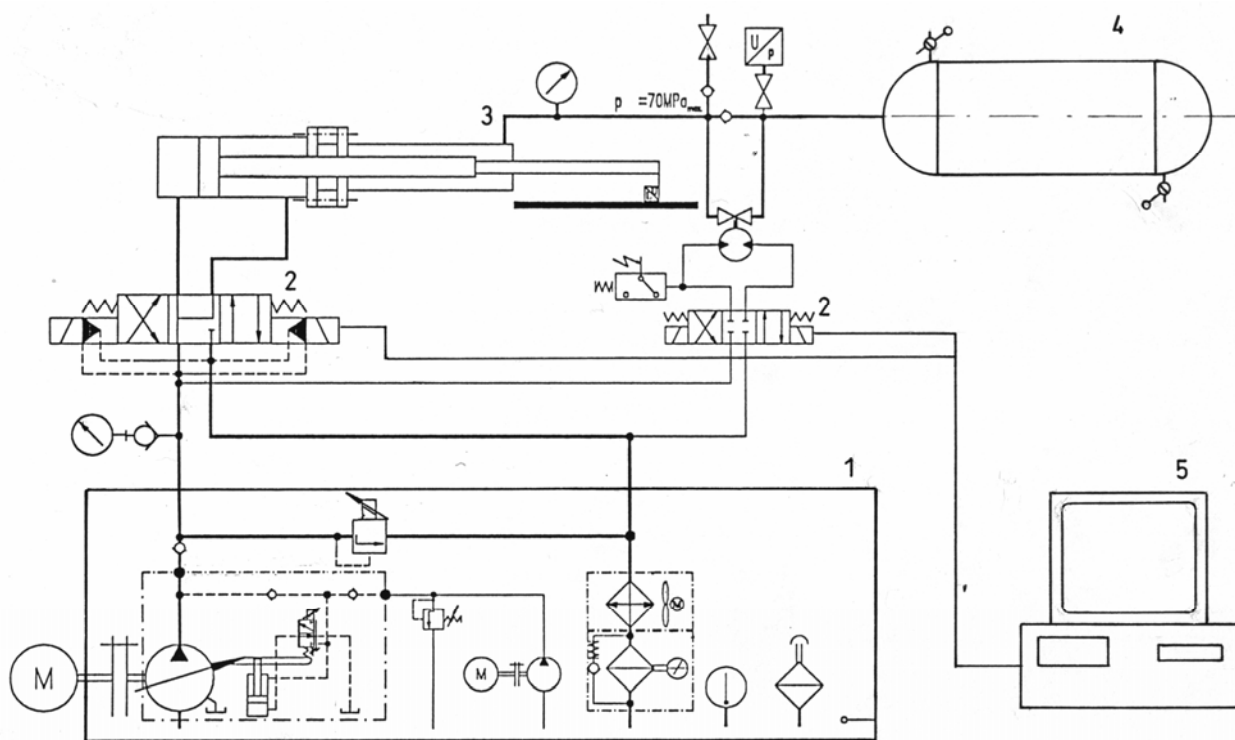


16. ábra. A 100 bar terhelhetőségű fárasztó rendszer felépítése.

A vizsgáló rendszer a vizsgált tartályban (6) maximum 10 MPa nyomást képes előállítani. A belső nyomás változása lehet kvázistatikus és időben ismétlődő. A vízdali nyomást, nyomásváltozást a hidraulikus tápegység (3) 21 MPa olajnyomásának felhasználásával, a szervoszelep megfelelő szabályozásával lehet előállítani. A szervoszelep állapotát a szabályozó elektronika (1) határozza meg. Ezzel a rendszer egy zárt villamos és egy zárt hidraulikus szabályozó kört alkot, biztosítva a beállított jellemző maximális pontosságát. A szervoszelep pillanatnyi állapotát jellemző feszültség értékét az elektronika rögzíti és összehasonlítja a vezérlő értékkel. E két jel különbségének megfelelően kap a szervoszelep jelet a nyitásra, vagy a zárásra, aminek hatására elmozdulnak a dugattyúk. A megváltozott nyomást a rendszerbe épített nyomástávadó érzékeli, amelynek jelét visszacsatolva a szabályozó körbe a szabályozási folyamat újra kezdődik.

A csőszakaszban uralkodó nyomás időbeli változásának követésére a nyomástávadó jele használható fel. E gyűjtött mennyiséget az elektronikus szabályozó egység erősítését követően A/D átalakítóra átvezetve, számítógéphez csatlakoztatva, azok letárolhatók.

A repesztő vizsgálatokhoz nyomásfokozóként egy 70 MPa -os (700 bar -os) – a Tanszéken kiépített – vizsgálópadot használtunk, amelynek főbb egységei a 17. ábrán láthatók. A hidraulikus tápegység (1) 35 MPa maximális nyomású olajat biztosít, amelyet megfelelő szabályozó szelepeken (2) keresztül lehet a munkahenger (3) olaj oldalára vezetni. Ezen tandem henger vízdoldali egysége csatlakozik a vizsgált kísérleti csőszakaszhoz (4) biztosítva a kívánt nyomást, ami maximum 70 MPa lehet. Amennyiben a vizsgált csőszakasz tágulása nagyobb, mint a vízdoldali henger-térfogata ($2,5\text{ liter}$) a végállaskapcsoló jelzésére a dugattyúk visszaállnak a kiindulási helyzetbe, miközben a hálózatról vizet vesz fel a rendszer. A nyomás jelentősebb csökkenését ezen idő alatt egy visszacsapószelep akadályozza meg. A nyomás időbeli változását a szabályozó szelepeken keresztül egy számítógép (5) vezérli, amely egyben gyűjti és tárolja is a mért adatokat.



17. ábra. A 700 bar-os vizsgálópad főbb egységei.

Az egymás mellett elhelyezkedő 700 bar -os és 100 bar -os munkahengereket – ebben a sorrendben – a 18. ábra szemlélteti. A felvételen a vezérlő- és adatgyűjtő számítógépek is láthatók.



18. ábra. A fárasztó- és repesztő-rendszerek munkahengerei, a vezérlő- és adatgyűjtő számítógépekkel.

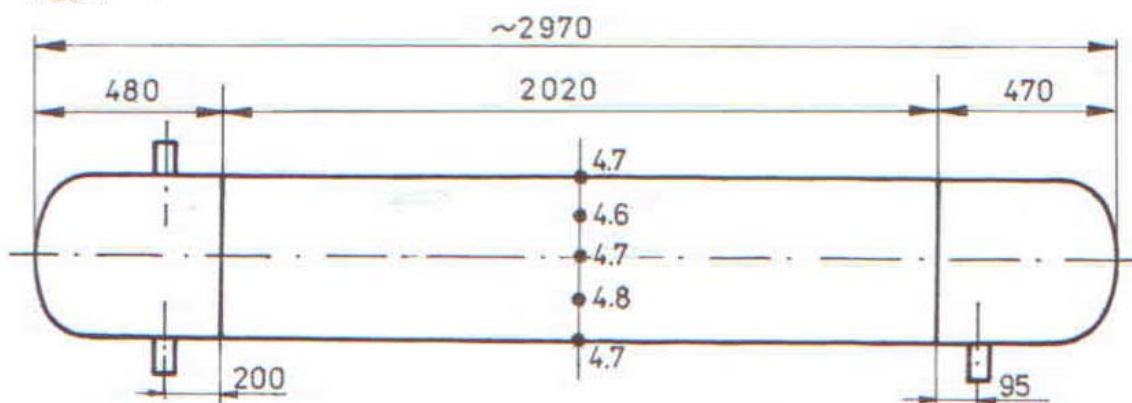
3.5. A kísérleti csőszakaszok vizsgálata

A fárasztóvizsgálatok adatait és eredményeit, valamint a repesztővizsgálatok eredményeit és az azokból számított biztonsági tényezőket a kísérleti csőszakaszok vizsgálatának bemutatása után található, 5. és 6. táblázatokban foglaltuk össze. A vizsgálatok részleges – vizsgálati csoport specifikus – értékelését a két vizsgálati csoport kísérleti munkájának bemutatása után, összegző értékelését pedig a fejezet végén adjuk meg.

3.5.1. A DN 200-as, közöttük kívülről megerősített csőszakaszok vizsgálata

Ezen DN 200-as csőszakaszok vizsgálatit két csoportra bontva végeztük el. Az első csoportba olyan csövek tartoztak, amelyek megerősítésére nem került sor, s amelyek fárasztóvizsgálatait $2 \cdot 10^4$ ciklusig végeztük (*a* jelű csövek). A második csoport csövei (*b* jelű csövek) között már több kívülről megerősített csövet is találhatunk, a csoport esetében a fárasztási ciklusszám nagyobb, 10^5 ciklus volt.

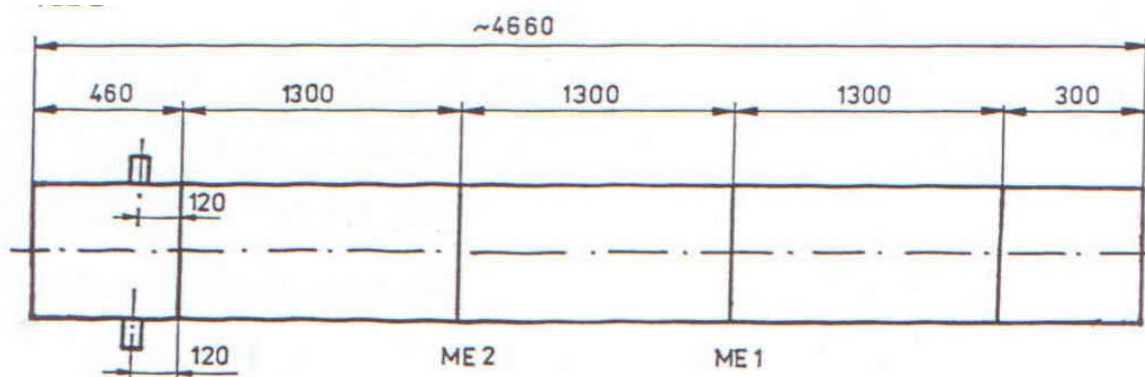
Az *a1* jelű csőszakasz hibátlan csőből állt, amelynek fárasztására sem került sor. Ezzel a vizsgálattal bázisadat szolgáltatása volt a célunk. A csőszakasz vázlata a 19. ábrán látható. (Az ábrán szereplő 4,6 mm-es, 4,7 mm-es és 4,8 mm-es falvastagság értékek a repesztővizsgálat után mért értékek.)



19. ábra. A megerősítés nélküli, hibátlan DN 200-as csőszakasz (a1) vázlata.

Ennek a csőszakasznak a tönkremenetele – a teljes kísérleti programban egyedülként – nem hibánál (hiszen nem is tartalmazott hibát) és nem is a palást mentén következett be, hanem a légtelenítő csonk körvarratában. Tekintettel a repesztési nyomás nagy értékére (261,7 bar, lásd 6. táblázat), nem javítottuk ki a hibát és nem terheltük meg ismét a csőszakaszt, mert a már elviselt terhelés okán nem számíhattunk megbízhatóan megítélhető eredményre.

Az a3 jelű, megerősítés nélküli kísérleti csőszakasz két körvarratot tartalmazott, amelyek közül az ME1 jelű körvarrat argon védőgázos wolfram elektródos ívhegesztés/bevont elektródás kézi ívhegesztés (141/111) eljárásokkal, míg az ME2 jelű körvarrat bevont elektródás kézi ívhegesztés (111) eljárással került kialakításra. A csőszakasz vázlatát a 20. ábra szemlélteti.



20. ábra. A megerősítés nélküli, két körvarratot tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (a3) vázlata.

A körvarratokat ellenőrzésére roncsolásmentes – röntgen – vizsgálattal került sor, amelynek az MSZ 14-01052:1991 [3.1] szabvány szerinti értékelését a 3. táblázat tartalmazza. A károsodások követésének szándékával 10^4 , illetve $2 \cdot 10^4$ fázisztási ciklus után ismételt sor került a körvarratok röntgenvizsgálatára. Az értékelést, mindkét esetre, ugyancsak a 3. táblázat mutatja be.

A kutató munkának nem volt tárgya az elvégzett vizsgálatok minőségének és megbízhatóságának értékelése. Áttekintve ugyanis a röntgenvizsgálatok kiértékelésének táblázati adatait, elemezni kellene annak okait például, hogy

- hogyan keletkezhetett az ME1 körvarrtban $2 \cdot 10^4$ ciklusszám után a 10-11 szakaszon C (401) jelű hiba, vagy

- hogyan keletkezhetett az ME2 körvarratban $2 \cdot 10^4$ ciklusszám után a 42-43 szakaszon Ab (2015), az 50-52 szakaszon pedig Fc (5013) jelű hiba.

A kutató munka szempontjából fontos annak megállapítása, hogy a kísérleti csőszakasz körvarrataiban – a fásasztás elvégzését követően – repedés, vagy repedés jellegű hiba nem került kimutatásra, vagyis a körvarratokban lévő eltérések egyike sem okozott terjedőképes repedést.

3. táblázat. A megerősítés nélküli, két körvarratot tartalmazó, DN 200-as csőszakasz körvarrataiban észlelt eltérések.

Varratszám	Értékelt szakasz	Hibahely és típus	Értékelés
Értékelés a fásasztóvizsgálat megkezdése előtt			
ME1	0-70-0	4,0-4,1 IG Ab, Fa	MEGFELELŐ
ME2	0-70-0	2,8-3,0 C, Fa; 4,3-4,8 Aa, Da 6,8-6,9 Da	MEGFELELŐ
Értékelés 10^4 fásasztási ciklus után			
ME1	65-0-25	67-69 C (401); 3-4 C (401); 5-6 C (401); 20-21 C (401)	JAVÍTANDÓ
	20-56	21-23 C (41) és Aa (2011); 30-32 C (401); 47-49 Fc (5013)	JAVÍTANDÓ
	48-0-5	1-2 C (401)	JAVÍTANDÓ
ME2	67-0-29	3-4 C (401); 15-17 Fc (5013) és C (401) és Aa (2011); 27-29 Fc (5013) és C (401)	JAVÍTANDÓ
	16-54	16-18 Fc (5013) és C (401); 28-30 Da (515) és C (401)	JAVÍTANDÓ
	40-0-7	64-66 C (401) és Fc (5013); 4-5 C (401); 6- 7 Da (515)	JAVÍTANDÓ
Értékelés $2 \cdot 10^4$ fásasztási ciklus után			
ME1	65-0-25	67-70 C (401); 3-4 C (401); 6-8 C (401); 10-11 C (401); 12-14 C (401); 20-21 C (401)	JAVÍTANDÓ
	20-56	21-24 C (401); 29-32 C (401); 41-42 Ab (2015); 47-50 Fc (5013)	JAVÍTANDÓ
	48-0-5	53-55 Fc (5013) és Aa (2011); 62-64 Fc (5013); 1-2 C (401)	JAVÍTANDÓ
ME2	67-0-29	65-68 C (401); 2-3 C (401); 5-6 Da (515) és C (401); 15-18 Fc (5013) és C (401) és Aa (2011); 27-29 Fc (5013) és C (401)	JAVÍTANDÓ
	16-54	26-30 Da (515) és C (401) és Fc (5013); 42- 43 Ab (2015); 50-52 Fc (5013)	JAVÍTANDÓ
	40-0-7	3-44 Ab (2015); 47-48 C (401); 64-67 C (401) és Fc (5013); 3-5 C (401); 6-7 Da (515) és C(401)	JAVÍTANDÓ

A megerősítés nélküli, két körvarratot tartalmazó DN 200-as csőszakaszt $2 \cdot 10^4$ ciklusú fárasztóvizsgálat után, repesztővizsgálatra előkészítve a 21. ábra, a repesztővizsgálat elvégzését követően pedig a 22. ábra szemlélteti.

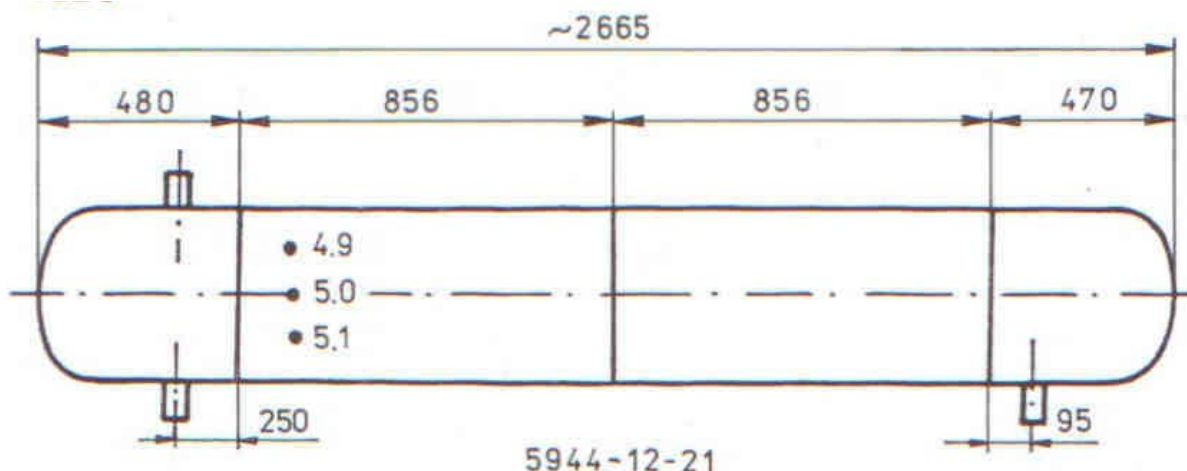


21. ábra. A megerősítés nélküli, két körvarratot tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (a3) a fárasztóvizsgálat után, repesztővizsgálatra előkészítve.



22. ábra. A megerősítés nélküli, két körvarratot tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (a3) a repesztővizsgálat után.

Az *a4* jelű, megerősítés nélküli kísérleti csőszakasz egy körvarratot (*ME3*) tartalmazott, amely argon védőgázos wolfram elektródos ívhegesztés/bevont elektródás kézi ívhegesztés (*141/111*) eljárásokkal készült. A csőszakasz vázlatát a 23. ábra szemlélteti.



23. ábra. A megerősítés nélküli, egy körvarratot tartalmazó, *DN 200*-as csőszakasz (*a4*) vázlata.

A körvarrat ellenőrzésére roncsolásmentes – röntgen – vizsgálattal került sor, amelynek az MSZ EN ISO 5817 [3.2] szabvány szerinti értékelését (*B* osztály) a 4. táblázat tartalmazza. A károsodások követésének szándékával ennél a csőszakasznál is 10^4 , illetve $2 \cdot 10^4$ fárasztási ciklus után ismételt sor került a körvarrat röntgenvizsgálatára. Az értékelést, mindkét esetre, szintén a 4. táblázat mutatja be.

4. táblázat. A megerősítés nélküli, egy körvarratot tartalmazó, *DN 200*-as csőszakasz körvarratában észlelt eltérések.

Varratszám	Értékelt szakasz	Hibahely és típus	Értékelés
Értékelés a fárasztóvizsgálat megkezdése előtt			
ME3	0-0	0-1 401, 515; 2-3 401; 2-4 5013, 515; 4-10 401; 13-17 401, 5013; 19-20 401; 22-27 5013; 28-29 401; 29-31 5013; 39-50 401, 5013; 51-53 401, 5013; 56-57 401; 57-0 5013	NEM MEGFELELŐ
Értékelés 10^4 fárasztási ciklus után			
ME3	0-0	0-1 401, 2011; 2-4 5013; 5-8 401; 9-10 401; 12-16 5013; 19-22 401; 23-29 5013; 515; 29-32 401; 40-52 401, 5013; 54-56 401; 60-0 5013	NEM MEGFELELŐ
Értékelés $2 \cdot 10^4$ fárasztási ciklus után			
ME3	0-0	69-0-1 401, 2011; 2-3 401; 6-8 401; 10-11 401; 12-17 401, 5013; 21-28 401; 31-32 401; 38-52 5013, 401; 55-56 401; 59-69 401, 5013	NEM MEGFELELŐ

Annak ellenére, hogy a körvarrat *NEM MEGFELELŐ* értékelésűnek bizonyult, ennél a kísérleti csőszakasznál is kijelenthető, hogy a körvarratban – a fárasztás elvégzését követően – repedés, vagy repedés jellegű hiba nem került kimutatásra, vagyis a körvarratban lévő eltérések egyike sem okozott terjedőképes repedést.

A megerősítés nélküli, egy körvarratot tartalmazó *DN 200*-as csőszakaszt $2 \cdot 10^4$ ciklusú fárasztóvizsgálat után, repesztővizsgálatra előkészítve a 24. ábrán, a repesztővizsgálat elvégzését követően pedig a 25. ábrán mutatjuk be.

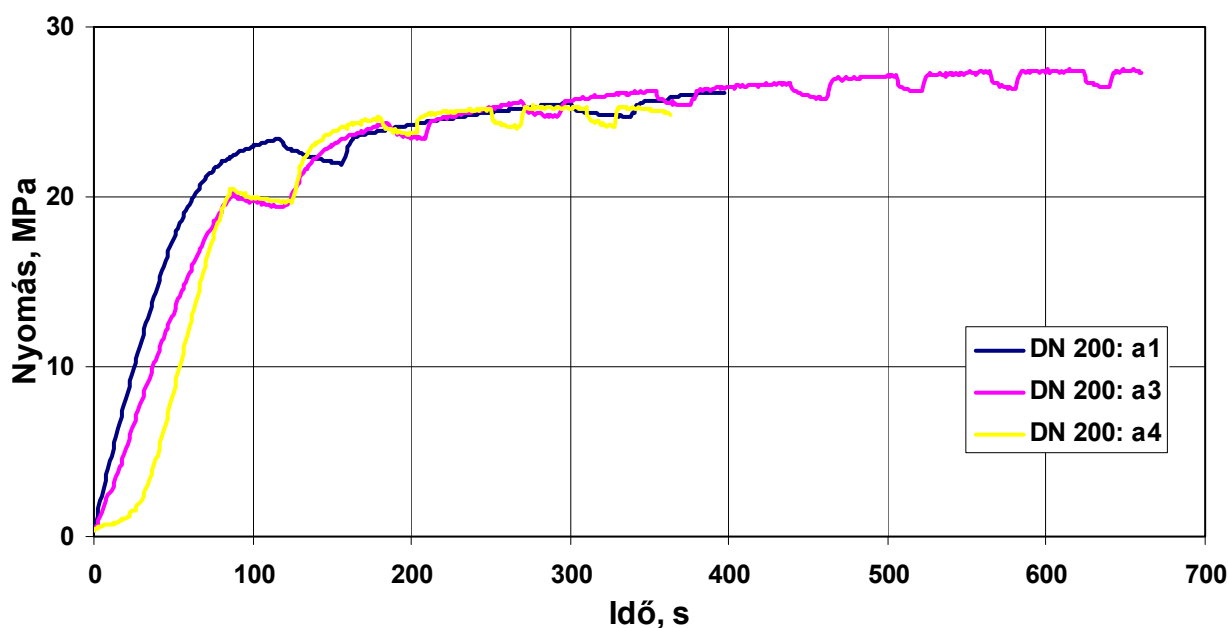


24. ábra. A megerősítés nélküli, egy körvarratot tartalmazó, *DN 200*-as csőszakasz (a4) a fárasztóvizsgálat után, repesztővizsgálatra előkészítve.



25. ábra. A megerősítés nélküli, egy körvarratot tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (a4) a repesztővizsgálat után.

A 26. ábra három DN 200-as kísérleti csőszakasz (a jelű, első sorozat) repesztés során felvett nyomás-idő diagramját mutatja. Ahogy azt az a1 csőszakasz leírásánál már jeleztük, annak tönkremenetele a légtelenítő csonk körvarratában következett be, az a3 és az a4 jelű csőszakaszok viszont a cső palástfelületén hasadtak fel. Sem a MEGFELELŐ-nek minősített – de eltéréseket tartalmazó –, sem a NEM MEGFELELŐ-nek minősített körvarratok károsodása nem következett be. Utóbbi állítás teljes összhangban van a témakörben megjelent cikksorozat [3.17-3.20] legfontosabb állításaival.



26. ábra. A DN 200-as csőszakaszok első sorozatának (a jelű csövek) repesztővizsgálatai során regisztrált nyomás-idő diagramok.

A *b1* jelű csőszakasz hibátlan csőből állt, kialakítása, jellemzői megegyeztek az *a1* jelű csőszakaszéval, a különbség mindössze annyi volt, hogy a cső lezárásához sík edényfeneket használtunk. Ezt a csőszakaszt 10^5 ciklusszámig fárasztottuk, majd repesztettük. A csőszakaszt a fárasztóvizsgálat után, repesztővizsgálatra előkészítve a 27. ábrán, a repesztővizsgálat elvégzését követően pedig a 28. ábrán láthatjuk.



27. ábra. A megerősítés nélküli, hibátlan, DN 200-as csőszakasz (*b1*) a fárasztóvizsgálat után, repesztővizsgálatra előkészítve.



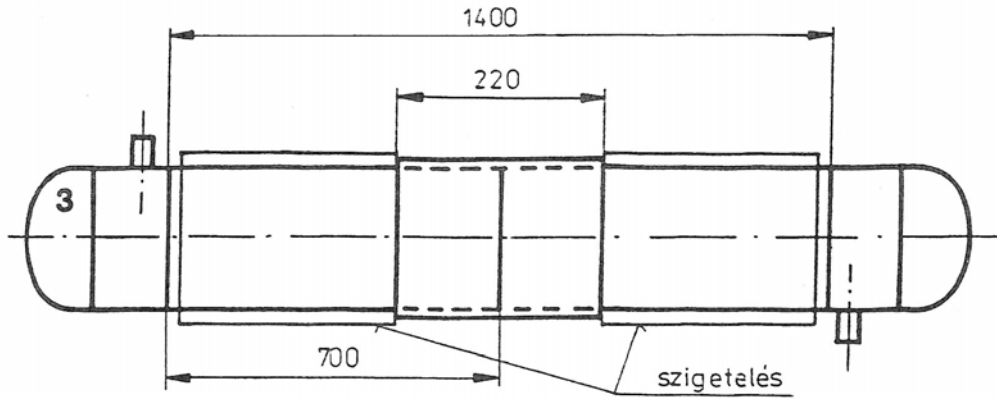
28. ábra. A megerősítés nélküli, hibátlan, DN 200-as csőszakasz (*b1*) a repesztővizsgálat után.

A *b2* jelű, megerősítés nélküli kísérleti csőszakasz – amely igen hasonlított az *a4* jelű csőszakaszhoz –, egy körvarratot tartalmazott. A körvarrat argon védőgázos wolfram elektródos ívhegesztés/bevont elektródás kézi ívhegesztés (141/111) eljárásokkal készült és *NEM MEGFELELŐ* minősítést kapott. Ezt a csőszakaszt is 10^5 ciklusszámig fárasztottuk, majd repesztettük.

A *b3*, a *b4* és a *b5* jelű, kívülről megerősített kísérleti csőszakaszok argon védőgázos wolfram elektródos ívhegesztés/bevont elektródás kézi ívhegesztés (141/111) eljárásokkal készült, *NEM MEGFELELŐ* minősítést kapott körvarratokat tartalmaztak. A *b3* jelű csőszakasz körvarratában 401, 5013 és 517, a *b4* jelűében 2011, 401, 402 és 5013, míg a *b5* jelű csőszakaszében 401, 513 és 602 típusú hibákat mutattunk ki. Mindezek folyamányaként mindhárom csőszakasz külső

megerősítésére a körvarraton, illetve annak környezetében került sor (1. ábrán bemutatott módszer) és mindhárom csőszakaszt 10^5 ciklusszámgig fárasztottuk, majd repesztettük.

A kívülről megerősített DN 200-as csőszakasz (b3) vázlatát a 29. ábra, a csőszakaszt 10^5 ciklusú fárasztóvizsgálat után, repesztővizsgálatra előkészítve a 30. ábra, a repesztővizsgálat elvégzését követően pedig a 31. ábra szemlélteti.



29. ábra. A kívülről megerősített, egy körvarratot tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (b3) vázlata.



30. ábra. A kívülről megerősített DN 200-as csőszakasz (b3) a fárasztóvizsgálat után, repesztővizsgálatra előkészítve.



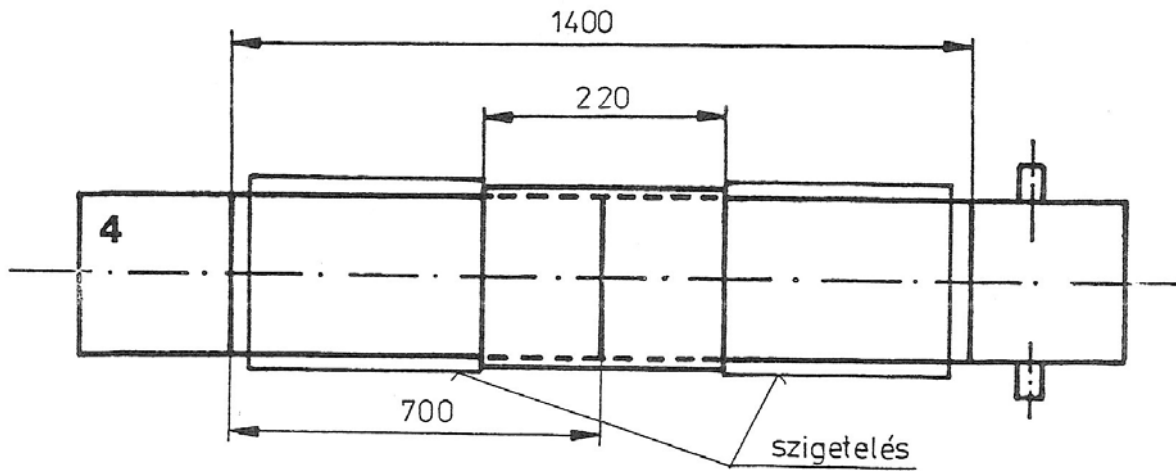
31. ábra. A kívülről megerősített DN 200-as csőszakasz (b3) a repesztővizsgálat után.

A 32. ábra bemutatja a körvarrat külső megerősítésének tönkremenetelét, amely a csőszakasz felhasadása előtt következett be.



32. ábra. A DN 200-as csőszakasz (b3) felszakadt külső megerősítése a repesztővizsgálat után.

A *b3* jelű csőszakasztól alig különböző, kívülről megerősített *DN 200*-as csőszakasz (*b4*) vázlatát a 33. ábrán, a csőszakaszt 10^5 ciklusú fárasztóvizsgálat után, repesztővizsgálatra előkészítve a 34. ábrán, a repesztővizsgálat elvégzését követően pedig a 35. ábrán láthatjuk.



33. ábra. A kívülről megerősített, egy körvarratot tartalmazó, *DN 200*-as csőszakasz (*b4*) vázlata.

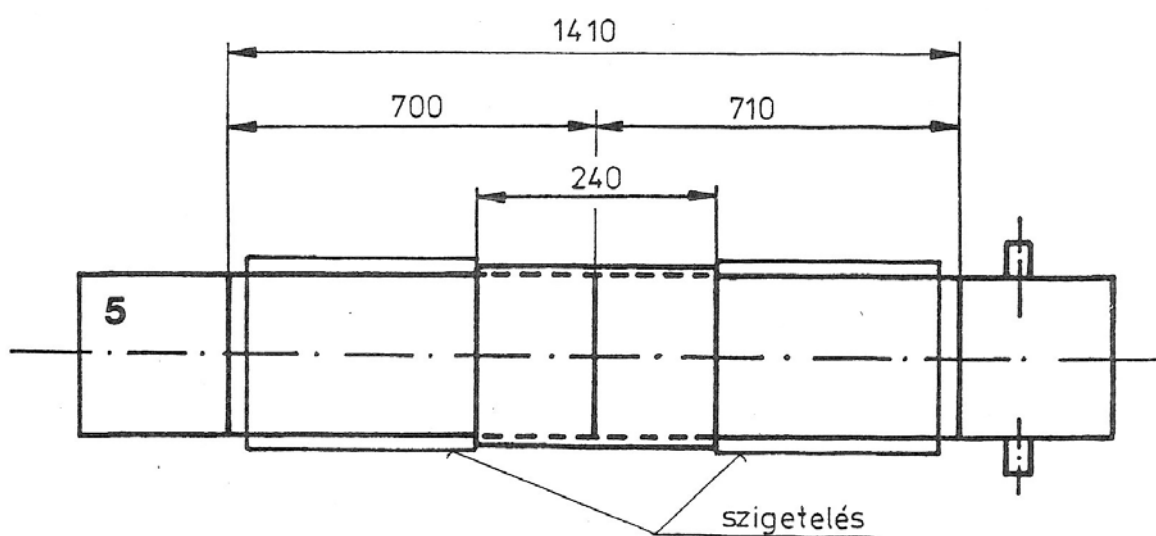


34. ábra. A kívülről megerősített *DN 200*-as csőszakasz (*b4*) a fárasztóvizsgálat után, repesztővizsgálatra előkészítve.



35. ábra. A kívülről megerősített DN 200-as csőszakasz (b4) a repesztővizsgálat után.

A b3 és a b4 jelű csőszakaszokkal lényegében megegyező, ugyancsak kívülről megerősített DN 200-as csőszakasz (b5) vázlatát a 36. ábrán, a csőszakaszt 10^5 ciklusú fárasztóvizsgálat után, repesztővizsgálatra előkészítve a 37. ábrán, a repesztővizsgálat elvégzését követően pedig a 38. ábrán szemléltetjük.



36. ábra. A kívülről megerősített, egy körvarratot tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (b5) vázlata.

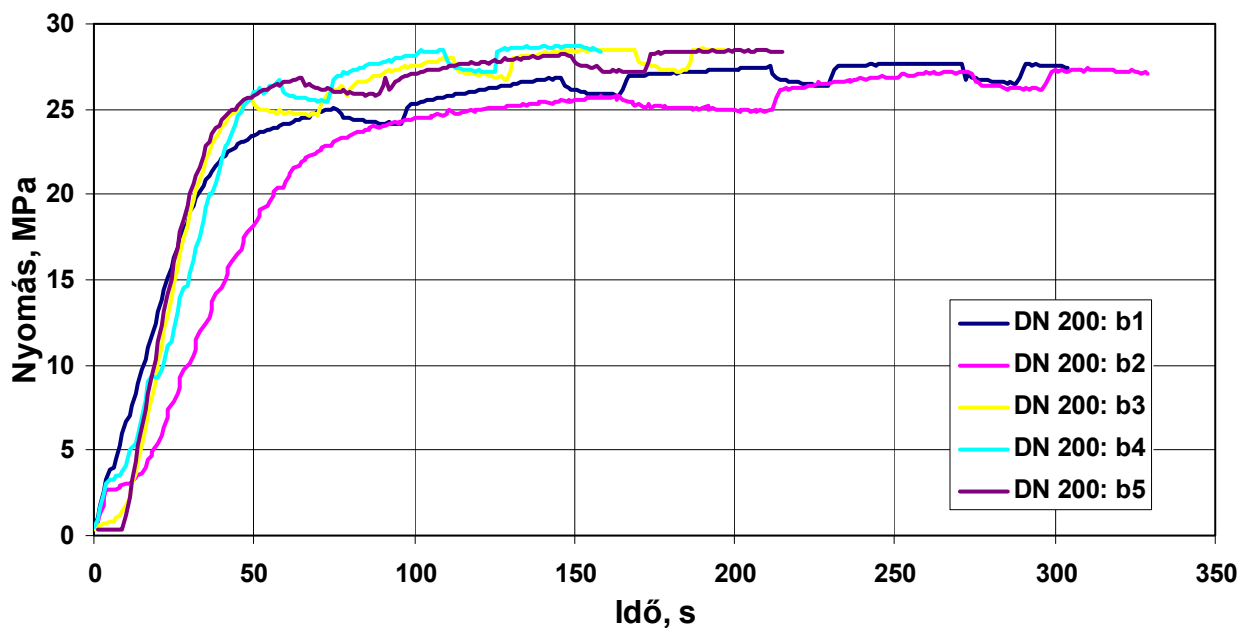


37. ábra. A kívülről megerősített DN 200-as csőszakasz (b5) a fárasztóvizsgálat után, repesztővizsgálatra előkészítve.



38. ábra. A kívülről megerősített DN 200-as csőszakasz (b5) a repesztővizsgálat után.

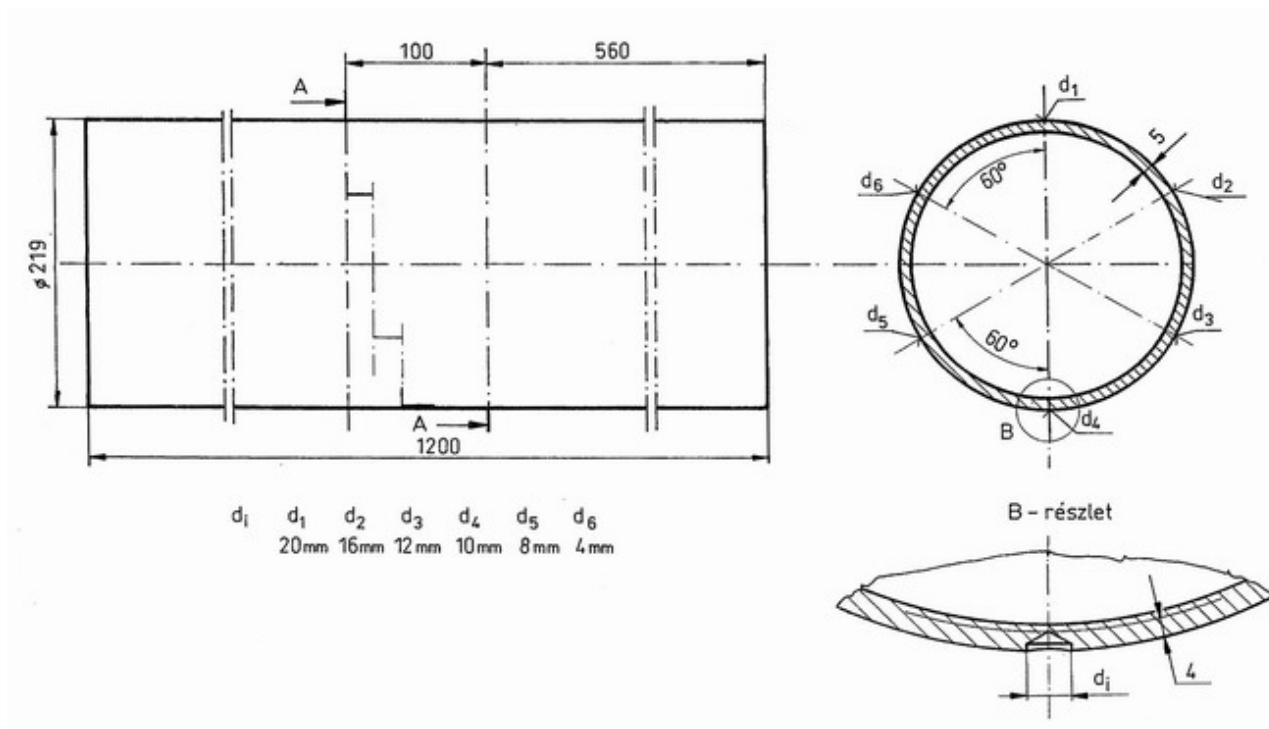
A 39. ábra öt DN 200-as kísérleti csőszakasz (b jelű, második sorozat) repesztése során felvett nyomás-idő diagramját mutatja. A csőszakaszok tönkremenetele azonos módon ment végbe, mind az öt csőszakasz a palástfelületén hasadt fel. A NEM MEGFELELŐ-nek minősített és kívülről megerősített körvarratok károsodása egyik csőszakaszon sem következett be, ami utal a megerősítés alkalmazhatóságára.



39. ábra. A DN 200-as csőszakaszok második sorozatának (*b* jelű csövek) repesztővizsgálatai során regisztrált nyomás-idő diagramok.

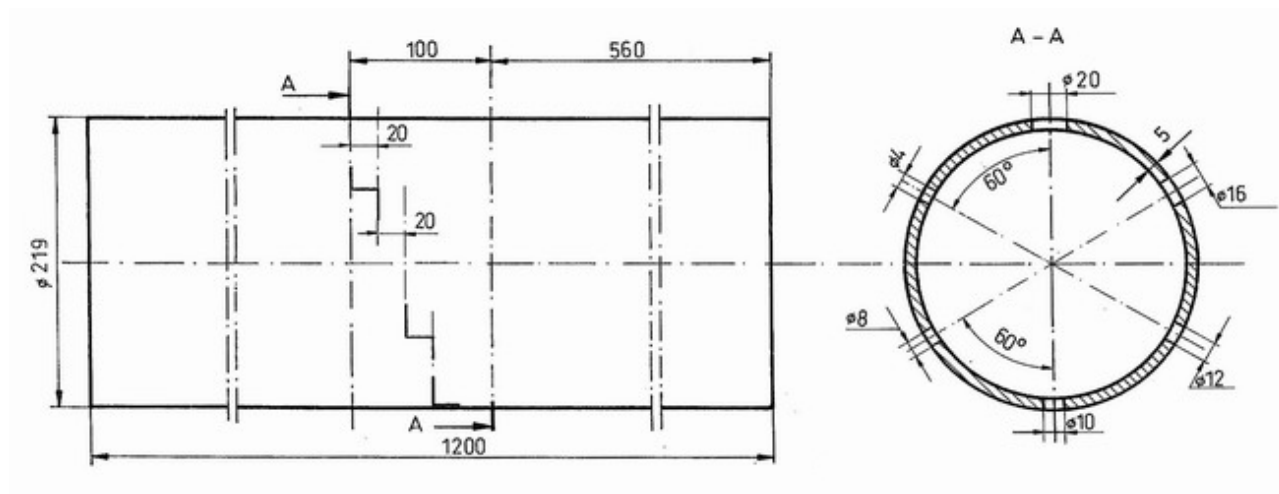
3.5.2. A DN 200-as, közöttük belülről megerősített csőszakaszok vizsgálata

A fárasztó- és repesztővizsgálatokhoz négy DN 200-as csőszakaszt (*o1-o4*) készítettünk, mind a négy csőszakasz mesterséges hibákat tartalmazott. Az *o4* és az *o3* jelű csőszakaszokra a kerület mentén, 20-20 mm-es axiális eltolással, maximum 4 mm mélységű, különböző átmérőjű zsákfuratokat munkáltunk, amelyek kialakítása és névleges méretei a 40. ábrán láthatók.



40. ábra. Az *o4* és az *o3* jelű, DN 200-as csőszakaszok mesterséges hibáinak kialakítása és névleges méretei.

Az *o2* jelű csőszakasz a kerület mentén, *20-20 mm*-es axiális eltolással, különböző átmérőjű átmenő furatokat tartalmazott. A furatok kialakítását és elhelyezkedését a 41. ábrán szemléltetjük.

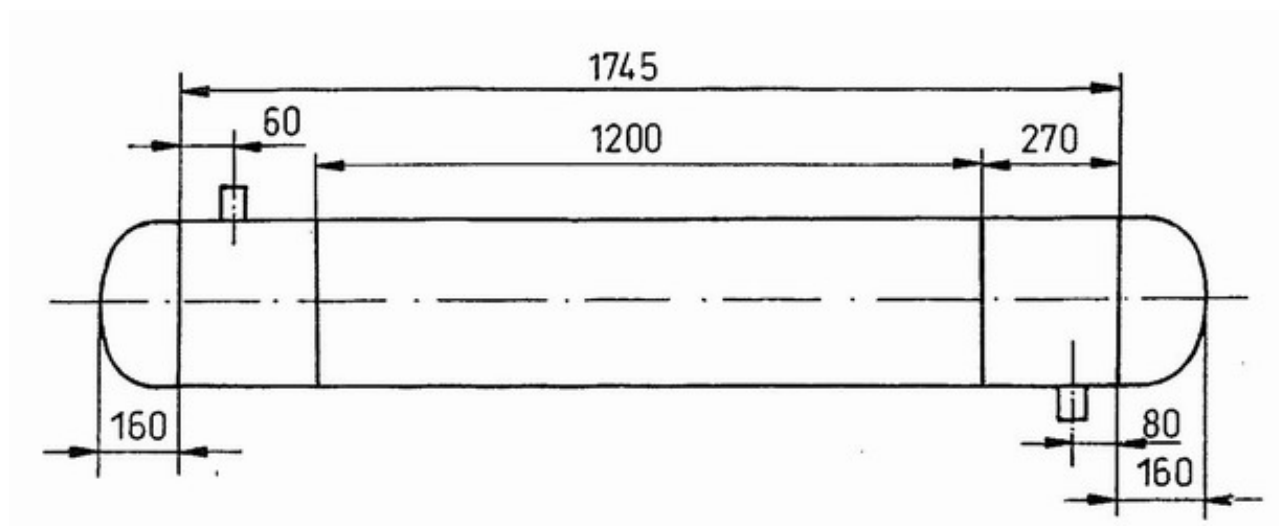


41. ábra. Az *o2* jelű, DN 200-as csőszakasz mesterséges hibáinak kialakítása és névleges méretei.

Az *o1* jelű csőszakaszra alkotó irányú, névlegesen *70 mm* hosszúságú és *3,2 mm* mélységű bemetszést készítettünk.

Az *o4* jelű csőszakasz megerősítésére nem került sor, az *o1*, az *o2* és az *o3* jelű csőszakaszokéra azonban igen, még hozzá belülről (lásd a „Belső megerősítés: hibrid csőszálak kialakítása” címet viselő fejezetet).

Az *o4* jelű csőszakasz vázlatát a 42. ábrán, a csőszakasz képét pedig a 43. ábrán szemléltetjük.



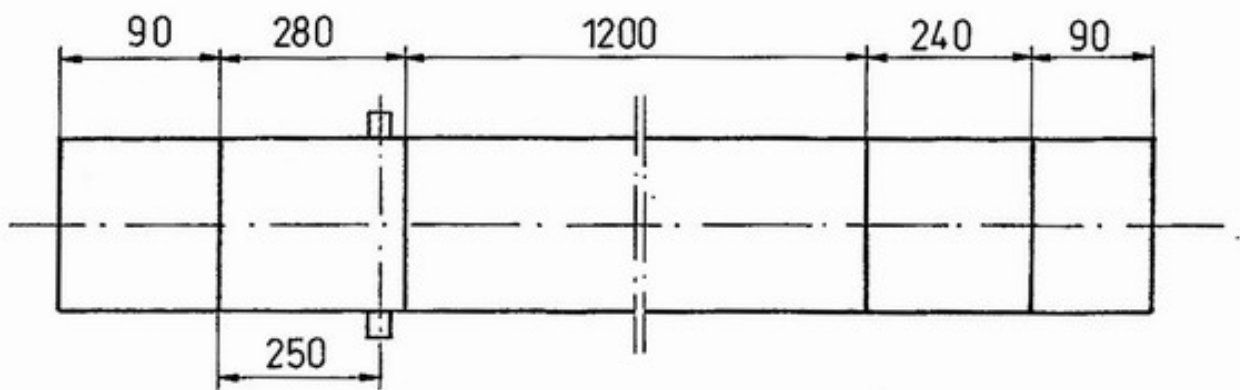
42. ábra. A megerősítés nélküli, mesterséges hibákat tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (*o1*) vázlat.



43. ábra. A megerősítés nélküli, mesterséges hibákat tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (o1).

Az o4 jelű csőszakasz károsodása a $d_3 = 12 \text{ mm}$ -es zsákfurat kifújásával következett be.

Az o3 jelű, belülről megerősített csőszakasz vázlatát a 44. ábra, a csőszakasz képét pedig a 45. ábra mutatja be.



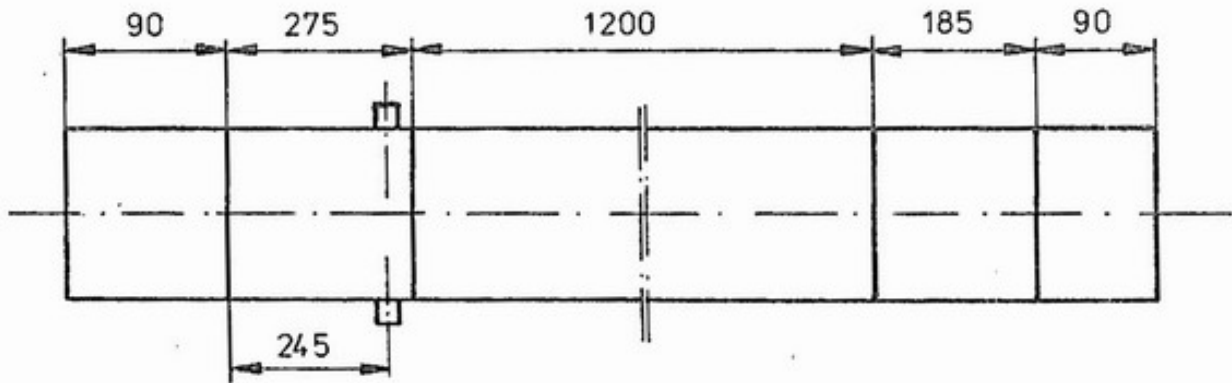
44. ábra. A belülről megerősített, mesterséges hibákat tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (o3) vázlata.



45. ábra. A belülről megerősített, mesterséges hibákat tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (o3).

Az *o3* jelű csőszakasz károsodása a $d_1 = 20 \text{ mm}$ -es zsákfurat kifújásával következett be.

Az *o2* jelű, belülről megerősített csőszakasz vázlatát a 46. ábrán, a csőszakasz képét pedig a 47. ábrán szemléltetjük. A csőszakasz tönkremenetele két fázisban következett be. Az első fázisnak a fárasztás során, $0,447 \cdot 10^5$ ciklusnál (44698 ciklus), a $d_1 = 20 \text{ mm}$ -es furatnál észlelt szivárgást (részleges tönkremenetel) tekintjük, amely után a fárasztást már nem is folytattuk tovább. A második fázis a repesztés során bekövetkezett teljes tönkremenetel, amely a $d_1 = 20 \text{ mm}$ -es átmenő furatnál, a belső erősítés kilökésével ment végbe. A csőszakasz károsodás utáni képét a 48. ábra, a végleges tönkremenetel helyét a 49. ábra, a kilökött belső erősítést pedig az 50. ábra mutatja be.



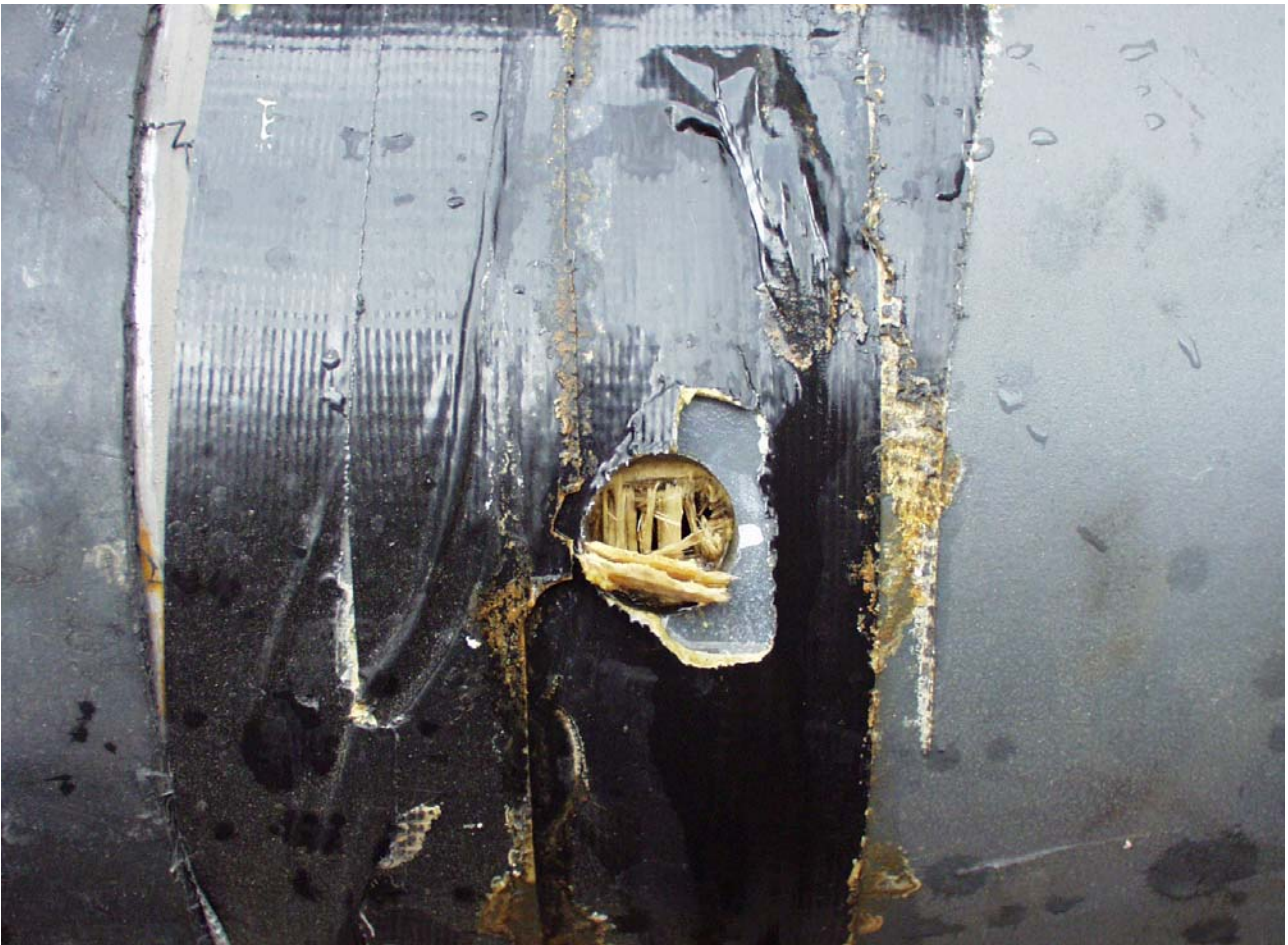
46. ábra. A belülről megerősített, mesterséges hibákat tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (*o2*) vázlat.



47. ábra. A belülről megerősített DN 200-as csőszakasz (*o2*) a fárasztóvizsgálat után, repesztővizsgálatra előkészítve.



48. ábra. A belülről megerősített, mesterséges hibákat tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (o2) a teljes károsodást követően.

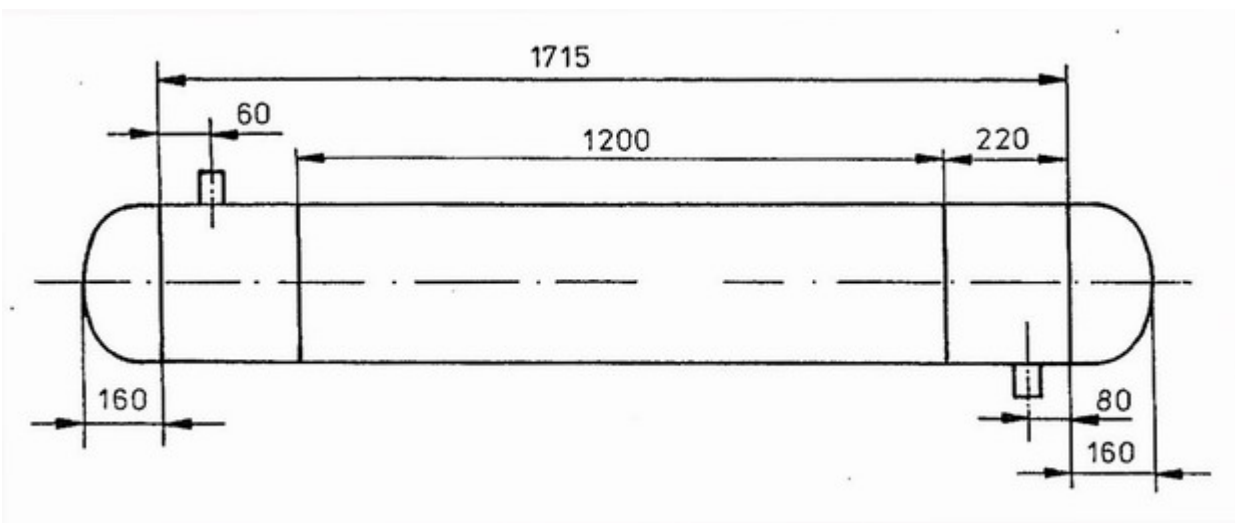


49. ábra. A teljes károsodás helye a belülről megerősített, mesterséges hibákat tartalmazó, DN 200-as csőszakaszon (o2).



50. ábra. A teljes károsodás helyéről kilökött belső megerősítés darab a belülről megerősített, mesterséges hibákat tartalmazó, DN 200-as csőszakaszról (o2).

Az o1 jelű, belülről megerősített csőszakasz vázlatát az 51. ábrán, a csőszakasz képét pedig az 52. ábrán szemléltetjük. A csőszakasz tönkremenetele a hosszirányú bemetszés kinyílásával következett be, amely az 53. ábrán mutatunk be.



51. ábra. A belülről megerősített, mesterséges hibát tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (o1) vázlata.

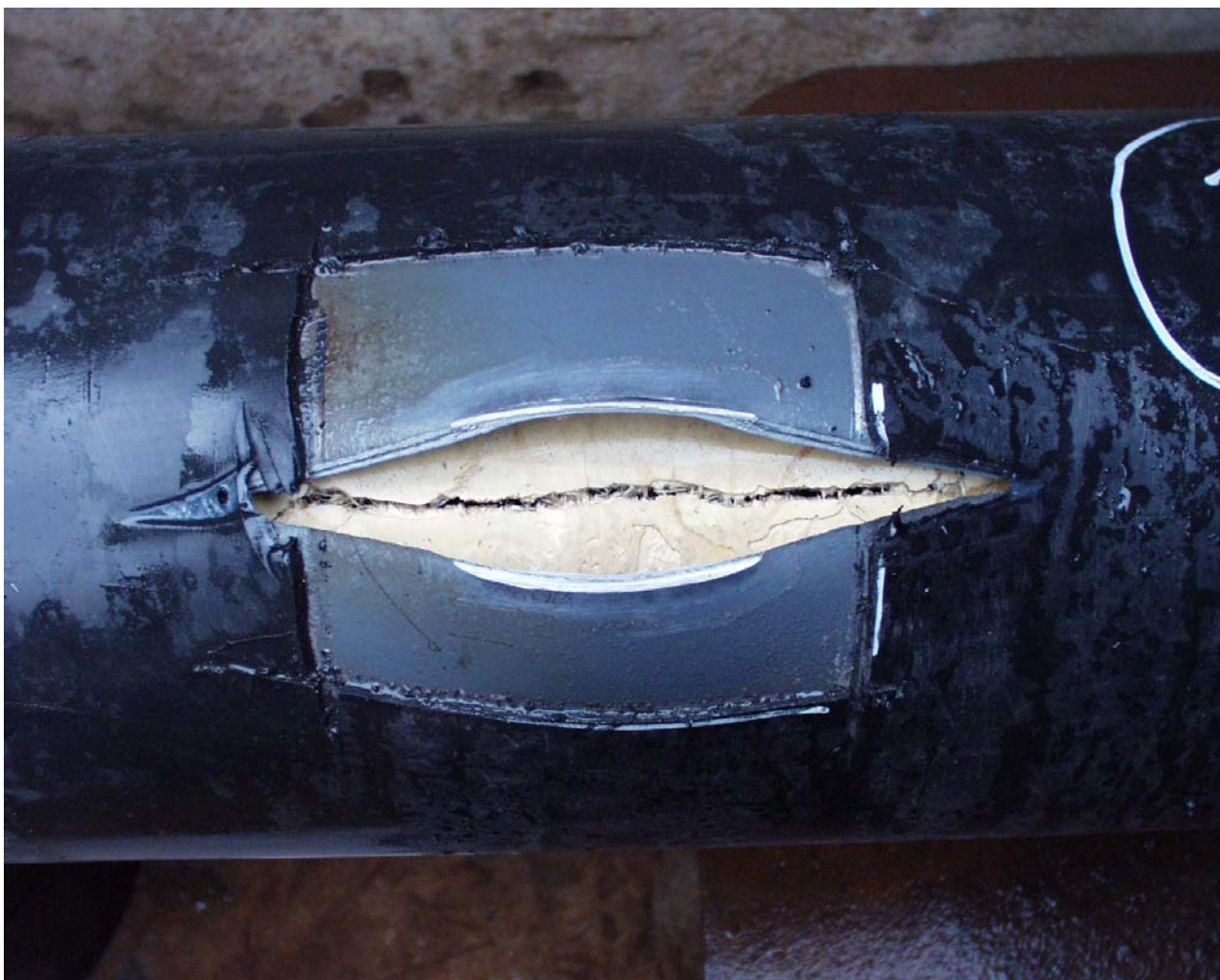


52. ábra. A belülről megerősített, mesterséges hibát tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (o1).



53. ábra. A belülről megerősített, mesterséges hibát tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (o1) a károsodást követően.

Az 54. ábra az o1 jelű csőszakasz tönkremenetelének helyét mutatja, közelebbről. Az ábrán jól látható mind a megerősítés fázis, mind pedig a cső falának felhasadása.



54. ábra. A belülről megerősített, mesterséges hibát tartalmazó, DN 200-as csőszakasz (o1) a károsodást követően.

3.6. A kísérletek eredményeinek összefoglalása és értékelése

A fárasztóvizsgálatok legfontosabb adatait és eredményeit az 5. táblázatban foglaltuk össze. A táblázat adataiból látható, hogy a külső megerősítések csoportjaiban (5. táblázat kettős vonala feletti esetek) minden kísérleti csőszakasz elviselte a vizsgálatok tervezésekor kitűzött ciklusszámot ($2 \cdot 10^4$, illetve 10^5 ciklus), függetlenül attól, hogy a csőszakaszon lévő vizsgálati körvarrat **MEGFELELŐ** vagy **NEM MEGFELELŐ** minősítést kapott. A belső megerősítések csoportjában (5. táblázat kettős vonal alatti esetek) a mesterséges hibaként átmenő furatokat tartalmazó o2 jelű csőszakasz kezdett el szivárogni a kitűzött 10^5 ciklus elérése előtt. A szivárgás okának pontos feltárása további elméleti és kísérleti munkát igényel, tekintettel az elvégzett repesztővizsgálat eredményére is.

A repesztővizsgálatok eredményeit és az azokból számított biztonsági tényezőket (repesztési nyomás/feltételezett MAOP, ahol $MAOP = 64 \text{ bar}$) a 6. táblázatban foglaltuk össze. A táblázat adatai alapján két tényre kell felhívni a figyelmet:

- a külső megerősítések csoportjaiba (5. táblázat kettős vonala feletti esetek) tartozó kísérleti csőszakaszok a palástfelület mentén hasadtak fel, az egyetlen kivételt a légtelenítő csonk körvarratában károsodott, hibátlan, megerősítés nélküli, a1 jelű csőszakasz jelentette;
- a belső megerősítések DN 200-as csoportjában (5. táblázat kettős vonal alatti esetek) a tönkremenetek a mesterséges hibák okán prognosztizálható helyeken menetek végbe.

5. táblázat. A fárasztóvizsgálatok legfontosabb adatai és eredményei.

Jel	Fárasztási adatok					A fárasztóvizsgálat eredménye	
	p_{min}	p_{max}	R	f_{max}	N	minősítés	a károsodás helye
	bar	bar	–	Hz	ciklus		
a1	nem releváns					nem releváns	nem releváns
a3	6,3	63	0,1	0,1	20000	nem károsodott	nem releváns
a4	6,3	63	0,1	0,16	20000	nem károsodott	nem releváns
b1	31,5	63	0,5	1	100000	nem károsodott	nem releváns
b2	31,5	63	0,5	1	100000	nem károsodott	nem releváns
b3	31,5	63	0,5	0,76	100000	nem károsodott	nem releváns
b4	31,5	63	0,5	1,12	100000	nem károsodott	nem releváns
b5	31,5	63	0,5	1,12	100000	nem károsodott	nem releváns
o1	6,3	63	0,1	0,5	100000	nem károsodott	nem releváns
o2	6,3	63	0,1	0,5	44698	károsodott	$d_1 = 20 \text{ mm}$ -es átmenő furat
o3	6,3	63	0,1	0,6	100000	nem károsodott	nem releváns
o4	6,3	63	0,1	0,65	100000	nem károsodott	nem releváns

6. táblázat. A repesztővizsgálatok eredményei és a számított biztonsági tényezők.

Jel	Repesztési nyomás	A felrepedés			Biztonsági tényező
		helye	hossza	maximális kinyílása	
	bar		mm	mm	
a1	261,7 ¹⁾	légtelenítő csonek körvarrata	nem releváns	nem releváns	>4,09
a3	275,3	palást	480	85	4,30
a4	253,5	palást	340	55	3,96
b1	276,6	palást	380	60	4,32
b2	274,0	palást	350	60	4,28
b3	285,6	palást	428	58	4,46
b4	287,2	palást	420	61	4,49
b5	284,7	palást	407	58	4,45
o1	241,6	hosszirányú bemetszés	270	39	3,78
o2	242,9	$d_1 = 20 \text{ mm}$ -es átmenő furat	nem releváns	nem releváns	3,80
o3	268,5	$d_1 = 20 \text{ mm}$ -es zsákfurat	nem releváns	nem releváns	4,20
o4	255,7	$d_3 = 12 \text{ mm}$ -es zsákfurat	nem releváns	nem releváns	4,00

¹⁾ Tekintettel a felrepedés helyére, a repesztési nyomás ennél az értéknél biztosan nagyobb.

Az időigényes kísérleti vizsgálatok eredményei alapján az alábbi összegző következtetések fogalmazhatók meg.

- A körvarratok hibatűrése nagy, amelyet igazolt az hogy a *NEM MEGFELELŐ* minősítést kapott körvarratok sem a fásasztóvizsgálatok, sem a repesztővizsgálatok során nem károsodtak, azokban az esetekben sem, amikor külső megerősítésükre nem került sor.
- A *NEM MEGFELELŐ* minősítésű mesterséges hibák a belső megerősítés nélküli kísérleti csőszakaszon elviselték a tervezett, 10^5 fásasztási ciklusszámot.
- A *NEM MEGFELELŐ* minősítésű azon mesterséges hibák, amelyek lyukas csövet modelleztek (átmenő furatok), a belső megerősítésű kísérleti csőszakaszon nem viselték el a tervezett, 10^5 fásasztási ciklusszámot.
- A kísérleti csőszakaszok mindegyikének tönkremenetele olyan repesztési nyomásokon ment végbe, hogy az azok segítségével számított biztonsági tényezők a 3,65-4,49-as tartományba estek. Ezek az értékek meghaladják az elvárt értékeket, ami különösen azokban az esetekben lényeges megállapítás, amikor a kísérleti csőszakasz *NEM MEGFELELŐ* minősítésű hibát tartalmazott.
- A kifejlesztett és kipróbált külső és belső megerősítési technológia egyaránt bizonyította alkalmasságát és alkalmazhatóságát, belső és külső hibákat tartalmazó csövek esetében.

4. Végeselemes modellezés és számítások

A numerikus szilárdságtani vizsgálatok alapvetően két célt tűztek ki:

- annak a kérdésnek a megválaszolását, hogy milyen mértékű károsodás esetén van szükség kompozit béléssel történő megerősítésre;
- annak eldöntését, hogy milyen kompozit bélés kialakítása esetén biztosított a károsodott cső további biztonságos üzeme.

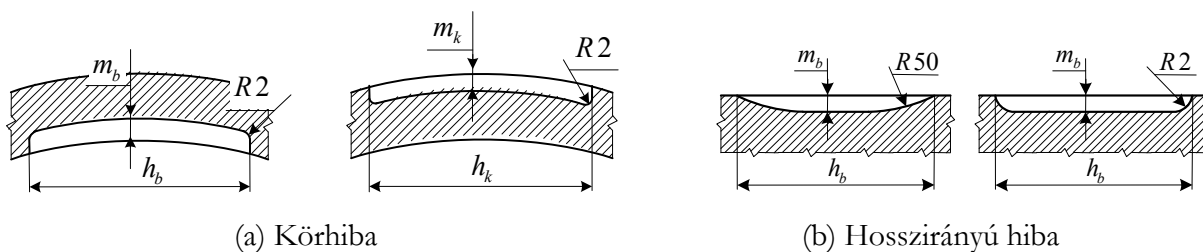
Az első kérdésre akkor tudunk választ adni, ha tisztázzuk a hibahely környezetében kialakuló szilárdságtani állapotokat (alakváltozásokat, feszültségeket). A második feladat megoldását pedig a komplex kompozit bélésű cső teljes szilárdságtani analízisével kapjuk.

4.1. Végeselem modellek és számítási eredmények belső és külső csőhibák/károsodások szilárdságtani analízisére

A numerikus szilárdságtani analízis keretében mesterséges hibageometriákat vizsgáltunk annak érdekében, hogy a számítások mérésekkel is ellenőrizhetők legyenek. Két alapvető hibatípust vizsgáltunk:

- egyszeres és kétszeres külső és belső körhibát.
- két, különböző lokális geometriájú külső és belső hosszirányú hibát.

A hibageometriák jellege az 55. ábrán látható.

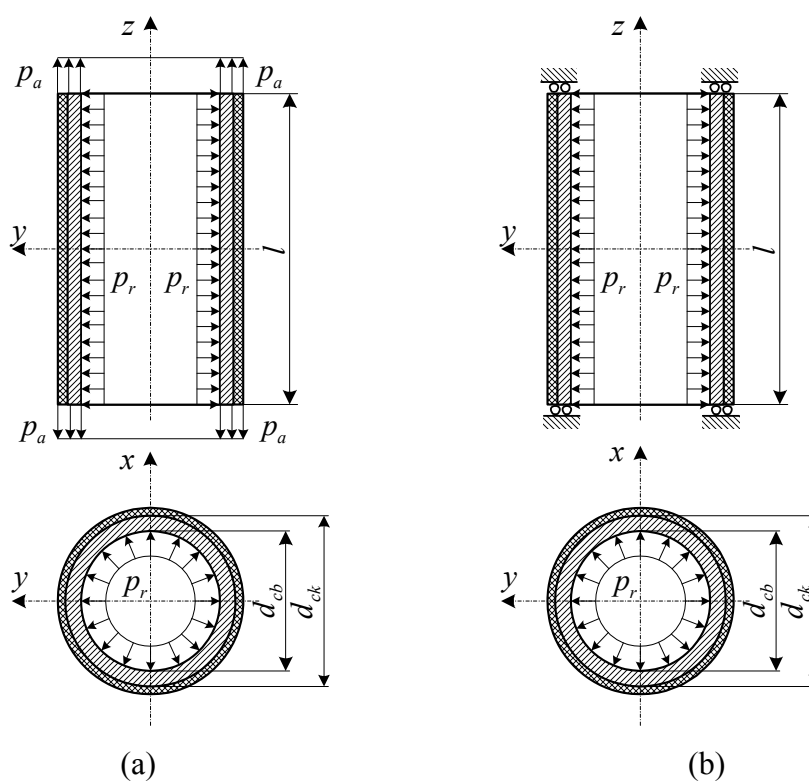


55. ábra. A kör és hosszirányú hibák lokális geometriája.

Minden hibatípusnál az m_b , illetve m_k hibamélység változásának hatását is megvizsgáltuk, 2, 4, 6 mm hibamélységre végeztünk számításokat.

A hibák környezetében kialakuló szilárdságtani állapotokat két tipikus esetre, kísérleti körülményekre és üzemi viszonyokra határoztuk meg. A csövet mindkét esetben $p_r = 63$ bar belső nyomás terhelte. A kísérletek során egy olyan kellően hosszú, mindkét végén lezárt csőszakaszt vizsgáltunk, amelynek a közepén helyezkedik el a vizsgált hiba. A kísérletek (nyomáspróba) esetén a csővégeket lezáró lapra ható nyomás miatt a csőmodell szélső keresztmetszetein a belső nyomás mellett még egy $p_a = \frac{d_{cb}^2}{d_{ck}^2 - d_{ck}^2} p_r$ axiális terhelést kell működtetni (56. ábra (a) ábrarészlet).

Üzemi viszonyok között a cső földbe történő ágyazása megakadályozza a lényeges hosszirányú elmozdulásokat, legfeljebb lokálisan léphetnek fel axiális elmozdulások. Ezért az üzemi viszonyok szimulálására az 56. ábra (b) ábrarészletén látható, két végén mereven megtámasztott mechanikai modellt használtuk.



56. ábra. A tipikus terhelések modellezése.

A numerikus vizsgálatokat rétegzett héjelemekből és térbeli elemekből felépített végelem modellezéssel is elvégeztük. A térbeli elem alkalmazásánál arra is volt lehetőség, hogy a rugalmas anyagtörvény mellett rugalmas-képlékeny anyagtörvényt is alkalmazzunk.

Rétegzett héjelemeknél a rétegszám és a rétegvastagságok megfelelő megválasztásával azonos végelem hálózat alkalmazásánál is elérhető, hogy a hiba/sérülés mélységének a megváltoztatása a hibához/sérüléshez tartozó elemeken az egyes rétegek anyagi tulajdonságainak megváltoztatásával kezelhető legyen (57. ábra).



(a) hibamentes hely

(b) 4 mm-es belső hiba helye

57. ábra. A hiba/sérülés mélységének figyelembevétele héjelemeknél.

A számítási eredmények is igazolták azt az előzetes feltételezést, hogy a korrózióvédő rétegnek szilárdságtani szempontból nincs számottevő hatása. Már az első numerikus vizsgálatok azt mutatták, hogy a hiba/sérülés feszültségekre és alakváltozásokra gyakorolt hatása nagyon gyorsan, a cső nagyon rövid szakaszán elhal, de az elmozdulási „zavaró hatás” sem terjed túl a modell fél hosszúságán. Az alkalmazott modellhosszat ezért a bélelt csövek vizsgálatánál $l = 1000$ mm-re, azaz a felére csökkentettük.

A mesterséges körhibák esetén a szilárdságtani állapotok jellege a két tipikus terhelési esetben megegyezett. A kísérleti terhelési eset azonban veszélyesebb, erre az esetre valamivel nagyobb kritikus értékek adódtak, mint az üzemi terhelést modellező esetben.

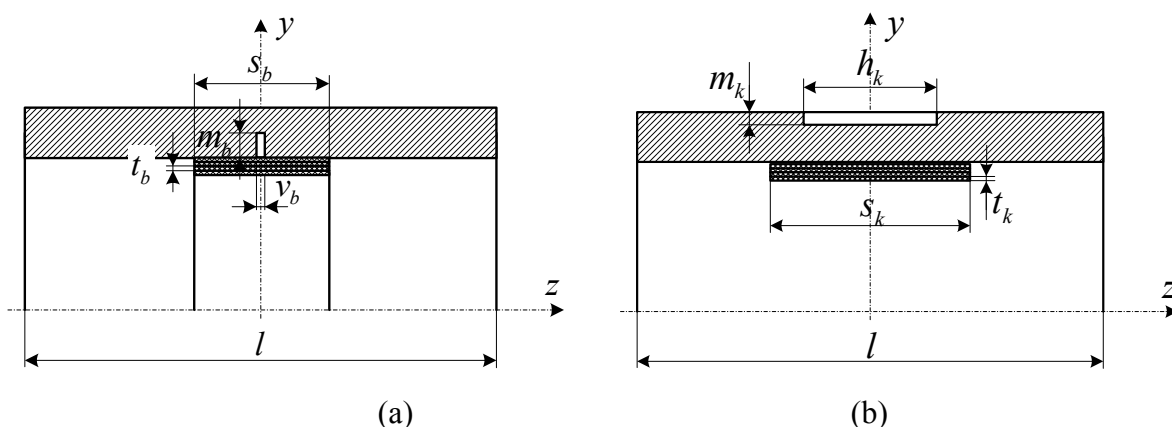
Belső körhibánál azt tapasztaltuk, hogy a szilárdságtani jellemzők eloszlása a cső felületén a hibamélység növekedésével átrendeződik, így ezzel az egyes mennyiségek szempontjából kritikus pontok helye is megváltozik. Külső körhibánál ez a jelenség nem lép fel.

Hosszirányú külső sérülés esetén az üzemi terhelési eset a veszélyesebb. A hosszirányú hibák minden esetben lényegesen veszélyesebbek, mint a körhibák. Az R50-es 3D modellel a várakozásnak megfelelően az R2-es modellnél kapottaknál kisebb kritikus értékek adódtak. Azonban rugalmas anyagot feltételezve mindkét esetben a redukált feszültség csúcsai túllépi a folyáshatárt, ezért rugalmas-képlékeny anyagmodell használata válik szükségessé. A keletkezett feszültségek olyan nagyok, hogy képlékeny alakváltozások figyelembevételével sem csökkennek a megengedett érték alá. A rugalmas-képlékeny vizsgálat eredménye szerint a redukált feszültség eléri az anyag szakítószilárdságát.

A rétegzett héj, a 3D rugalmas és a 3D rugalmas-képlékeny végelem modellezéssel kapott számítási eredmények közel voltak egymáshoz, a különbség nem haladta meg a 10 %-ot. Ami még ennél is fontosabb, hogy mindhárom modell ugyanazokban az esetekben jelezte a cső tönkremenetelét, azaz a javítás (bélelés) szükségességét. Ezért a továbbiakban, a bélelt csövek analizésére már csak a legkisebb számítás igényű rétegzett héjmodellel alkalmaztuk.

4.2. A kompozit bélelés mechanikai modellezése és szilárdságtani tervezése

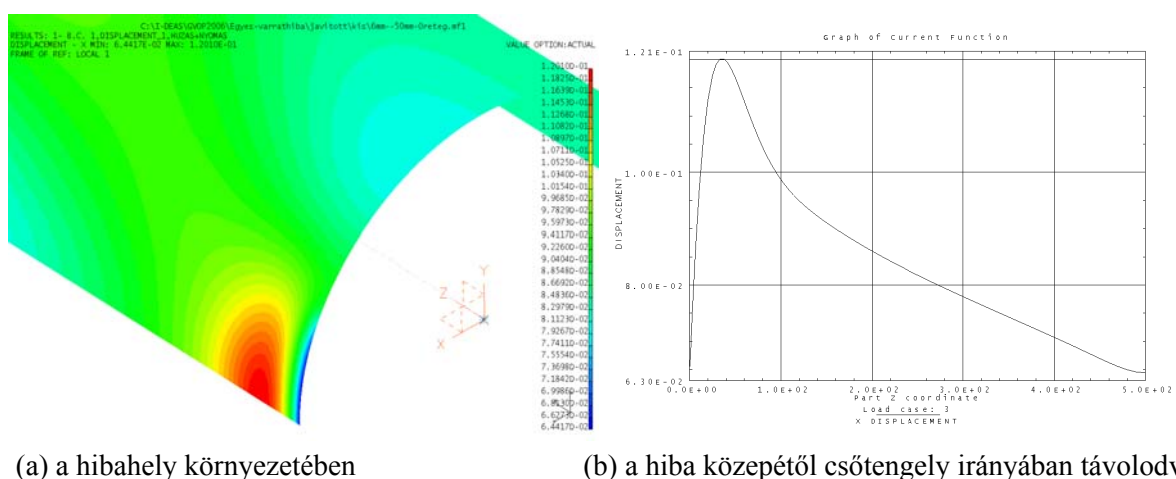
A csőhibák szilárdságtani analízise során azt tapasztaltuk, hogy a hibák hatása a hibahelytől távolodva nagyon gyorsan elhal, lecseng. Ezért a cső béleléssel történő javítása esetén nem szükséges, hogy a kompozit bélés a cső hosszabb szakaszára kiterjedjen. Elegendő, ha a bélés „éppen csak lefedi” a hibahelyet, azaz körhibánál elegendő egy keskeny kompozit szalag bélés (4.a ábra), hosszirányú hibánál pedig elegendő a hiba h_k hosszúságának 1,5-szörösét nem meghaladó hosszúságú bélés (58. ábra (b) ábrarészlet).



58. ábra. A hibahely kompozit béléssel történő megerősítése.

A kutató munka keretében az 58. ábrán látható jellegű béleléssel megerősített hibás csövek numerikus szilárdságtani analízisét végeztük el olyan hibamélységek esetére, amelyeknél a cső tönkremegy.

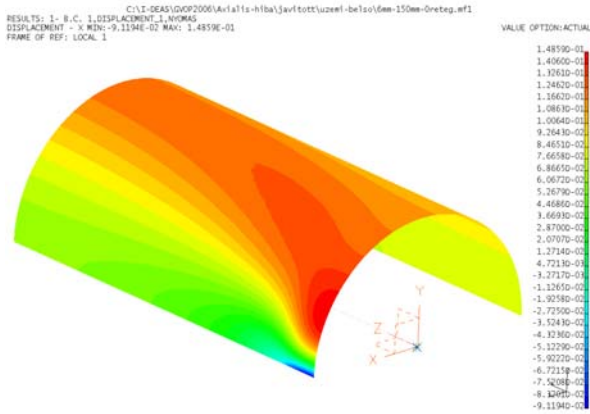
A belső kör és hosszirányú hibáknál a szilárdságtani analízis egy érdekes jelenségre mutatott rá: arra, hogy belső hibák esetén a cső deformációja olyan, hogy a legnagyobb sugárirányú elmozdulások nem a hibánál, hanem a hiba mellett lépnek fel. Ezt a jelenséget körhibára az 59. ábra, hosszirányú hibára pedig a 60. ábra mutatja be.



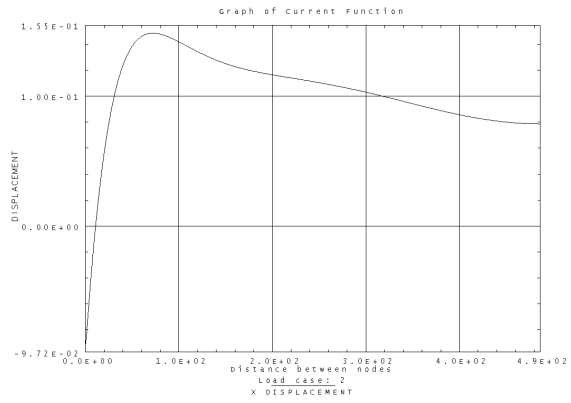
(a) a hibahely környezetében

(b) a hiba közepétől csőtengely irányában távolodva

59. ábra. A sugárirányú deformáció jellege belső körhiba esetén.



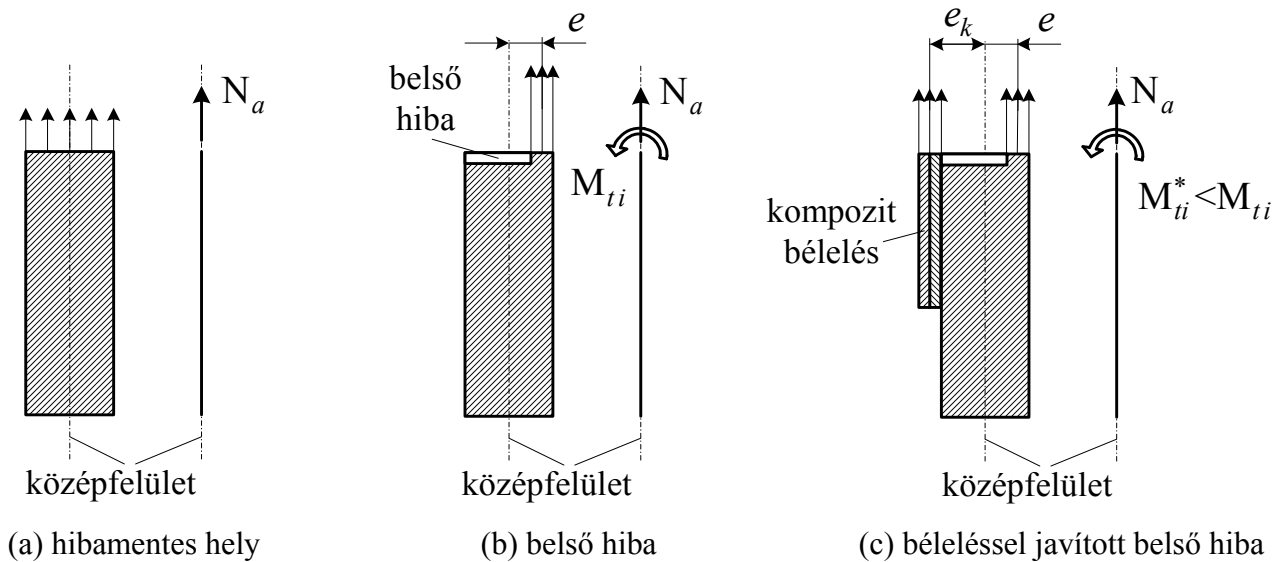
(a) a hibahely környezetében



(b) a hiba közepétől körkörösen távolodva

60. ábra. A sugárirányú deformáció jellege belső hosszirányú hiba esetén.

Ez a jelenség azzal magyarázható, hogy a belső hiba környezete mindkét esetben jelentős, a belső nyomásból származó excentrikus terhelésnek és ebből következően jelentős, a hiba középvonala körüli lokális hajlításnak van kitéve. A 61. ábra (a) ábrarészlete a cső hibamentes helyén szemlélteti a feszültségeloszlást, illetve a feszültségeloszlás falvastagság menti N_a eredőjét. A hibamentes helyen a cső membrán állapotban van. A 61. ábra (b) ábrarészletén egy belső hibahelyen kialakuló viszonyok láthatók: itt az excentricitás következtében az N_a eredő mellett egy jelentős M_{ti} lokális hajlító nyomaték is fellép. Ez a hajlító hatás a belső hibát befelé nyitja szét. Ha a belső hibahelyet kompozit béleléssel megerősítjük/javítjuk (61. ábra (c) ábrarészlet), akkor az M_{ti} lokális hajlító nyomaték jelentős mértékben lecsökkenthető, sőt akár meg is szüntethető.



61. ábra. Feszültségeloszlás és feszültségi eredők.

Külső kör- és hosszirányú hibáknál ez a sugárirányú elmozdulásra vonatkozó jelenség nem lép fel, a legnagyobb sugárirányú deformáció a hiba középpontjában jelentkezik. Lokális hajlító-nyomaték azonban fellép, ami megnöveli a hiba közepén kialakuló maximális sugárirányú elmozdulást.

Numerikus úton igazoltuk, hogy a belső hibák néhány (kisszámú) kompozit rétegből álló béleléssel nagyon hatékonyan javíthatók. A külső kör és hosszirányú hibák viszont kompozitos béleléssel csak nagyon nehezen javíthatók, ezek javításához a cső eredeti falvastagságát meghaladó vastagságú kompozit bélés szükséges.

5. Hibrid csövek károsodásának detektálási és követési lehetőségei

A csőbélelési eljárások esetén a hibrid cső egy fémes anyagból (acél, öntöttvas) készült külső rétegből és egy polimer mátrixú szálerősítésű bélésből épül fel. Az acél cső károsodásai a klasszikus roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerekkel (mágneses szóródás elemzése, ultrahangos vizsgálat) [5.1-5.10] akár üzem közben is detektálhatók, illetve követhetők. A polimer mátrixú kompozit réteg azonban nem mágnesezhető, és inhomogén szerkezete miatt az ultrahang visszaverődés elvén működő eljárások sem alkalmasak a vizsgálatára. Létezik azonban egy módszer amely a hibrid cső alkotóinak károsodását egyenként, sőt együttesen is képes kimutatni működés közben. Az akusztikus emissziós (AE) detektor az anyagokban – általában valamilyen fizikai átalakulás vagy tönkremeneteli folyamat eredményeképpen – keletkező rezgéseket, hangokat fogja fel, majd ezek jellemzőiből következtet a folyamat jellegére és jelentőségére. Az akusztikus emissziós eljárás tehát kiválóan alkalmas fém-polimer hibrid csövek károsodásának detektálására illetve követésére.

5.1. Akusztikus emissziós vizsgálat mint hibrid csövek felülvizsgálati és károsodás követési technológiája

Az ipari gyakorlat több évtizede alkalmaz különféle roncsolásmentes anyagvizsgálati módszereket, amelyek mágneses, röntgen, ultrahang, folyadék penetrációs és egyéb elveken működnek. Ezek az eljárások részben alapelvükből adódóan (a nem fémes anyagok nem mágnesezhetők), részben technológiai okokból nem terjedtek el a polimer kompozit anyagok vizsgálati módszerei között. Az akusztikus emisszió olyan széles amplitúdó és frekvenciatartományban képes az anyagban felszabaduló energiák hatására keletkező akusztikus jelek detektálására, hogy kiválóan alkalmas mind a fémek, mind pedig a különböző alapanyagok kombinációjával létrehozott (például szénszálas epoxi, vagy üvegszálas poliészter) kompozitok roncsolásmentes anyagvizsgálatára. Mivel a kutató munka keretében polimer kompozit rétegeket alkalmazó javítási technikákat vizsgálunk, az AE különösen jó választás a javított szakaszok időszakos felülvizsgálatának elvégzésére, sőt a folyamatos károsodáskövetésre is.

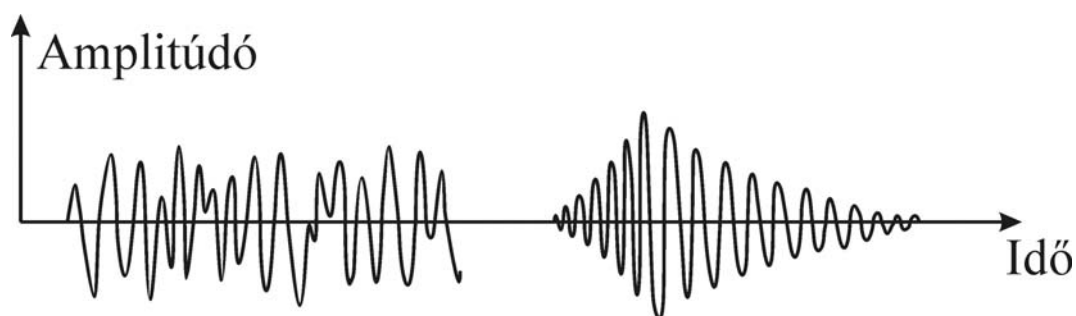
5.2. Az AE elterjedése az ipari gyakorlatban

Az AE technika alapjait letevő, átfogó vizsgálatokat 1950-ben Joseph Kaiser végezte el. Legnagyobb felfedezése a róla elnevezett ún. Kaiser-effektus. Az akusztikus emissziós kutatásokat Kaiser munkatársai terjesztették el Európában és Észak-Amerikában. Bár elterjedése kezdetben nem volt látványos, az 1950-es évek végétől kezdve az érdeklődés központjába került, és az iparban mind több alkalmazást nyert a roncsolásmentes anyagvizsgálatok terén. Például 1961-től repülőgépszárnyak ellenőrzésére vezették be, 1966-tól nyomástartó tartályok, csövek repedésterjedésének, illetve szivárgásának ellenőrzésére, valamint 1967-től atomerőművek primerköri nukleáris tartályainak integritás- és szivárgásvizsgálatára alkalmazták. Az akusztikus emisszió ezek után oly mértékű ismertséget és elterjedtséget ért el, hogy az 1990-es években már havonta 500-nál több cikk jelent meg [5.11], amelyek valamilyen kapcsolatban álltak az akusztikus emisszióval. Hazánkban az akusztikus emisszió elterjedése a KFKI-ban Péter Attila és Pellionisz Péter 1974-ben megindult kutató-fejlesztő munkájának köszönhető [5.12-5.14]. Ennek eredményeként akusztikus emissziós műszercsaládot fejlesztettek ki a speciális alkalmazásokhoz

való berendezéseken (például szivárgás detektáló rendszeren) át az univerzális, hordozható kivitelű műszerekig. A paksi atomerőműben ilyen fix szivárgásmérő rendszer van telepítve, illetve a reaktortartály évenkénti integritás vizsgálatát 48 csatornás hordozható készülékkel végzik napjainkban is. Szálerősítésű polimerek vizsgálatával, illetve megmunkáló gépek rezgés és szerszámkopás felügyeletével a BME-n foglalkoztak. Az első magyar nyelvű publikáció 1979-ben jelent meg, amelyben Pellionisz Péter az akusztikus emisszióknak a törésmechanikai vizsgálatokban történő alkalmazhatóságát mutatta be. Magyar nyelvű könyv 1992-ben jelent meg Pellionisz szerkesztésében [5.15]. Hazánkban elsőként 1993-ban tartottak akusztikus anyagvizsgáló képesítést nyújtó tanfolyamot Miskolcon.

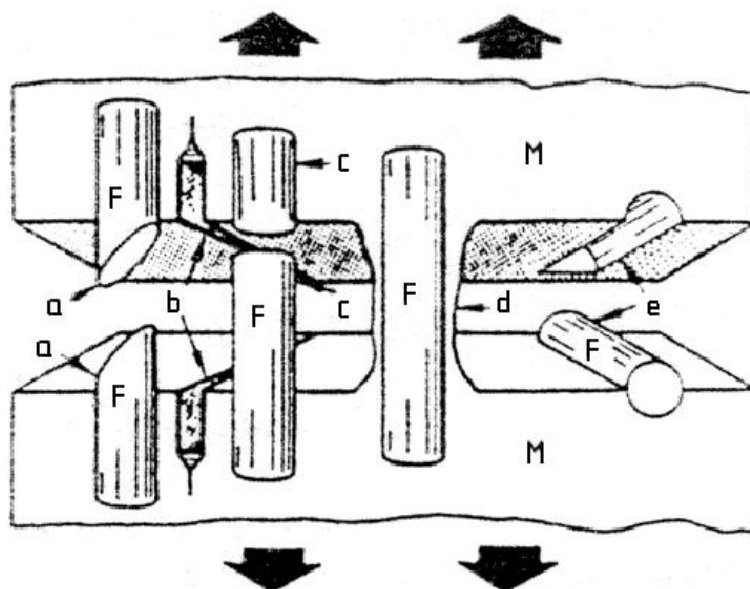
5.3. Az AE alapelve, alkalmazása polimer kompozit anyagok vizsgálatára

Az anyagokban lejátszódó folyamatok feltárhatók az általuk kibocsátott hangok alapján. Az anyagok (közet, beton, fa, fém, kompozit stb.), illetve a szerkezetek típusaiktól függően különböző frekvenciájú hangokat bocsátanak ki, mialatt valamilyen fizikai változás lép fel bennük. A különféle folyamatokhoz tartozó AE két formáját különböztetjük meg: a folyamatos emissziót, illetve a hangkitöréses emissziót (62. ábra). Folyamatos emissziót okozhat például nagynyomású rendszerben a közeg szivárgása, gépi megmunkológép zaja stb. A folyamatos jelek mérésén alapuló diagnosztikai rendszereknél a zajszint ismétlődő (például többélű szerszámmal dolgozó forgácsológép esetén a szerszám egy foga eltörik) vagy tartós megemelkedése (például folyamatos szivárgás) utal meghibásodásra. A kitöréses típusú akusztikus emisszió a szilárd anyagokban hirtelen energiafelszabadulás bekövetkezésekor, például mikrorepedés kialakulásakor, illetve hirtelen továbbterjedésekor jön létre [5.15].



62. ábra. Folyamatos, illetve kitöréses típusú akusztikus emissziós jelek hullámformája.

Fémek esetén diszlokációs mozgás, képlékeny zóna növekedés, repedésterjedés, fáradás, törés, korrózió mutatható ki. Polimer kompozitok esetén kimutatható elemi tönkremeneteli formák a mátrix deformáció, mátrixtörés, szál-mátrix elválás, száلكihúzóadás, illetve szálszakadás, amelyeket a 63. ábra szemléltet [5.16].



63. ábra. Elemi tönkremeneteli formák kompozitokban. (Jelölések: a) szálszakadás, b) mátrixtörés, c) száلكihúzóadás, d) mátrix deformáció, e) szál-mátrix elválás, F-szál, M-mátrix.)

Az akusztikus emisszió mint anyagvizsgálati módszer bevezetése a műanyagoknál szinte egyidőben kezdődött a fémekével. Habár napjainkban a műanyagok mechanikai mérőszámait messze nem ismerjük olyan pontosan, mint a fémek hasonló mérőszámait és a lemaradás évtizedekben mérhető, elmondhatjuk, hogy az AE vizsgálatok terén egyáltalán nincs lemaradás. Ennek oka az, hogy a műszaki műanyagok szinte kivétel nélkül tartalmaznak erősítőanyagot, így a kompozitban található anyagok rugalmassági modulusa igen széles skálán változik. Ennek köszönhetően az AE mérések során mért fizikai mennyiségekből (amplitúdó, energia stb.) meglehetősen nagy biztonsággal megállapíthatók, hogy mikor milyen károsodási folyamat játszódik le az anyagban. Így jól elkülöníthetőek a mátrix és az erősítőanyag tönkremeneteli formái (mátrixdeformáció, mátrix tépődés, száلكihúzóadás, szál-réteg elválás és szálszakadás). Ezért mondják azt, hogy az erősített műanyagok az AE mérések számára alkalmas (a „leghálásabb”) anyagok [5.15].

5.4. Az akusztikus emissziós módszer jellegzetességei

Az akusztikus emisszió a következő két lényeges dologban különbözik a hagyományos roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerektől:

- az észlelt és feldolgozott jelek magában az anyagban keletkeznek, nem pedig egy mesterséges jelet bocsátunk át az anyagon, és a választ detektáljuk (mint például az ultrahangos vizsgálatok esetében);
- az akusztikus emissziós eljárás nem statikus, hanem dinamikus eljárás, amin azt értjük, hogy a terhelt, működő szerkezetben az adott terhelés vagy működési körülmények hatására életbe lépő változásokat, mechanizmusokat érzékeljük, és nem a szerkezetnek egy pillanatnyi állapotát.

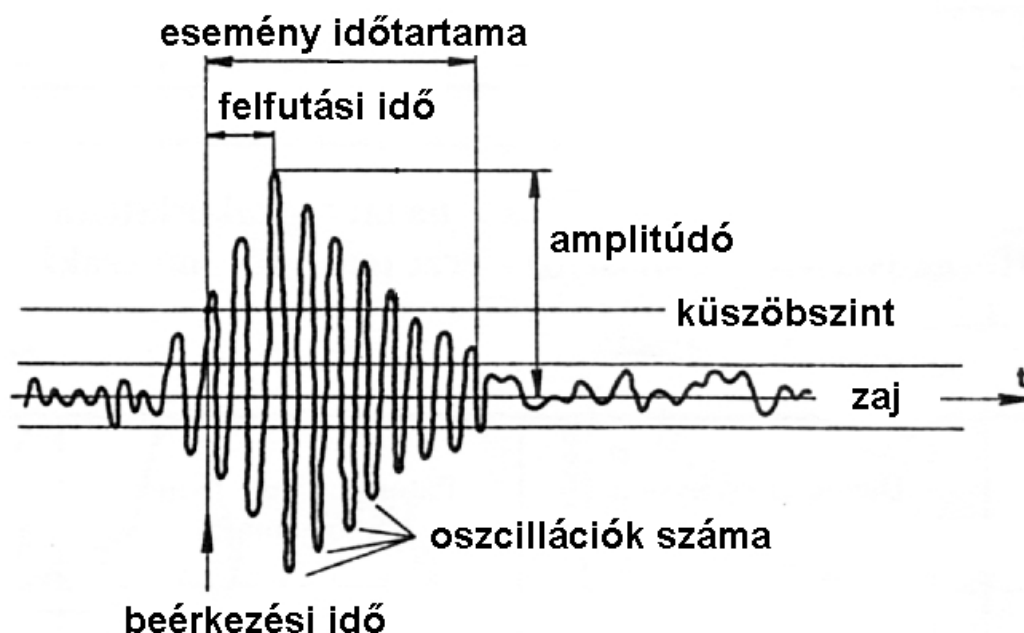
Az akusztikus emissziós vizsgálat során csak az adott terhelési szinten aktív mechanizmusok működnek. Azaz, amíg például röntgen vizsgálatnál a szerkezet egészét megvizsgálva felderíthető az összes, a módszer érzékenységének megfelelő minimális hibaméretnél nagyobb hiba, addig az akusztikus emissziós vizsgálatnál csak azok a hibák lepleződnek le, amelyek az adott igénybevételi szinten aktívvá válnak. Ez azt jelenti, hogy ún. passzív hibák jelen lehetnek a szerkezetben, amelyek azonban az adott terhelésszinten nem jelentenek veszélyt. Ezzel szemben a többi vizsgálati

módszernél, bár ismerjük a jelen lévő hibákat, de nem ismerjük, hogy azok a szerkezet üzemi igénybevételén hogyan viselkednek, mennyire veszélyesek.

5.5. Akusztikus emissziós jelek detektálása és feldolgozása

Az anyagok, szerkezetek a külső igénybevétel hatására tárolt belső energiájuk egy részét irreverzibilis esetben a belső helyi instabilitások során, lokális deformációkon, illetve törési folyamatokon keresztül adják le. Az energia egy része hővé alakul, illetve szabad felület képzésére fordítódik, további része akusztikai energiává alakul, amely feszültség-hullám formájában végighalad az anyagon. Az AE érzékelők alakítják át ezeket a mechanikai rezgéseket elektromos jelekké.

Az akusztikus emissziós vizsgálat célja, hogy az anyagban keletkező AE jeleket kiváltó jelenségeket minél pontosabban azonosítsuk. Ezért a detektált jelekről minél több információt próbálunk begyűjteni. Egy kitöréses típusú AE jelet a következő paraméterekkel írunk le: amplitúdó, esemény időpontja, felfutási idő, esemény időtartama és rezgésszám (64. ábra).



64. ábra. Kitöréses típusú AE esemény paramétereit.

A közvetlenül nyert paraméterekből további közvetett mennyiségek állíthatók elő, például az esemény energiája. Logaritmikus erősítők esetén az így származtatott mennyiségek közvetlen fizikai tartalommal nem rendelkeznek, de a jelek összehasonlítása szempontjából hasznosak lehetnek.

5.6. Az AE vizsgálatok fajtái

Az akusztikus emissziós vizsgálatnak két kiértékelési irányzata különíthető el. Az egyik módszernél az érzékelők a detektált AE jelet elektromos jellé alakítják, és a mérőberendezés ennek az elektromos jel burkológörbéjének néhány paraméterét (maximális amplitúdó, eseményszélesség, felfutási idő stb.) határozza meg, és rögzíti a további feldolgozás számára. A további feldolgozás célja, hogy az AE jeleket a paramétereik alapján hozzárendeljék a megfigyelt károsodási formákhoz. Azaz meg lehessen mondani, hogy adott paraméterű AE jel milyen károsodási formából származik. A másik irányzat az egész feszültségjellé konvertált AE jelet rögzíti, és ezt a

feszültségjelet vagy ennek a frekvenciaspektrumát elemzi. Ez utóbbinál bár elméletileg többletinformációhoz jutunk az adott AE jelet illetően (hiszen nemcsak a jel burkológörbéjének néhány paraméterét, hanem magát az egész jel lefutását ismerjük), ennek a gyakorlati alkalmazásában számos korlátba és ezáltal hátrányba ütközünk. Az egyik probléma, hogy nem magát az AE forrás elektromos jelle alakított hullámformáját regisztrálja a mérőberendezés, hanem az AE hullám által megrezgetett detektorban levő lengőrendszer rezgésének csillapodását. Ha tehát ezt a hullámformát vagy ennek Fourier-spektrumát elemezzük, az a valóságos AE forrást csak közvetve jellemzi. A módszer következő hátránya, hogy attól függően, hogy a detektált hullámforma mely részének Fourier-spektrumát állítjuk elő, az más és más lesz. Hátrány továbbá a hullámforma frekvenciaspektrumának nagy számítási igénye, ami miatt egy nagy akusztikus aktivitású kompozit szerkezet valós idejű felügyelete nehezen oldható meg.

5.7. Kifejlesztett felülvizsgálati és károsodáskövetési technológia

Fém- polimer kompozit hibrid csövek időszakos felülvizsgálatait a következő protokoll szerint javasoljuk elvégezni.

- a felülvizsgálat szükségességét rendkívüli esemény (csőtörés, szivárgás stb.) hiányában a csővezeték üzemeltetőjének belső előírásaira támaszkodva kell meghatározni
- rendkívüli esemény, vagy a csővezeték kiemelt veszélyeztetettségének jelei esetén azonnali AE felülvizsgálat szükséges
- az acél csőfal elvékonyodását, a korróziós folyamatok felmérését és korábbi állapotokhoz történő viszonyítását (ha végeztek korábban részletes vizsgálatot a csőszakaszon) az ipari gyakorlatban elterjedt csőgörényes vizsgálatok elvégzésével javasoljuk
- a korábban kompozit rétegekkel megerősített, javított csőszakaszok felülvizsgálatát a csőgörényes vizsgálatok mellett célszerű akusztikus emissziós vizsgálatokkal is kiegészíteni, amely többletinformációt szolgáltat a kompozit javítórétegek állapotáról. Az AE berendezés csőgörény segítségével juttatható a javított csőszakaszba, vagy kívülről (föld alatti csövek esetén helyi feltárással) is elvégezhető a felülvizsgálat.
- különösen kritikus területeken lehetőség van a csőjavítás során mikrofonokat rögzíteni a javítórétegekre, amelyek folyamatos akusztikus emissziós állapot felügyeletet és károsodáskövetést tesznek lehetővé

6. Irodalomjegyzék

[1.1] Soden P. D., Kitching R., Tse P. C., Tsavalas Y., Hinton M. J.: Influence of winding angle on the strength and deformation of filament-wound composite tubes subjected to uniaxial and biaxial loads. *Composites. Science and Technology*, 46 (1993), 363–378.

[1.2] Hull D., Spencer B.: Effect of winding angle on the failure of filament wound pipe. *Composites*. 9 (1978), 263–271.

[1.3] Drozdov A. D., Kalamkarov A. L.: Optimization of winding process for composite pressure wessels. *International Journal of Pressure Wessels and Piping*, 62 (1995), 69-81.

[1.4] Harte A. M., McNamara J. F., Roddy I. D.: Application of optimisation methods to the design of high performance composite pipelines. *Journal of Materials Processing Technology*, 142 (2003), 58-64.

[1.5] Zsigmond B.: Modeling of braided fiber reinforced composites crosslinked by electron beam. PhD Thesis. BME, Budapest, 2005.

- [1.6] Zsigmond B., Halász L., Czvikovszky T.: Electron beam processing of carbon fibre reinforced braided composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 67 (2003), 441-445.
- [1.7] Zsigmond B., Halász L., Czvikovszky T.: EB processing of braided carbon fibre composite profiles. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 208 (2003), 247-251.
- [1.8] Stein D.: *Rehabilitation and maintenance of drains and sewers*. Ernst&Sohn, Berlin, 2001.
- [1.9] Lee D. G., Chin W. S., Kwon W. J., Yoo A. K.: Repair of underground buried pipes with resin transfer molding. *Composite structures*, 57 (2002), 67-77.
- [1.10] Yu H. N., Kim S. S., Hwang I. U., Lee D. G.: Application of natural fiber reinforced composites to trenchless rehabilitation of underground pipes. *Composite Structures*, 86 (2008), 285-290.
- [2.1] Saechtling-Zebrowski: *Kunststoff-taschenbuch*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1974
- [2.2] Czvikovszki T., Nagy P., Gaál J.: *A polimertechnika alapjai*. Műegyetemi kiadó, Budapest, 2000
- [2.3] Lublin: *Handbook of composites*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1982
- [2.4] Saechtling: *International plastics handbook*. Carl Hanser Verlag, München, 1995
- [2.5] Hyer: *Stress analysis of fiber reinforced composite materials*. WCB/McGraw-Hill. 1998
- [3.1] MSZ-14-01052-1991: A bányahatóság felügyelete alá tartozó acél csővezetékek hegesztett körvarrataival szemben támasztott radiográfiai követelmények.
- [3.2] MSZ EN ISO 5817:2004: Hegesztés. Acél, nikkelt, titán és ötvözetek ömlesztőhegesztéssel készített kötése (a sugaras hegesztés kivételével). Az eltérések minőségi szintjei (ISO 5817:2003).
- [3.3] JONES, D.: Use for high resolution internal inspection and fitness for purpose to ensure pipeline reliability. IBC Pipeline Risk and Rehabilitation Conference, Aberdeen, May 1996. p. 1-15.
- [3.4] MORGAN, B.: The risk assessment of high pressure gas pipelines. IBC Pipeline Risk and Rehabilitation Conference, Aberdeen, May 1996. p. 1-32.
- [3.5] SHANNON, R. W.; ARGENT, C. J.: A system approach to the quantitative condition monitoring of pipelines. 17th World Gas Conference, Washington DC, June 1988. p. 1-33.
- [3.6] EIBER, R. J.; JONES, D.: An analysis of reportable incidents for natural gas transmission and gathering lines June 1984 through 1990. NG-18 Report No. 200. Battelle, August, 1992.
- [3.7] UREDNICEK, M.; COOTE, R. I.; COUTTS, R.: Risk assessment and inspection for structural integrity management. Pipeline Pigging and Inspection Technology Conference, Houston, 1991. NOVA Corporation of Alberta, Canada.
- [3.8] SZTERMEN, A.: *Módszer gázvezeték szakasz veszélyeztetettségének meghatározására*. Egyetemi doktori értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc, 1996.
- [3.9] A GOÜ gáz- és olajszállító vezetékrendszerében előfordult haváriák és meghibásodások 1980-1992. MOL Rt. GOÜ, Siófok, 1993. p. 1-6. (Kézirat.)
- [3.10] *Gas pipeline incidents: 1970-1992*. A report of the European Gas Pipeline Incident Data Group. Pipes and Pipelines International, July-August 1995. p. 9-12.
- [3.11] HOPKINS, P.: *Transmission pipelines*. Pipeline Technology. Ed.: DENYS, R. Elsevier, 1995. Vol. I, p. 683-706.

- [3.12] KHARINOVSKY, V. V.: Operating integrity problem of gas pipeline constructions. Pipeline Technology. Ed.: DENYS, R. Elsevier, 1995. Vol. I, p. 35-43.
- [3.13] FINGERHUT, M.; WESTLAKE, H.: Pipeline fitness-for-purpose certification. Pipes and Pipelines International, March-April 2000. p. 11-22.
- [3.14] JONES, D. G.: Inspection: the key to a reliable future. The Pipeline Pigging Conference, Houston, February 3-6, 1997. p. 1-24.
- [3.15] LUKÁCS, J.; NAGY, GY.; TÖRÖK, I.: Próbatetek és szerkezeti elemek viselkedésére jellemző mérőszámok ismétlődő terhelésnél. Anyagok Világa, (3) 2002/1. <http://www.materialworld.uni-miskolc.hu>.
- [3.16] LUKÁCS, J.; NAGY, GY.; TÖRÖK, I.: Reliability of pipeline girth welds reinforced with polymer matrix composite. 7th Conference on NEW TRENDS IN FATIGUE AND FRACTURE (7NTFF), 3-4 May, 2007, Miskolctapolca, Hungary. CD-ROM, BAY-LOGI, Miskolc, 2007. 46 slides.
- [3.17] DENYS, R. M.: Girth-weld defect qualification methods need to be rationalized. Part 1: Focusing on mechanical properties in Engineering Critical Assessment saves money. Pipe Line and Gas Industry, Vol. 82, No. 9, September 1999. p. 35-41.
- [3.18] DENYS, R. M.: Standard weld-defect judging model needs some research. Part 3: Industrywide cooperation could lead the way to fewer unneeded repairs of girth-weld defects. Pipe Line and Gas Industry, Vol. 82, No. 11, November 1999. p. 69-74.
- [3.19] DENYS, R. M.: Weld-defect acceptance models need more validated inputs. Part 2: Using good mechanical, toughness and defect-size data could reduced unneeded repairs. Pipe Line and Gas Industry, Vol. 82, No. 10, October 1999. p. 59-64.
- [3.20] DENYS, R. M.: Consensus on judging multi-level weld defects would benefit all. Part 4: Economics may eventually be the lever to bring a change from current assessment methods. Pipe Line and Gas Industry, Vol. 82, No. 12, December 1999. p. 60-65.
- [5.1] Wolf, T.: Rohrleitungsinspektionen mit dem UltraScan. Erdöl Erdgas Kohle, 117. k. 11. sz.2001. p. 518–521.
- [5.2] Weenker, M.: Fragen der Sicherheitsphilosophie bei der Bewertung von Wanddickenverschwächungen. 3R international, 40. k. 10–11. sz. 2001. p. 651–654.
- [5.3] Hoffmann, U.: Erfahrungen bei der Bewertung von Wanddickenverschwächungen im Ergebnis von Molchinspektionen. 3R international, 40. k. 10–11. sz. 2001. p. 646–650
- [5.4] Miller S., Fenyvesi L.: Determining Corrosion Growth Accurately and Reliability
- [5.5] Morrison T., Mangat N., Desjardins G., Bhatia A.: Validation of an In-Line Inspection Metal Loss Tool, presented at International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2000
- [5.6] Nestleroth J.B., Bubenik T.A.: Magnetic Flux Leakage (MFL) Technology – for The Gas Research Institute – United States National Technical Information Center 1999
- [5.7] Rempel R.: Anomaly detection using Magnetic Flux Leakage (MFL) Technology - Presented at the Rio Pipeline Conference and Exposition, Rio De Janeiro, Brasil 2005
- [5.8] Westwood S., Cholowsky S.: Tri-Axial Sensors and 3-Dimensional Magnetic Modelling of Combine to Improve Defect Sizing From Magnetic Flux Leakage Signals. presented at NACE International, Northern Area Western Conference, Victoria, British Columbia, Canada 2004

- [5.9] Westwood S., Cholowsky S.: Independent Experimental Verification of the Sizing Accuracy of Magnetic Flux Leakage Tools, presented at 7th International Pipeline Conference, Puebla Mexico 2003
- [5.10] Amos D. M.: Magnetic flux leakage as applied to aboveground storage tank flat bottom tank floor inspection, *Materials Evaluation*, 54(1996), p.26
- [5.11] Szűcs P.: Az akusztikus emisszió története. *Anyagvizsgálók Lapja*. 4 (1993) 132-133
- [5.12] Pellionisz P.: Akusztikus emissziós vizsgálat I. Rész: mérés technikai alapok. *Anyagvizsgálók Lapja I.* 2 (1991), 47-50
- [5.13] Pellionisz P.: Akusztikus emissziós vizsgálat II. Rész: alkalmazási területek. *Anyagvizsgálók Lapja I.* 3 (1991), 79-81
- [5.14] Pellionisz P.: Akusztikus emissziós vizsgálat III. Rész: Az A.E. technika eszközei. *Anyagvizsgálók Lapja II.* 1 (1992), 19-20
- [5.15] Pellionisz P.: Akusztikus emissziós anyag- és szerkezet vizsgálatok. Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 1992
- [5.16] Kander R.G., Siegmann A.: Mechanism of damage and failure in an orthotropic glass-polypropylene composite. *Polymer Composites*. 13 (1992), 154-168