

A fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállást tükröző anyagi mérőszámok megbízhatósága

Dr. Lukács János*

Bevezetés

A fáradásra történő méretezés két alapvető koncepciója – a biztos élettartamra való (safe-life), illetve a sérülésbiztos (fail-safe) méretezés [1] – közül az utóbbi alkalmazása került előtérbe. Ennek oka az, hogy a gépészeti szerkezetek repedésektől, folytonossági hiányoktól mentes gyártása csak elvben garantálható és az üzemeltetés során is keletkeznek hibák; ezek nem mutathatók ki 100 %-os biztonsággal; a tervezési élettartam elérésekor végrehajtott szerkezeti elem-csere során fel nem használt élettartam veszhet el; továbbá gazdaságtalan és műszakilag erősen vitatható az a gyakorlat, amely az észlelt hiba javítását írja elő, veszélyességének legalább becslés szintjén való megítélése nélkül.

A sérülésbiztos méretezési koncepció megalkalmazása rendszerszemléletű megközelítést igényel. A repedést tartalmazó, ismétlődő igénybevételű szerkezetek megbízhatóságának megítélésére csak olyan rendszer alkalmas, amely megteremti a roncsolásos vizsgálatokból származó anyagi mérőszámok, a szerkezeti elemeket leíró mechanikai modellek és a roncsolásmentes anyagvizsgálati eredmények kapcsolatát, összhangját. A lineárisan rugalmas törésmechanikai elmélet (LEFM) és a feszültségintenzitási tényező tartománya erre alkalmas. A rendszer elemei közül a fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállást tükröző anyagi mérőszámok szerepe kiemelt. Ennek oka egyaránt kereshető a mechanikai modellek közelítő jellegében, a roncsolásmentes vizsgálatok megbízhatóságában, valamint a számítógépes algoritmusok (élettartambecslés) pontatlanságában. Ez indokolja a fáradásos repedésterjedést leíró anyagi mé-

rőszámok matematikai-statisztikai módszerekkel való megközelítését, s teszt szükségessé azok megbízhatóságának megítélését.

A fáradásos repedésterjedést visszatükröző kinetikai diagramot szinte kizárólag egyszerűsített formában alkalmazzák. Kiindulva abból, hogy a diagram mérnöki szempontból legfontosabb tartománya a középső, a Paris-Erdogan összefüggésre [2] épülő egyszerűsítés a legerősebb. Ezt szemlélteti az 1. ábra.

A Paris-Erdogan összefüggés a fáradásos repedésterjedési sebesség (da/dN) – feszültségintenzitási tényező tartománya (ΔK) kapcsolatot az alábbi formában írja le:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n \quad (1)$$

Az összefüggésben szereplő C és n elsődlegesen az anyagminőségtől függő állandók.

Az egyszerűsített kinetikai diagram sérülésbiztos méretezési koncepcióhoz való alkalmazása megköveteli a feszültségintenzitási tényező tartományának küszöbértéke (ΔK_{th}); a két, már említett állandó (C és n), valamint a feszültségintenzitási tényező tartományának kritikus értéke, a ciklikus törési szívósság (ΔK_{fc}) ismeretét.

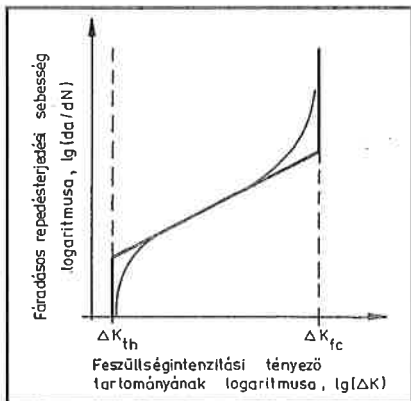
Fáradásos repedésterjedés sebességének vizsgálata; jellemzők

Az anyagi mérőszámok megbízhatóságának megítélése érdekében – nagy számú próbatesten – fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokat végeztünk. A próbatestek egyik csoportja a hegesztett szerkezetek gyártásához széles körben alkalmazott 37 C és E 420 C minőségi jelű, mikroötvözött acél alapanyagokból [3] készült. Egy másik csoport az

előbbi acél védőgázos fogyóelektródás ívhegesztéséhez használatos, VIH – 2 jelű hegesztő huzalból, 100 % CO₂ védőgázban, illetve 50% CO₂ + 50% Ar és 25% CO₂ + 75% Ar védőgázkeverékben készített hegesztési ömledékből került kimunkálásra. A próbatestek harmadik csoportját azok alkották, amelyek a két acél fogyóelektródás védőgáz ívhegesztéssel elkészített kötéseiből munkáltattam ki. A negyedik csoportba az X80 TM minőségi jelű, termomechanikusan kezelt [4], az ötödik csoportba golyóscsapágyak gyártására szolgáló GO 3 acél alapanyagból, a hatodik csoportba pedig német gyártmányú, 60 kg-os, DO 76 jelű nagy vasúti sínből készült próbatestek kerültek.

A ΔK_{th} meghatározás érdekében terheléscsökkenéses, a C és az n meghatározása érdekében pedig állandó terhelésamplitúdójú vizsgálatokra került sor [5], a ΔK_{fc} számításához szükséges kritikus repedésméretet (a_c) – ott ahol ez megfelelő biztonsággal kivitelezhető volt – az eltört próbatesten mértem. A terjedő repedést optikai úton vagy a compliance módszerrel követtük [6], előbbi esetben 0,1 – 0,2 mm-enkénti repedésméret regisztrálással. A vizsgálatokat szobahőmérsékleten és levegőn, szinuszos alakú fázastáji függvény szerint, $R = 0,1$ terhelési aszimmetria tényezővel végeztük.

Az alapanyagokból készült próbatestek orientációja T-L, L-T, illetve T-S [7], a sínből készülté L-T, illetve L-S [8], a hegesztési ömledékekből kimunkáltak elrendezése pedig 2-3 [9] volt. A kötéseket úgy hegesztettük, hogy a varrat hossz tengelye és a lemezek hengerlésének iránya párhuzamos legyen egymással, illetve merőleges legyen egymásra, majd belőlük olyan próbatesteket munkáltattam ki, amelyek orientációja T-L és L-T, elrendezése pedig 1-2 és 2-1 volt. A hegesztett kötésekből készített próbatestek így négy vizsgálati alcsoportot alkottak (T-L/1-2, T-L/2-1, L-T/1-2 és



1. ábra. A fáradásos repedésterjedés kinetikai diagramja és annak Paris-Erdogan összefüggésre épülő egyszerűsítése

1. táblázat. A vizsgált alapanyagok és hegesztési ömledékek szakítóvizsgálatainak eredményei

Anyagminőség, a szakító próbatest kivételének iránya	R _{p0,2} vagy R _{eH} MPa	R _m MPa	A %	Z %
37 C alapanyag, hosszirány	269	405	33,3	64,7
37 C alapanyag, keresztirány	269	402	33,8	62,8
E 420 C alapanyag, hosszirány	444	593	25,5	–
E 420 C alapanyag, keresztirány	434	595	–	–
VIH-2 ömledék, 100% CO ₂ , hosszirány	444	554	23,2	56,6
VIH-2 ömledék, 50% CO ₂ + 50% Ar, hosszirány	480	587	23,4	63,4
VIH-2 ömledék, 25% CO ₂ + 75% Ar, hosszirány	504	609	24,4	64,7
X80 TM alapanyag, hosszirány	526	616	25,7	74,2
X80 TM alapanyag, keresztirány	551	633	24,5	71,9
GO 3 alapanyag, hosszirány	471	645	–	–
DO 76 alapanyag, hosszirány	582	954	7,6	–

* Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai tanszék

L-T/2-1). A különböző anyagok szakítóvizsgálatainak eredményeit az 1. táblázatban foglaltam össze. A táblázatban szereplő minden adat legalább három mérés átlaga.

A terheléscsökkentés vizsgálatok eredményét, a ΔK_{Ih} értékét, az [5] előírás alapján határoztam meg. A 10^{-6} – 10^{-7} mm/ciklus repedésterjedési sebesség tartományba eső legalább öt pontra, a legkisebb négyzetek módszerével egyenest fektettem, s számítottam annak 10^{-7} mm/ciklus-hoz tartozó helyettesítési értékét. A repedésterjedési sebesség nagyságát a differencia módszerrel (secant method), a feszültségintenzitási tényező tartományát pedig az előírásban közölt összefüggéssel számítottam.

Az állandó terhelésamplitúdójú vizsgálatok eredményeit, az (1) összefüggés C és n állandóját, a legkisebb négyzetek módszerével, lineáris regresszióval határoztam meg. A repedésterjedési sebesség nagyságát a hét ponton átmenő polinomos módszerrel (seven point incremental polynomial method), a feszültségintenzitási tényező tartományát pedig a próbatest típusának (CT, illetve TPB) megfelelő összefüggéssel számítottam [5, 10].

A ΔK_{Ic} meghatározásához szükséges kritikus repedésméretet sztereomikroszkópon mértem, a számításhoz pedig itt is az előírásokban megadott formulákat használtam.

A vizsgálati eredmények értékelése

Az egyes anyagi mérőszámok megbízhatóságának megítéléséhez először azt vizsgáltam meg, hogy azok milyen statisztikai mintákba rendezhetők. Ehhez az ismeretlen eloszlású alapsokaságok egyezőségének, illetve különbözőségének megítélésére alkalmas Wilcoxon-próbát [11] használtam, $\epsilon = 0.05$ kétoldali szignifikanciaszinten. A minták elemszámától függően mindig a megfelelő, a kis vagy a nagy mintákra érvényes próba alkalmazására került sor.

Az első csoportba sorolt alapanyagok (37 C és E 420 C) esetében megvizsgáltam, hogy a T-L és az L-T orientációjú próbatesteken kapott ΔK_{Ih} , n , valamint ΔK_{Ic} értékek, anyagminőségként egy mintát alkotnak-e vagy sem. Eredményül azt kaptam, hogy a ΔK_{Ih} értékekben az eltérés nem szignifikáns, az n és a ΔK_{Ic} esetében azonban igen, mindkét anyagminőség esetén. Utóbbi két anyagi mérőszám vizsgálati eredményei tehát nem vonhatók össze egy közös mintába.

A második csoportba tartozó hegesztési ömledékek esetében először azt vizsgáltam, hogy a két eltérő huzalátmérből ($d_e=1.2$ mm és $d_e=1.6$ mm) származó, n értékekből álló minták azonosak-e vagy sem, védőgázonként. Miután az eltérés nem volt szignifikáns, azt is ellenőriztem, hogy a védőgázonként így kapott minták azonosak-e vagy sem. Eredményül azt kaptam, hogy az Ar-tartalmú védőgázkeverékek és a tiszta CO_2 védőgáz esetén kapott minták eltérése szignifikáns, így csak a védőgázkeverékekben hegesztett ömledékek vizsgálati eredményei vonhatók össze egy közös mintába.

gálati eredményei vonhatók össze egy közös mintába.

A harmadik csoportban lévő hegesztett kötések (37 C és E 420 C) esetében azt ellenőriztem, hogy az orientációból származó n és ΔK_{Ic} minták elrendezésként és anyagminőségként azonosak-e vagy sem. A számítások azt mutatták, hogy a minták eltérése nem szignifikáns, így azt is megvizsgáltam, hogy az elrendezésként rendelkezésre álló, n és ΔK_{Ic} értékeket tartalmazó minták anyagminőségként azonosak-e vagy sem. Eredményül itt is azt kaptam, hogy a minták nem térnek el egymástól szignifikánsan, vagyis a 37 C és az E 420 C anyagminőségű hegesztett kötések vizsgálatának adatai egy-egy közös mintába összevonhatók.

A negyedik csoportba tartozó alapanyag (X80 TM) esetében megvizsgáltam, hogy a T-L, az L-T és a T-S orientációjú próbatesteken kapott n értékek egy mintát alkotnak-e vagy sem. Eredményül azt kaptam, hogy az eltérés egyik összehasonlításban sem szignifikáns, az orientációnként rendelkezésre álló minták szórása azonban jelentősen különbözik. Ez azt jelenti, hogy az egyesített mintát kellő kritikával kell értékelni.

A hatodik csoportba sorolt sín alapanyag (DO 76) esetében szintén azt ellenőriztem, hogy az L-T és az L-S orientációjú próbatesteken kapott n értékek összevonhatók-e egy mintába, vagy sem. Eredményül azt kaptam, hogy a két minta eltérése szignifikáns, vagyis külön-külön kezelendők.

Az előzők figyelembevételével kapott minták statisztikai jellemzőit – ahol indokolt volt, ott a részmintára külön is – a 2. táblázatban foglaltam össze.

A Paris-Erdogan összefüggés két állandója közötti kapcsolatot, alapanyagokra valamint hegesztési ömledékekre és hegesztett kötésekre a 2. ábra szemlélteti.

A 2. táblázat és a 2. ábra alapján – figyelembe véve az 1. táblázat adatait is – az alábbi

összegző megállapítások fogalmazhatók meg.

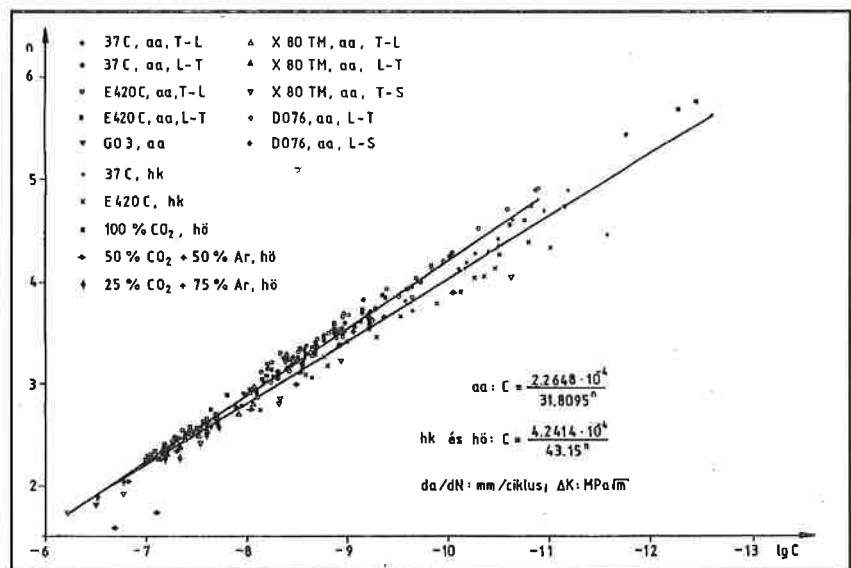
1. A szórásai együtthatók összhangban vannak a törésmechanikai vizsgálatokra az irodalomban [12] közölt adatokkal, ami megbízható, jól reprodukálható vizsgálati és adatfeldolgozási, kiértékelési rendszerről tanúskodik. Egyedül az X80 TM jelű, T-S orientációjú próbatestek vizsgálati eredményeiből kapott szórásai együttható magas, ami a repedés vastagság irányú terjedésével, illetve a lemez réteggességével magyarázható.

2. A ΔK_{Ih} értékek átlaga a kisebb szilárd-ságú alapanyag esetén a nagyobb, ami az iro-

2. táblázat. A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálataiból kapott minták statisztikai jellemzői

Vizsgálati csoport	Mérőszám	Elem-szám	Átlag	Szórás	Szórás együttható
37 C, aa, T-L és L-T	ΔK_{Ih}	9	7.69	1.220	15.87
E 420 C, aa, T-L és L-T		7	5.72	1.038	18.12
37 C, aa, T-L	n	37	3.74	0.534	14.30
E 420 C, aa, T-L		32	2.58	0.182	7.06
37 C, aa, L-T		33	3.45	0.311	9.01
E 420 C, aa, L-T		7	2.42	0.191	7.88
37 C, aa, T-L	ΔK_{Ic}	33	66.03	6.035	9.14
E 420, aa, T-L		27	101.52	5.300	5.22
37 C, aa, L-T		27	58.69	3.627	6.18
E 420 C, aa, L-T		5	94.43	0.964	1.02
100% CO_2 , hő	n	21	3.90	0.874	22.41
50% CO_2 + 50% Ar, hő		8	2.81	0.559	19.91
25% CO_2 + 75% Ar, hő		8	2.53	0.564	22.28
Ar tartalmú hő, egyesített	n	16	2.67	0.561	21.01
37 C, hk	n	15	4.36	0.499	11.45
E 420 C, hk		17	3.60	0.568	15.77
37 C, hk	ΔK_{Ic}	14	76.23	5.603	7.35
E 420 C, hk		15	113.89	9.197	8.08
X 80 TM, aa, T-L	n	5	2.57	0.200	7.78
X 80 TM, aa, L-T		5	2.31	0.050	2.20
X 80 TM, aa, T-S		8	2.60	0.789	30.70
X 80 TM, egyesített	n	18	2.51	0.538	21.40
GO 3, aa	n	10	3.18	0.324	10.40
DO 76, aa, L-T	n	5	3.22	0.234	7.27
DO 76, aa, L-S		4	3.63	0.101	2.77

Megjegyzés: aa = alapanyag, hő = hegesztési ömledék, hk = hegesztett kötés



2. ábra. A Paris-Erdogan összefüggés két állandójának kapcsolata alapanyagokra, valamint hegesztési ömledékekre és hegesztett kötésekre

dalomban [13, 14] található tendenciákkal megegyezik.

3. A T-L orientációhoz tartozó n és ΔK_{IC} értékek átlaga, anyagminőségenként, nagyobb mint az L-T orientációjúaké.

4. Az alapanyagokon elvégzett vizsgálatok eredményeiből kapott szórásai együtthatók a ΔK_{IC} értékekre a legnagyobbak, továbbá a T-L orientáció esetén nagyobbak mint az L-T orientációnál.

5. A hegesztési ömledékekre jellemző n értékek átlaga az alkalmazott védőgáz (keverék) Ar-tartalmának növekedésével csökken, miközben a szórásai együttható gyakorlatilag nem változik.

6. A hegesztett kötések vizsgálataiból kapott n és ΔK_{IC} értékek átlaga nagyobb mint a nekik megfelelő alapanyagoké.

7. A hegesztési ömledékek és a hegesztett kötések szórásai együtthatói általában nagyobbak mint a nekik megfelelő alapanyagoké, ami azok inhomogenitására vezethető vissza.

8. Az alapanyagokra, a hegesztési ömledékekre, valamint a hegesztett kötésekre kapott n és ΔK_{IC} minták szórásai együtthatóinak különbsége alapján az mondható, hogy a hegesztés okozta inhomogenitás elsősorban az n értékére hat.

9. A Paris-Erdogan összefüggés két állandója közötti kapcsolat (létezésére példák a [15] munkában) az alapanyagokra szorosabb mint a hegesztési ömledékekre és hegesztett kötésekre. Ez különösen akkor igaz, ha azt is figyelembe vesszük, hogy az alapanyagokra meghatározott törvényszerűség szélesebb adatbá-

zisra támaszkodik. Az előbbi kapcsolatot 146 adatpár alapján a (2), utóbbit pedig 69 adatpár alapján a (3) összefüggés mutatja:

$$C = \frac{2.2648 \cdot 10^{-4}}{31.8098^n} \quad (2)$$

$$C = \frac{4.2414 \cdot 10^{-4}}{43.1500^n} \quad (3)$$

A korrelációs együtthatók 98.80 %, illetve 98.37 %.

Mindezekből az is következik, hogy a kapott, illetve meghatározott minták – mint halmozok – alkalmasak a vizsgált anyagminőségek, hegesztési ömledékek és hegesztett kötések fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállásának statisztikai jellemzésére.

Irodalom

- [1] Pickard, A. C.: Component Lifing. Materials Science and Technology, September, 1987. Vol. 3, p.743-749.
- [2] Paris, P.; Erdogan, F.: A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, December 1963. p.528-534.
- [3] MSZ 6280-1982: Acél hegesztett szerkezetekhez.
- [4] Hollósné, Sz. A.; Csikós, G.: Termomechanikusan kezelt X80 TM jelű acél hegesztése. Hegesztéstechnika, (4) 1993/1. p. 7-10.
- [5] ASTM E 647-88: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.
- [6] Schwalbe, K.-H.: Test Techniques. 5th International Conference on Fracture (5th ICF) Cannes, France, 29 March - 3 April 1981. Ed.: Francois, D. Pergamon Press, 1981, Advances in Fracture Research, Volume 4, p. 1421-1446.
- [7] ASTM E 616-82: Standard Terminology Relating to Fracture Testing.
- [8] Rice, R.C.; Leis, B. N.; Tuttle, M. E.: An Examination of the Influence of Residual Stresses on the Fatigue and Fracture of Railroad Rail. Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 776. American Society for Testing and Materials, 1982. p. 172-194.
- [9] MSZ 6855/2-1988: Fémek törésmechanikai vizsgálata. Általános vizsgálati előírások.
- [10] MSZ 4927-1976: Fémek K_{IC} törési szívósságának meghatározása.
- [11] Owen, D.B.: Handbook of Statistical Tables. (Sbornik Statisticheskikh tablic.) Vychislitel'nyj Centr AN SSSR, Moskva, 1973.
- [12] Tóth, L.: Matematikai statisztikai módszerek alkalmazása mérési eredmények kiértékelésére. Nehézipari Műszaki Egyetem, Miskolc, 1980.
- [13] Taylor, D.: A Compendium of Fatigue Thresholds and Growth Rates. Engineering Materials Advisory Services Ltd., Warley, 1985.
- [14] Pusch, L. G. et al.: Bruchmechanische Bewertung von Schweissverbindungen höherfester Baustähle bei zyklischer mechanischer Beanspruchung. Neue Hütte, (31) Heft 5, Mai 1986, p. 161-166.
- [15] Blumenauer, H.; Pusch, G.: Technische Bruchmechanik. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig, 1992.

Az alkalmazott kutatás újjászerveződése

Megnyílt a BAYATI



A honi műszaki és természettudományi alkalmazott kutatás támogatására, az OMFB által 1992-ben alapított Bay Zoltán alkalmazott Kutatási Alapítvány országos intézethálózatának újabb intézménye a Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézet, (BAYATI – Budapest, XI., Kondorfa utca 1.). Az intézet ünnepélyes megnyitására ez év szeptember 4-én került sor.

Az ünnepség díszvendége Bay Zoltánné volt. Számos honi és külföldi kutatási és oktatási intézmény képviselőinek, illetve a kezdetektől együttműködő partner, a német Fraunhofer Intézet vezetőinek, továbbá diplomaták, kormánytagok jelenlétében Pungor Ernő akadémikus, az alapítvány kuratóriumának elnöke méltatta a névadó érdemeit. Kiemelte az intézethálózatban is követésre méltó munkamódszerét: az elmélet és a gyakorlat összekapcsolását az igényes kutatási célok elérése érdekében.

A BAYATI is, mind Szegeden a Biológiai, és Miskolcon a Logisztikai és Gyártástechnikai Intézet, a szakmailag érdekelt egyetemre települt, és jogilag függetlenül, de szoros munkakapcsolatban dolgozva szolgálják az alapkutatási eredmények hasznosítását és a szakemberképzést. Végül megköszönve az intézet szervezéséhez és felszereléséhez nyújtott támogatásokat átadta a BAYATI kulcsát az intézet igazgatójának, Gyulai József akadémikusnak.

Az igazgató intézetet bemutató beszédéből megtudtuk, hogy már a szerveződés időszakában is, 1993 őszétől kezdve, a hazai és külföldi intézményekkel együttműködve, megbízásos kutatásokat végezve alakították ki szakterületüket, amely kiterjed a szerkezeti anyagok teljes

körére, a fémekre és ötvözetekre, a polimerekre, a kerámiákra és a kompozitokra, illetve az előállításukkal, feldolgozásukkal kapcsolatos technológiákra, tulajdonságaik vizsgálatára, az anyagszerkezet-változással és károsodással járó folyamatok modellezésére, illetve követésére. A munkájukhoz szükséges eszközöket a Budapesti Műszaki Egyetemmel egyeztetve és együttműködve szerzik be. Például, közösen használják az egyetem tulajdonában lévő plazmaszóró és széndioxid-teljesítménylézer berendezést, közös a polimer-technológiai laboratóriumuk, míg a polimerek felületkezelésére alkalmas elektronbesugárzó és gyorsító berendezést az intézet technológiai csarnokába telepítik. A fémtani laboratóriumban fény- és elektronmikroszkópok, dilatometer, DTA-berendezés és egyéb eszközök segítik a kutatók munkáját.

A megnyitóra rögtönzött poszterekből az eddigi kutatások eredményeiből részleteket is megtudhattak a kötetlen eszmecserevel záruló ünnepség résztvevői.

Kiemelhető eredmény a nagy igénybevételnek kitétt megalakító szerszámok lézeres felületnemesítésével elérhető két-háromszoros élettartam. Az eljárást az Institut für Produktionstechnologie, Aachen, és a Lézer Kft-vel együttműködve fejlesztették ki és alkalmazták sikerrel a Rába Rt-nél. De figyelemre méltó a plazmaionitridálás felületnemesítési eljárás sikeres alkalmazása a humánimplantátumok, például csípőprotézis, használati idejének megnövelésére.

Az intézetnyitói ünnepség a szétesett alkalmazott kutatás új rendező elvek és érdekeltségek mentén történő újjászervezhetőségét igazolta.

-ferko-