

KORSZERŰ ANYAGOK HEGESZTHETŐSÉGE ANKÉT

A HEGESZTETT KÖTÉS HŐHATÁSÖVEZETÉBEN BEKÖVETKEZŐ VÁLTOZÁSOK NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOKNÁL



Prof. Dr. Gáspár Marcell, egyetemi tanár

Dr. Pap Judit, adjunktus



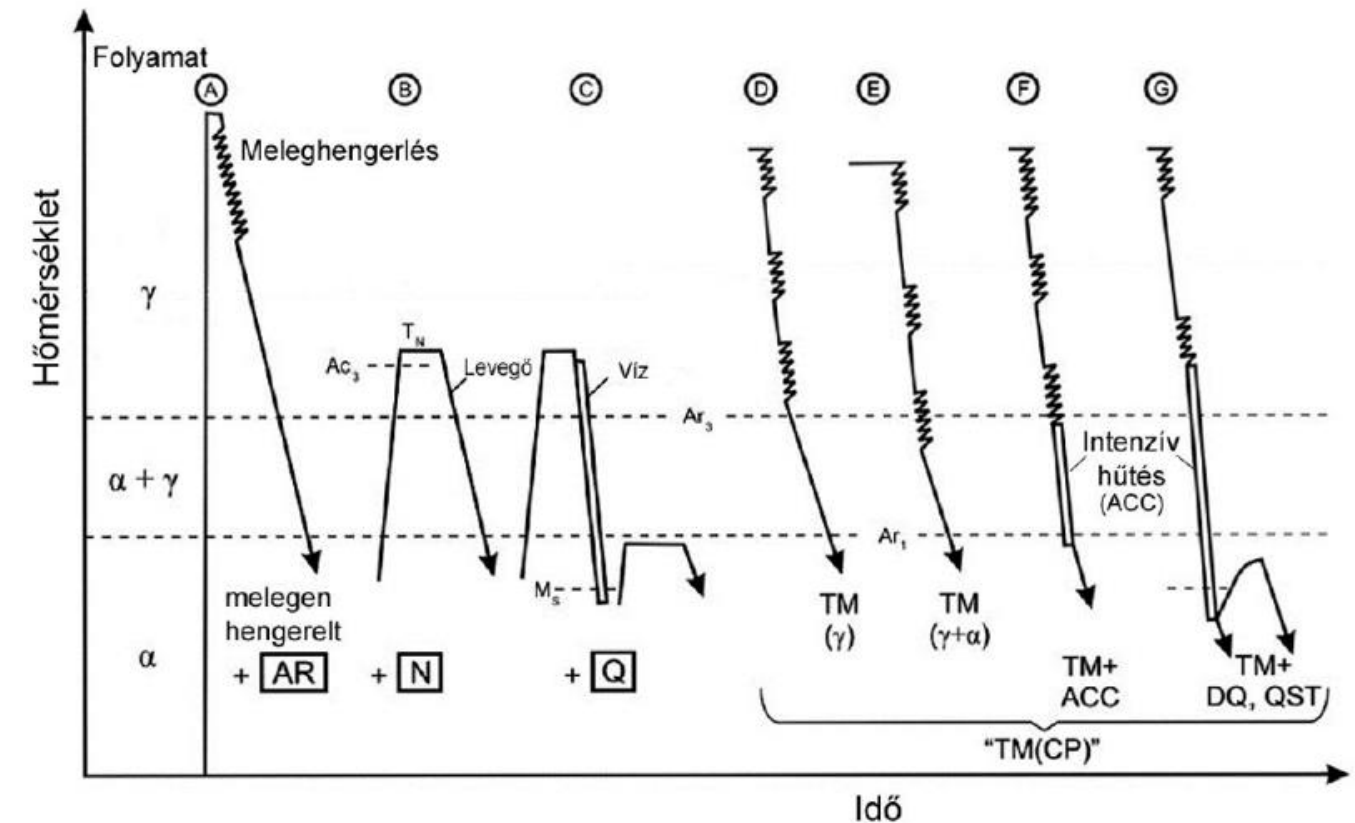
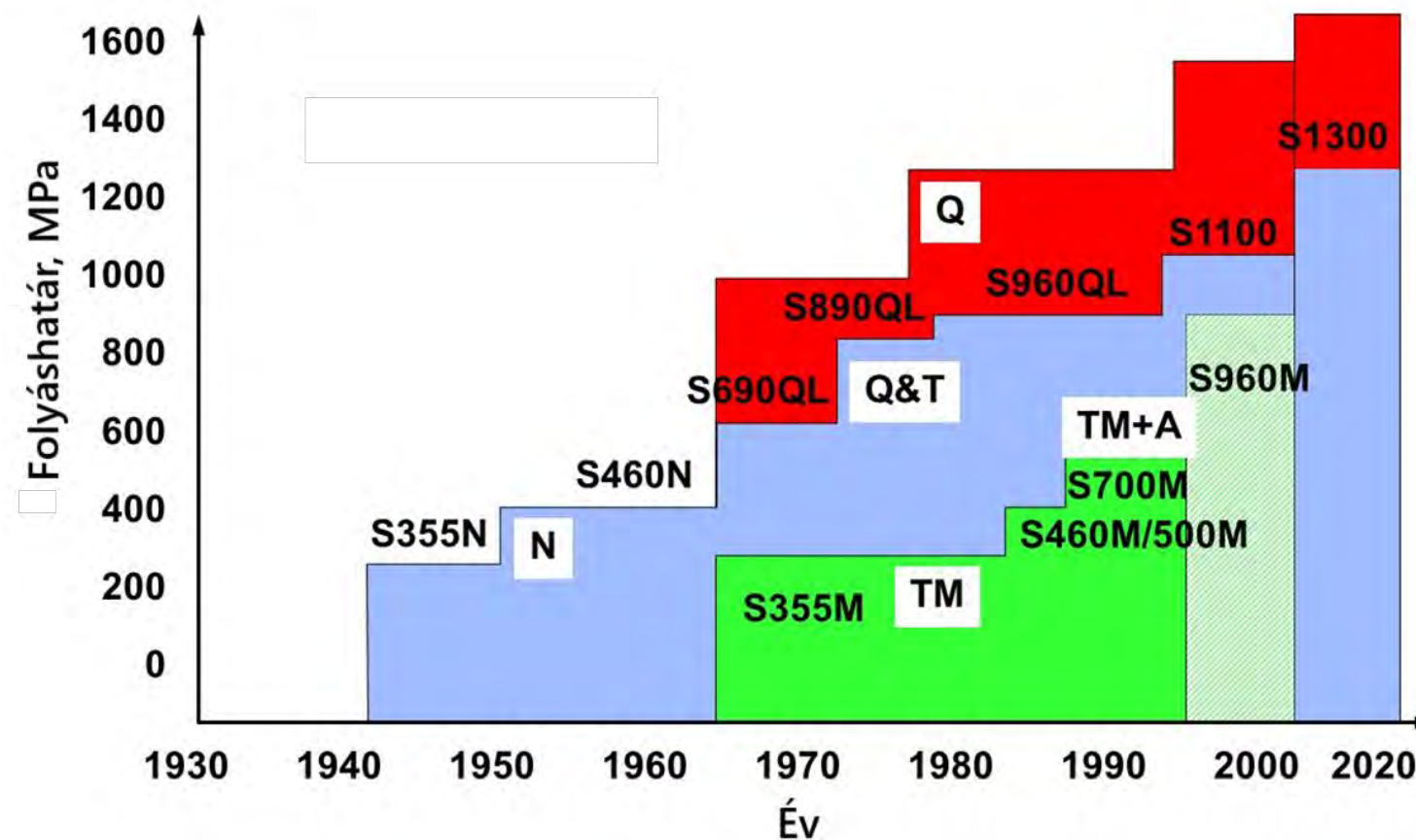
Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki és Informatikai Kar
Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet

TARTALOM

- ✓ Bevezetés, motiváció
- ✓ Alapanyagok és jellemzőik
- ✓ Fizikai szimulációs vizsgálatok
- ✓ Anyagvizsgálatok, műszerezett ütésvizsgálat
- ✓ Összefoglalás és következtetések

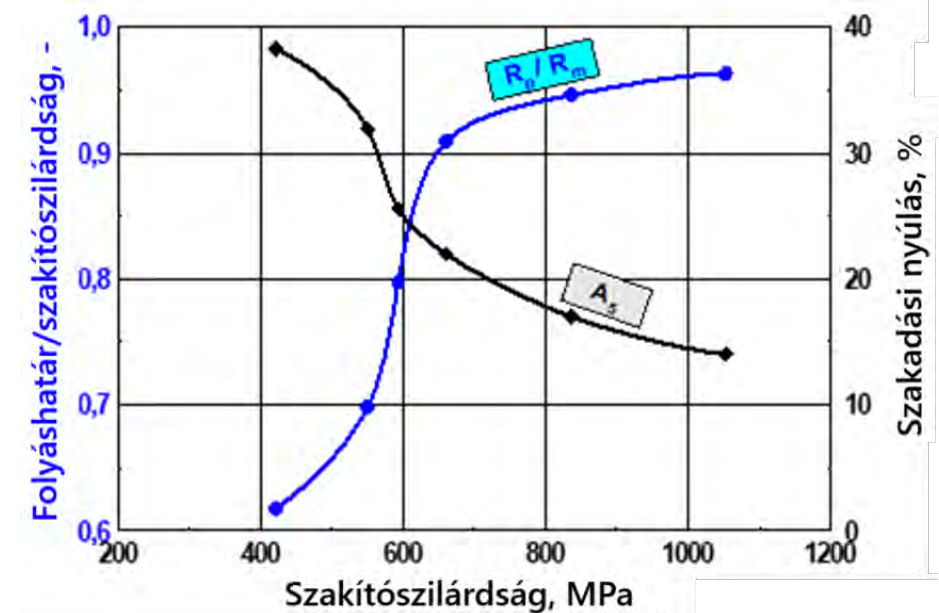
MOTIVÁCIÓ

✓ A szerkezeti acélok fejlesztési tendenciái



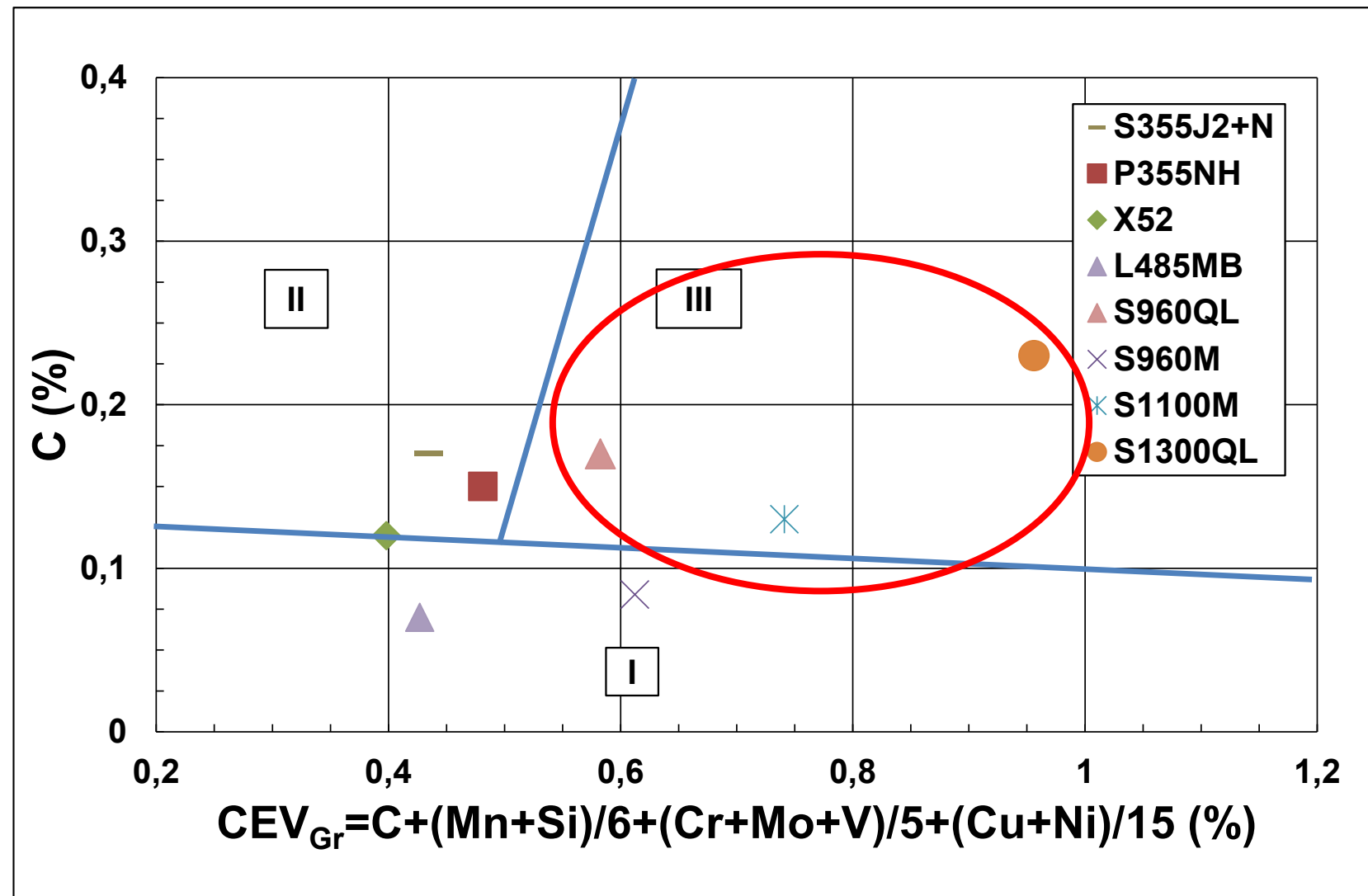
MOTIVÁCIÓ

- ✓ A nagyszilárdságú acélokat (S960QL-ig) viszonylag széles körben alkalmazzák hegesztett szerkezetekben (pl. daruk, munkagépek, teherautók stb.).
- ✓ Az irányadó európai alapanyag-szabványok (EN 10025-6, EN 10149-2) 960 MPa folyáshatárig tartalmazznak előírásokat.
- ✓ Az ipar még mindig visszafogottan alkalmazza a nagyobb szilárdságú anyagokat (S1100, S1300), mivel ezek hegeszthetőségéről korlátozottak az ismeretek.



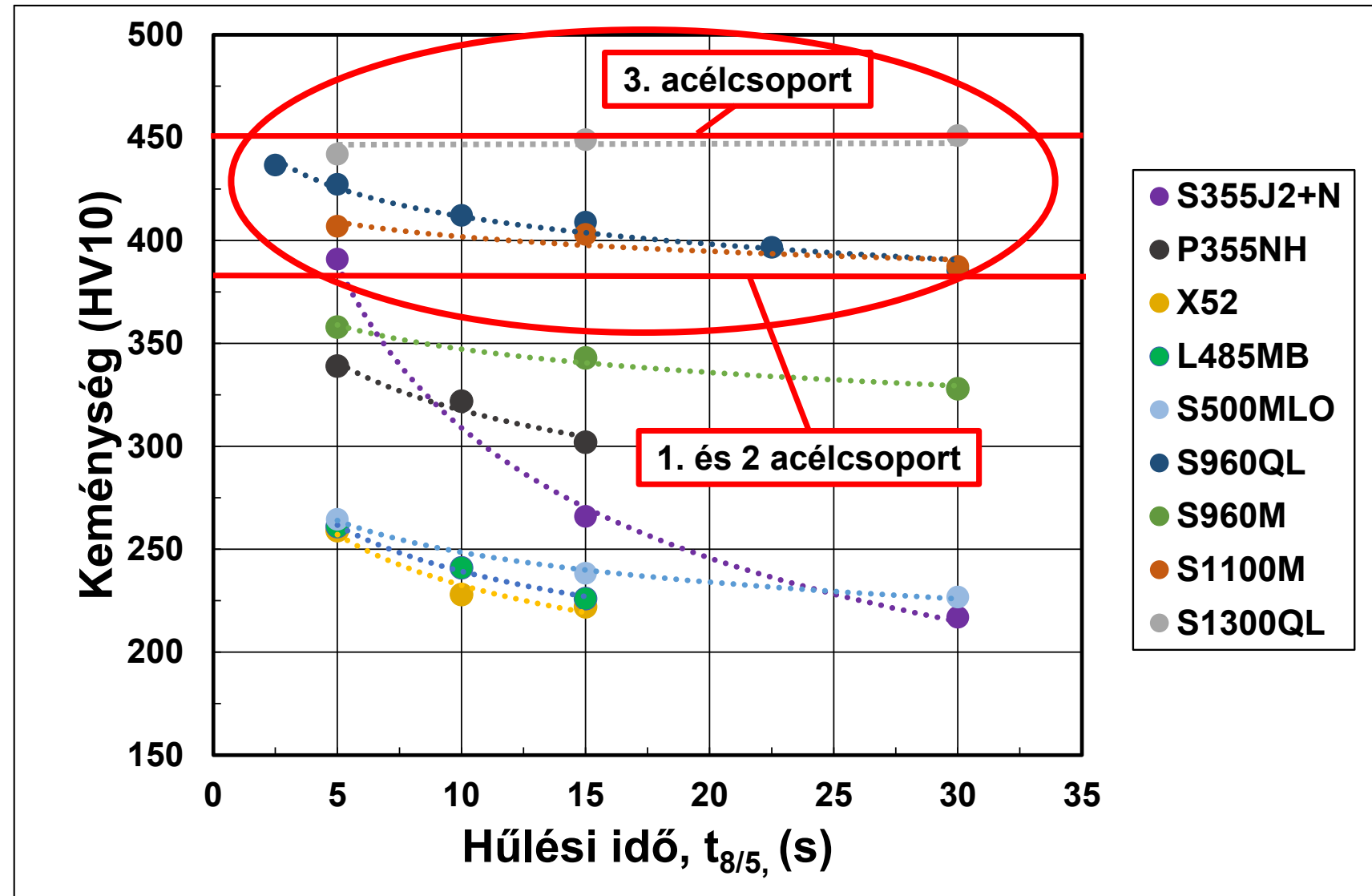
HEGESZTÉSI NEHÉZSÉGEK

✓ Graville diagram



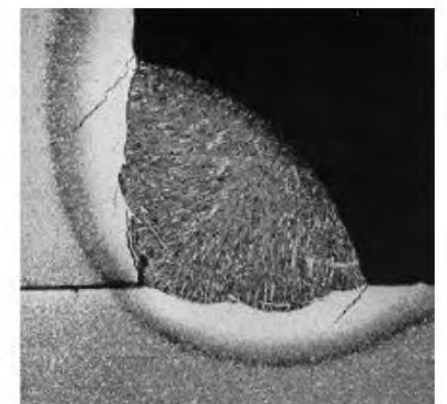
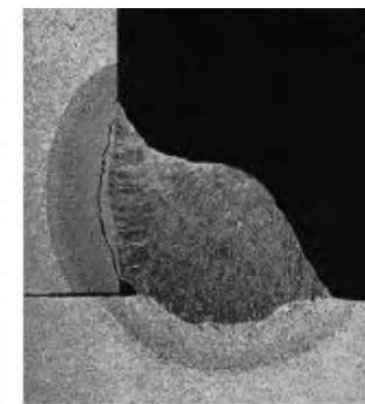
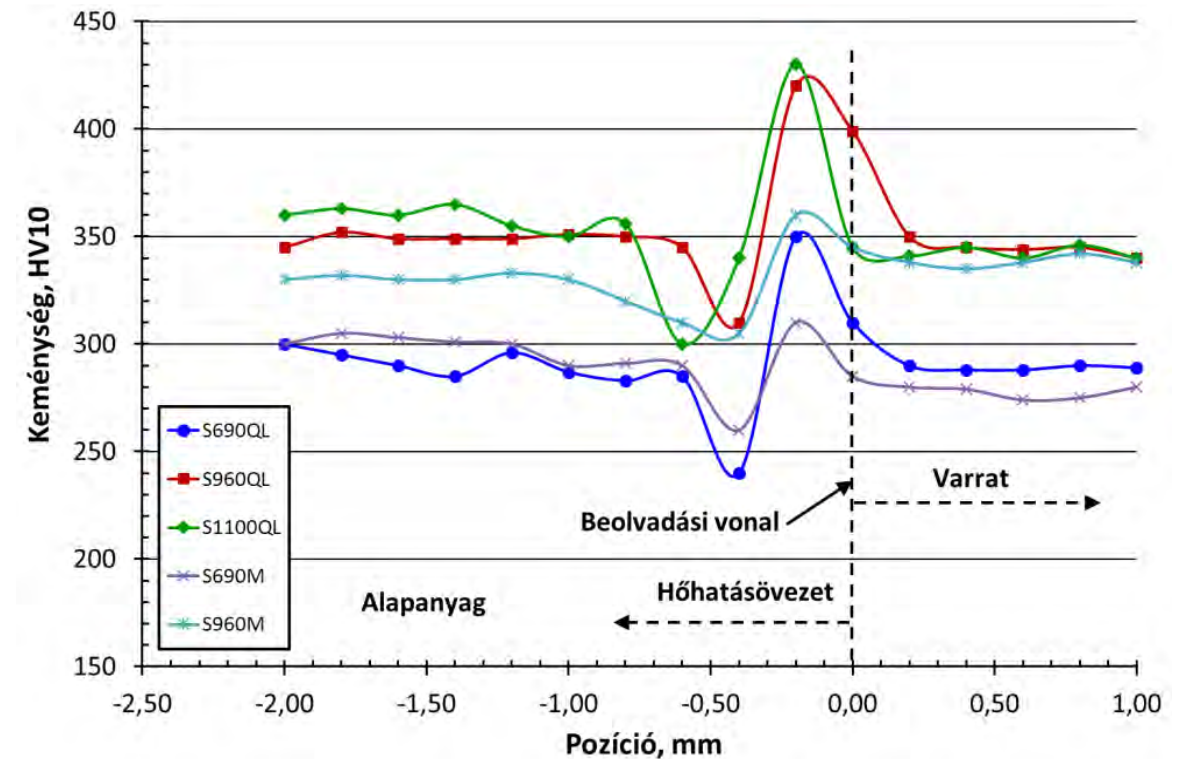
HEGESZTÉSI NEHÉZSÉGEK

✓ Durvaszemcsés sáv keményedési hajlama



HEGESZTÉSI NEHÉZSÉGEK

- ✓ Inhomogén hőhatásövezet
 - Szívósság csökkenés (LBZ)
 - Keményedés/kilágyulás
- ✓ Hidegrepedés
 - H diffúzió
 - Húzófeszültség
 - Nagy karbon egyenérték (CEV)
- ✓ Matching problémakör (mismatch)



A VIZSGÁLT ALAPANYAGOK ÉS JELLEMZŐIK

✓ Mechanikai tulajdonságok:

Alapanyag	Vastagság, mm	Keménység, HV10	R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	A ₅ , %	Ütőmunka, J (-40°C-on)
S960QL	15	340	1014	1053	14	164
S1100M	15	394	1193	1221	11,6	88
S1300QL	10	468	1300	1560	12	78

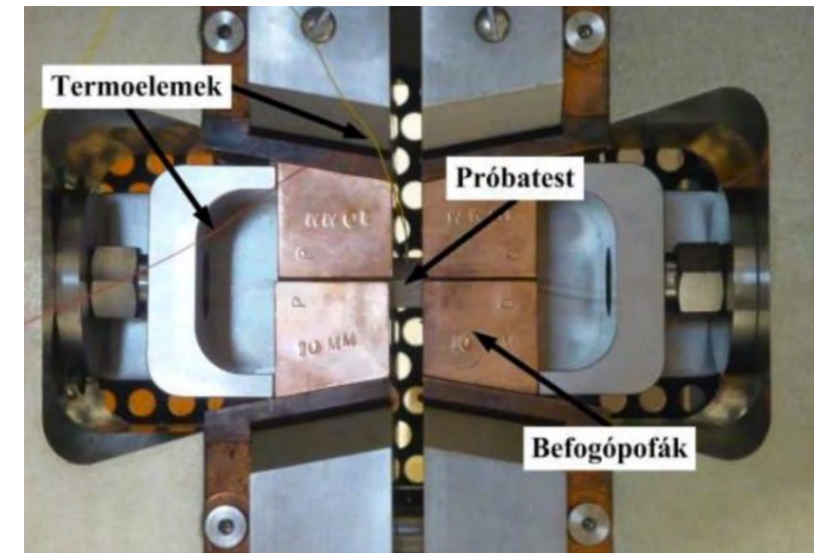
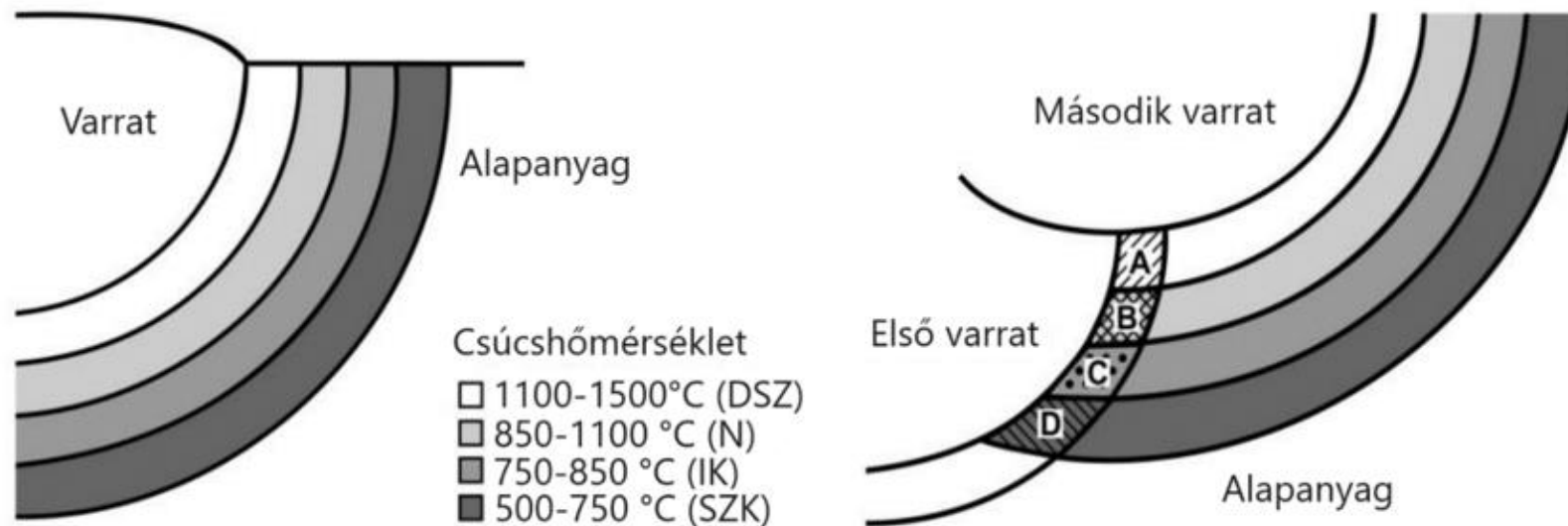
✓ Kémiai összetétel:

Alapanyag	Kémiai összetétel, tömeg%							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni
S960QL	0,17	0,23	1,23	0,011	0,001	0,2	0,01	0,04
S1100M	0,13	0,32	1,62	0,009	0,0015	0,63	0,047	0,32
S1300QL	0,23	0,45	1,86	0,012	0,001	0,85	0,093	2,43
	Mo	V	Ti	Al	Nb	Zr	B	N
S960QL	0,588	0,041	0,004	0,061	0,017	N/A	0,001	0,002
S1100M	0,62	0,066	0,011	0,035	0,037	N/A	0,0014	N/A
S1300QL	0,360	0,030	0,002	0,063	<0,001	<0,001	N/A	N/A

Alapanyag	CEV, %	CET, %
S960QL	0,54	0,36
S1100M	0,68	0,39
S1300QL	0,956	0,56

FIZIKAI SZIMULÁCIÓ

- ✓ Gleeble 3500 fizikai szimulátor
- ✓ Vizsgált hőhatásövezeti sávok (HAZ)
 - Durvaszemcsés (CGHAZ)
 - Interkritikus (ICHAZ)
 - Interkritikus durvaszemcsés (ICCGHAZ)

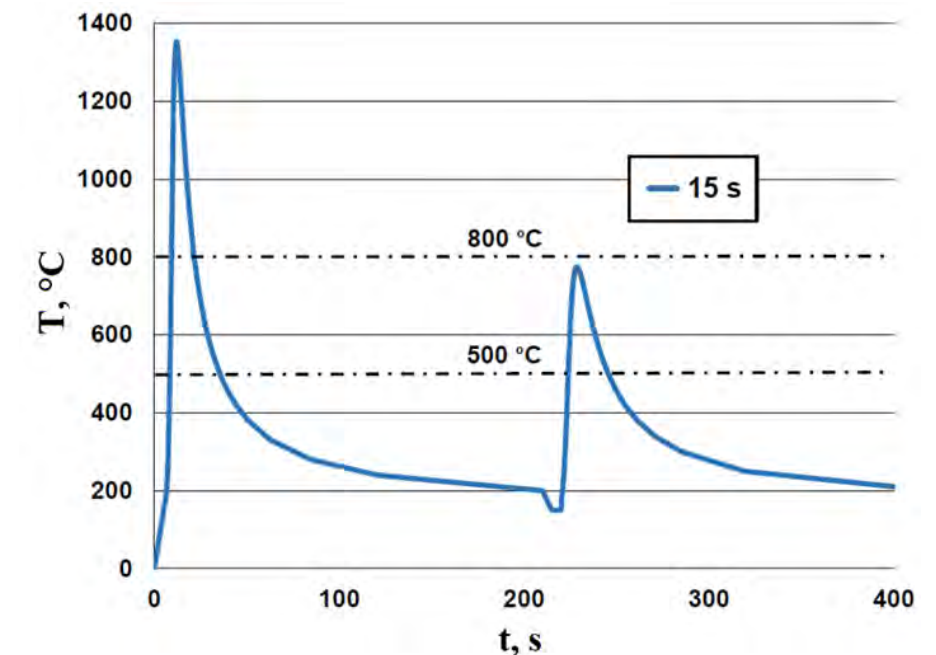
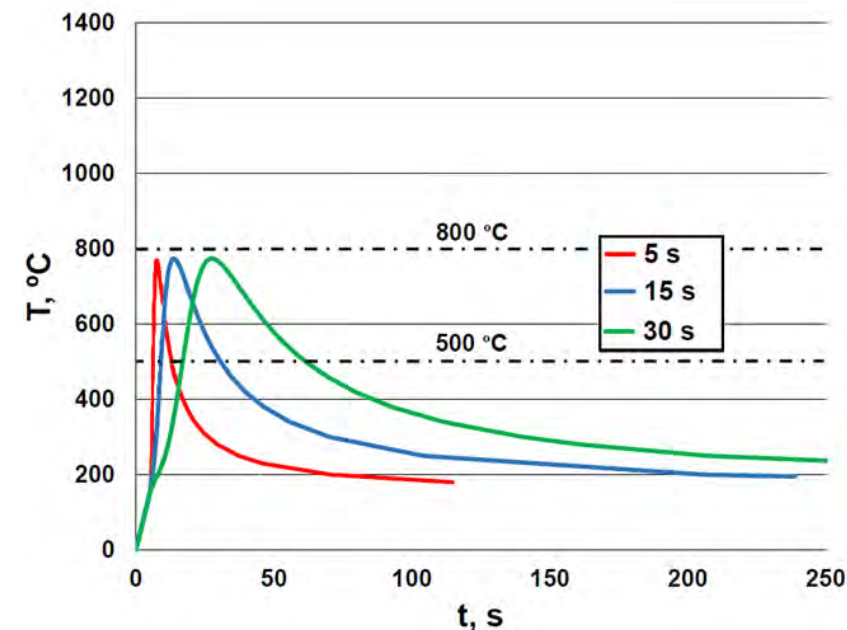
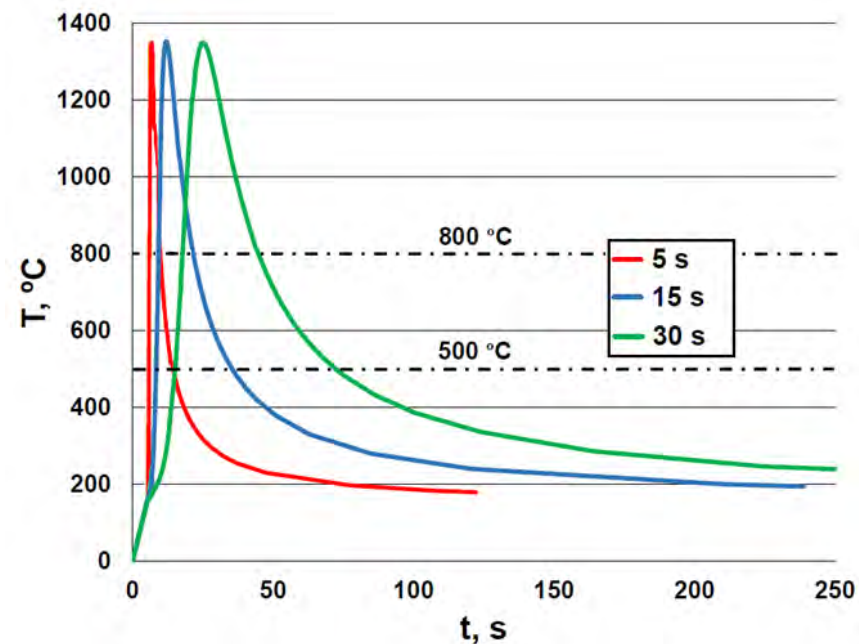


- ✓ A vizsgált $t_{8/5}$ hűlési idő tartomány GMAW eljáráshoz: 5-30 s

FIZIKAI SZIMULÁCIÓ

✓ A programozott hőciklusok és paramétereik

Hőhatásövezeti sáv	Csúcshőmérséklet [°C]		$t_{8/5}$ hűlési idő [s]
	T_{max1}	T_{max2}	
CGHAZ	1350	N/A	5, 15, 30
ICHAZ	775	N/A	5, 15, 30
ICCGHAZ	1350	775	5, 15, 30



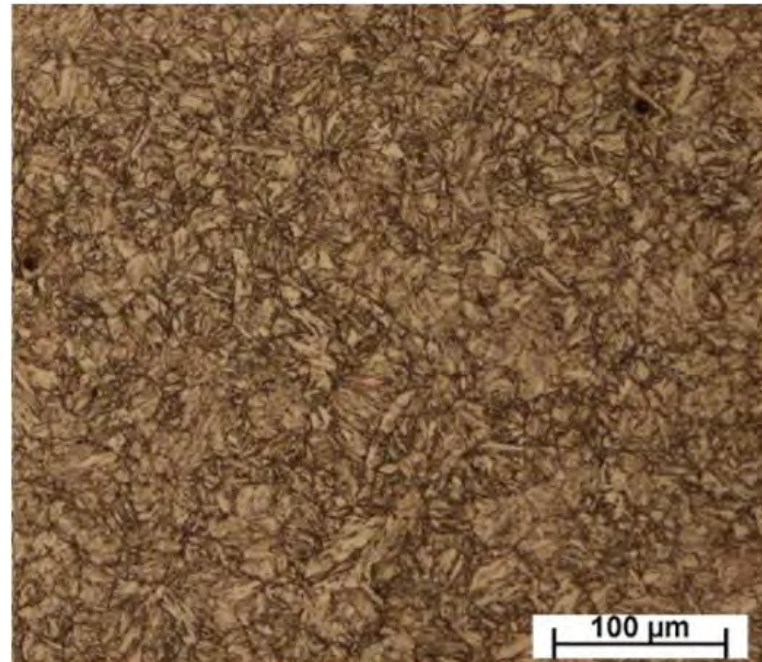
ANYAGVIZSGÁLATOK

- ✓ Mikroszkópos vizsgálatok
- ✓ Keménységmérések
- ✓ Műszerezett ütésvizsgálatok

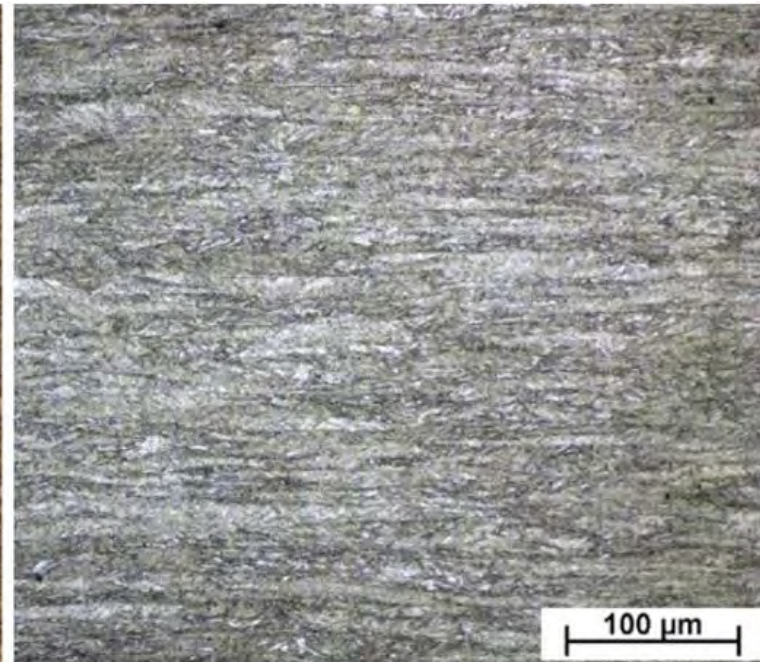
MIKROSZERKEZETI TULAJDONSÁGOK

✓ Alapanyagok (M=200x, maratás: 2% Nital)

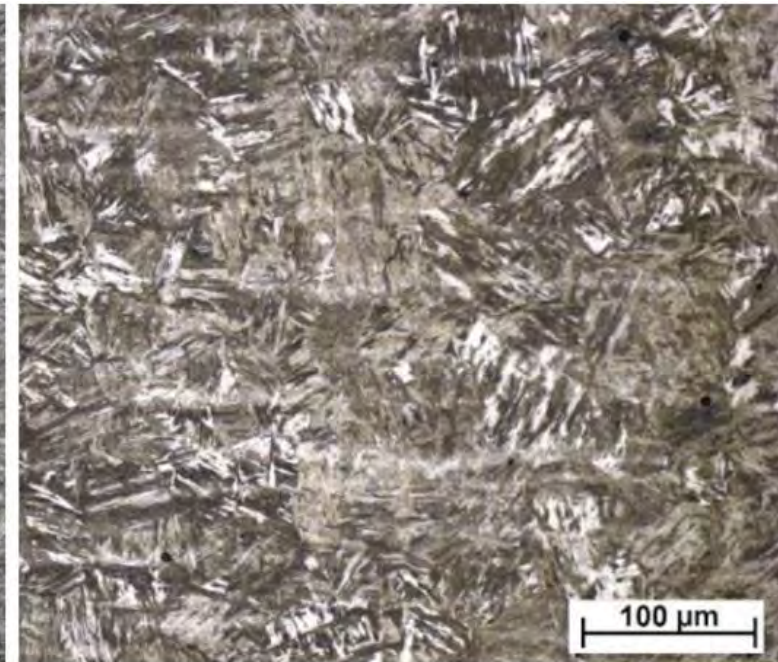
S960QL



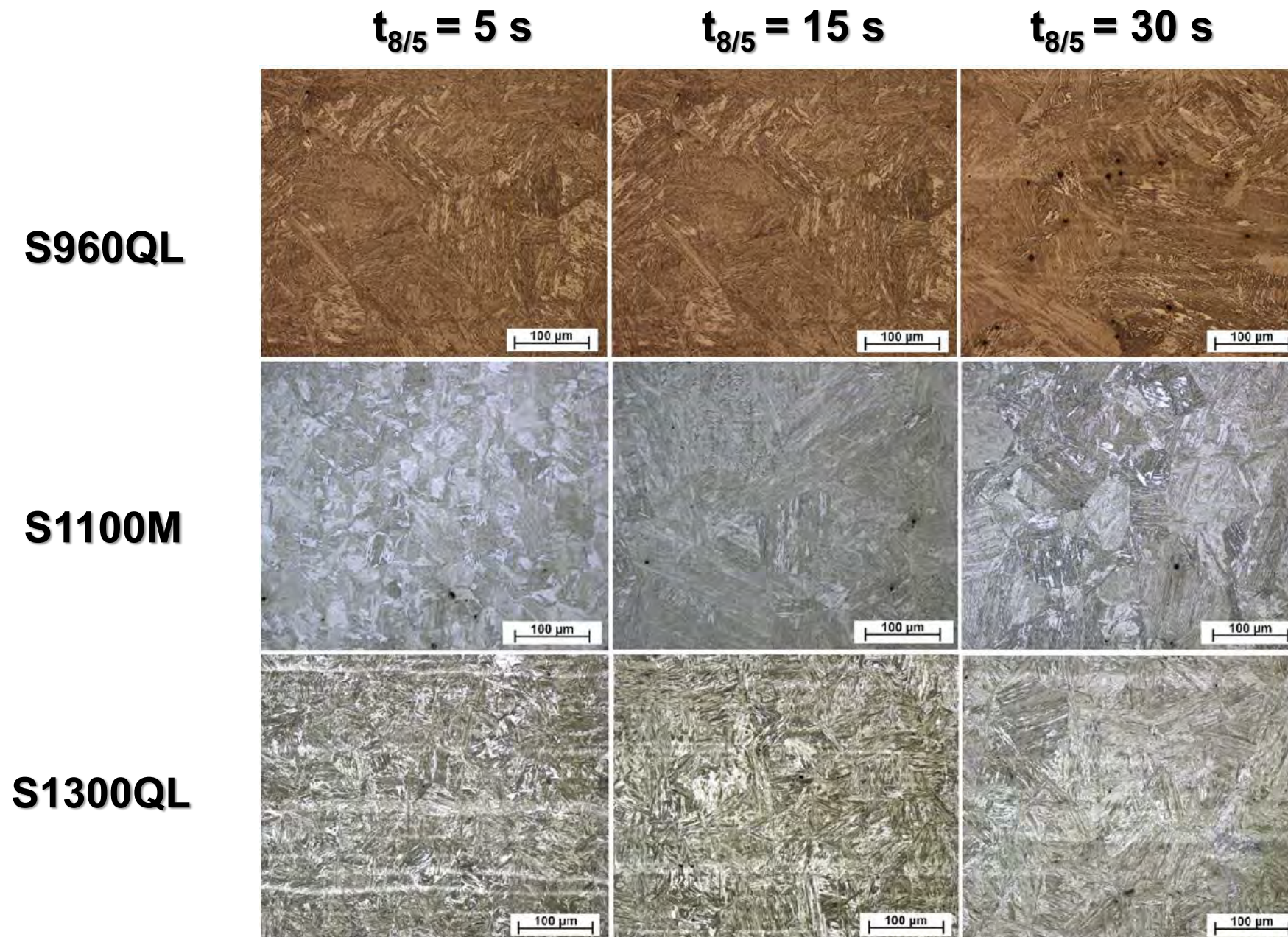
S1100M



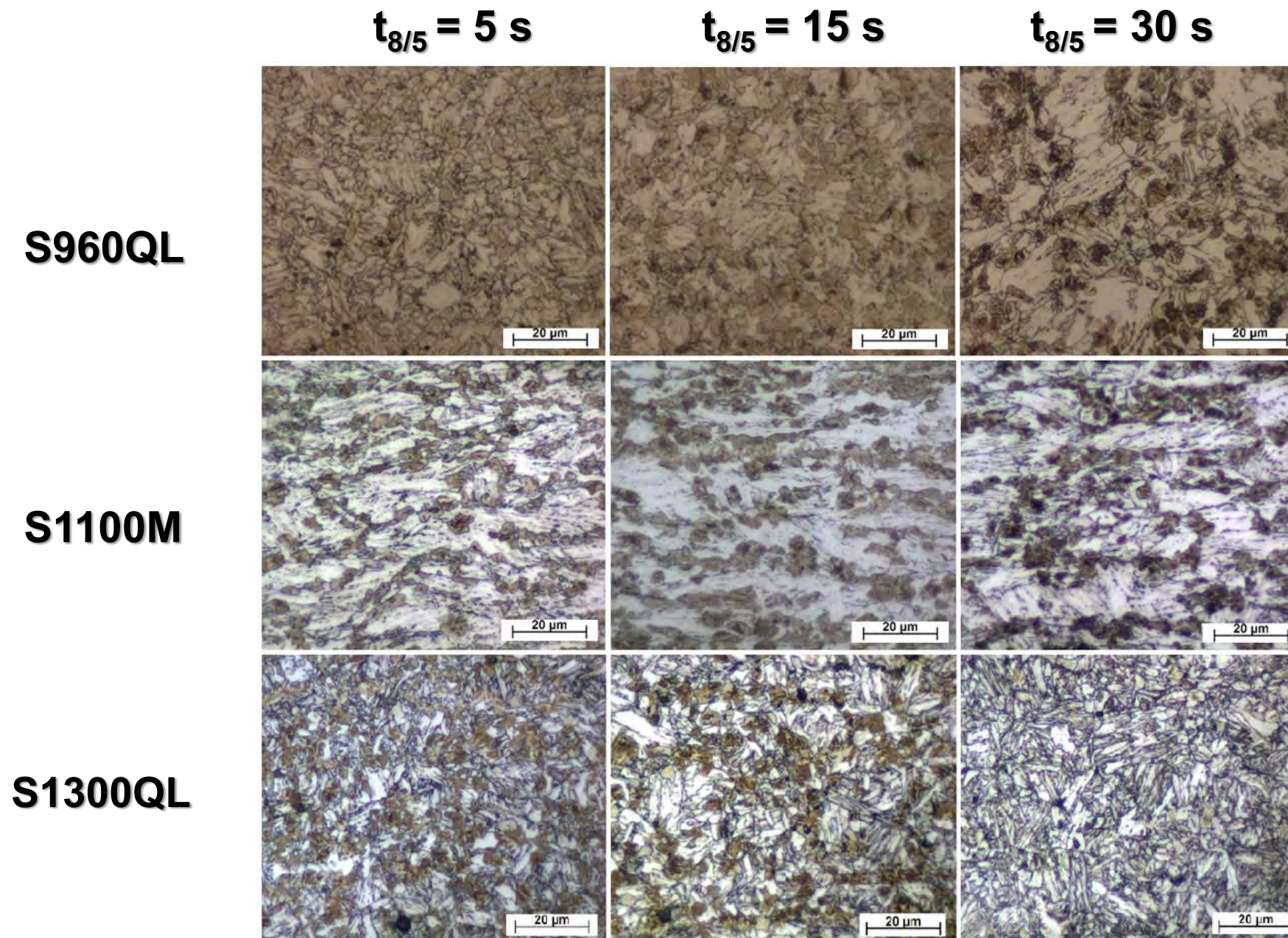
S1300QL



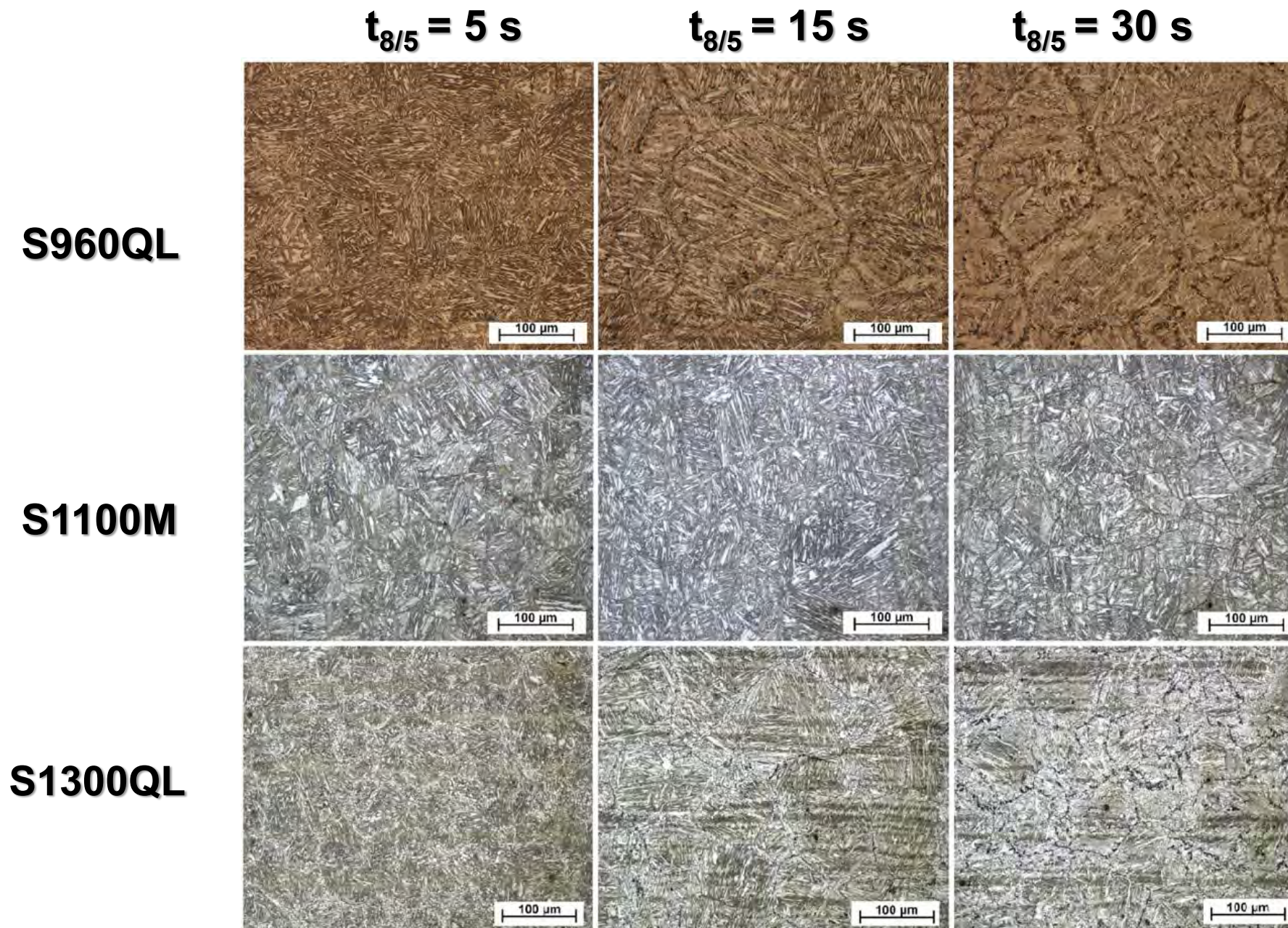
MIKROSZERKEZETI TULAJDONSÁGOK - CGHAZ



MIKROSZERKEZETI TULAJDONSÁGOK - ICHAZ



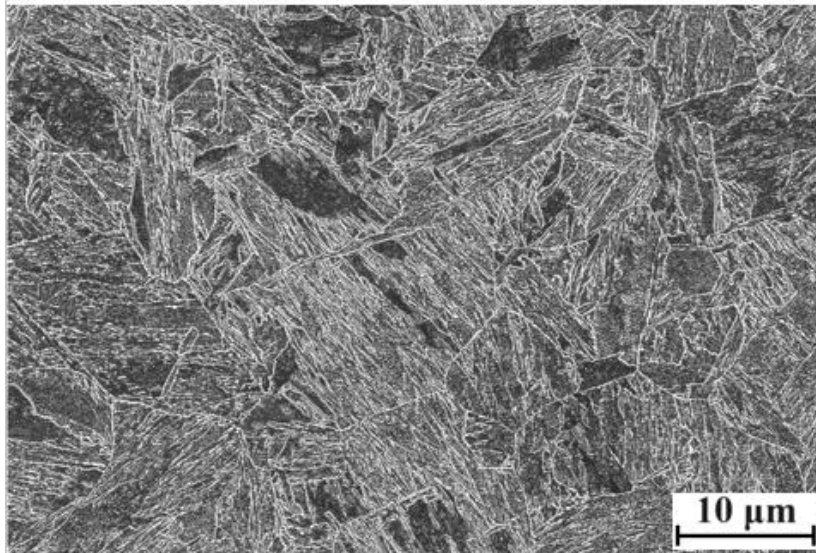
MIKROSZERKEZETI TULAJDONSÁGOK - ICCGHAZ



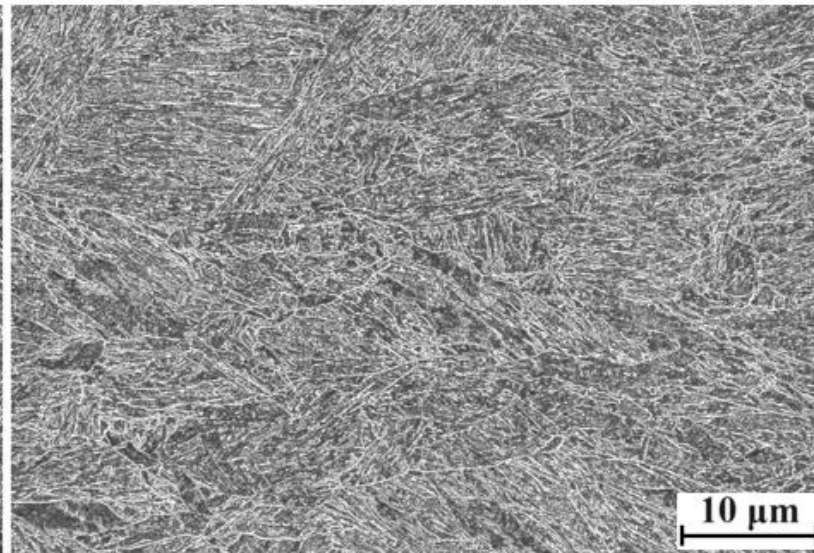
MIKROSZERKEZETI TULAJDONSÁGOK

✓ Alapanyagok (M=5000x, maratás: 2% Nital)

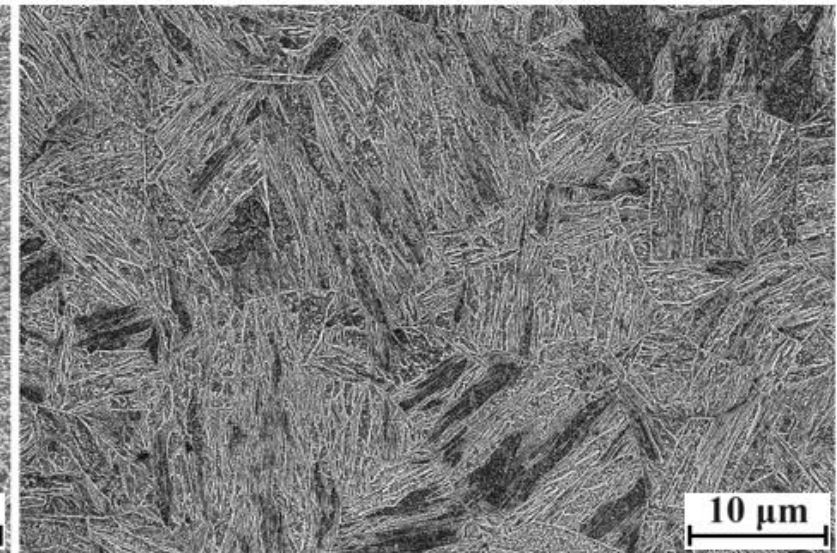
S960QL



S1100M



S1300QL



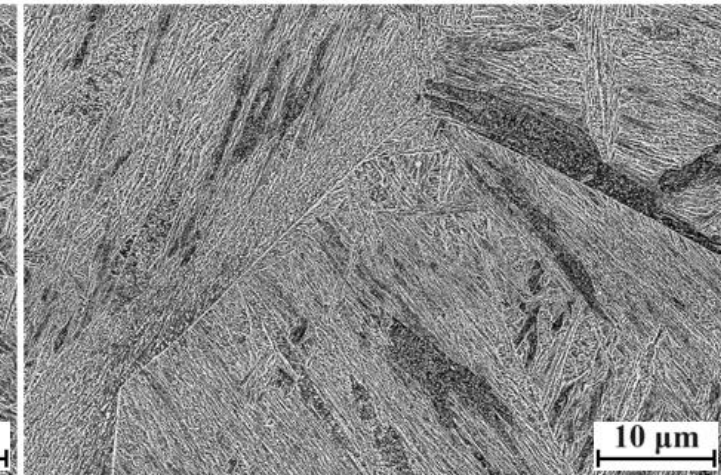
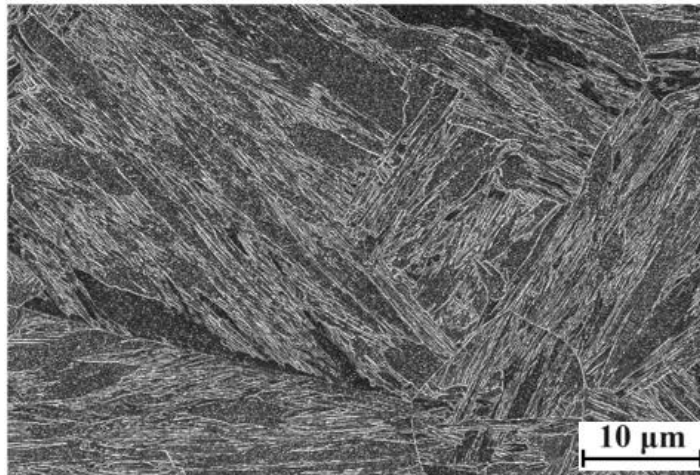
MIKROSZERKEZETI TULAJDONSÁGOK – S1300QL

$t_{8/5} = 5 \text{ s}$

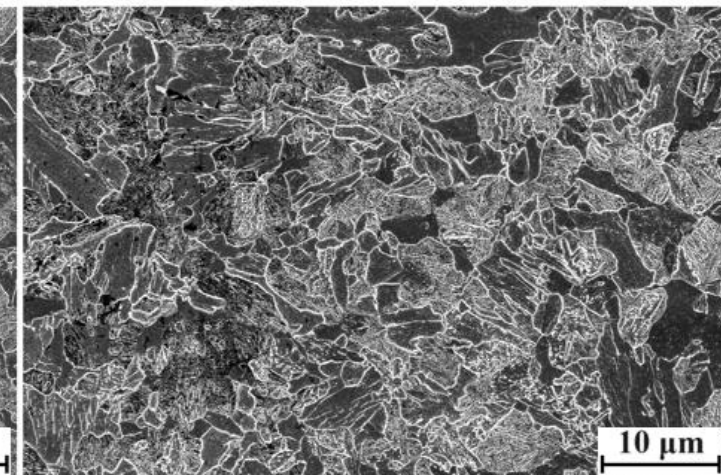
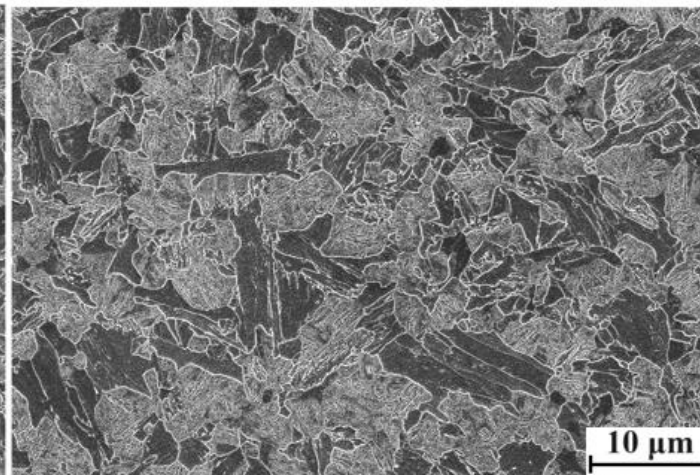
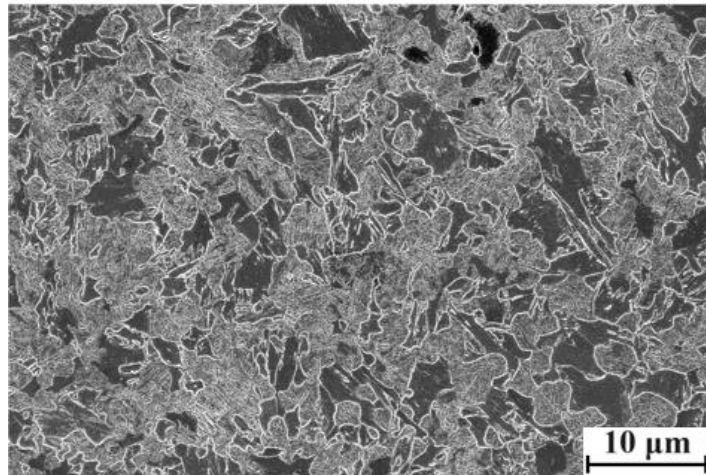
$t_{8/5} = 15 \text{ s}$

$t_{8/5} = 30 \text{ s}$

CGHAZ



ICHAZ

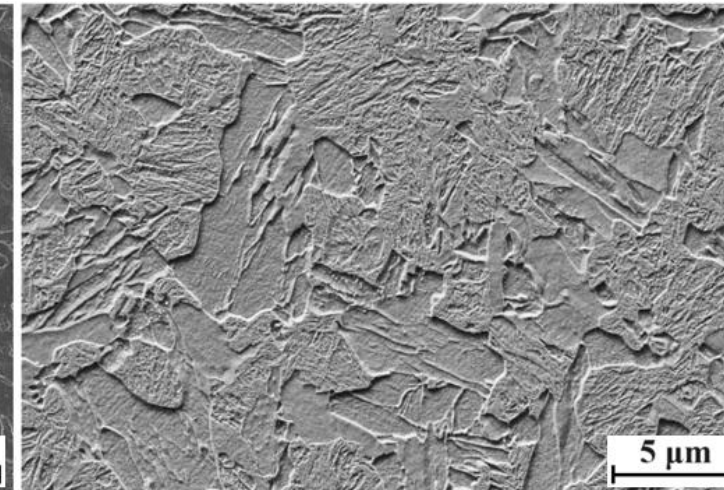
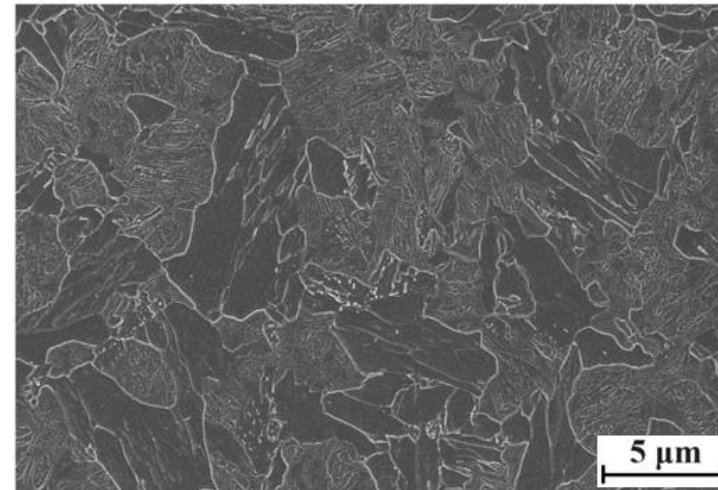


MIKROSZERKEZETI TULAJDONSÁGOK – S1300QL - ICHAZ

InLens

SE2

$t_{8/5} = 15 \text{ s}$

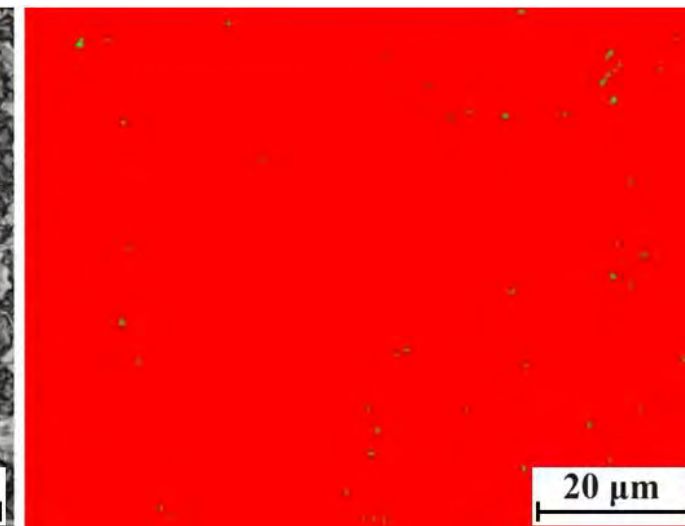
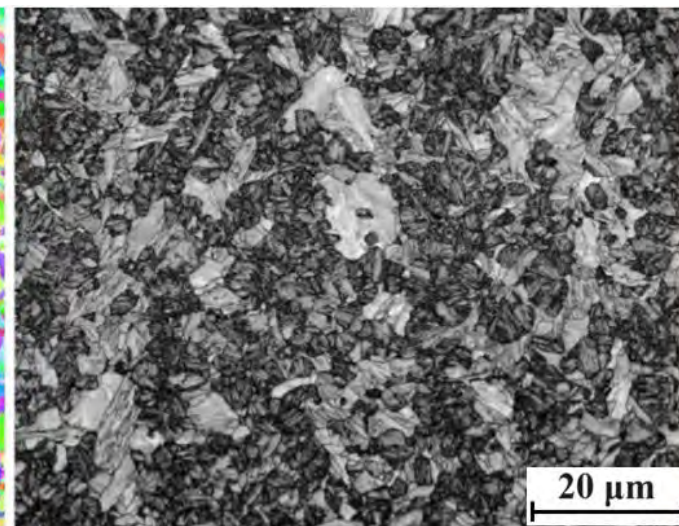
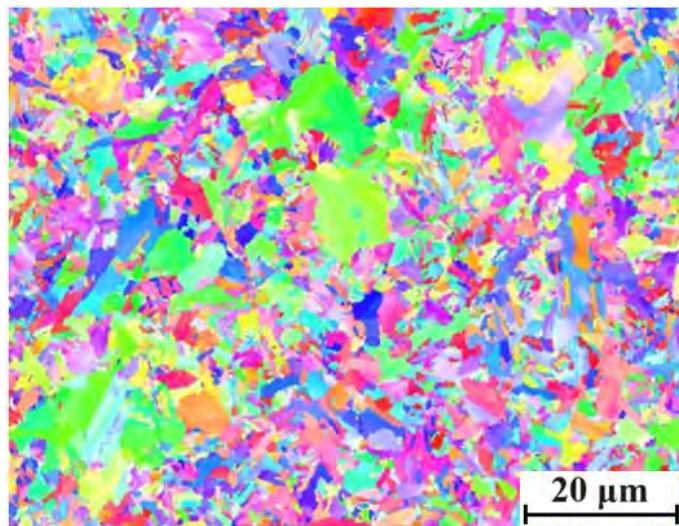


IPF

IQ

Phase

$t_{8/5} = 30 \text{ s}$



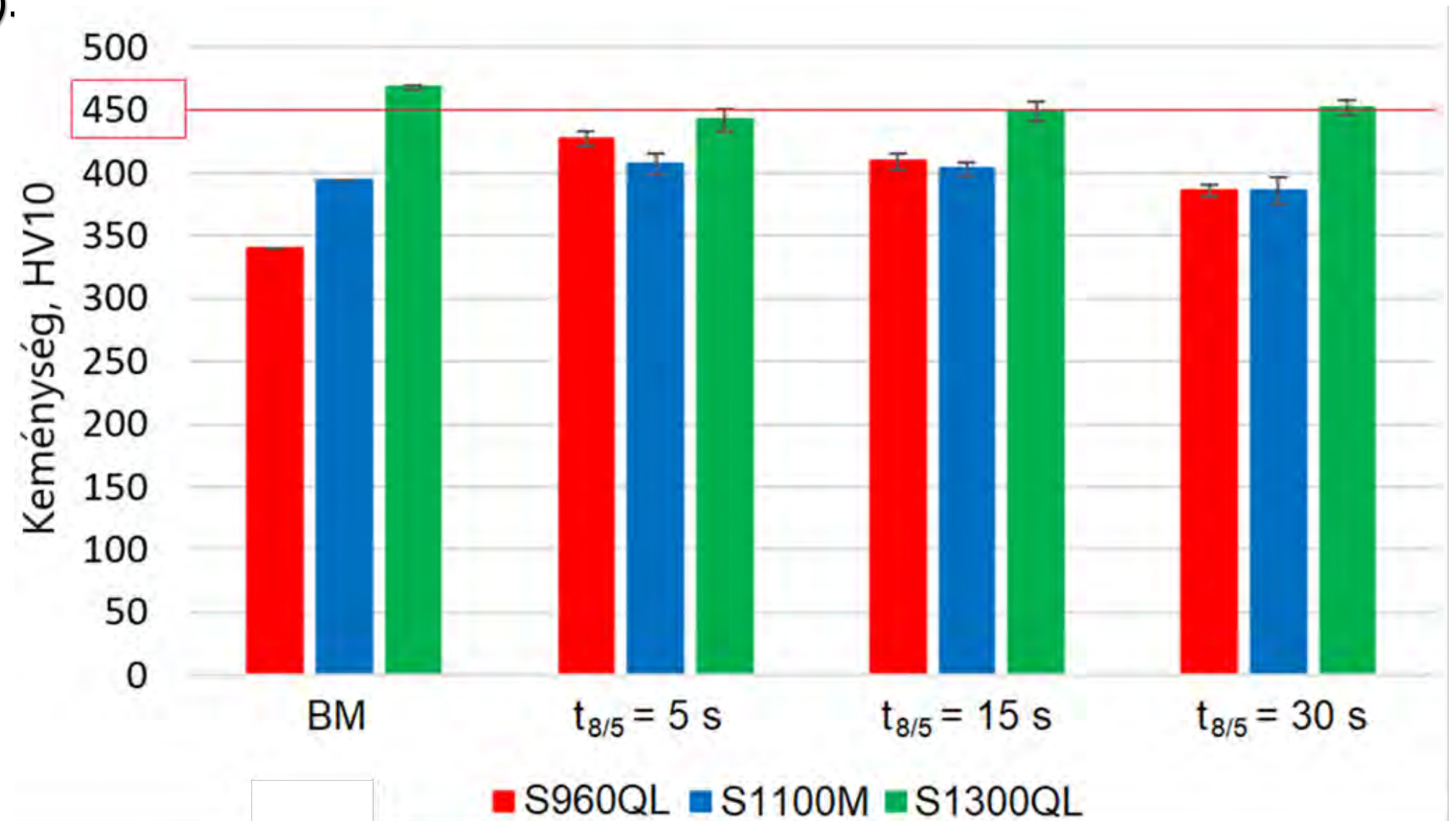
MIKROSZERKEZETI TULAJDONSÁGOK

✓ Kezdeti ausztenit szemcseméret meghatározása

$t_{8/5}$ hűlési idő, s	S960QL		S1100M		S1300QL	
	Átlagos kezdeti ausztenit szemcseméret, μm	Átlagos szórás, μm	Átlagos kezdeti ausztenit szemcseméret, μm	Átlagos szórás, μm	Átlagos kezdeti ausztenit szemcseméret, μm	Átlagos szórás, μm
5	44,438	0,341	26,663	0,117	33,869	0,197
30	66,527	0,387	52,214	0,570	64,595	0,878

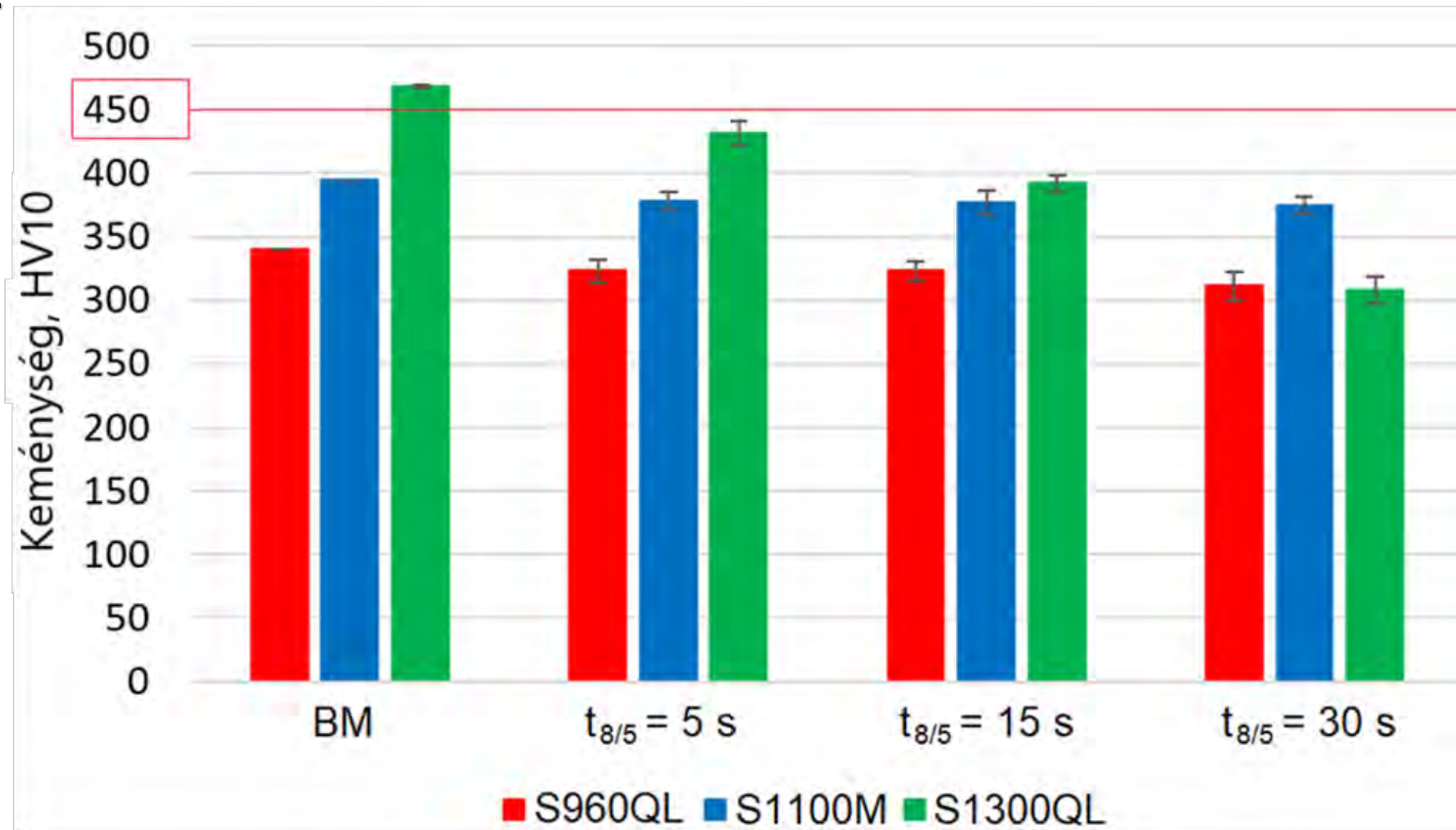
KEMÉNYSÉGMÉRÉSEK - CGHAZ

- ✓ Az EN ISO 15614-1:2017 E szabvány előírásai alapján a megengedett legnagyobb keménység 450 HV10 (S960QL esetén).



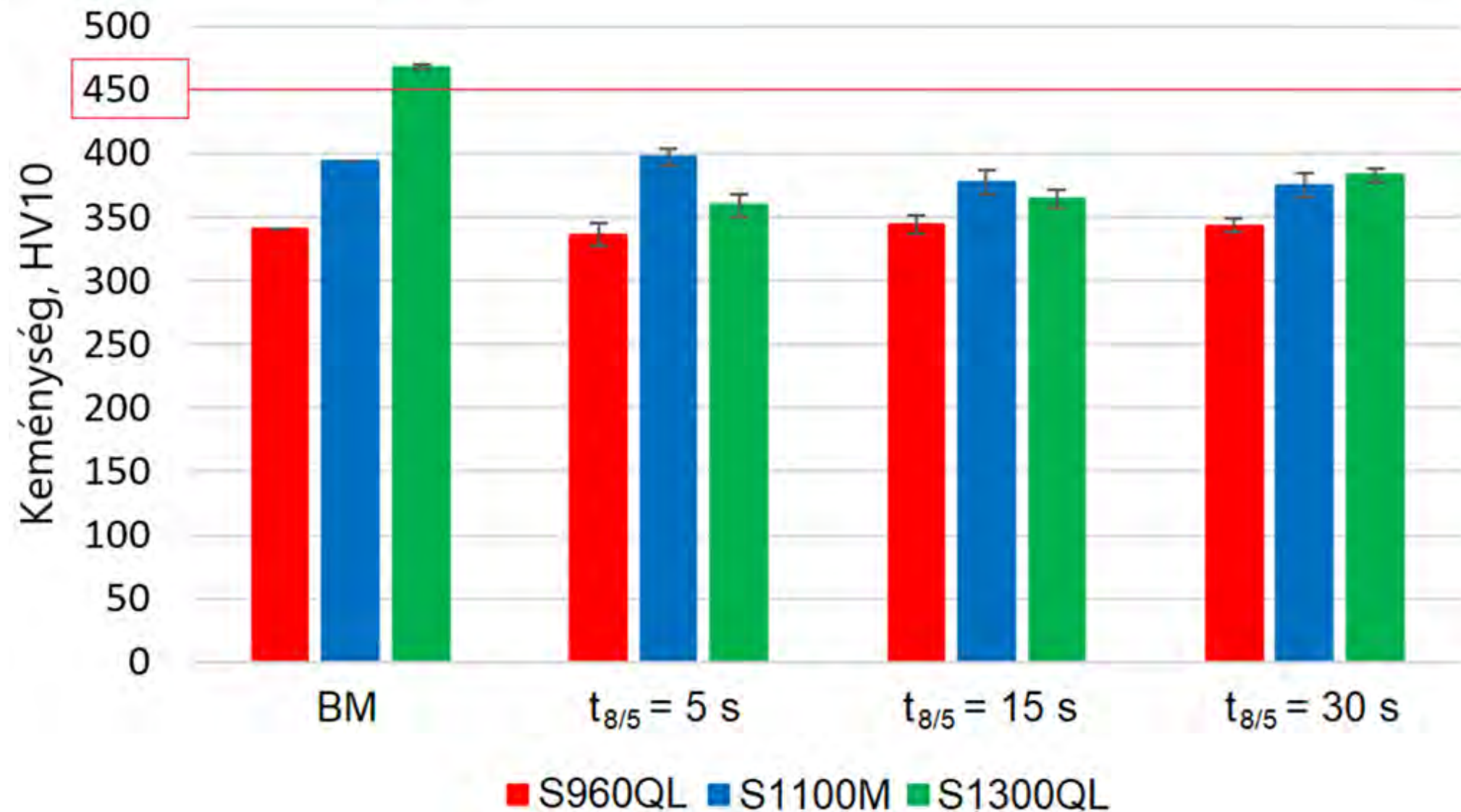
KEMÉNYSÉGMÉRÉSEK - ICHAZ

- ✓ Az EN ISO 15614-1:2017 E szabvány előírásai alapján a megengedett legnagyobb keménység 450 HV10 (S960QL esetén).



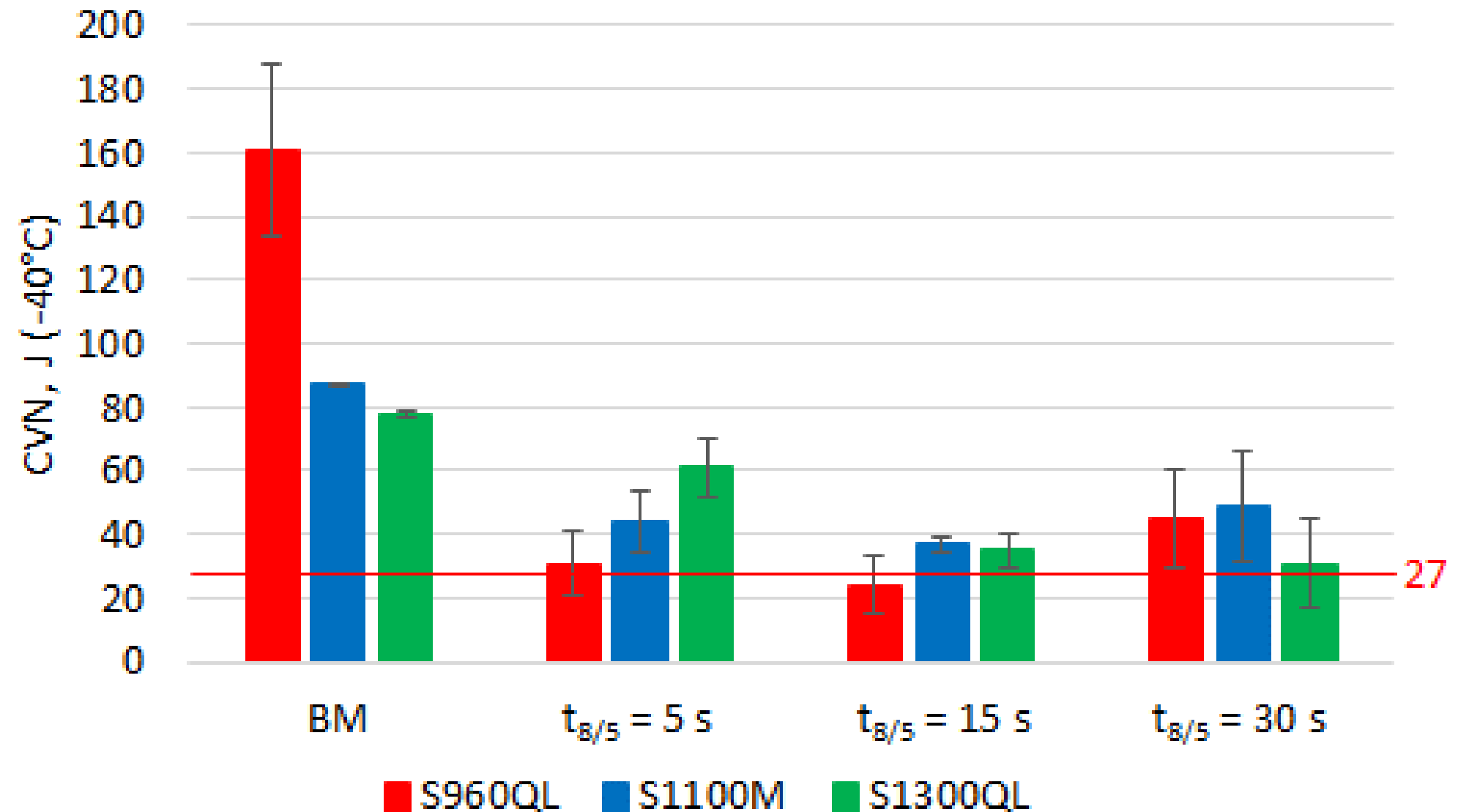
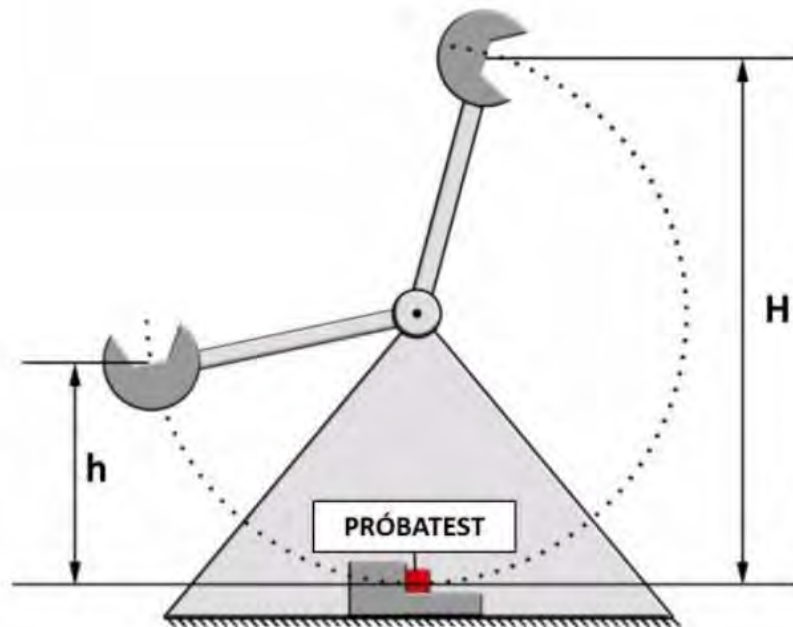
KEMÉNYSÉGMÉRÉSEK - ICCGHAZ

- ✓ Az EN ISO 15614-1:2017 E szabvány előírásai alapján a megengedett legnagyobb keménység 450 HV10 (S960QL esetén).



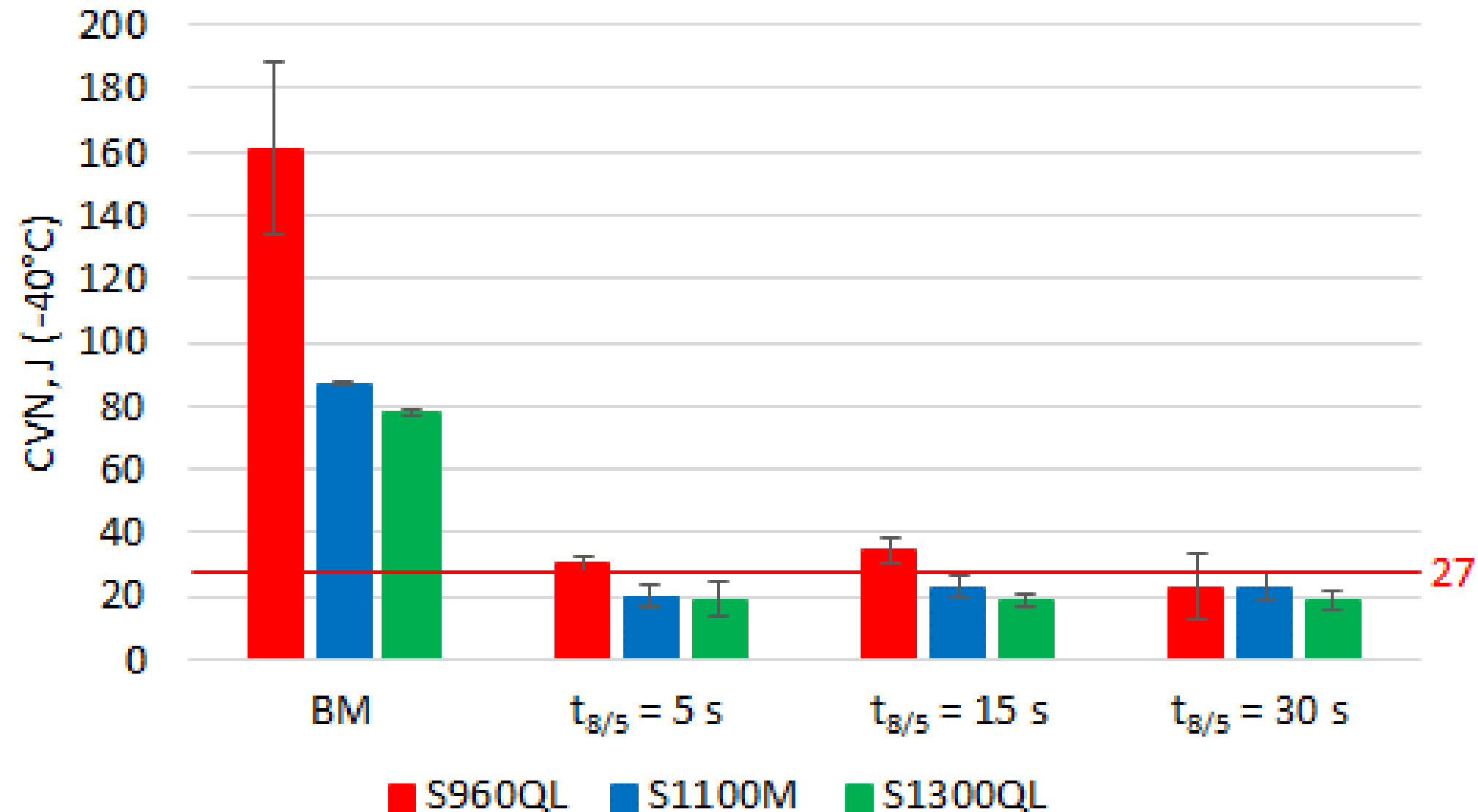
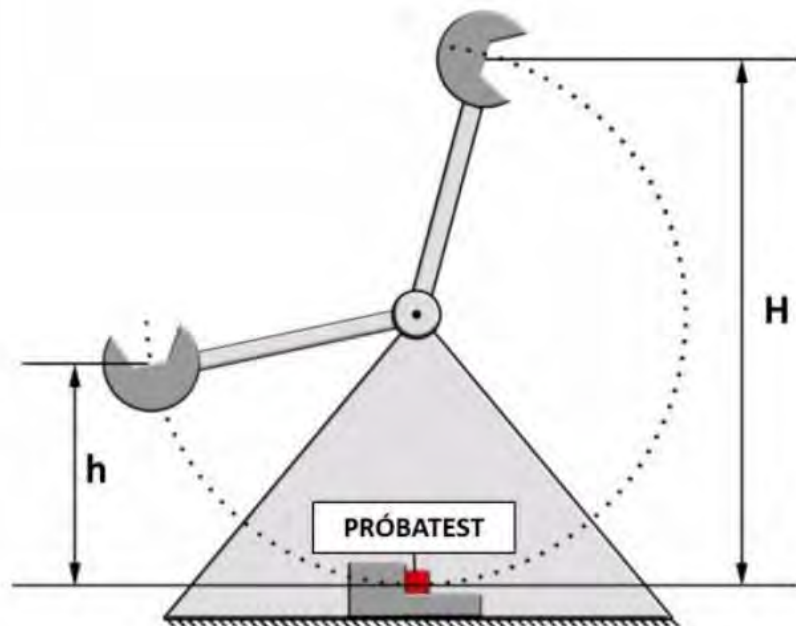
MŰSZEREZETT ÜTŐVIZSGÁLAT - CGHAZ

- ✓ Az EN 10025-6:2019:E szabvány előírásai alapján a nemesített acélok esetén a minimális ütőmunka 27 J -40 °C-on.



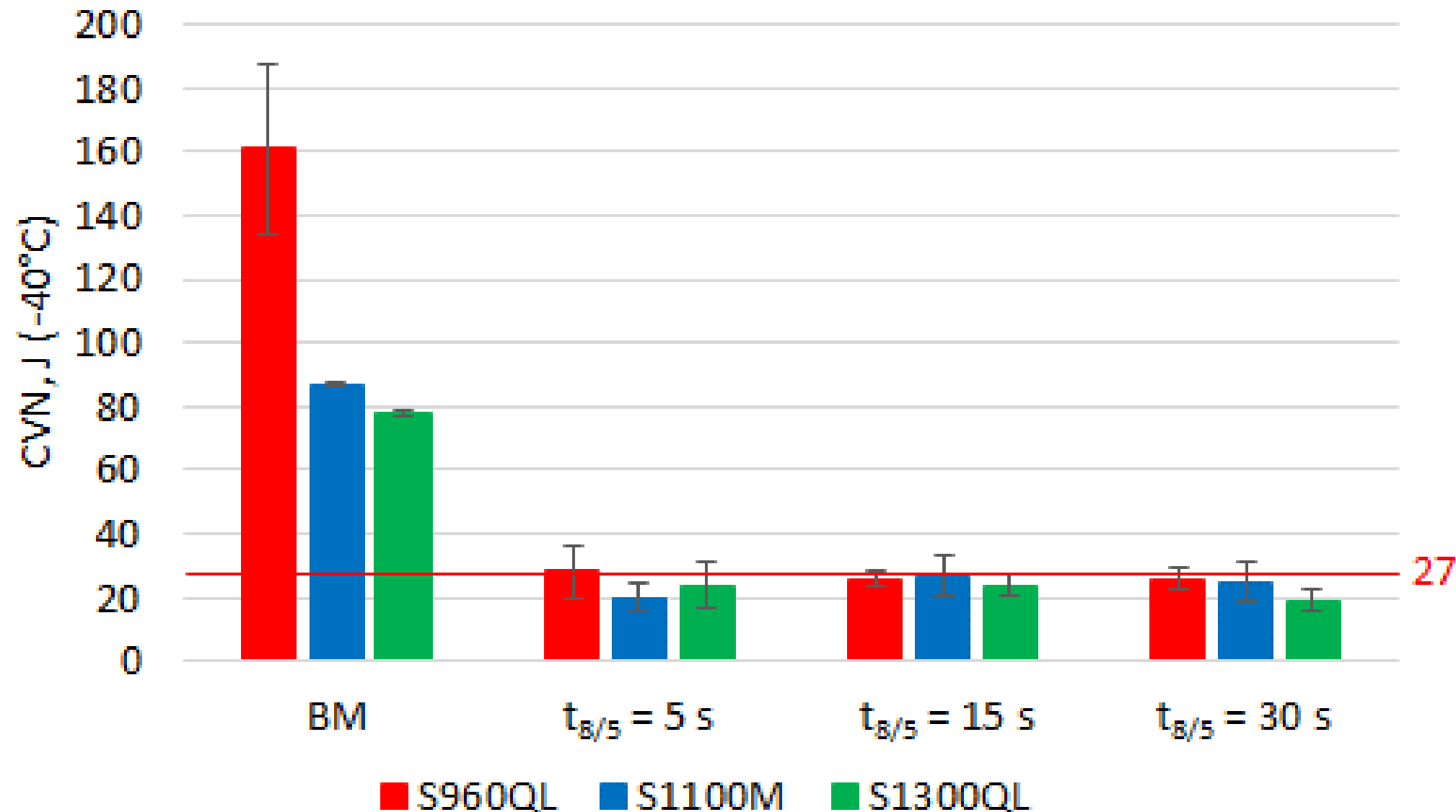
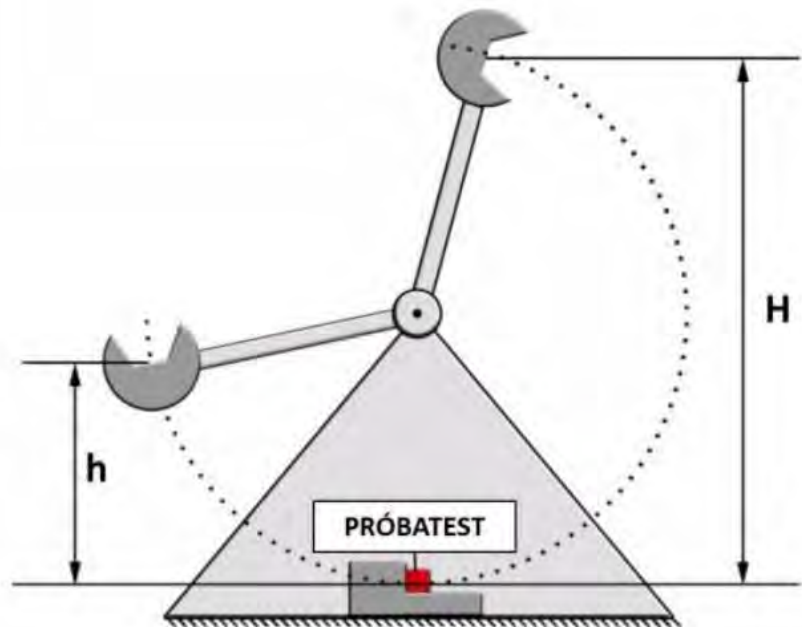
MŰSZEREZETT ÜTŐVIZSGÁLAT - ICHAZ

- ✓ Az EN 10025-6:2019:E szabvány előírásai alapján a nemesített acélok esetén a minimális ütőmunka 27 J -40 °C-on.



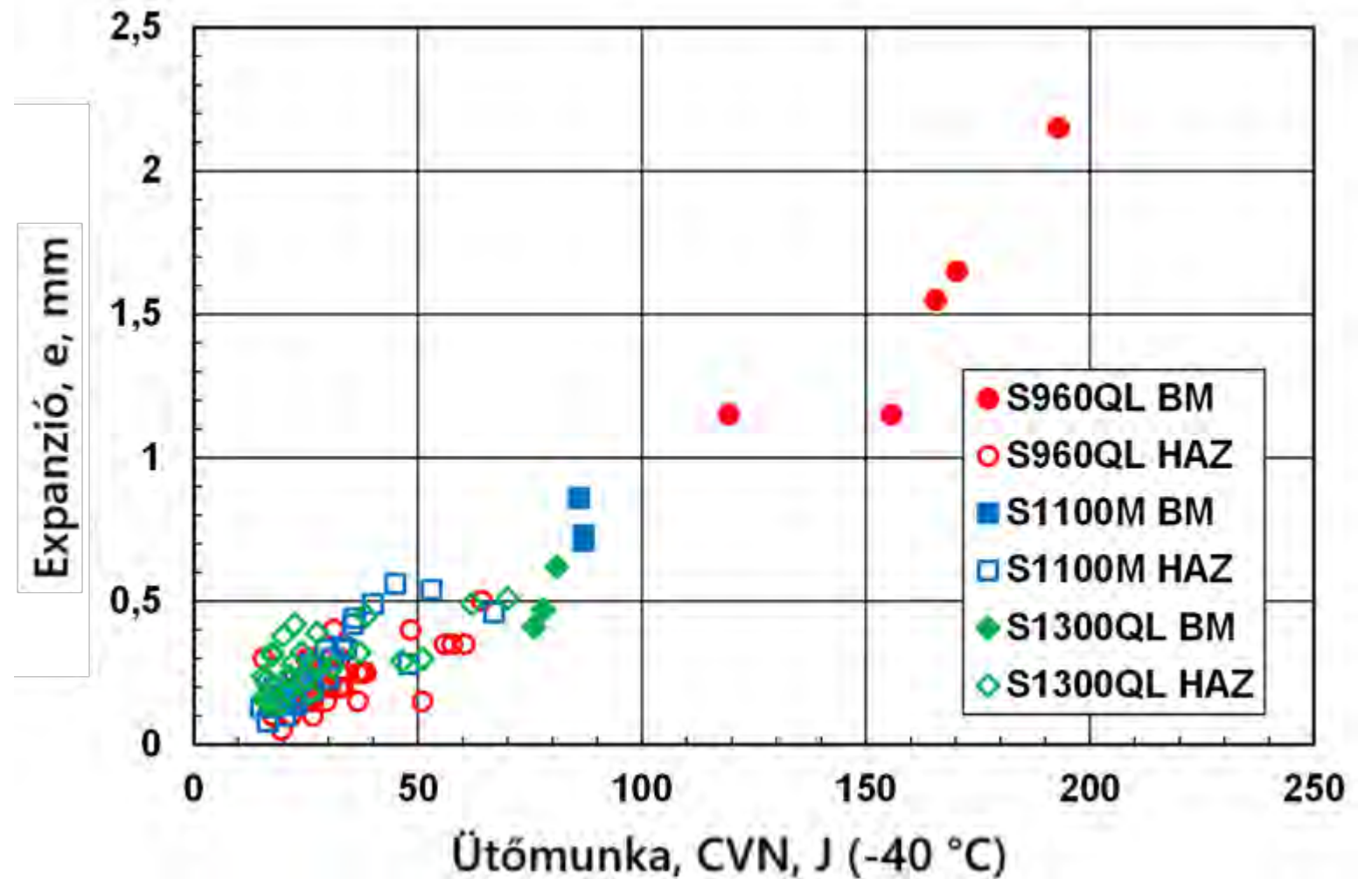
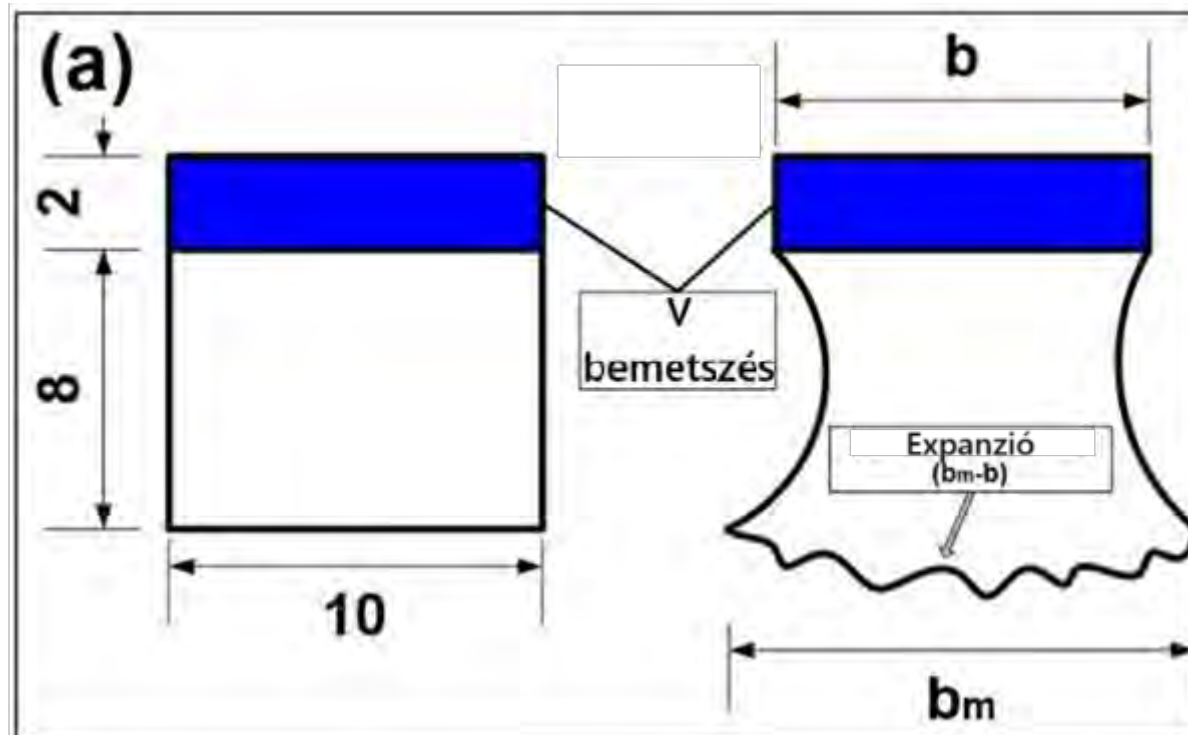
MŰSZEREZETT ÜTŐVIZSGÁLAT - ICCGHAZ

- ✓ Az EN 10025-6:2019:E szabvány előírásai alapján a nemesített acélok esetén a minimális ütőmunka 27 J -40 °C-on.



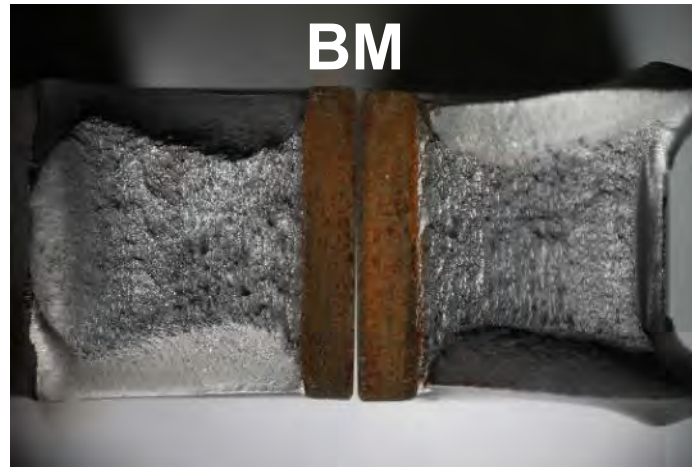
MŰSZEREZETT ÜTŐVIZSGÁLAT - ICCGHAZ

✓ Az expanzió és az ütőmunka kapcsolata:



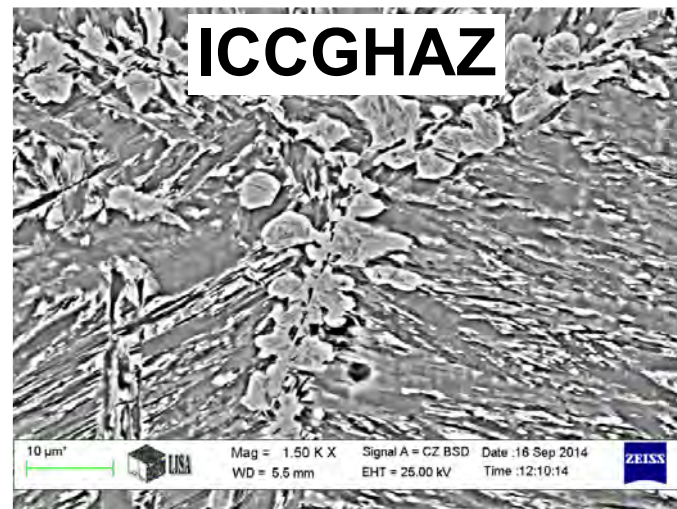
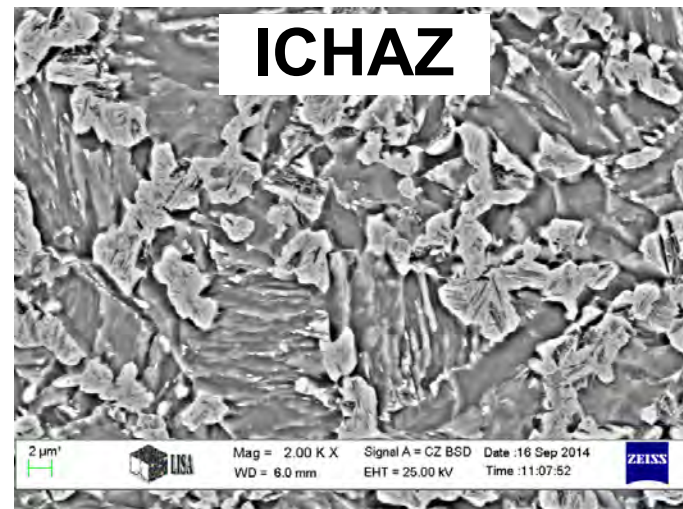
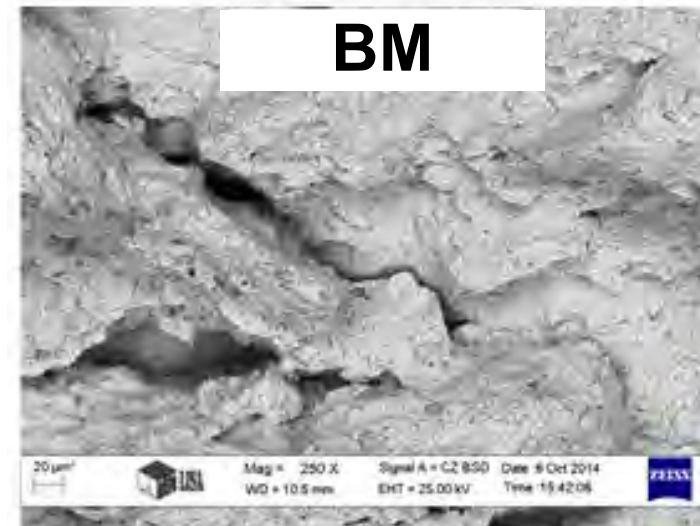
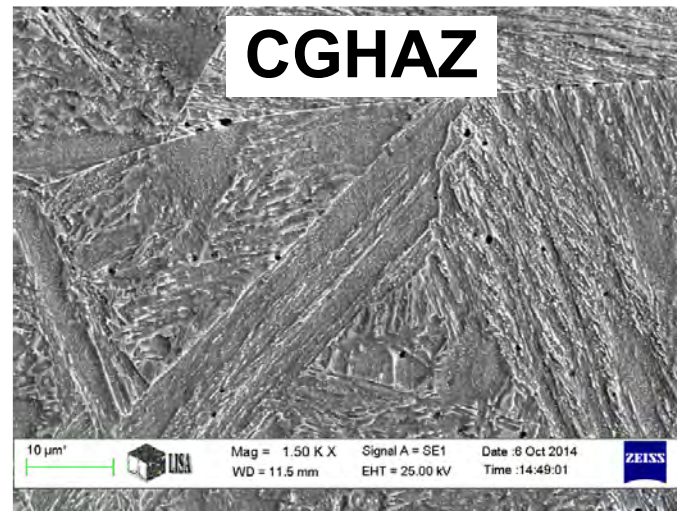
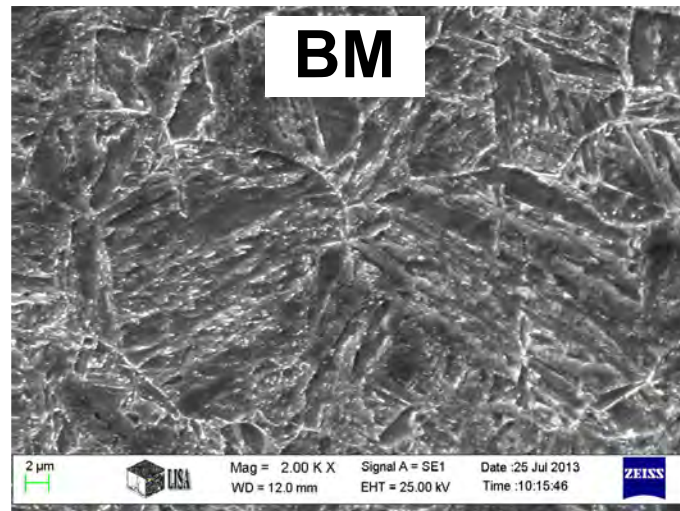
MŰSZEREZETT ÜTŐVIZSGÁLAT

✓ Fraktográfia: S960QL ($t_{8/5} = 15$ s)



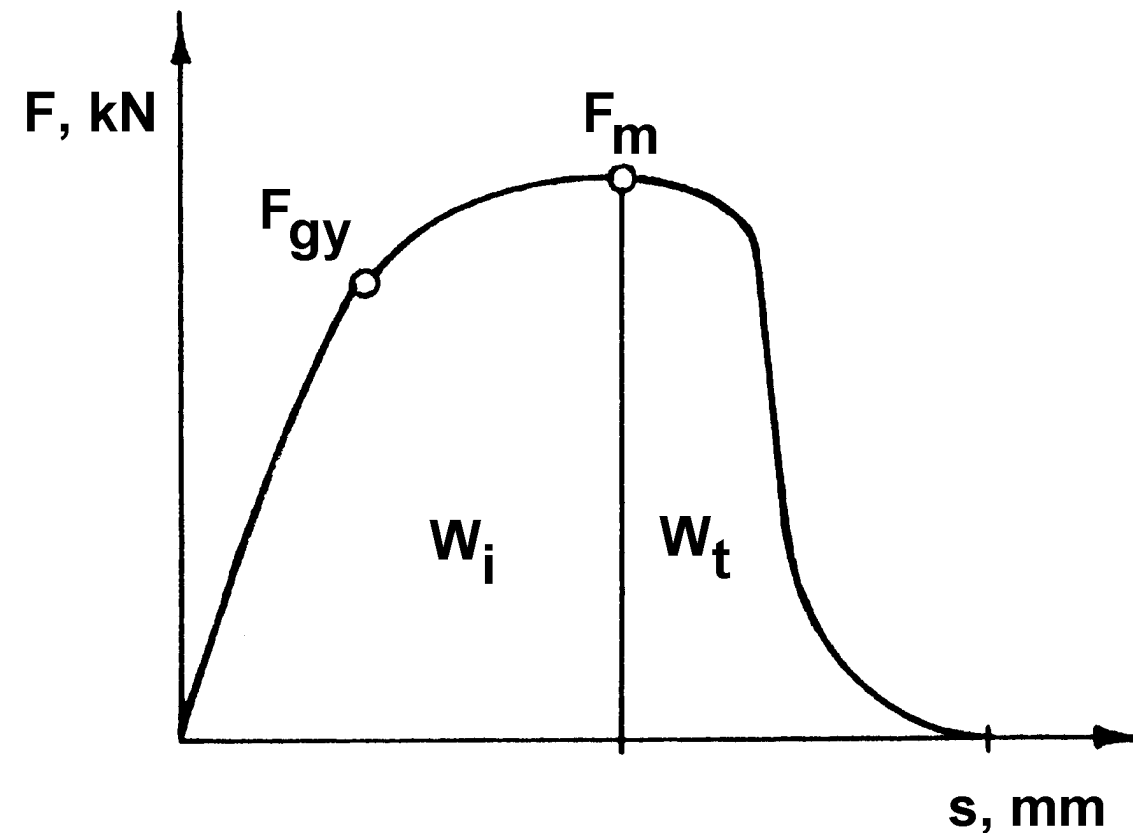
MŰSZEREZETT ÜTŐVIZSGÁLAT

✓ Fraktográfia: S960QL ($t_{8/5} = 15$ s)



MŰSZEREZETT ÜTŐVIZSGÁLAT – BM

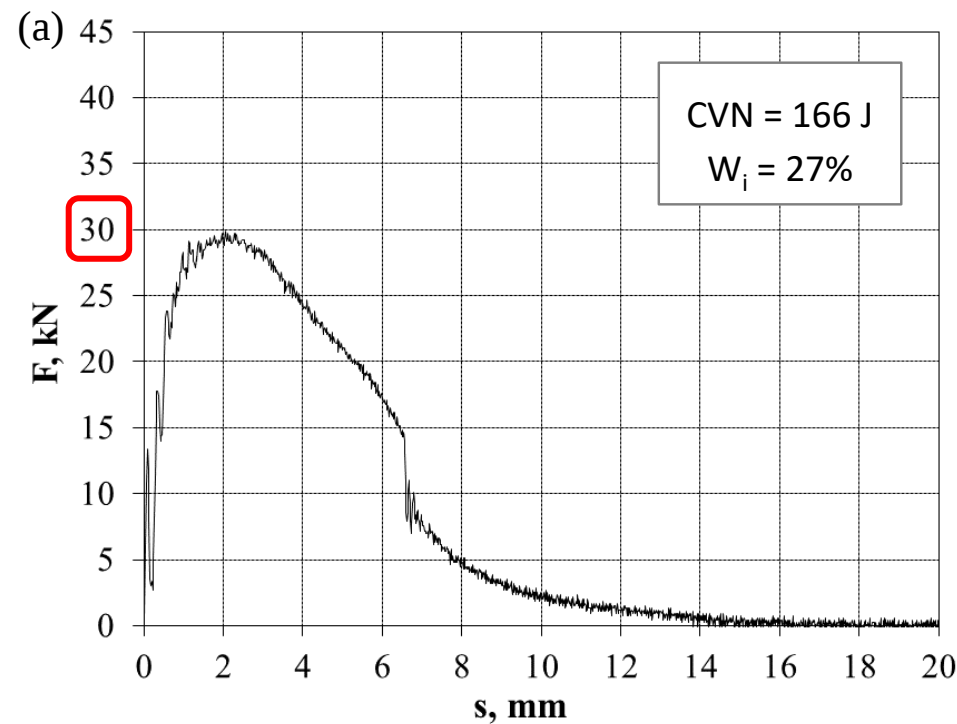
- ✓ Az erő-elmozdulás diagram meghatározása



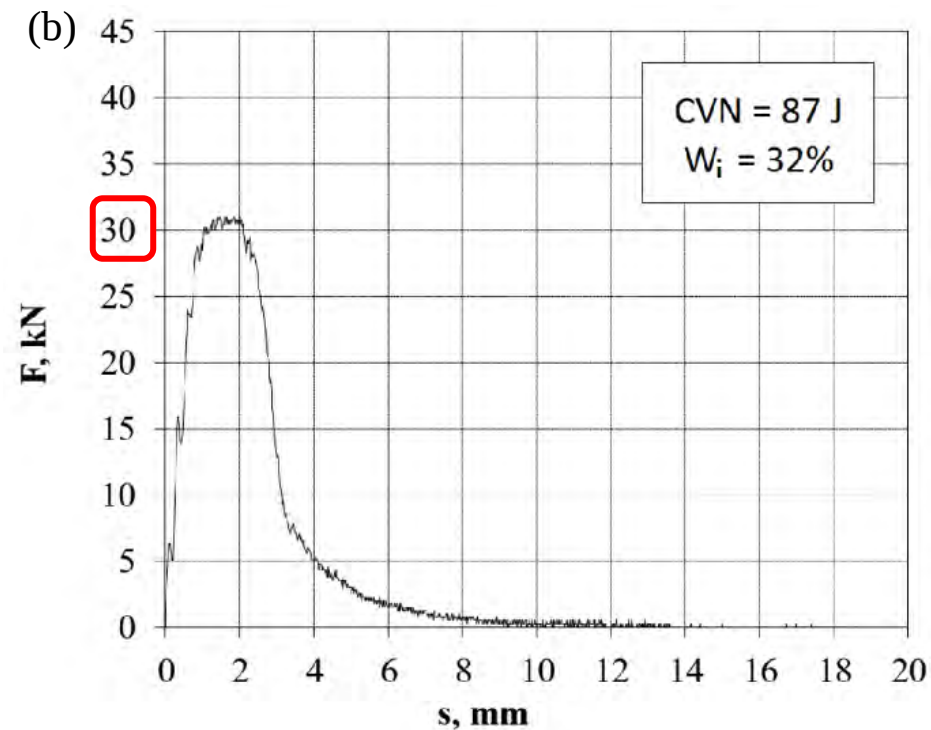
MŰSZEREZETT ÜTŐVIZSGÁLAT – BM

✓ Az erő-elmozdulás diagram meghatározása: alapanyagok

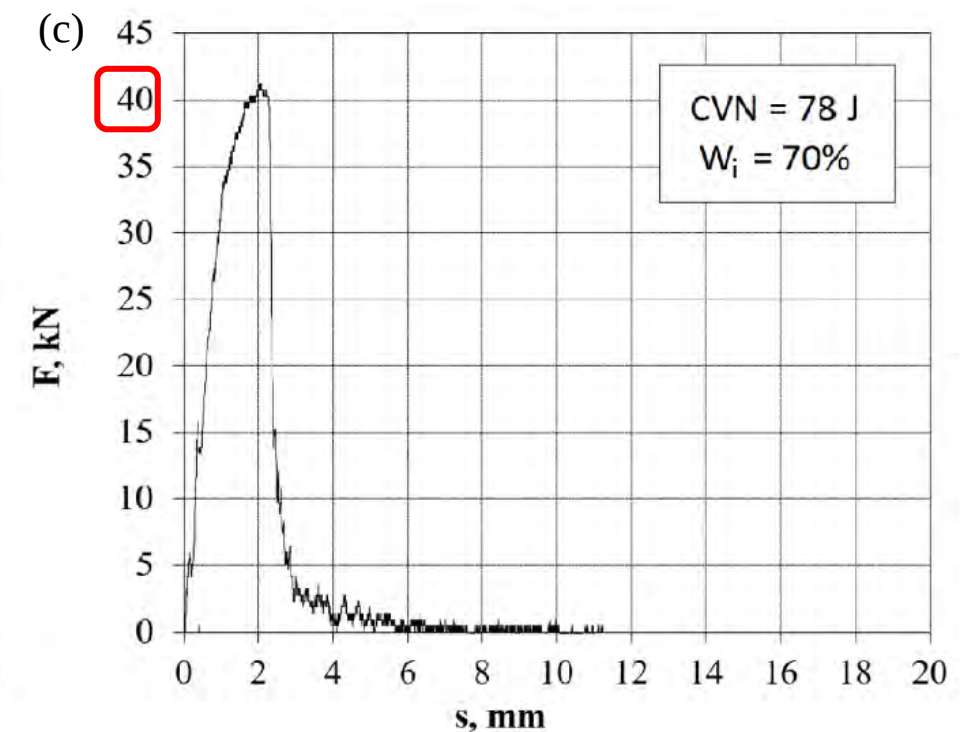
S960QL



S1100M



S1300QL

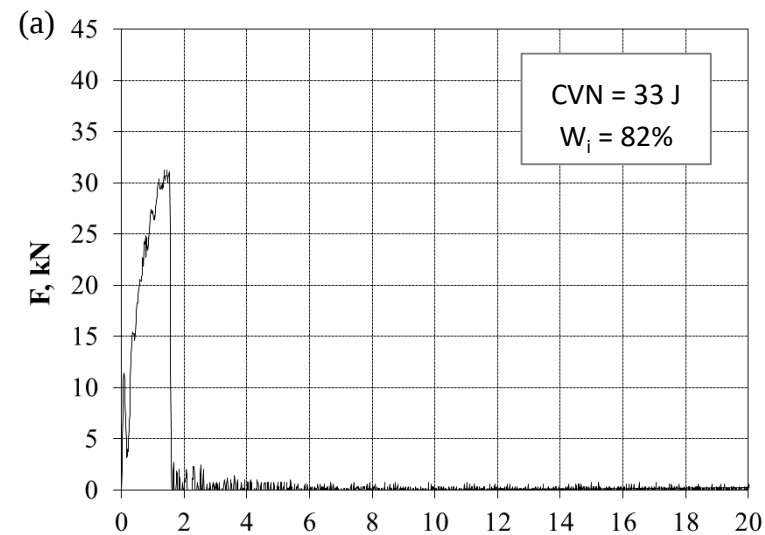


MŰSZEREZETT ÜTŐVIZSGÁLAT – CGHAZ

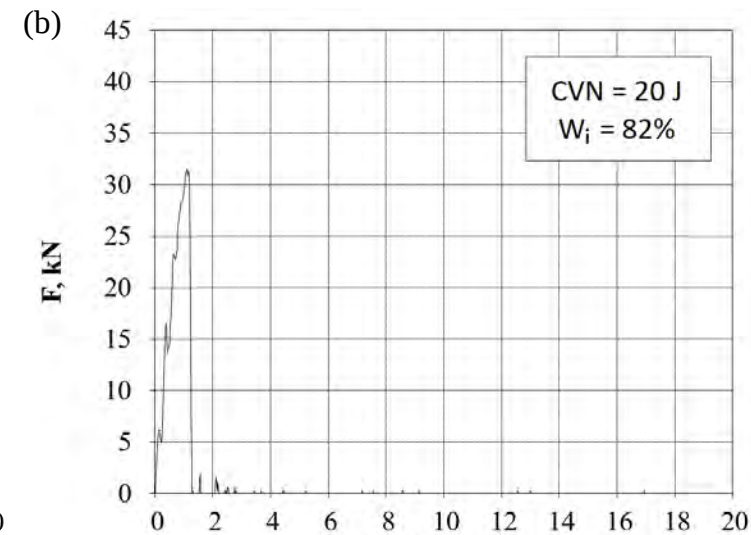
✓ Az erő-elmozdulás diagram meghatározása

$t_{8/5} = 5 \text{ s}$

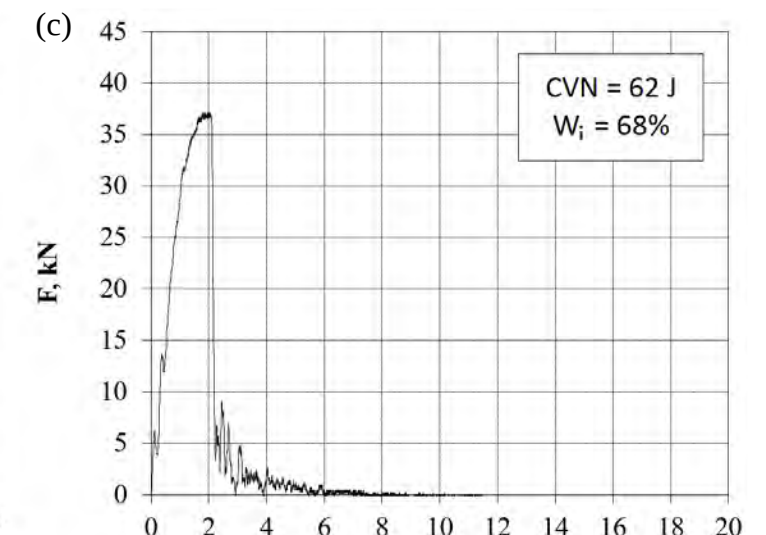
S960QL



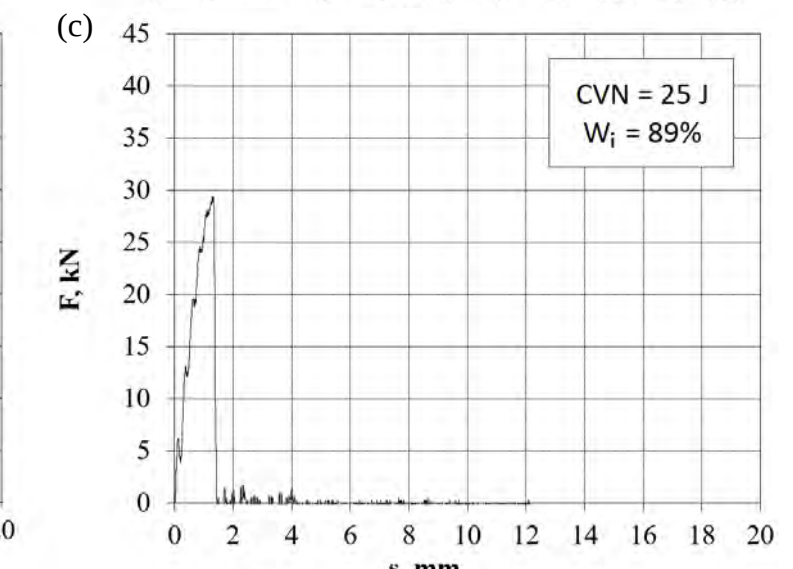
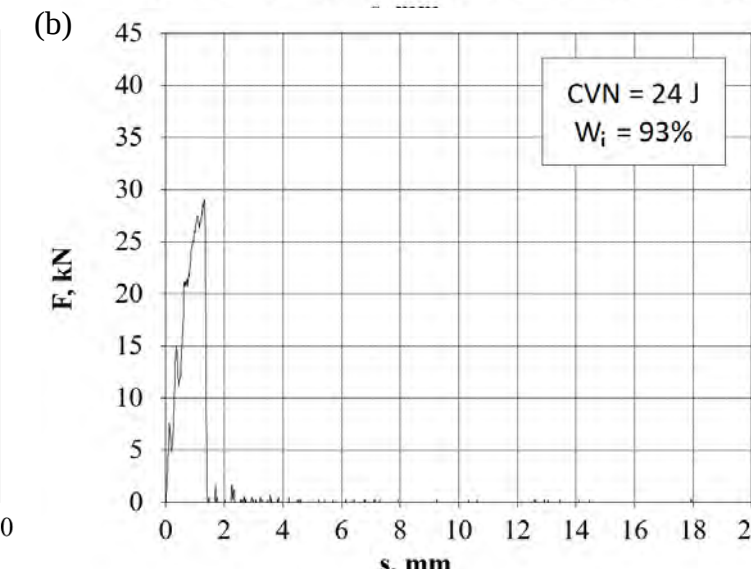
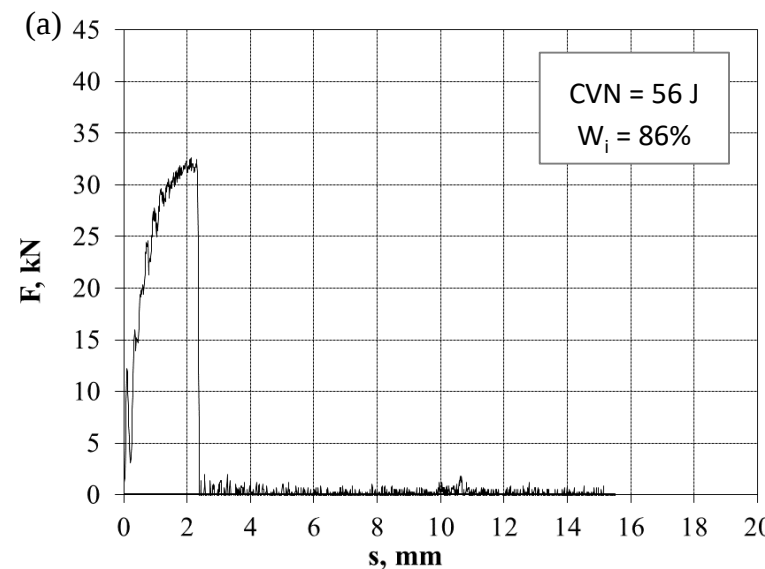
S1100M



S1300QL



$t_{8/5} = 30 \text{ s}$



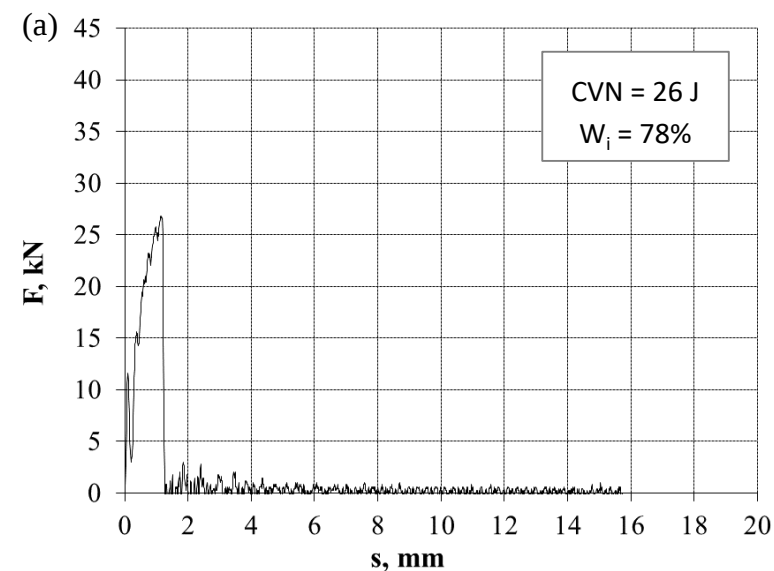
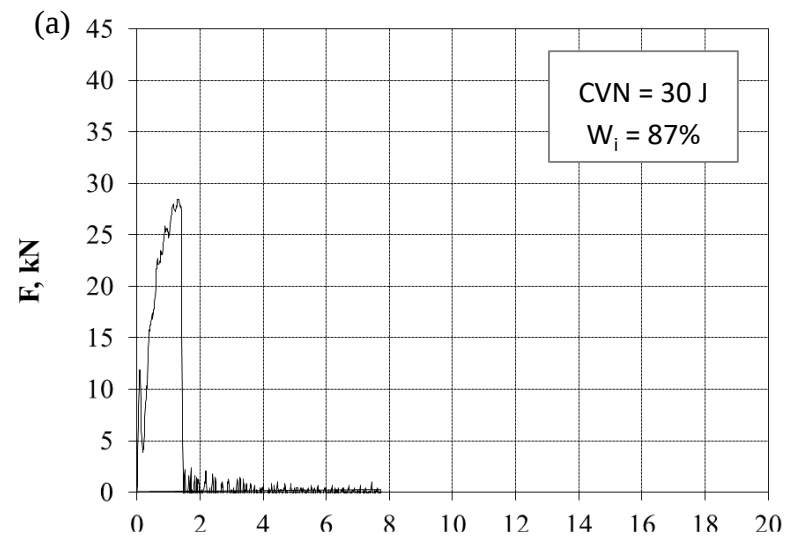
MŰSZEREZETT ÜTŐVIZSGÁLAT – ICHAZ

✓ Az erő-elmozdulás diagram meghatározása

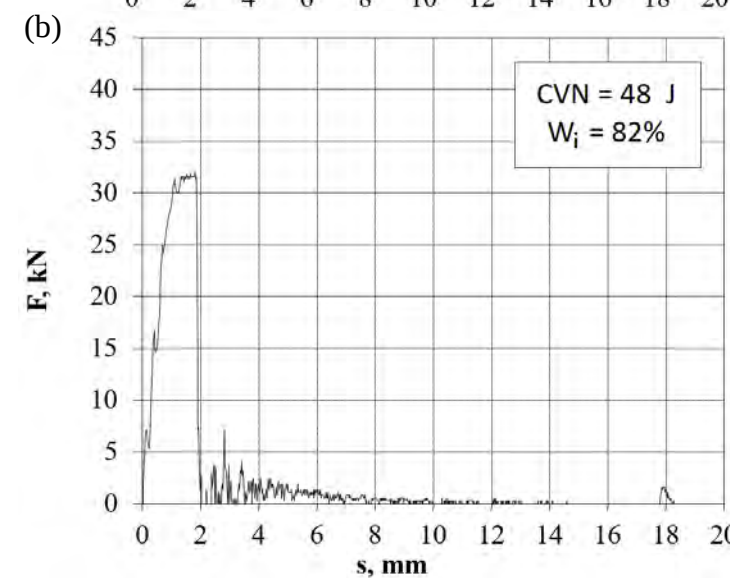
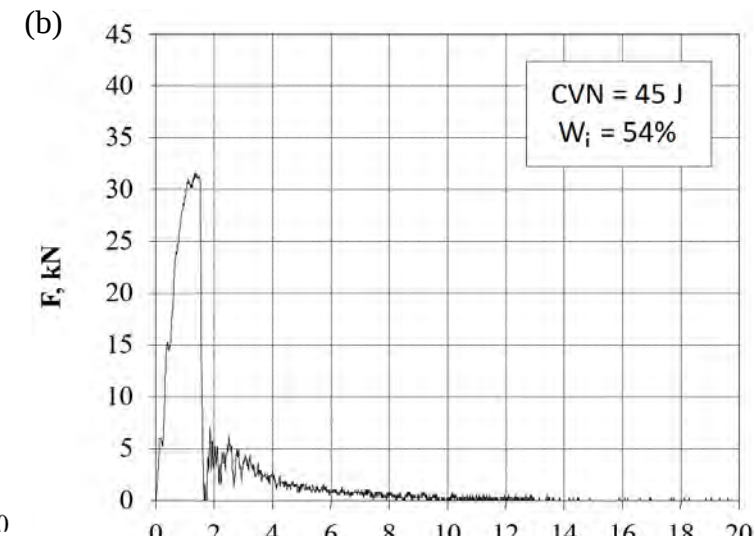
$t_{8/5} = 5 \text{ s}$

$t_{8/5} = 30 \text{ s}$

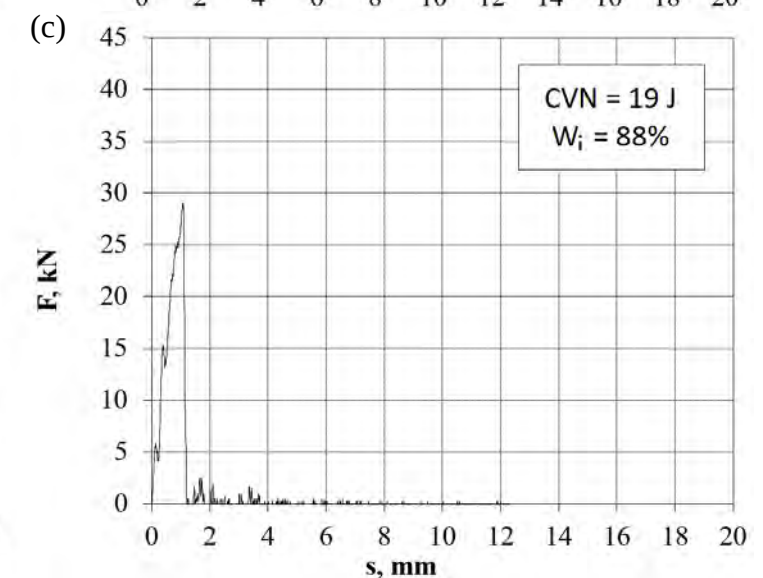
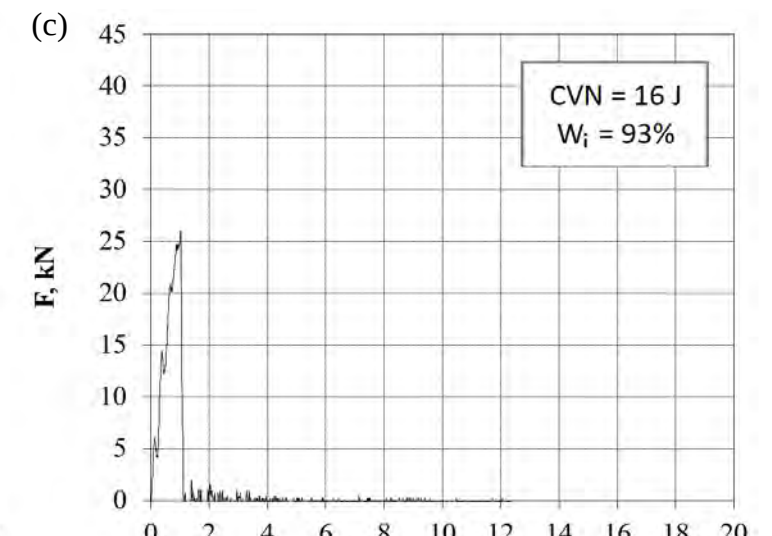
S960QL



S1100M



S1300QL

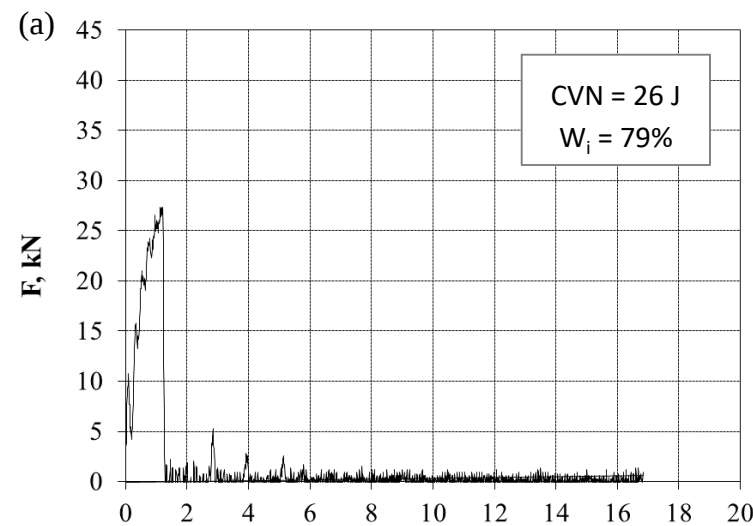


MŰSZEREZETT ÜTŐVIZSGÁLAT – ICCGHAZ

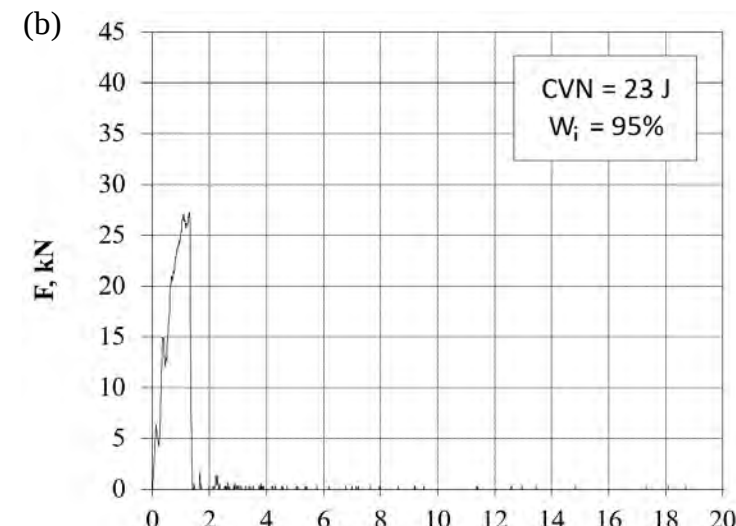
- ✓ Az erő-elmozdulás diagram meghatározása

$t_{8/5} = 5 \text{ s}$

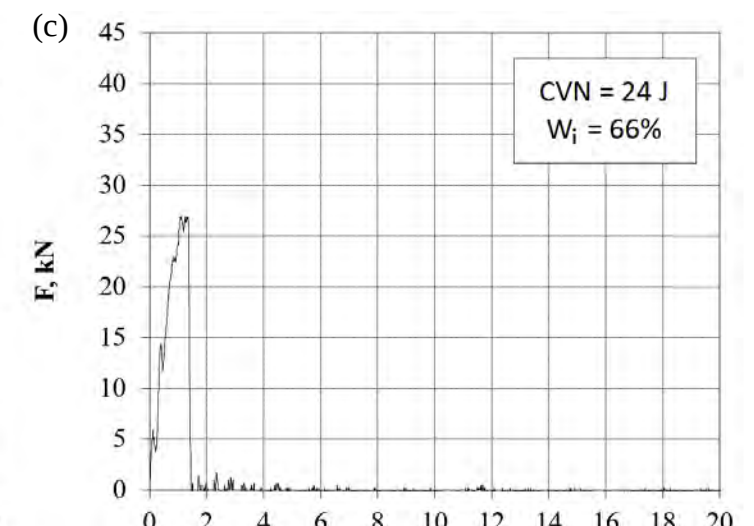
S960QL



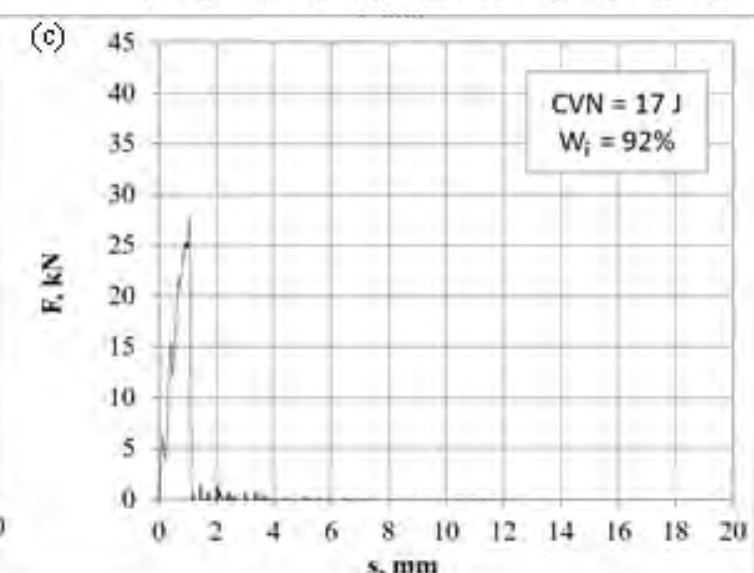
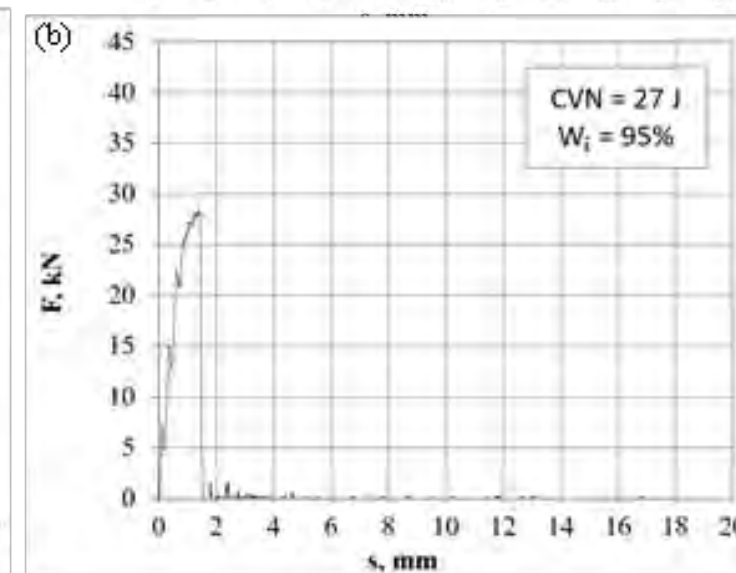
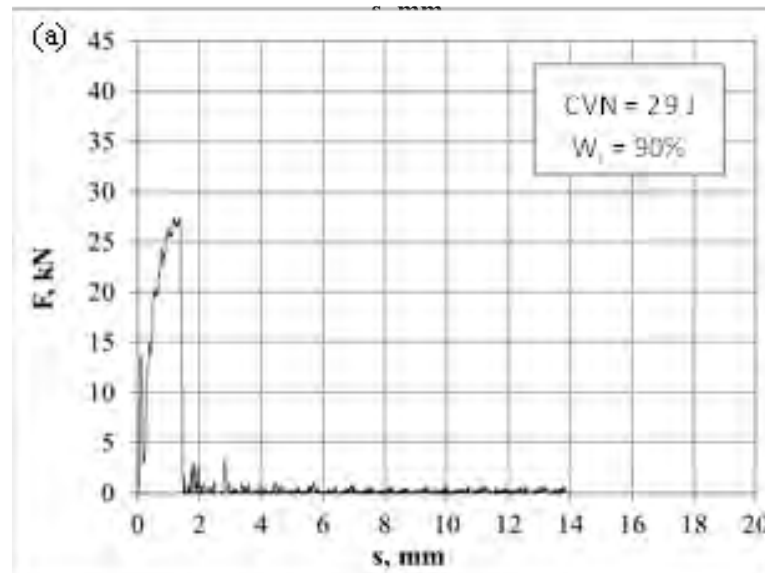
S1100M



S1300QL



$t_{8/5} = 30 \text{ s}$



MŰSZEREZETT ÜTŐVIZSGÁLAT

✓ A repedés keletkezéséhez szükséges energia aránya a teljes energiához viszonyítva:

Alapanyag / HAZ	A repedésinduláshoz felhasznált energia aránya, %											
	S960QL				S1100M				S1300QL			
	Szállítási állapot	t _{8/5} , s			Szállítási állapot	t _{8/5} , s			Szállítási állapot	t _{8/5} , s		
		5	15	30		5	15	30		5	15	30
Alapanyag	28	N/A	N/A	N/A	37	N/A	N/A	N/A	69	N/A	N/A	N/A
CG	N/A	88	92	86	N/A	56	69	71	N/A	72	84	85
IC	N/A	87	81	78	N/A	84	82	90	N/A	92	87	84
ICCG	N/A	79	83	90	N/A	95	88	89	N/A	79	79	87

ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK - I

- ✓ A vizsgált S960QL, S1100M, S1300QL nagyszilárdságú acélok három különböző hőhatásövezeti sávját sikeresen szimuláltuk a Rykalin-3D modell alapján a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztésre vonatkozó $t_{8/5}=5-30$ s hűlési idő tartományban.
- ✓ A szimulációk után a próbatesteket mikroszkópos elemzéshez, keménységvizsgálathoz és műszerezett ütővizsgálathoz készítettük elő.
- ✓ A keménységvizsgálatok eredményei alapján a hűlési idő növelésével a keménység kismértékben csökkent az S960QL és az S1100M durvaszemcsés hőhatásövezeti sávjában, viszont az S1300QL esetén szinte változatlan maradt.
- ✓ A műszerezett ütővizsgálatok eredményei alapján megállapítható volt, hogy az ütőmunka jelentősen csökkent minden vizsgált hőhatásövezeti sávban, és sok esetben az ütőmunka nem érte el a 27 J-t sem.

ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK - II

- ✓ A repedésindulásához felhasznált energia számított értékei a vizsgált hőhatásövezeti sávok rideg viselkedésére utaltak. A diagramokon többnyire instabil repedésterjedés volt megfigyelhető.
- ✓ Az alapanyagok erő-elmozdulás diagramjaiban jelentősek voltak a különbségek, ami azt igazolta, hogy az S960QL anyagminőségnek a legnagyobb a szívóssága. A hőhatásövezet erő-elmozdulás diagramjai azonban minden vizsgált acél esetén hasonlóak voltak. Az S1300QL acél ICHAZ sávja volt a legridegebb.
- ✓ Összességében a vizsgálati eredmények azt mutatták, hogy a rövidebb $t_{8/5}$ hűtési idő alkalmazása előnyös lehet a vizsgált nagyszilárdságú acélok esetén, mivel a teljes vizsgált hűlési időtartományban jelentős szívósságcsökkenés és a kilágyulás volt megfigyelhető.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] T. Lahtinen, P. Vilaca, P. Peura, S. Mehtonen: MAG welding tests of modern high strength steels with minimum yield strength of 700 MPa, Applied Sciences, 9, 1031, 2019. doi:10.3390/app9051031
- [2] R. N. Jha, K. Dutta, K. K. Ray: Effect of tempering on mechanical properties of V-added AISI 4335 steel, ISIJ Int., 50, No. 4, pp. 607–612, 2010.
- [3] Z. M. Shi, K. Liu, M. Q. Wang: Effect of tensile deformation of austenite on the morphology and strength of lath martensite, Met. Mater. Int., 18, No. 2, pp. 317–320, 2012. doi:10.3390/app10072205
- [4] M. St. Weglowski, M. Zeman, M. Lomozik: Physical simulation of weldability of Weldox 1300 steel, Materials Science Forum, 762, pp. 551-555. 2013. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.762.551
- [5] M. St. Weglowski, M. Zeman: Prevention of cold cracking in ultra-high strength steel Weldox 1300, Archives of civil and mechanical engineering, 163, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2013.10.010>
- [6] M. Tümer, F. Pixner, N. Enzinger: Residual stresses, microstructure, and mechanical properties of electron beam welded thick S1100 steel, Journal of Materials Engineering and Performance, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06348-1>
- [7] M.-T. Chen, A. Cai, M. Pandey, C. Shen, Y. Zhang, L. Hu: Mechanical properties of high strength steels and weld metals at arctic low temperatures, Thin-walled structures, 185, 110543, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110543>
- [8] A. Ilic, I. Miletic, R. R. Nikolic, V. Marjanovic, R. Ulewicz, B. Stojanovic, L. Ivanovic: Analysis of influence of the welding procedure on impact toughness of welded joints of the high-strength low-alloyed steels, Applied Sciences, 10, 2205, 2020.
- [9] D. P. Dunne, W. Pang: Displaced hardness peak phenomenon in heat-affected zone of welded quenched and tempered EM812 steel. Weld. World, 61, pp. 57–67, 2017.
- [10] F. Hochhauser, W. Ernst, R. Rauch, R. Vallant, N. Enzinger: Influence of the soft zone on the strength of welded modern HSLA steels. Weld. World, 56, pp. 77–85, 2012.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [11] L. Olsson, D. Siewert, T.A. Liu, S. Edwards, G.R. ASM Handbook: Welding Brazing and Soldering; ASM International: Novelt, OH, USA, pp. 191–212, 1995.
- [12] P. Nevasmaa: Evaluation of HAZ Toughness Properties in Modern Low Carbon Low Impurity 420, 550 and 700 MPa Yield Strength Thermomechanically Processed Steels with Emphasis on Local Brittle Zones; Lisensiaatintyö, University of Oulu: Oulu, Finland, 1996.
- [13] M. Gáspár: Effect of Welding Heat Input on Simulated HAZ Areas in S960QL High Strength Steel, Metals, 9, 1226, 2019.
doi:10.3390/met9111226
- [15] ISO/TR 15608:2017: Welding. Guidelines for a metallic materials grouping system.
- [16] EN ISO 15614-1:2017 E: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test – Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys.
- [17] EN 10025-6:2019 E: Hot rolled products of structural steels – Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition.
- [18] EN 10025-4:2019 E: Hot rolled products of structural steels – Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels.
- [19] B. Gy. Lenkeyné, S. Winkler, L. Tóth, J.G. Blauel: Investigations on the brittle to ductile fracture behaviour of base metal, weld metal and HAZ material by instrumented impact testing, In Proceedings of the 1st International Conference on Welding Technology, Materials and Material Testing, Fracture Mechanics and Quality Management, Wien, Austria, 22–24 September 1997, pp. 423–432
- [20] M. Gáspár, R. Sisodia: Improving the HAZ toughness of Q+T high strength steels by post weld heat treatment, IOP Conference Series, Materials Science and Engineering 426, Paper: 012012, 2018

KORSZERŰ ANYAGOK HEGESZTHETŐSÉGE ANKÉT



Köszönöm a figyelmet!

Dr. Marcell Gáspár, egyetemi tanár (marcell.gaspar@uni-miskolc.hu)

Dr. Pap Judit, adjunktus (judit.kovacs@uni-miskolc.hu)

**Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki és Informatikai Kar
Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet**