

Termomechanikusan kezelt acélok hegesztése és a hegesztett kötések tulajdonsága

Welding and Properties of Welded Joints of TMCP Steels

Dr. Rittinger János

Rittinger Engineering, e-mail: rittinger@t-online.hu

Absztrakt: az előadás bemutatja a TMCP acélból gyártott távvezeték hegesztési varratainak tulajdonságát. Ismerteti a TMCP acélok előnyeit és jelenlegi korlátait.

Abstract: Properties of welded joints is TMCP steel pipelines are presented. The advantages and limitations of application of TMCP steels are discussed.

Kulcsszavak: TMCP acélok gyártása, repedésérzékenység, szívósság, korrozioállóság, távvezetékgyártás, diffúzióképes hidrogén

1. Bevezetés

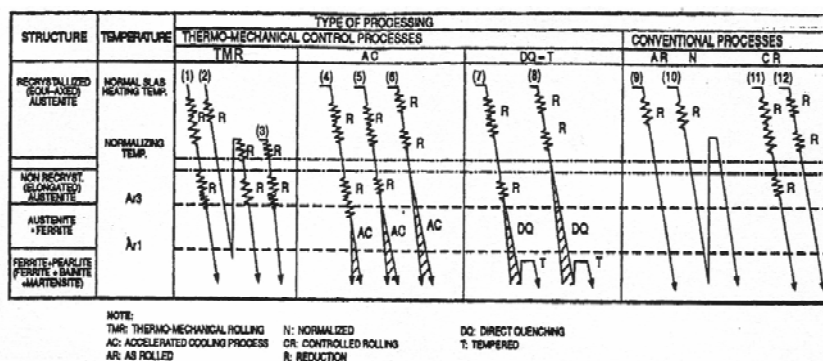
A termomechanikus eljárás (Thermo-Mechanical Controlled Processing, TMCP) eljárás, több évtizede már alkalmazott és hazánkban is jól ismert irányított hengerlésű (Controlled Rolling, CR) eljárásból fejlődött ki. A TMCP terméke finomszemcsés acél, amely az acél összetételének és a lemezbuga újrahevítésétől a hengerlés befejezéséig, valamint az azt követő lehűtésig terjedő folyamatok integrált kapcsolatának eredményeként jött létre.

A TMCP a hengerlés hőmérsékletének és az alakítás mértékének szigorú kapcsolatát jelenti.

A TMCP nem foglalja magában a tekercsbe gyártott termékek esetén a fel- és letekercselést (pl spirálvarratos csövek gyártásakor), a lapos termékből a hosszvarratos csövek alakítását (U, O profil létrehozását), illetve hegesztést követően a cső expandáltatását.

A TMCP eljárás bevezetését a meleg (fél meleg) hengerlési technológiák (főként a hengsorok) fejlesztése, a hengerlés során a folyamatos (érintésmentes) hőmérséklet és vastagság mérés, illetve ezek mérési eredményeihez kapcsolódó on-line számítógéppel vezérelt hengerlés bevezetése tette lehetővé.

A TMCP eljárások áttekintését az 1. ábra foglalja össze a [1] szabvány nyomán.



1. ábra Hagyományos és TMCP eljárások

A fontosabb eljárások:

- A termomechanikus hengerlés (Termo-Mechanical Rolling, TMR) esetén a finom szemcseszerkezet az ausztenit rekrisztallizációs és nem rekrisztallizációs hőmérsékleti tartományában, esetenként az ausztenit és a ferrit kétfázisú hőmérsékleti tartományában végzett megfelelő mértékű alakítás eredménye.
- A gyorsított hűtés (Accelerated Cooling, AC) valójában a korábban alkalmazott, kevésbé hatékony (CR), illetve, illetve a TMR eljárásához kapcsolódik. A hengerlés befejeződését követő gyors hűtés a rekrisztallizáció megakadályozására hivatott.
- A TMR és az AC összekapcsolásával született meg a Mannesmann cég által kifejlesztett és alkalmazott MACOS: Mannesmann Accelerated Cooled Steel eljárás.
- A közvetlenül edzett és megeresztett eljárás (Direct Quenched and Tempered, DQT) eljárás a CR és részben a TMR eljárásokhoz kapcsolódva a CR és a TMR eljárásokhoz kapcsolódva, még az A3 hőmérsékletnél nagyobb hőmérsékletről végzett edzést és megeresztést jelenti. A DQT nem azonos a nemesítéssel, a QT (Quenched and Tempered) eljárással. A QT (Quenched and Tempered) eljárás során a hengerlés befejezését követően a terméket az A1-nél kisebb hőmérsékletre hűl le. Ismételt felhevítés következik A3 + 500 °C hőmérsékletre, gyors lehűtés (edzés összetételtől függően vízben, olajban,) megeresztés A1-nél kisebb az elvárt mechanikai tulajdonságokat figyelembe vevő hőmérsékleten.

2. A termomechanikusan kezelt acélok fontosabb szabványai

A TMCP eljárással gyártott acélokra vonatkozó szabványok nagyon általános formában adják meg az acélok tulajdonságait. Az acélgyártók által forgalmazott termékekre lényegesen konkrétabb (sokszor túlzottan optimális) adatokat adnak meg, amelyeket a tervező (a gyártó) korlátozott módon vehet figyelembe. Ez a globalizáció velejáró jelensége.

Tekintsünk át néhány szabványos előírást.

Az ASTM előírását az 1. táblázat foglalja össze [1] szabvány nyomán.

1. a. táblázat

	Gr A	Gr B	Gr C	Gr D	Gr E	Gr F
C max	0,20	0,15	0,10	0,09	0,07	0,10
Mn, s<40	0,7-1,35	0,7-1,35	0,7-1,60	1,0-2,0	0,7-1,60	1,10-1,70
s>40	1,0-1,60	1,0-1,60	1,0-1,60	-	-	-
Si	0,15-0,50	0,15-0,50	0,15-0,50	0,05-0,25	0,05-0,30	0,10-0,45
P max	0,030	0,030	0,030	0,010	0,015	0,020
S max	0,030	0,025	0,015	0,005	0,005	0,008
Cu max	0,35	0,35	0,35	0,50	0,35	0,40
Ni max	0,25	0,60	0,25	1,0-5,0	0,60	0,85
Cr max	0,25	0,25	0,25	0,30	0,30	0,30
Mo max	0,08	0,30	0,08	0,40	0,30	0,50
Nb max	0,03	0,03	0,06	0,05	0,08	0,10
V max	0,06	0,06	0,06	0,02	0,06	0,09
Ti	-	-	0,006-0,02	0,006-0,03	-	-
B	-	-	-	0,0005-0,002	-	-

A szénegyenértékre vonatkozó megkötések:

1. b. táblázat

	s<50	s>50
Gr A	0,40	0,45
Gr B	0,45	0,50

$$CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 \text{ (IIW ajánlás)}$$

A többi esetben $P_{cm} < 0,27\%$

$$P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5.B$$

A folyáshatár és a folyáshatár/szakítószilárdság viszonya:

1. c. táblázat

	Gr A, B, C		Gr D	Gr E		Gr F		
	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7	Cl 8
R_{p0,2}	345	415	690	485	515	485	515	550
R_{p0,2}/R_m	0,72	0,76	0,69	0,84	0,85	0,85	0,87	0,87

Első vastagságcsoporthoz $s < 40$ mm, az egyezményes folyáshatár névleges értékével és a szakítószilárdság legkisebb értékével számolva.

Hidrogén környezetben üzemelő szerkezetek esetén $S < 0,003\%$ a HIC (Hydrogen Induced Cracking) és a SCC (Sulfide Stress Cracking) korrózióval szembenállás érdekében.

A Cl 1 – Cl 3 osztályokba sorolt acélokat ajánlják nyomástartó berendezésekhez, többi kategóriát nagynyomású szénhidrogén távvezetékhez.

Az MSZ EN 10028-5 szabvány [2] három folyáshatár, P355, P420, és P460 kategóriában tartalmaz acélokat (amelyek folyáshatára $s < 40$ mm vastagság esetén 355, 400 és P440 MPa). A folyáshatár és a szakítószilárdság viszonya 0,79-0,83 között változik. Az IIW ajánlással számított szénegyenérték, vastagságtól függően: $CE = 0,39 - 0,47$.

A hegesztést követő feszültségcsökkentő hőkezelés paramétereit korlátozzák, $P < 17,5$,

$P = T_s (20 + \lg t) \times 10^3$, ahol T_s a feszültség csökkentő hőkezelés hőmérséklete (K), a hőtartási idő (h).

Melegen hengerelt termék szerkezeti acélból MSZ EN 10025-4 [3] négy szilárdsági kategóriába tartalmaz acélokat. Az acélok termékelemzésre vonatkozó összetételét a következő táblázat tartalmazza.

2a táblázat

	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Cu	N
S275ML	0,15	0,55	1,6	0,03	0,025	0,06	0,10	0,06	0,35	0,35	0,13	0,6	0,017
S355ML	0,16	0,55	1,7	0,03	0,025	0,06	0,12	0,06	0,35	0,55	0,13	0,6	0,017
S420ML	0,18	0,55	1,8	0,03	0,025	0,06	0,14	0,06	0,35	0,85	0,23	0,6	0,027
S460ML	0,18	0,65	1,8	0,03	0,025	0,06	0,14	0,06	0,35	0,85	0,23	0,6	0,027

Szilárdságtól és vastagságtól függően a megengedett szénegyenérték $CE = 0,34 - 0,48$ között változik.

2b táblázat

	S275ML	S355ML	S420ML	S460ML
R_{p0,2}	265	345	400	440
R_{p0,2}/R_m	0,72	0,73	0,77	0,82

Termomechanikusan kezelt acélból gyártott hossz- és spirálvarratos csövekre vonatkozik az MSZ EN 10208-1 illetve az MSZ EN 10208-2 szabványok tartalmazzák [4, 5]. Külön szabvány tartalmazza a tengeri fűtőtoronyok csöveit. A repedés megállására vonatkozó követelményeket pedig az EPRG ajánlás [6] fo-

galmazza meg. A távvezetékek létesítésére az MSZ EN 14163 [7], illetve a gázelosztó rendszerek létesítésére pedig az MSZ EN 12732 [8] szabvány vonatkozik.

3. táblázat

Jel	$R_{p0,5}$	R_m	$R_{p0,5}/R_m$
L245MB	245-440	415	0,85
L290MB	290-440	415	0,85
L360MB	360-510	460	0,85
L415MB	415-565	520	0,85
L450MB	450-570	535	0,87
L485MB	485-605	570	0,90
L555MB	555-675	625	0,90

A fontosabb szabványok áttekintése nyomán megállapítható, hogy a TMCP eljárást ma már a 265-355 MPa névleges folyáshatárú acélok esetén is alkalmazzák. A TMCP eljárás energia felhasználása lényegesen kisebb, mint a normalizált (N), illetve a nemesített (QT) eljárás energia felhasználása.

A TMCP eljárás további előnye, hogy a hengerelt termékek felülete reve-mentes, bár ez ma már normalizált és nemesített acélok esetén is eléri nagy nyomású vízugaras revítenítővel

3. A TMCP acélok fontosabb tulajdonságai

3.1. Repedésérzékenység

A hegesztés során a rugalmas nyúlást meghaladó alakváltozás lép fel. A hegesztett kötés egyes zónáinak alakváltozó képességétől függően maradó nyúlás (hegesztési alakváltozás), vagy repedés keletkezik. Ezt fejezi ki az alábbi egyenlőtlenség:

$$\varepsilon_{AK} > /< \varepsilon_{GH} + \varepsilon_{FA} + \varepsilon_H(t), \text{ ahol:}$$

ε_{AK} az alakváltozó képesség,

ε_{GH} a gátló hatások,

ε_{FA} a fázisátalakulásból származó alakváltozás,

$\varepsilon_H(t)$ a diffúzióképes hidrogén hatása, az idő függvényében változik.

Az alakváltozások közül a fázisátalakulásból származó alakváltozás becsülhető. Illetve a diffúzióképes hidrogén hatása határozható meg implant vizsgálattal. Az implant vizsgálatot a [9] szabvány tartalmazza.

A hegesztési hőfolyamat izotermái nem síkfelületek, ezért csak keménység mérésre van lehetőség. A keménység szilárdsági anyagjellemző, azonban szoros kapcsolatba hozható az alakváltozó képességgel. Ez a magyarázata annak, hogy a keménység megengedhető, legnagyobb értékére tesznek megkötéseket a hőhatásövezet repedésmentessége érdekében.

A TMCP acélok ötvöző tartalma kicsi. Főként kicsi a széntartalma, mert a TMCP eljárás során egyik szilárdság növelő tényező a harmadlagos kiválás, amely kizárólag $C < 0,1\%$ esetén fejti ki kedvező hatását. A hőhatásövezet repedésmentességének meghatározásához számos korrelációs kapcsolat ismert, amelyeknek független változója a szénegyenérték. A szénegyenérték függvényében meghatározható a legkisebb hűlési idő ($\Delta t_{800/500}$) és az előmelegítés hőmérséklete. Hazai gyakorlatban az MSZ 6280 szabvány F1 függeléke tartalmazott módszert 1974-től a szabvány visszavonásáig. Jelenleg az MSZ EN 1011-2 szabványban találunk a gyakorlat számára hasznos összefüggéseket. Ezeknek az összefüggéseknek a hibái, hogy nem tartalmazzák az ötvöző tartalom érvényességi tartományát, illetve nem veszik figyelembe a hegesztés során fellépő gátló hatásokat.

A TMCP eljárással gyártott acélok folyáshatára ma már ötvözés nélkül, csekély ötvözéssel eléri az 1100 MPa-t.

A hegesztési varratok szilárdságával szemben elvárt követelmény:

$$R_{p0,2}^{WM} > R_{p0,2}^{BM} \text{ ahol:}$$

WM a varrat, BM az alapanyag egyezményes folyáshatárát jelenti.

A hegesztési varrat folyáshatárát TMCP eljárással, értelemszerűen növelni nem lehet. A varrat folyáshatára kizárólag ötvözéssel növelhető.

A TMCP eljárással gyártott acélok hegesztett kötéseinek repedésérzékenysége a varrat ötvöző tartalmának növelése miatt, a diffúzióképes hidrogén tartalmától függően a varrat repedésmentességét jelenti.

A hegesztési varrat repedésmentessége a varrat szilárdságától és a varratba jutó diffúzióképes hidrogéntartalomtól függ.

A varrat repedésmentességének érdekében az előmelegítés hőmérséklete három tagból tevődik össze az alábbi módon:

$$T_0 = f(H) + f(R_m) + \text{állandó, ahol:}$$

$f(H)$ az ISO 3690 szabvány [10] szerint meghatározott, diffúzióképes hidrogén tartalom,

$f(R_m)$ a varrat szilárdságával összefüggő tag.

Néhány példa a javasolt összefüggésekből a 4. táblázat ismertet.

4. táblázat

Forrás	$f(H_{IIW})$	$f(R_m)$	Állandó
[11]	$62 \cdot H^{0,35}$	$700 \cdot (CET + 0,03) \cdot 160 \cdot \tanh(t/35) + \{53 \cdot (CET + 0,03) - 30,4\} \cdot Q$	-330
[12]	$318 \cdot \log H$	$0,614 \cdot R_m$	-554,3
[13]	$120 \cdot \log(H_{JIS}/3,5)$	$0,815 \cdot R_m + 5 \cdot (t - 20)$	-569,5
[14]	$7,348 \cdot H$	$188,4 \cdot CEW - 2,261 \cdot t/5$	-108,3
[15]	$5,844 \cdot H$	$487 \cdot CEC - 2,922 \cdot t/5$	-15,3

$$H_{JIS} = 0,67 \cdot H_{IIW} - 0,8$$

$$CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40$$

t/5 s a 800 – 500 °C közötti hűlési idő,

Q kJ/cm a fajlagos hőbevitel,

R_m MPa a varrat szilárdsága,

$$CEW = C + 0,378 \cdot Mn + 0,145 \cdot Ni + 0,648 \cdot Cr + 0,298 \cdot Mo$$

$$CEC = C + 0,16 \cdot Si + 0,07 \cdot Mn + 0,22 \cdot Cr + 0,03 \cdot Ni - 0,27 \cdot Cu$$

A bemutatott összefüggések korlátozásokkal érvényesek, amelyek közül ki kell emelni a rétegszámot, főként akkor, ha a hegesztést nagy hidrogéntartalmú hegesztőanyaggal (pl. cellulóz bevonatú elektródával végzik. Figyelembe kell venni azt, hogy a gyártó által közölt, kötött, laboratóriumi körülmények között meghatározott hidrogén tartalom és az adott hegesztőanyag felhasználásakor a tényleges hidrogén tartalom jelentősen eltérhet, szabadban végzett hegesztéskor a hőmérséklettől, a relatív páratartalomtól, nem utolsósorban a hegesztő anyag gondos kezelésétől függően.

3.2. A TMCP acélok szívóssága

A szívósság és a szívós-rideg átmenet nem azonos fogalom. A szívós-rideg átmenet hőmérsékleti tartományban kijelölhető az átmeneti hőmérséklet. A kijelölés módja, ami egyben az adott termék átvételi feltételeként is előírható ütővizsgálat esetén az ütőmunka, amelynek értéke függ az acél szilárdságától. A szabványokban használt értékek, J=27 J, K=40 J, L=60 J. Továbbá meghatározható az 50% szívós-rideg törethez, a próbatest adott mértékű keresztirányú expanziójához (EXP, mm) tartozó hőmérséklet.

A szavatolt átmeneti hőmérséklet a szabványok szerint ma már -50°C, vagy annál kisebb lehet. A TMCP acélok esetén jelentős mértékben korlátozzák az acél kéntartalmát. A kéntartalom csökkenésével jelentősen nő az acél szívóssága. Ez az ütővizsgálattal meghatározott ütőmunka legnagyobb értékében (amit az angol nyelvű terminológia USE upper self energy) növekedésében nyilvánul meg. Az USE nagysága főként nagynyomású gáztávvezetékek, esetén a repedés terjedés sebességének csökkenésében, illetve a repedésterjedés megállításában van jelentősége.

3.3. Korrózióállóság

A nyomástartó berendezések és csővezetékek, főként nagynyomású földgáz távvezetékek esetén fontos követelmény a korrózió állóság. A korrózió nagy nyomású, illetve nagy hőmérsékletű környezetben fordul elő. A hidrogén atomos állapotba kerülhet vegyi reakció, vagy elektrolízis következtében. Az atomos állapotú hidrogén abszorbeálódik az acélba és a következő hatásokat váltja ki:

- A hidrogén bontja a vaskarbidot, metán képződik.
- Az α vasban (ferritben) oldódó hidrogén rideg állapotot hoz létre.
- A szulfid zárványokkal reakcióba lép és kénhidrogén keletkezik.

A TMCP acélok kén tartalma ppm nagyságú lehet. Azonban a hengerlés következtében a szulfid zárványok sorosan, a hengerlési felülettel párhuzamosan helyezkednek el. A szulfid zárvány és a hidrogén kölcsönhatásaként lamináris hibák (repedések) keletkeznek, amelyek kezdetben a hegesztett kötés roncsolásmentes (UT) vizsgálatát teszik lehetetlenné, később jelentős mértékben csökkentik a hegesztett kötés teherbírását. A HIC (Hydrogen Induced Cracking), a SOHIC (Stress Oriented Hydrogen Induced Cracking) és az SSC (Sulphide Stress Cracking) korróziós folyamatok részben a vizsgálati szabványokon [16, 17] keresztül, részben pedig, többek között a [18] közlemény alapján érthetők meg.

A HIC, a SOHIC korrózióállóság szempontjából a TMCP acélokhöz képest lényegesen kedvezőbbek a QT acélok. A QT acélokból a szulfid zárványok, a hengerlést követő kettős hőkezelés hatására gömbösödnek és nem alkotnak egybefüggő elnyújtott zárványsort.

3.4. A folyáshatár és a szakítószilárdság viszonya

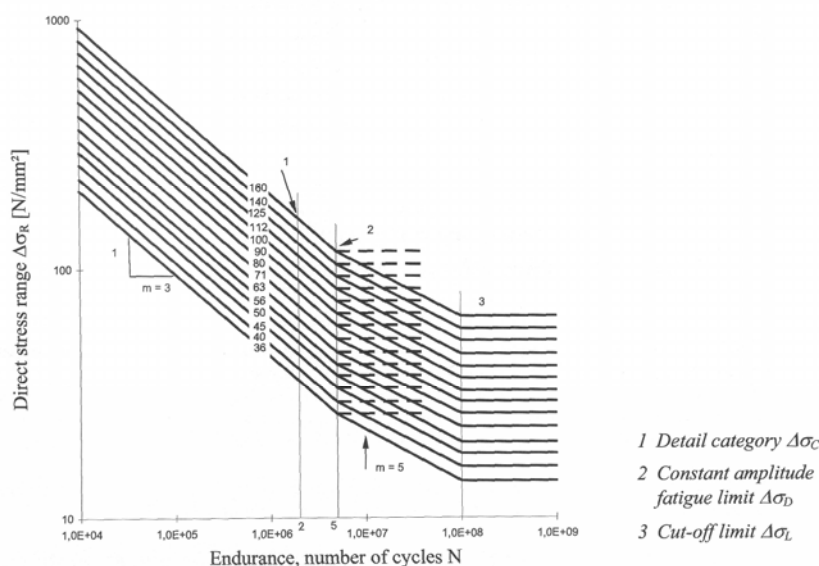
A jelenleg alkalmazott méretezési módszerek (DBF, DBR) szerint a folyáshatár és a szakítószilárdság viszonyának növekedése hátrányosan érinti a TMCP acélok alkalmazását.

Hátrányok származnak abból, hogy a TMCP acélokat korlátozott módon lehet hegesztést követően feszültség csökkentő hőkezelni. A TMCP eljárással kapcsolatban nem szabad summás véleményt nyilvánítani az alkalmazás korlátainak tekintetében. A folyáshatár és a szakító szilárdság viszonyának hatását szerkezet típusonként kell értékelni.

4. A TMCP acélok néhány alkalmazási területe

4.1. Acélszerkezetek

Az acélszerkezeteket (hidakat, darukat, darupályákat, stb.) elsősorban fáradásbírásra és stabilitásra méretezik. Az acélszerkezetek (csomóponti) elemeinek és a hegesztett kötéseinek fáradásbírását a [19] szabvány, illetve ennek háttéranyagát [20] tartalmazza. A [19] szabvány nyomán a fáradási görbéket a 2. ábra ismerteti. Feltételezve az $r=0$ terhelési módot a $\Delta\sigma=160-36$ MPa között változik, ami a folyáshatár töredéke.



2. ábra Acélszerkezetek fáradási osztályai

Megengedett lehajlásra végzett méretezéskor a folyáshatár legfeljebb harmada a méretezési határfeszültség.

A stabilitásra (kihajlásra, horpadásra) méretezett szerkezeti elemek esetén nyomó feszültség lép fel.

Azonban a TMCP acélok kis ötvöző tartalma miatt egyszerű (előmelegítés nélküli) hegesztési munkarenddel hegeszthetők, ami rendkívül előnyt jelent a gyártás, főként a helyszíni szerelés során végzett hegesztések esetén.

Természetesen az $R_{p0,2} > 460$ MPa névleges folyáshatárú acélok esetén figyelemmel kell lenni arra, hogy a varratba jutó, diffúzióképes hidrogén hatására a repedésképződés veszélye a hegesztési varratra tevődik át.

Kedvező a TMCP acélok réteges tépődéssel (lammelar tearing) szembeni ellenállása. A [21] szabvány Z15, Z25, Z35 kategóriákat különböztet meg. Az MSZ EN 1993-1-10 szabvány 3.2. táblázatában találunk szempontokat a Z kategória megválasztásához.

4.2. Földmunka gépek

A földmunkagépek működő elemei, illetve ezeket működtető karok méretezését sajátos módon végzik. Alap egy szilárdsági méretezés, ehhez kapcsolódik a gyártó széleskörű információ gyűjtése, a meghibásodásokkal kapcsolatban. Ezek figyelembevételével kerül sor a földmunkagép nagy és igen pontatlanul meghatározható igénybevétellel terhelt elemeinek acélmegválasztására. A földmunkagépek az egyik jelentős alkalmazási területe a TMCP acéloknak. Az alkalmazás során a kedvező hegesztési munkarendet és a nagy szilárdságot egyaránt ki tudják használni.

4.3. Nyomástartó berendezések

A nyomástartó berendezések méretezésekor (DBF) $R_{p0,2}/n_1$, vagy R_m/n_2 feszültséget alapul, ahol $n_1 = 1,5$, $n_2 = 2,4$. Az $n_1/n_2=0,625$, ami azt jelenti, hogy ha az $R_{p0,2}/R_m < 0,625$ az $n_1=1,5$ biztonsági tényező vehető figyelembe, ez a normalizált állapotú acélok esetén mindenkor teljesül. Azonban, ha az $R_{p0,2}/R_m > 0,625$ a szaktípus szilárdsághoz rendelt biztonsági tényezőt kell figyelembe venni. A TMCP acélok esetén az $R_{0,2}/R_m \rightarrow 0,9-0,95$ értékhez, a biztonsági tényező pedig az $n \rightarrow 2,4$ értékhez. Ebből következik, hogy a TMCP acélok folyáshatárának növekedéséből származó előnyök egyre csökkenő mértékben használhatók ki.

A nyomástartó berendezések bűvónyílással (DN 500, DN 600) kell, hogy rendelkezzenek, illetve további, különböző méretű kiváltásokat (csonkokat) tartalmaznak. A bűvónyílás és a csonkok feszültségkoncentrációt (SCF) jelentenek.

Amennyiben integrált csonkot, vagy integrált bűvónyílást alkalmaznak az $SCF=1,1-1,3$, hegesztett merevítő galléros erősítés esetén az $SCF=2-2,25$.

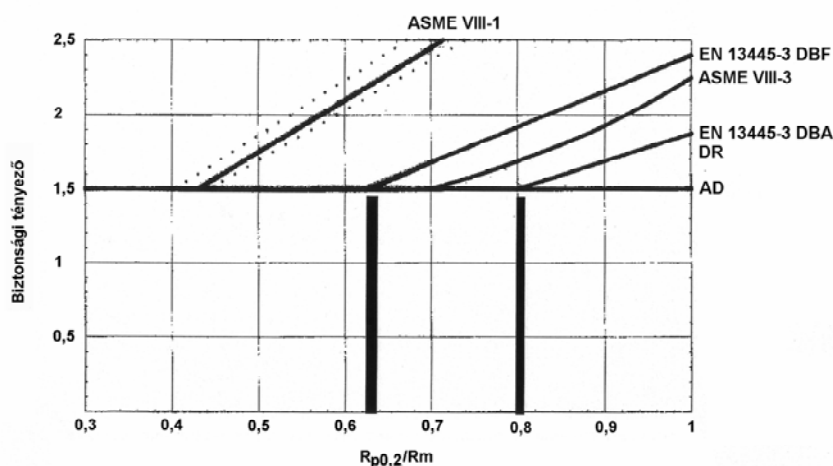
Kedvezőtlen megoldást véve, ha az $R_{p0,2}/R_m \rightarrow 0,9-0,95$, az $(R_m/2,4) \cdot (2-2,25) = (0,83-0,94) \cdot R_m$.

Abban az esetben, ha az $R_{p0,2}/R_m > 0,83$, a kiváltások környezetében ébredő feszültség meghaladja az egyezményes folyáshatárt. A TMCP acélok a rugalmas nyúlást meghaladó feszültség esetén kevésbé hajlamosak felkeményedésre, illetve mindenképpen számolni kell a Lüders sávok aktiválásával.

A nyomástartó berendezések nagy többsége esetén feszültségkorróziós károsodással kell számolni. A feszültség korrózió megelőzése érdekében szükség van a berendezések feszültség csökkentő hőkezelésére. Ennek azonban a TMCP acélok esetén jelentős korlátja van (pl $P < 17,5$).

A nyomástartó berendezések gyártásához fenekekre, kovács darabokra (kari-mákra, csőfalakra) van szükség. Ezeket, a termékeket TMCP eljárással nem lehet gyártani, nemesített (QC) acélok használatára vagyunk utalva.

Az European Pressure Equipment Research Council (EPERC), amelyben Magyarország is képviselteti magát (BAYLOGI-GTE) fontos programjának tekinti az acélok megbízható, jobb kihasználását. A biztonsági tényezővel kapcsolatban tett megállapítását az 3. ábra foglalja össze a [22] dokumentum.



3. ábra Biztonsági tényező változása a folyáshatár és a szakítószilárdság hányadosa függvényében

4.4. Távvezetékek

A távvezetékek esetén a pontatlan illesztések (éleltolódások, ovalítás), illetve a gyök és a korona oldali geometriai eltérések okoznak feszültség koncentrációt (SCF).

A felsorolt esetekre, amennyiben teljesül az MSZ EN ISO 5817 szabvány B követelménye, az $SCF < 1,3$. Távvezetékek esetén a folyáshatárra vonatkoztatott biztonsági tényező $n_1 = 1,5$, vagy 2. A TMCP eljárással gyártott csövek esetén az $R_{p0,5}/R_m \leq 0,9$ esetén nem áll fent annak veszélye, hogy a terhelésből származó feszültség meghaladja az egyezményes folyáshatárt. Adott nyomás és átmérő esetén az acélok szilárdságát korlátozza a körvarratok hegesztése (illesztés) és a csövek belső, külső korróziója (a passzív, aktív korrózió védelem ellenére).

5. Vizsgálatok

5.1. A távvezeték

A 64 bar üzemi nyomású földgázt szállító távvezeték építéséhez az MSZ EN 10208-2 szabvány szerinti, L 485 MB jelű acélból gyártott 1020x25 mm méretű hosszvarratos és 1016x12,7 mm méretű spirálvarratos csöveket használtak. A távvezeték D=1420 mm átmérőjű szakaszának hossza 8 km, a D=1016 mm átmérőjű szakasza, pedig 220 km. Átlagosan 15 m hosszú csöveket véve (a szállítási szerződés szerint ettől a gyártó a szállított tétel 10%-ában térhetett el), 533 db D=140 mm átmérőjű és 14670 db D=1016 mm átmérőjű cső került beépítésre a távvezetékbe (ezek tájékoztató adatok és a nagyságrendre vonatkoznak). A hegesztési varratok hosszúsága, 48177 m (ebből a D=1420 mm átmérőjű csövön készült varratok hossza 2377 m volt). A hegesztési varratok hosszúságában nem szerepelnek a javított varratok hosszúsága.

5.2. A távvezeték hegesztése

A távvezetékét az 5. táblázat szerinti eljárásokkal és hegesztőanyagokkal hegesztették.

A 111 eljáráshoz cellulóz bevonatú elektródát, a 136 eljáráshoz, pedig rutilos portöltetű huzalt használtak, amelyekre 30-40 ml/100 gr fém, illetve 10-15 ml/100 gr fém diffúzióképes hidrogén tartalom a jellemző.

A hegesztők az adott feladatra megfelelő minősítéssel rendelkeztek. A Mag-natech Pipeliner II hegesztőgép kezeléséhez, az MSZ EN 1418 szerint kiegészítő minősítést szereztek.

A WPS-eket, független szervezetek által vizsgált és megfelelőnek talált WPQR-ek igazolták.

5. táblázat

Jel	Eljárás	Hegesztési helyzet	Hegesztő anyag	
			Gyöksor	Töltősor
111/111	111	PG	E 383 C 2 1	-
	111	PG	-	E 503 1 Ni C 25
135/111	135, STT	PF	G 42 4 MG 2 Si 1	-
	111	PG	-	E 503 1 Ni C 25
135/136	135, STT	PF	G 42 4 MG 2 Si 1	-
	136, MT	PF		T46 2 P 1 M H10

Nem szorosan tárgya előadásomnak, de fontosnak tartom a hegesztéssel és az ellenőrzéssel kapcsolatban a következő észrevételeket:

A hegesztők minősítését bázisokon, vagy a kivitelező telephelyén végzik, a korrekt WPQR-el alátámasztott WPS szerint.

A távvezetékek hegesztését sajátos körülmények között, terepen az átmérőtől függően 2, vagy 4 (esetünkben 2) hegesztő végzi. A hegesztők között megfelelő összhangnak kell lenni. Ezeket, a körülményeket, a szabvány szerinti minősítés nem veszi, nem tudja figyelembe venni. Ezért lényeges, hogy a hegesztők az adott helyszíni körülmények között egy OS (on site) kiegészítő minősítést kapjanak, amelyet a hegesztő felelős adhat meg. Az OS minősítés a hegesztők kiválasztását, párba állítását és gyakoroltatását jelenti, ami nem ellenkezik a jelenlegi minősítési rendszerrel, mivel az OS bemeneti feltétele az adott feladatra érvényes MSZ EN 287-1 szerinti minősítés.

A WPQR a WPS megfelelőségét igazolja és semmit nem mond a távvezeték (adott szerkezet) hegesztett kötésének tulajdonságáról.

A roncsolásmentes anyagvizsgálók esetén is szükség van az OS (az adott feladat sajátosságait figyelembe vevő) kiegészítő minősítésre, különös tekintettel a volumetrikus vizsgálatok (UT, RT) esetén.

5.3. A vizsgálatok terjedelme

1. Roncsolásmentes (RT) vizsgálatok újra értékelése.
2. Távvezetéki varratok szabvány szerinti (rutin) vizsgálata.
3. Kiegészítő roncsolásos vizsgálatok.
4. Szempontok a TMCP eljárással gyártott csövek hegesztési munkarendjének meghatározásához.
5. A diffúzióképes hidrogén a sokrétegű varratokban.
6. Repedés oka és a javításának módja.
7. Adatbázis és módszer a távvezetékek élettartam menedzseléséhez.

A 3. pontszerinti vizsgálatokat a KVV Zrt. anyagvizsgáló laboratóriuma, a kiegészítő roncsolásos vizsgálatokat szakértői irányításom mellett a BAY-LOGI végezte.

A kiegészítő roncsolásos vizsgálatok azokat a többlet vizsgálatokat azokat a vizsgálatokat jelentik, amelyek a TMCP acélok sajátosságait veszik figyelembe, illetve az élettartam menedzselés adatbázisába kerültek.

A terjedelmes munkából néhány, a TMCP acélok hegesztett kötéseinek tulajdonságával kapcsolatos részletet emelek ki.

Rittinger János: Termomechanikusan kezelt acélok hegesztése és a hegesztett kötések tulajdonsága

5.4. Részletek a vizsgálati eredményekből

A távvezeték építéséhez felhasznált csövek összetételének átlagértékét a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat

C	Si	Mn	P	S	Ti	V	Al	V	Nb
0,08	0,31	1,68	0,013	0,005	0,016	0,07	0,039	0,068	0,006

A táblázat adatai alapján számított szénegyenértékek:

$C_e = 0,36\%$ (az IIW javaslat szerint)

$P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5.B$ szerint, a

$P_{cm} = 0,176\%$ (a megengedett érték 0,27%)

A hegesztési varratok összetételét pedig a 7. táblázat tartalmazza.

7. táblázat

	C	Mn	Si	S	P	Ti	V	Al	Nb
111/111	0,15	1,13	0,20	0,007	0,016	0,02	0,09	0,003	0,005
135/136	0,09	1,40	0,59	0,015	0,013	0,07	0,03	0,013	0,030

Alapanyagból és a hegesztési varratokból kimunkált hengeres szakító próbatestek vizsgálata során meghatároztuk a folyásgörbéket

A folyásgörbéket a

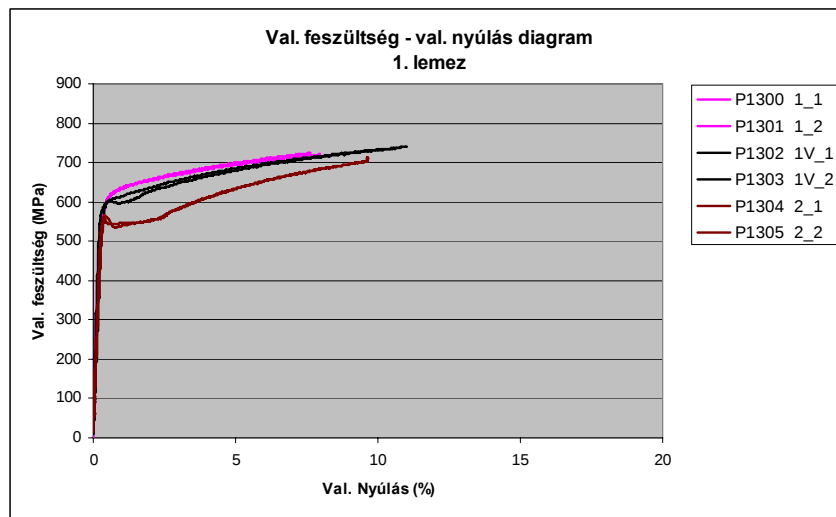
$$\sigma = K\varepsilon^n$$

alakú összefüggéssel írtuk le.

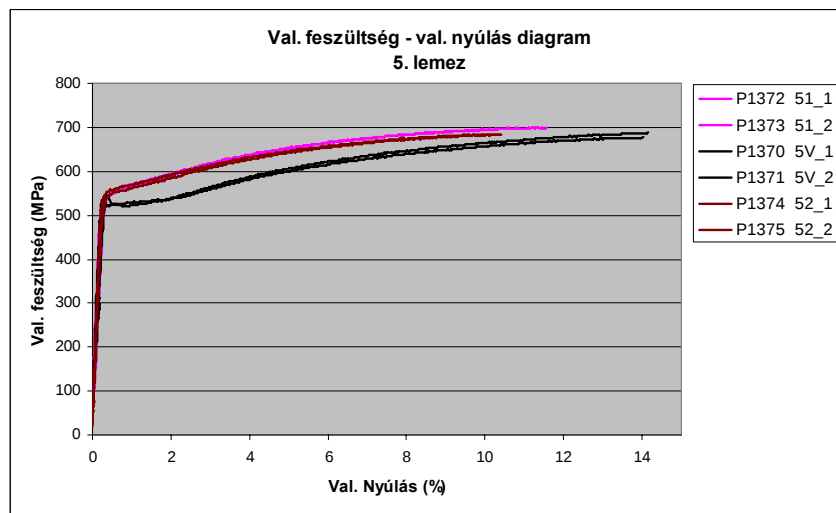
A szakító vizsgálat eredményei alapján egy esetben fordult elő, hogy $R_{p0,2}/R_m$ nagyobb volt, mint a márvány szerint megengedett 0,9. Az 5 hegesztett kötés esetén három 135/136 eljárással hegesztett varrat folyáshatára kisebb volt az alapanyag folyáshatáránál.

A folyásgörbe kitevőjének átlaga a varratok esetén 0,094, az alapanyagok esetén pedig 0,127 volt.

A tíz megvizsgált alapanyagból hét esetben észleltünk jelentős Lüders platót. Jellegzetes folyásgörbék a 4-6. ábrákon láthatók.

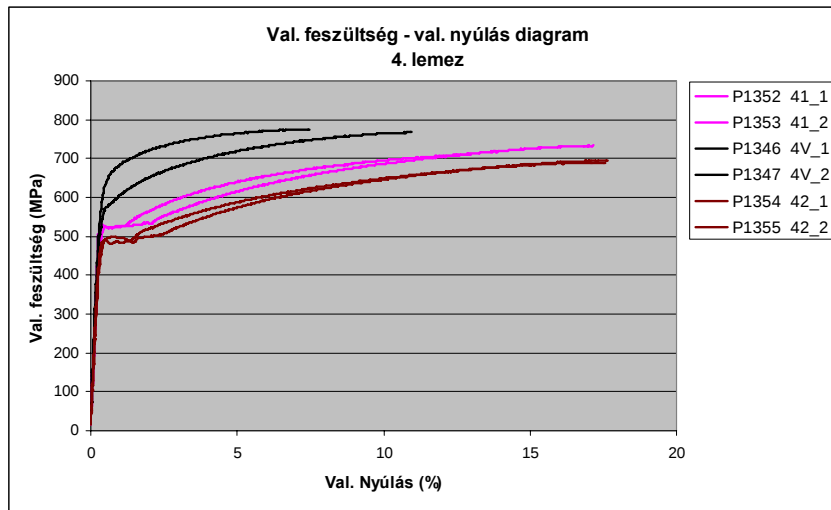


4. ábra 135/136 eljárással hegesztett cső és varrat folyásgörbéje



5. ábra 135/136 eljárással hegesztett cső és varrat folyásgörbéje

Rittinger János: Termomechanikusan kezelt acélok hegesztése és a hegesztett kötések tulajdonsága



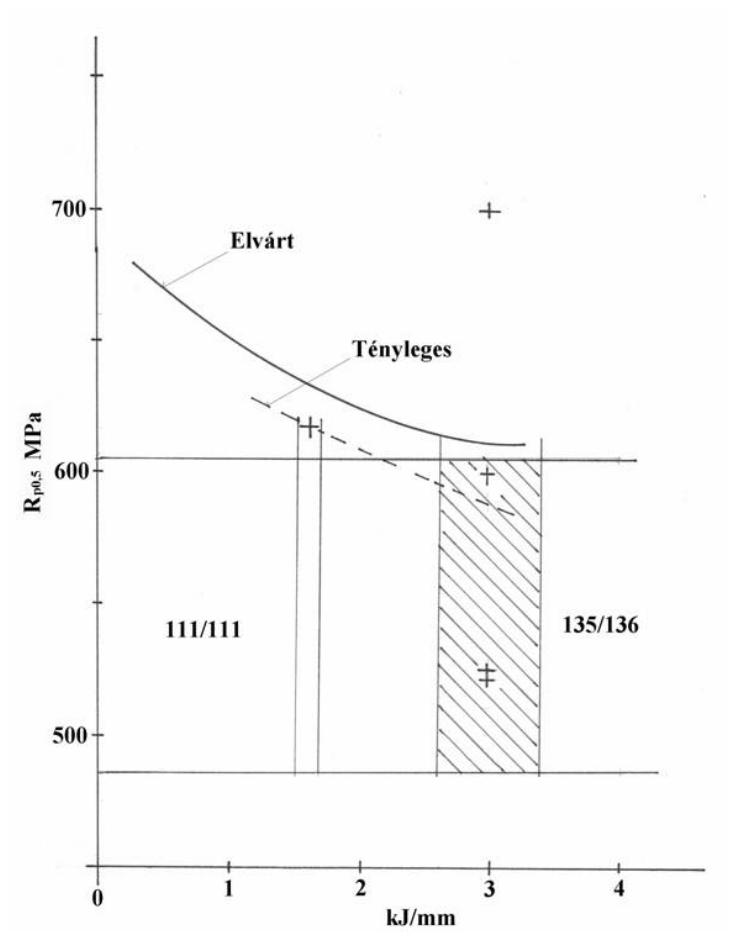
6. ábra 111/111 eljárással hegesztett cső és varrat folyásgörbéje

A fajlagos hőbevitel és a varrat folyáshatárának kapcsolatát a 7. ábra tartalmazza. A 111/111 eljárással PG helyzetben hegesztettek, a varrat sorok keresztmetszete a hegesztési helyzetből következően kicsi volt.

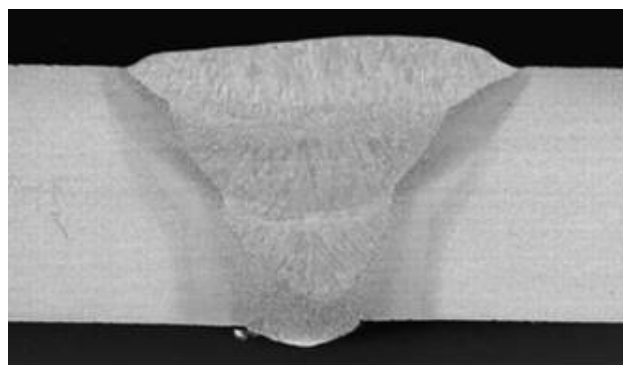
A 135/136 (STT/MAGNATECH) eljárásokkal a hegesztést PF helyzetben készítették. A hegesztési helyzetből és az ív lengetéséből következően a varrat keresztmetszete lényegesen nagyobb volt. Jellemző varratkeresztmetszet a 8. ábrán látható.

Az alapanyag folyáshatárának növekedésével fokozott figyelmet kell fordítani a hegesztő anyag és a hegesztési munkarend megválasztására. Egyre több acél-szabvány a folyáshatár elvárt legkisebb, illetve megengedett legnagyobb értéket, a szakító szilárdságra elvárt legkisebb értéket, illetve a szakító szilárdságra vonatkoztatott folyáshatára megengedhető legnagyobb értéket tartalmaz.

Ez a követelményrendszer lehetővé teszi a megfelelő hegesztőanyag és munkarend megválasztását.



7. ábra A varrat folyáshatárának változása a fajlagos hőbevitel függvényében

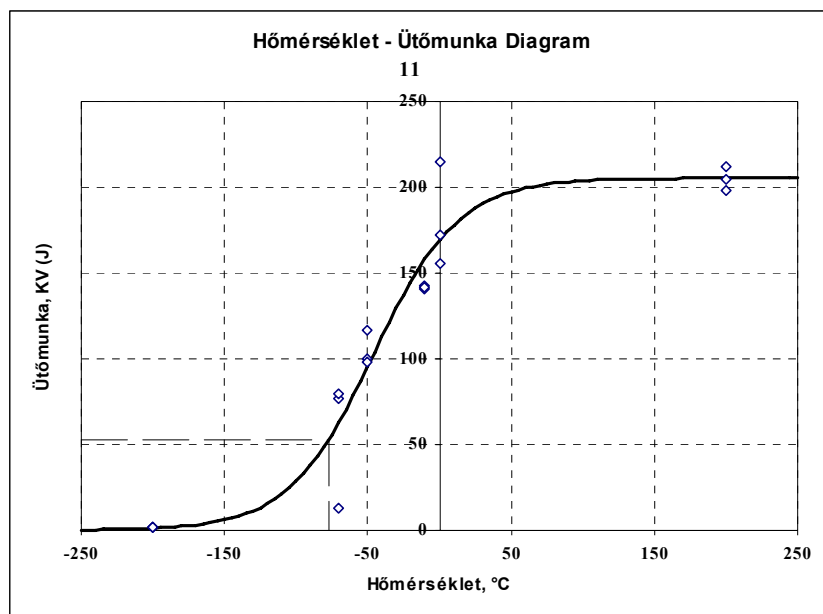


8. ábra 135/136 eljárással hegesztett varrat $N = 2x$

Rittinger János: Termomechanikusan kezelt acélok hegesztése és a hegesztett kötések tulajdonsága

Ütővizsgálatot ISOV bemetszésű próbatesttel végeztünk a szívós állapottól a rideg állapotig terjedő tartományban. A KV=53 J alapján kijelölt átmeneti hőmérsékletek alapanyagok esetén -62 ... -104 °C hőmérsékleti tartományba estek. A 135/136 eljárással hegesztett varratok átmeneti hőmérséklete -19 ... -36 °C közé estek a 111/111 eljárással hegesztett varraté pedig -6 °C volt.

Jellegzetes ütőmunka-hőmérséklet görbék a 9-11. ábrán láthatóak.



9. ábra Alapanyagra jellemző ütőmunka – hőmérséklet diagram

Az ütővizsgálat eredményeire

$$KV = A + B \cdot \ln[(T - T_0)/C]$$

alakú összefüggést illesztettünk. A paraméterek jelentése:

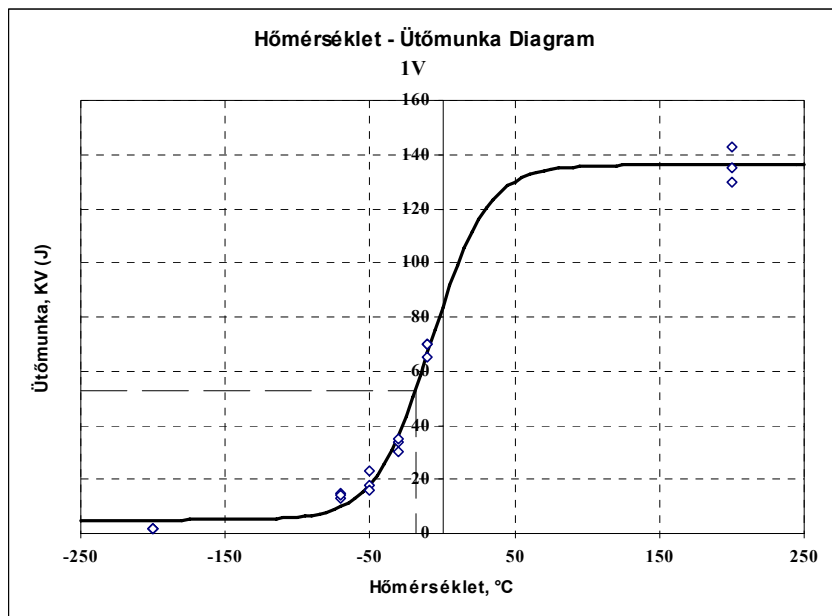
$A + B = KV_{\max} = USE$

$2C$ az átmenet hőmérsékleti tartománya

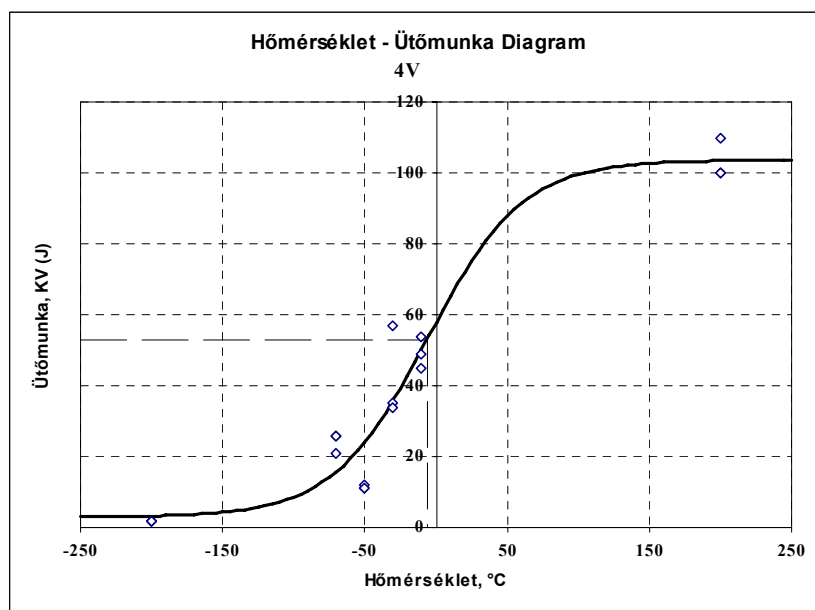
A és a T_0 a görbe inflexiós pontjának koordinátái

B/C az átmenet meredeksége.

Az állandók ismerete lehetővé teszi az eredmények adatbázisba foglalását, illetve különböző feltételhez tartozó átmeneti hőmérsékletek kijelölését.



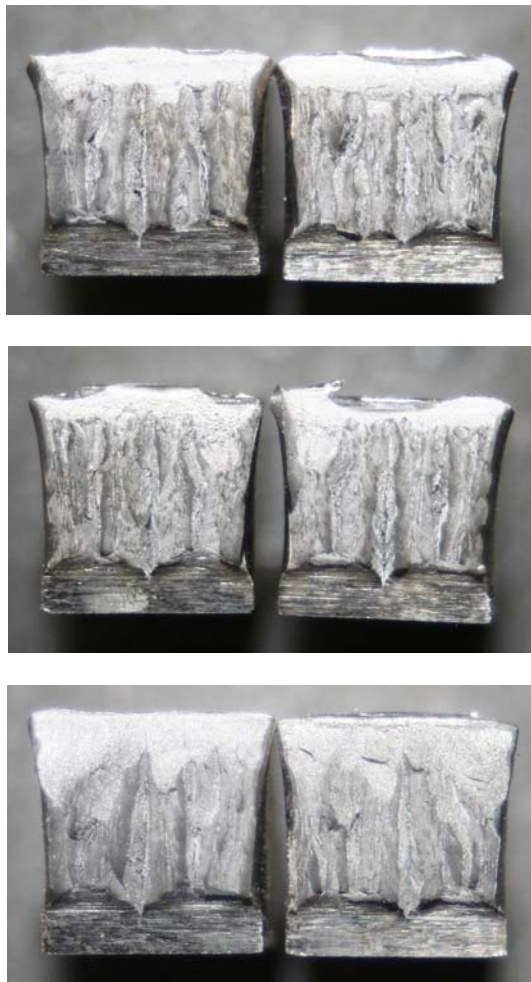
10. ábra 135/136 eljárással hegesztett varratra jellemző ütőmunka – hőmérséklet diagram



11. ábra 111/111 eljárással hegesztett varratra jellemző ütőmunka – hőmérséklet diagram

Rittinger János: Termomechanikusan kezelt acélok hegesztése és a hegesztett kötések tulajdonsága

Az alapanyagból származó ütőpróbatestek töretén jól látható a TMCP eljárás hatására kialakult soros szerkezet (12. ábra).



12. ábra Alapanyag jellemző töretei

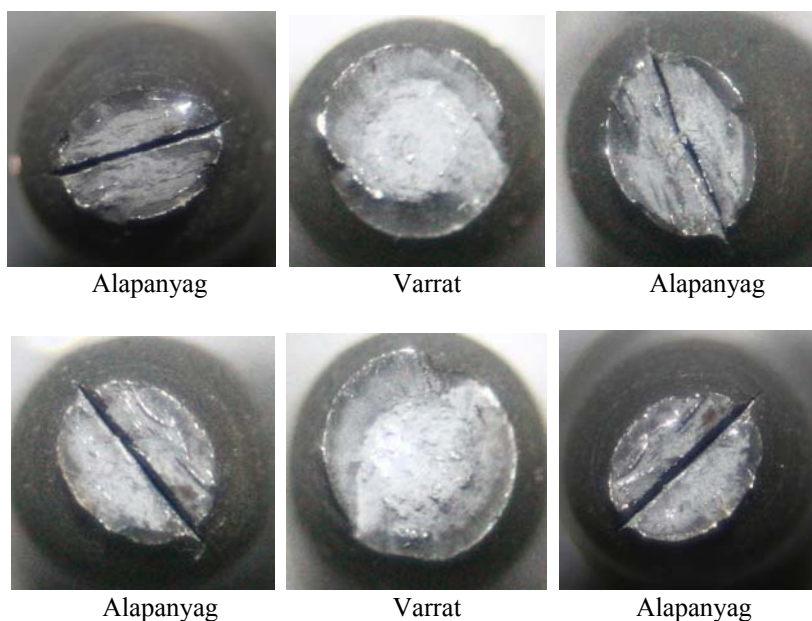
A szakító próbatest töretén a kontrakció hatására a soros szerkezet felrepedt (13. ábra).

B=10 és W=20 mm, a/w~0,5 méretű CT próbákkal meghatároztuk a varratok törésmechanikai anyagjellemzőit a távvezeték mértékadó hőmérsékletén -10 °C-on. A CTOD értéke 0,13 és 0,30 mm, a J_{IC} értéke pedig 130 és 240 kJ/m² között változott.

A J integrál és a CTOD között lineáris kapcsolat van:

$$J_{IC} = mCTOD \cdot R_{p0,2}$$

A mértéke függ a repedés relatív hosszától (a/w) és a folyásgörbe kitevőjétől. Az ASTM E 129D szabvány szerint, a mérési eredményekből számolt m érték 1,75 – 1,83 között változott. A mérési eredményekre illesztett egyenes iránytangense $m=1,8$ volt, ami jó egyezésnek tekinthető.



13. ábra Alapanyag és hegesztési varrat szakító próbatestek törétfelülete

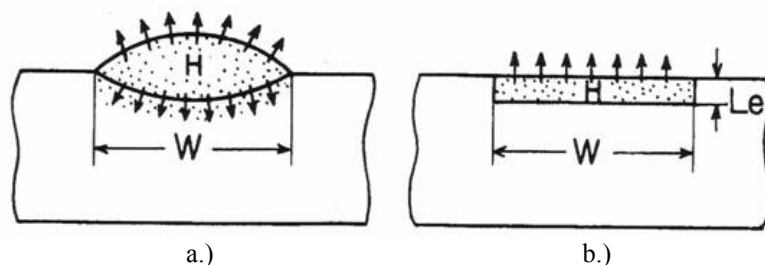
A hegesztési varratokat értelem szerűen nem lehet termomechanikusan hengerelni. Ahhoz, hogy a varrat folyáshatára legyen nagyobb, mint az alapanyag folyáshatára ötvözött hegesztő anyagot kell választani. A TMCP acélok ötvöző tartalma nagyon kicsi, ezért széles tartományban előmelegítés nélkül hegeszthetők, nem keletkezik repedés a hőhatás övezetben.

Az ötvözött hegesztőanyag esetén főként, ha nagy a hegesztőanyag diffúzióképes hidrogén tartalma, előmelegítésre lesz szükség a varrat repedésmentessége miatt.

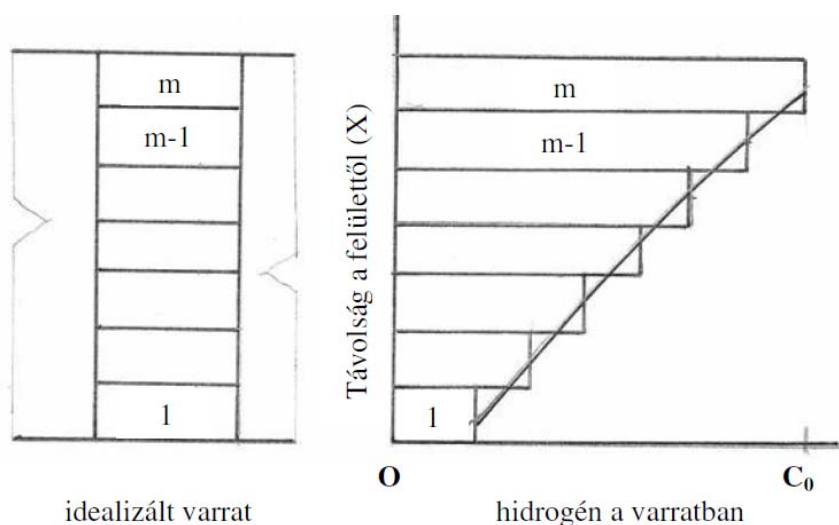
A hegesztőanyagok diffúzióképes hidrogén tartalmát egy varratsorban határozzák meg (14. ábra).

A hegesztett kötések több sorral készíthetők, ezt idealizálja a 15. ábra. Az egyen varratsorok felhalmozzák a hidrogént a hegesztési varratban. A felhalmozódással ellentétes folyamat is működik, és a hidrogén jelentős része a felületeken át diffúzióval távozik. Ezt a két hatást ismerteti a 16. ábra. Az ábrában $X = x/L_e$. A távolság frakció, x a gyök oldaltól mért távolság, L_e jelentését a 14.b ábra ismerteti, $\tau = Dt/T_e^2$.

Rittinger János: Termomechanikusan kezelt acélok hegesztése és a hegesztett kötések tulajdonsága

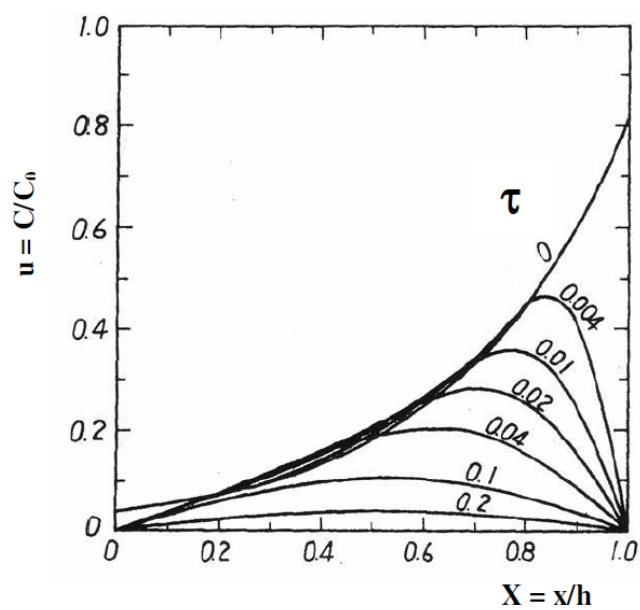


14. ábra A diffúzióképes hidrogén meghatározása egyrétegű varrat esetén (a).
A diffúzióképes hidrogén meghatározásához felhasznált modell (b)

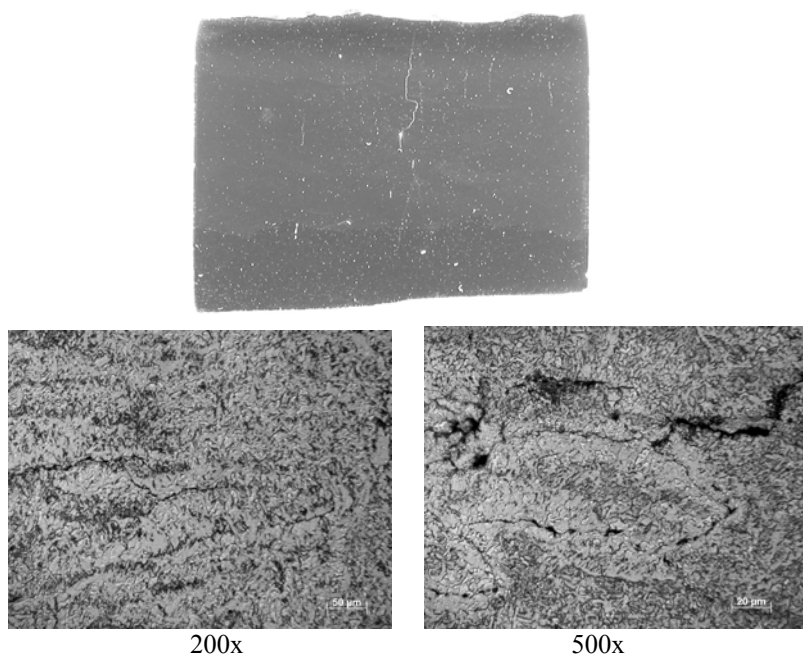


15. ábra Hidrogén többretegű varratban a 14.b. ábra szerinti modell alapján

Legtöbb hidrogén vastagság 80% körüli zónában halmozódik fel. Hidrogén hatására a varratra merőleges irányú repedések keletkeznek. A 17. és 18. ábra egy L 485 MB jelű acélból gyártott $D=1420$ mm átmérőjű és $s=25,4$ mm vastagságú cső cellulóz bevonatú elektródával készített, előmelegítés nélkül hegesztett varratának hosszmetsetét ismerteti. Jól láthatók a keresztirányú repedések. Az alapanyag szénegyenértéke $C_e=0,36\%$ (IIW), illetve a $P_{cm}=0,17\%$ volt, ami valóban nem igényelt a hőhatás övezet repedésmentességéhez előmelegítést. A hegesztési varrat azonban megrepedt.

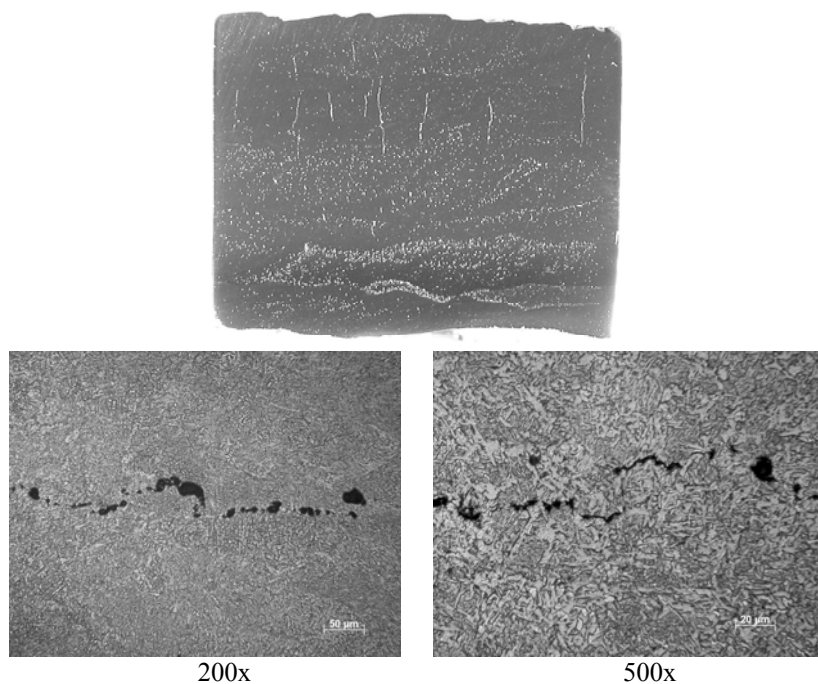


16. ábra A hidrogénfrakció (u) és a távolsághfrakció (X) különböző τ értékek esetén



17. ábra Keresztirányú repedések

Rittinger János: Termomechanikusan kezelt acélok hegesztése és a hegesztett kötések tulajdonsága



18. ábra Keresztirányú repedések

Megállapítások

Egy új acél bevezetésekor nem lehet kizárólag az acélgyártó ajánlásaira hagyatkozni. Részletesen vizsgálni kell az alkalmazás körülményeit, a méretezés módját és az alkalmazni kívánt hegesztő eljárást.

Teljesülnie kell annak, hogy a varrat folyáshatára legyen nagyobb az alapanyag folyáshatáránál. Ehhez kell megfelelő hegesztő anyagot választani és a hegesztési munkarendet meghatározni.

A folyáshatár növekedésével egyre szigorúbb követelményekkel találjuk szembe magunkat.

Ma még mértékadó hazai tapasztalat kevés áll rendelkezésre. A tapasztalatokat csak saját vizsgálatok eredményeiből gyűjthetjük össze.

Irodalomjegyzék

- [1] ASTM A 841 Standard Specification for Steel Plates for Pressure Vessels, Produced Thermo Mechanical Controls Process (TMCP)
- [2] MSZ EN 10028-5 Lapostermék nyomástartó berendezésekhez. Hegeszthető, finom szemcsés termomechanikusan hengerelt célok

- [3] MSZ EN 10025-4 Melegen hengerelt termék szerkezeti acélból. Termomechanikusan hengerelt hegeszthető finomszemcsés szerkezeti acélok műszaki szállítási feltételei
- [4] MSZ EN 10208-1 Acélcsővek éghető cseppfolyós anyagok csövezetékeihez. Műszaki szállítási feltételek. **A** osztályú csövek
- [5] MSZ EN 10208-2 Acélcsővek éghető cseppfolyós anyagok csövezetékeihez. Műszaki szállítási feltételek. **B** osztályú csövek
- [6] Knauf, G., Hopkins, P.: The EPRG Guidelines on the Assessment of Defects in Transmission Pipeline Girth Welds. R International. 10-11/1996, Essen, Vulkan-Verlag, 1996
- [7] MSZ EN 14163 Petroleum and Natural Gas Industries - Pipeline Transportation System – Welding of Pipelines (ISO 13847 modified)
- [8] MSZ EN 12732 Gázellátó rendszerek. Acélcsővek hegesztése. Műszaki követelmények
- [9] MSZ EN ISO 17642-3 Fémek hegesztett kötéseinek roncsolásos vizsgálata. Hegesztett alkatrészek repedés vizsgálata. Ív hegesztő eljárások. Külső terhelésű próbatest vizsgálata (ISO 17642-3)
- [10] MSZ EN ISO 3690 Welding and Allied Process-Determination of Hydrogen Content in Ferritic Arc Weld Metal (ISO 3690:2000)
- [11] Uwer, D., Höhne, H.: Ermittlung angemessener Mindestvorwärmtemperaturen für das kaltrissichere Schweißen von Stählen. Schweißen und Schneiden **43** (1991) H.5, 282/286
- [12] Okuda, N., Nishikawa, Y., Goto, A., Abe, T.: Hydrogen Induced Cracking Susceptibility in High Strength Weld Metal. Welding Journal **66** (1987) 141s/146s
- [13] Yurioka, N.: Predictive Methods for Prevention and Control of Hydrogen Assisted Cold Cracking. Doc. IX-1938-1999 (IIW/IIS)
- [14] Hart, P., P., M.: Resistance to Hydrogen Cracking in Steel Weld Metals Welding Journal **65** (1986), 14s/22s
- [15] Chakravarti, A., P., Bala, S., R.: Evaluation of Weld Metal Cold Cracking Using G_{BP} Test. Welding Journal **68** (1989) 1s/8s
- [16] ANSI/NACE TM0284 Standard Test Method. Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking
- [17] NACE Standard MR1103 Materials Resistant to Sulfide Stress Cracking in Corrosive Petroleum Refining Environments
- [18] Bardal, E.: Corrosion and Protection Springer (2003)
- [19] MSZ EN 1993-1-9 Eurocode 3: Acélszerkezetek tervezése. 1-9. rész Fáradás
- [20] Hobbacher, A.: Recommendation for Fatigue Design of Welded Joints and Components. IIW-1823-07 (IIW/IIS, 2008)
- [21] MSZ EN 10164 Felületre merőleges irányban javított alakítási tulajdonságú acéltér-mék. Műszaki szállítási feltételek