



A vágógázok hatása a termikusan vágott, nagy szilárdságú acélok keménységére

Effect of Cutting Gases on the Hardness of Thermally Cut High Strenght Steels

Kuti János,¹ Fábián Enikő Réka,² Gáti József³

¹ Óbudai Egyetem, Anyagtudományi Doktori Iskola. Budapest, Magyarország, janos.kuti@gmail.com

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Budapest, Magyarország, fabian.reka@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

In this work, it was illustrating the consequences of flame cutting on XAR® 400 and S960Q type high-strength steels. During flame cutting, the metal, locally heated to ignition temperature, burns in the oxygen beam and removes the resulting combustion product from the kerf. As a result of the process, chemical and physical changes occur in the microstructure of the steel, which can have a significant effect on its properties. Examining the microstructural transformations due to flame cutting of high-strength steels is essential from the point of view of proper design and production. In case of XAR® 400 steel quality, increasing the cutting oxygen significantly changes the microstructure, with a high reduction in hardness in the heat affected zone at cutting zone. For S960Q steel, flame cutting does not cause a drastic change in the microstructure of steel, and increasing the amount of cutting oxygen does not significantly change the hardness.

Keywords: flame cutting, hardening, high strength steel.

Összefoglalás

Ebben a munkában XAR® 400 és S960Q típusú nagy szilárdságú acélok lángvágásának következményeit szemléltettük. A lángvágás során a helyileg gyulladási hőmérsékletre hevített fém az oxigénsugárban elég, és a keletkező égésterméket a vágási résből eltávolítja. A folyamat eredményeképpen az acél szerkezetében kémiai és fizikai változások következnek be, amelyek jelentős hatással lehetnek annak tulajdonságaira és szerkezetére. A nagy szilárdságú acélok termikus vágása szerkezeti átalakulásainak vizsgálata elengedhetetlen a megfelelő tervezés és gyártás szempontjából. XAR® 400 acélminőségnél a vágóoxigén növelése jelentősen módosítja a szövetszerkezetet, a vágás környezetében nagy a keménységcsökkenés. A S960Q acélnál a lángvágás nem okoz jelentős szövetszerkezetbeli változást, a vágóoxigén mennyiségének növelése nem változtatja jelentősen a keménységet.

Kulcsszavak: lángvágás, keményedés, nagy szilárdságú acél.

1. Bevezetés

Napjainkban egyre jobban előtérbe kerülnek a nagy szilárdságú és a növelt szilárdságú acélok [1, 2]. A fő mozgatóerő a szerkezet tömegének csökkentése. Hiszen a nagyobb mechanikai tulajdonságú alapanyagból elég a kisebb szelvénykeresztmetszet vagy falvastagság ugyanazon teher viseléséhez. Mivel a szerkezeti és a növelt szilárdságú acélok sűrűsége közel azonos, ezért belátható, hogy az így felépített szerkezetek, járművek tömege kisebb lesz azonos szilárdság mellett [3, 4]. Szerkezetek gyártásakor ezeket az acélokat vágni, illetve esetenként hegeszteni kell. A hidegmegmunkálási módszerek, a nyírás és a lyukasztás,

³ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Budapest, Magyarország, gati.jozsef@bgk.uni-obuda.hu

körülbelül 10 mm lemezvastagságig alkalmazható, és főleg a lágyabb szerkezeti acélokra korlátozódnak [5]. A nagy szilárdságú acélok jellemzően termikus vágással feldolgozhatók, de főleg vastag lemezek esetén számos szövetszerkezeti változás következik be, esetenként a vágott éleknél repedés is létrejöhet [5].

A Thyssan Krupp Steel által gyártott XAR® 400-as acélt elsősorban nagy kopásállóság és jó ütésállóság jellemzi, emellett jól hajlítható és hegeszthető. Az XAR® 400 minőségű acél a kívánt tulajdonságait az ausztenitesítési utáni gyors hűtésnek és az azt követő A_{r1} hőmérséklet alatti megeresztésnek köszönheti. Főbb alkalmazási területei a karbantartás, kohászat, energetikaipar, a szén- és cementgyártás [6].

Az SSAB nemesített, nagy szilárdságú acélja, az S960QL nagy szilárdsági jellemzőit az ötvöző tartalomnak és a meleghengerlést követő edzésből (Q), illetve nagy hőmérsékletű megeresztésből (HTT) álló (kétciklusú) hőkezelésnek köszönheti.

A nagy szilárdságú acélok termikus vágásakor, akárcsak hegesztésekor, a szövetszerkezetben változások következnek be. Szakirodalomból ismert, hogy a nagy szilárdságú acélok hegesztésekor a hőhatásövezetben a szövetszerkezet és ennek következtében a keménység is változik [7, 8]. A nagy szilárdságú acélok hagyományos szerkezeti acélokhoz képest nagyobb érzékenységet mutatnak a hegesztési, vágási hőbevitelre. Míg a kis vagy közepes szilárdságú acéloknál a hőhatásövezet szívósságát és keménységét jelentősen befolyásolhatja a t_{8/5} hűtési idő, addig az S960QL esetében a leggyakoribb ívhegesztési eljárások t_{8/5}=2,5–30 s teljes hűtési időtartományában jelentős keményedés- és szívósságcsökkenést figyeltek meg. A t_{8/5} = 100 s esetén lágyulást és rendkívül kicsi Charpy-féle ütővizsgálati értékeket állapítottak meg [9].

Felmerül a kérdés: mi történik a vastag lemezek vágásakor a vágott él környezetében? A vágási technológia milyen hatással lesz a vágott él környezetére?

2. Kísérleti anyagok és technológiák

A kísérletekhez az XAR 400 és az S960Q típusú, mikroötvözött, finomszemcsés, nagy szilárdságú acélokat használtuk. Az XAR 400 acél névleges összetétele: C = 0,14%, Si = 0,22%, Mn = 1,14%, Al = 0,1%, B = 0,002% P = 0,01%, S = 0,001%, Cr = 0,23%, Mo = 0,01, Nb = 0,02%, Ti = 0,05% [10].

Az S960Q acél névleges összetétele: C = 0,16%, Si = 0,2%, Mn = 1,22%, Cr = 0,2%, Ni = 0,05%, P = 0,011%, S = 0,01% [11].

A vizsgálatok során különböző vastagságú acéllemezeket alkalmaztunk. Az XAR® 400 acél esetében 8 mm, az S960Q jelűnél pedig 10 mm vastagságú acéllemezeken végeztük a méréseinket. A vágásra szánt acélok szövetszerkezetét az 1. ábrán láthatjuk.

Kísérleteinkhez mindkét anyagminőségnél 300 mm hosszú próbadarabokat vágtunk különböző módszerekkel a Linde Magyarország Zrt. budapesti telephelyén. A technológiai adatokat az 1. táblázat mutatja.

Kézi vágáskor egy oxigénbetáplálás volt, a gépi vágásnál külön volt a hevítő- és a vágóoxigén-adagolás, az égő kialakítása fejkeveréses volt.

Lángvágáskor a láng a felületen addig melegíti az anyagot, amíg az a gyulladási hőmérsékletét el nem éri. Oxigént fújva a vágási nyomba az anyag égni kezd. Az égés további hőt szabadít fel. Ez pedig az alatta lévő anyagot melegíti fel a gyulladási hőmérsékletre. Ez lehetővé teszi, hogy a folyamat



1. ábra. A vágásra szánt lemezek szövetszerkezete, a) XAR® 400, b) S960Q

Jel	Fúvóka	Éghető gáz	p _{02h}	p _{02v}	p _{ég}	V _{O2h}	V _{O2v}	V _{ég}	v	у	Rés
			bar			L/h			cm/min	mm	
CAK	ANME10-30	C_2H_2	4	4	0,5	700	1500	350	48	10	
СРК	HP337	C ₃ H ₈ /O ₂	3	4	0,5	600	1450	200	33	11	1,6
CAG	ANME10-30	C ₂ H ₂	2	4	0,5	400	2400	350	58	8	
CPG	PNME10-25	C ₃ H ₈ /O ₂	2	3	0,5	400	1200	200	36	10	1,7
DAG	ANME10-30	C ₂ H ₂	2	4	0,5	400	2400	350	46	8	
DPG	PNME10-25	C ₃ H ₈ /O ₂	2	3	0,5	400	1200	200	34	10	1,7

1. táblázat. A minták jelölése a vágási adatokkal

A táblázatban alkalmazott jelölések:

Első betű: anyagminőség (C = Xar® 400; D = S960Q).

Második betű: gáz (A: acetilén, P: propán).

- Harmadik betű: G = gépi (külön hevítő- és vágóoxigén-adagolás, fejkeveréses égő), K=kézi (egy O₂-betáplálás).
- Fúvóka = a fúvóka gyári jele, a visszakövethetőséghez.

Éghető gáz = az előmelegítő lánghoz használt gázok.

 $-p_{02h} = az előmelegítő lánghoz használt oxigén nyo$ mása.

automatikusan folytatódjon. A fém-oxidok a vágóoxigénnel együtt kifújódnak a vágási résből.

Az alkalmazott vágógázok fizikai tulajdonságai különböznek egymástól.

A láng hőmérséklete acetilén esetében oxigénnel a ≈3200 °C, levegővel a ≈2100 °C hőmérsékletet is elérheti (lásd a 2. táblázatot.) Az ilyen nagy hőmérséklet gyorsabb anyagátfúrást és gyorsabb vágást tesz lehetővé. Ugyanakkor az acetilén másodlagos lánghőmérséklete viszonylag kicsi.

A propán elég nagy hőmérsékletet érhet el: a maximum 2800 °C körüli. Az acetilénnel összehasonlítva a láng koncentrációja kisebb, ami szélesebb hőhatásövezetet és hosszabb átfúrási időt eredményez. A vágási sebesség azonban hasonló. Az oxigén és a propán aránya körülbelül 4,3:1. Így a maximális hőmérséklet eléréséhez körülbelül 3,5-szer több oxigénre van szükség, mint az oxigénes-acetilénes vágáshoz [12].

2.1. Mintadarabok vizsgálatra való előkészítése

Minden elvágott darabnál vizsgálni kívántuk a vágások elején, a vágások közepén és a vágott felületek végénél tapasztalható szövetszerkezeti változásokat. A metallográfiai vizsgálati darabok a Woldem Kft. telephelyén vízsugaras vágással készültek. Az 1. minta a vágás kezdetéről, a 2. minta a közepéről, illetve a 3. minta a végéről származik. A vágási elrendezést a 2. ábra szemlélteti. A vízsugaras vágás használatára azért is volt szükség, hogy a vágás közben ne érje hőhatás a darabokat.

– p_{O2v} = a vágóoxigén nyomása.

p_{ég} = az éghető gáz nyomása.

V_{02h} = az előmelegítő láng oxigénjének térfogatárama.

– V_{02v} = a vágóoxigén térfogatárama.

- $-V_{ég}^{02v}$ = az éghető gáz térfogatárama. -v = vágási sebesség.
- y = az égő és a munkadarab távolsága.
- Rés = a vágási rés szélessége.

2. táblázat. Az éghető gázok fizikai tulajdonságai

T-11	Propán	Acetilén	
Jenemzok	C ₃ H ₈	C_2H_2	
Sűrűség: 15 °C, 0,1 MPa (kg/m³)	1,87	1,171	
Relatív sűrűség; levegő = 1	1,55	0,9	
Gyulladási hőmérséklet levegő- ben (°C)	466	335	
Gyulladási határ levegővel táplálva (V%)	2,1–9,5	3–82	
Gyulladási határ oxigénnel táplálva (V%)	2,0–48	3–93	
Lángteljesítmény (W/mm²)	104,5	448	
Lánghőmérséklet levegővel táplálva (°C)	1920	2100	
Lánghőmérséklet oxigénnel táplálva (°C)	2780	3126	
Fűtőérték, (kJ/m³)	92 000	56 800	



2. ábra. A minták vágási elrendezése: 1. mintadarab – vágás kezdete, 2. mintadarab – vágás közepe, 3. mintadarab – vágás vége

A vízsugaras vágás után az azonos lemezből kivágott minták hidegbe ágyazása egyszerre történt, kétkomponensű Duracryl plus akrilgyanta felhasználásával.

Az akrilgyanta megszilárdulását követően a mintákat egyre finomabb szemcseméretű (P60, P100, P220, P400, P600, P1200 típusú) csiszolópapírral csiszoltuk, majd, 3 µm és 1 µm szemcsefinomságú gyémántpasztát használva políroztuk. A csiszolatokat Buehler Ecomet 250 Pro berendezéssel készítettük elő. A szövetszerkezeti változások vizsgálatának érdekében a mintákat Nital-2 marószerrel marattuk.

A vizsgálati minták keménységeloszlását Buhler Wilson W 3111S berendezéssel HV 5 keménységméréssel határoztuk meg, úgy, hogy a lenyomatok lépéstávolsága a hőhatásövezetben és közvetlen közelében 1 mm, a hőhatásövezetet elhagyva 5 mm legyen.

A lenyomatok vizsgálatához és kiértékeléséhez Zeiss Axio Observer Z1m optikai mikroszkópot, illetve az ehhez tartozó egyedi számítógépes szoftvert alkalmaztuk.

3. Vizsgálati eredmények

Vizsgáltuk, hogy van-e különbség a kézi vágás és a gépi vágás között. Kísérleteinknél tanulmányoztuk az éghető gázok minőségének hatását (acetilén, illetve propán), miközben annak nyomását azonos értéken tartottuk.

3.1. Az XAR® 400 acél vágásakor bekövetkező szövetszerkezeti változások

Tanulmányozva az XAR® 400 acélnál a különböző éghető gázok hatását azt tapasztaltuk, hogy a felület közelében szövetszerkezet-változás következik be minden egyes vágáskor, bármely éghető gázt is alkalmaztuk. Ennél az acélnál a vágási él közelében dekarbonizáció volt megfigyelhető kb. 100 µm mélységig, ahogy azt a **3. ábra** is mutatja.

A XAR® 400 anyagminőségnél a felület közelében végzett keménységmérések azt mutatják, hogy a propán és az acetilén hatása kézi égő alkalmazásakor hasonló mind a vágás elején (4. ábra), mind a közepén (5. ábra), illetve a végén (8. ábra), viszont a gépi vágófej alkalmazásakor eltérés mutatkozik (7. ábra).

A vágási zóna vége felé 300 HV5-nél kisebb keménységi zóna (kilágyulás mértéke) meghaladja az 5 mm-t. A propánnal való vágáskor ez az anyag kevésbé lágyult ki kézi vágáskor, mint acetilénes vágáskor (6. ábra).

A XAR® 400 típusú acél kézi égővel való vágásakor a 4., 5. és 6. ábra keménységi eredményeit



 ábra. XAR® 400 lemez szövetszerkezet-változása a vágás környezetében



 ábra. Keménységváltozás a vágási felülettől a minta belseje felé a CAK/CPK mintáknál a vágás elején



 ábra. Keménységváltozás a vágási felülettől a minta belseje felé a CAK/CPK mintáknál a vágás közepén



 ábra. Keménységváltozás a vágási felülettől a minta belseje felé a CAK/CPK mintáknál a vágás végénél



7. ábra. Keménységváltozás a vágási felülettől a minta belseje felé a CAG-minták vágása után, a mintalemez középső szakaszán



8. ábra. A DAG/DPG acetilénnel és propánnal gépi vágófejjel végzett vágások HV5 eredményei a vágott éltől mért távolság függvényében

összehasonlítva megállapítható, hogy a keménységi értékek a vágási él közvetlen közelében kedvezőbbek propán égőgáz használata esetén, bár a különbségek nem mondhatók drasztikusnak. A vágási éltől távolabb a keménység majdnem ugyanarra az értékre áll be. Az eltérő keménységi eredmények a vágási él közelében azzal magyarázhatók, hogy az acetilén (448 W/mm²) lángteljesítménye sokkal nagyobb, mint a propáné (104,5 W/mm²), így a vágási él közelében valószínűbb a szemcsék durvulása, ami a keménységi értékek romlásához vezet.

Gépi vágófej alkalmazásakor a lemez szélén az acetilén erőteljesebb lágyulást okozott a szélső 5 mm-en, mint a propán, és egyértelműen szélesebb a kilágyult zóna, mint kézi égő alkalmazásakor (7. ábra).

A vágási él közelében az eltérő keménységi eredmények feltehetőleg azzal magyarázhatók, hogy az acetilénnek (448 W/mm²) jóval nagyobb a lángteljesítménye a propánéhoz (104,5 W/mm²) képest, így a vágási él közelében nagyobb valószínűséggel jön létre szemcsedurvulás, ami a keménységi értékek romlását eredményezi.

3.2. A különböző éghetőgázok hatása az S960Q acél szövetszerkezetére

Az S960Q anyagminőségű acélnál a propán és az acetilén hatása jelentősen eltér. Míg acetilén használatakor a vágott él szélső 5 mm-én keménységnövekedés következett be, a propán használatakor ez a zóna kilágyult, ahogy azt a **8. ábrá**n is láthatjuk. Távolodva a vágási éltől, szinte azonos értékre áll be a 2. minta keménységi értéke.

Vizsgálva az acél szövetszerkezetét, a vágott él környezetében, a szélső 10 µm-en tapasztalható megolvadt és újradermedt réteg. Azon belül durvaszemcsés primer ausztenitből kialakult, bénites szövetszerkezetet láthatunk (9. ábra).



9. ábra. S960Q anyagú acéllemez szövetszerkezete a vágási él mellett

4. Következtetések

A cikkben összefoglalt eredmények és a tapasztalatok alapján az alábbi főbb megállapítások tehetők:

- Az XAR® 400 acélminőséget nem javasolt lángvágással vágni. A szövetszerkezet nagy mélységben képes átalakulni a láng hatására, ezáltal a keménységi értékek is csökkennek.
- 2. Az XAR® 400 acélminőség esetében a vágóoxigén növelése okozta a legnagyobb változást a szövetszerkezetben, illetve ennek hatására a legnagyobb a keménységcsökkenés.
- 3. Az S960Q acélminőség az eredmények alapján megfelelően vágható lángvágási eljárással. A vágás nem okoz drasztikus szövetszerkezeti változást. A szövet ugyan újrakristályosodik, de az újrakristályosodott zóna kellően kismértékű ahhoz, hogy a vágást követő hegesztés során az említett zóna újraömlesztése végbemenjen, vagy kismértékű utómunkálással eltávolítsuk.
- 4. Az S960Q acélminőség tekintetében nem figyelhető meg a vágóoxigén-mennyiségváltoztatás hatására olyan jelentős keménységváltozás, mint a XAR® 400 acélminőség esetében.

Szakirodalmi hivatkozások

- Gáspár M. Gy.: Nemesített nagyszilárdságú acélok hegesztésének nehézségei. TDK-dolgozat, Miskolc, 2010.
- [2] Komócsin M.: Nagyszilárdságú acélok és hegeszthetőségük. Gépgyártás, 41/11. (2002) 24–29.
- [3] Béres G., Danyi J., Végvári F., Tisza M.: Napjaink járműkarosszéria anyagai. Gradus, 2/2. (2015) 209–224.

 [4] Zhang W., Xu J.: Advanced lightweight materials for Automobiles: A review. Materials & Design, 221. (2022) 110994.

https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994

- [5] TECHSUPPORT #16 Thermal Cutting of Hardox and Weldox. https://www.australiansteel.com.au/wp/wp-content/uploads/2015/09/Cutting-of-Hardox-Wear-
- Plate.pdf (letöltve: 2024. november 7.) [6] XAR®400 acéllemez https://www.flinkenberg.fi/wp-content/uploads/ DATASHEET-XAR400.pdf (letöltve: 2024. szeptember 9.)
- [7] Mihályfi T.: Undermatching elven választott hozaganyag hatásának elemzése nagyszilárdságú acélok hegesztésekor. Diplomamunka, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezettani és Anyagtechnológiai Intézet, Miskolc, 2014.
- [8] Gáspár M., Balogh A.: GMAW experiments for advanced (Q+T) high strength steels. Journal of Production Processes and Systems, 6/1. (2013) 9–24.
- [9] Gáspár M.: Effect of Welding Heat Input on Simulated HAZ Areas in S960QL High Strength Steel. Metals, 9/11. (2019), 1226. https://doi.org/10.3390/met9111226

nttps://doi.org/10.3390/met9111226

- [10] Thyssen Krupp Steel Europe: XAR400 TKS-WBL 703 06.10
- [11] MSZ EN 10025-6: Melegen hengerelt termékek szerkezeti acélokból. 6. rész: Nagy folyáshatárú szerkezeti acélokból készült, nemesített lapos termékek műszaki szállítási feltételei (2019+A1:2023)
- [12] Fuel gases for oxyfuel cutting https://fractory.com/fuel-gases-for-oxyfuel-cutting (letöltve: 2024. október 12.)