

Mikroötvözött acélminőségek ötvözőinek módosítása a gyártási költséghatékonyság optimalizálásának szempontjából

Modification of microalloyed steel alloys to optimise manufacturing cost efficiency

VESZPRÉMI Ramóna¹, SZABÓ Gábor¹

¹Miskolci Egyetem, Fémelőállítási és Öntészeti Intézet, 3515 Miskolc Egyetemváros, Hungary

Abstract

The microalloying of steels is of paramount importance in the steel industry as microalloyed HSLA steels exhibit strong mechanical properties, including high strength, toughness, and good formability. Furthermore, microalloying allows for weight reduction without compromising mechanical properties, and through proper procedures and material selection, it can reduce manufacturing costs, enhancing competitiveness. Research indicates that niobium microalloying yields stable results, while further optimization is required for economically efficient production in the case of titanium microalloying.

Kulcsszavak: mikroötvözés, nióbbium, titán, HSLA, költséghatékonyság

1. BEVEZETÉS

Az acélipar az egyik legnagyobb környezetkárosító iparág, azonban az Európai Unió egy-re szigorodó környezeti direktívái (pl. Kiotói Jegyzőkönyv, Párizsi Megállapodás, EU ETS) megkövetelik, hogy a gyártók a fajlagos kibocsátási értékeket egyre alacsonyabb szintre szorítsák. Az acélgyártásnak a lehető leggyorsabban fenntarthatóvá, biztonságosabbá és megújulóbbá kell válni. Ezt felismerve Európának meg kell válnia a klímát erősen károsító nagyolvasztóműveitől.

Ezekon túlmenően a CO₂-kibocsátás jelentős hatással van az acéltermékek előállítási költségeire, ugyanis a kibocsátási kvóták vagy adók is növelhetik az előállítási költségeket. Az előállítási költségek csökkentésének egyik lehetséges módja az ötvözőanyagok költségeinek csökkentése, és ezáltal acélminőségek fajlagos előállítási költségeinek a redukálása. Számos tanulmány található, melyek az acélgyártás energia igényének csökkentésével foglalkozik, de az ötvözőanyagok módosításán jóval kevesebben gondolkoznak, holott a fajlagos költségekre gyakorolt hatása jelentős. Az acéliparban az energia költségek mellett az ötvözőanyagok költségei a legszámottevőbbek. A nyereséges és a veszteséges termelés között sokszor csak minimális különbségek vannak. Mivel az energiaszükséglet többé kevésbé konstans, ezért azt célszerű megvizsgálni, hogy az ötvözésre használt anyagok mi módon helyettesíthető hasonló tulajdonságú, de olcsóbban beszerezhető anyagokkal.

Másik aspektusból nézve belátható, hogy a magas hozzáadott értéket képviselő járműipari követelmények a járművek tömegének, ezáltal károsanyag- kibocsátásának csökkentése irányába tolódik el. A biztonságot az alkatrész előállításához használt acél energiaelnyelő képessége határozza meg. Mindezek arra ösztökélik az autógyártókat, hogy a hagyományos acélok helyettesítésére HSLA (High Strength Low Alloy – nagyszilárdságú, gyengén ötvözött) acélokat használjanak az autóalkatrészek gyártásához. A mikroötvözött acélok fő ötvözője a nióbbium (Nb) ellátása megszakadhat. Az ellátáshiány a nióbbium esetében több okból léphet fel. Először is, a nióbbium kitermelése csak néhány országban, például Brazíliában, Kanadában és Ausztráliában jelentős, így a kitermelés koncentrálnodik. Ha bármelyik fő kitermelési területen katasztrófa vagy politikai instabilitás lép fel, az ellátás megszakadhat. Másodsor, a nióbbium kitermelése és feldolgozása technikailag és gazdaságilag összetett folyamatokat igényel. Bármilyen probléma a kitermelési vagy feldolgozási létesítményekben, például berendezési hibák vagy munkaerőhiány, zavart okozhat az ellátásban. Emellett a környezetvédelmi előírások szigorítása is korlátozhatja a nióbbiumtermelést, mivel a kitermelés és feldolgozás környezeti hatásokkal jár. Ha nem is lép fel ellátási hiány a beszerzési költsége drasztikusan emelkedhet. A nióbbium beszerzési árának növekedése esetén az is szerepet játszhat, hogy a kereslet növekedik az ipari felhasználások, például a gyártás és az energiatermelés terén. Ha a kereslet hirtelen megnő, az ellátási láncok

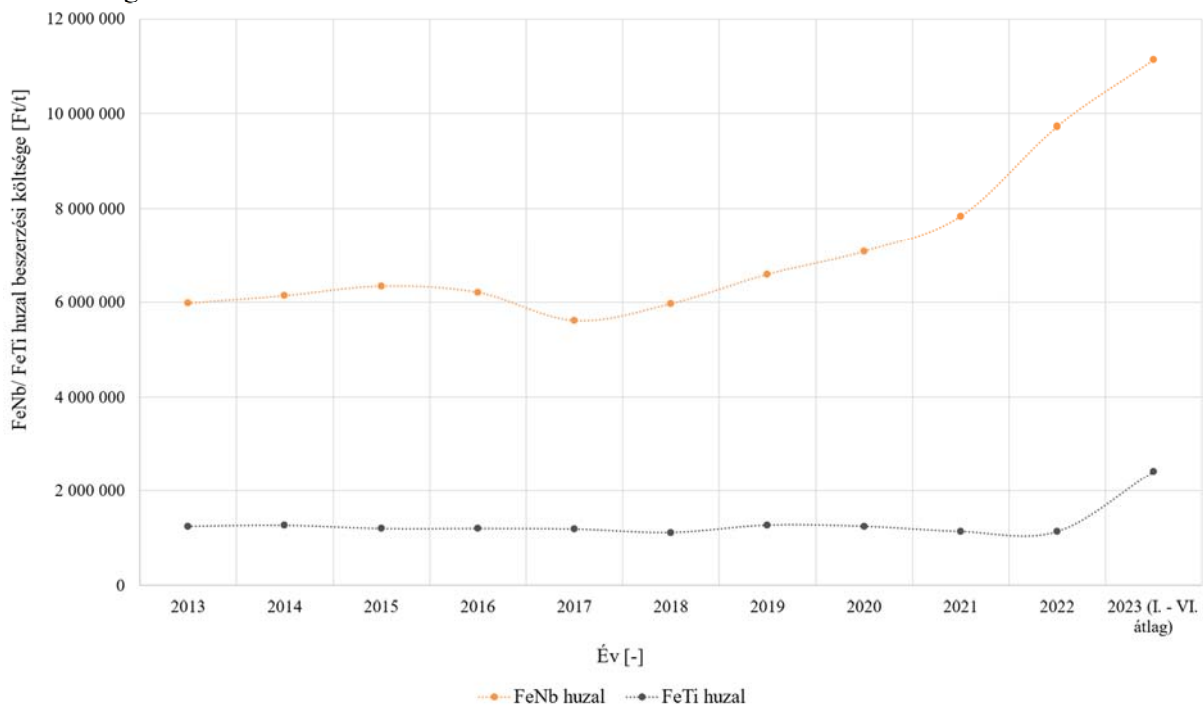
nehezen tudnak lépést tartani, ami az árak emelkedését eredményezheti. Ezenkívül geopolitikai tényezők, például konfliktusok vagy politikai instabilitás, is befolyásolhatják az ellátást és az árakat. Éppen ezért az acéliparnak mihamarabb más, alternatív megoldásokat kell találnia. Egy ilyen megoldás lehet a nióbium helyettesítése titánnal (Ti), ugyanis a titán is alkalmazható mikroötvözőként, valamint sokkal gyakoribb elem, ezáltal ipari tekintetben könnyebb hozzájutni, mint a nióbiumhoz.

Célom volt, az azonos acélminőségek fajlagos előállítási költségeinek csökkentése új – jellemzően kevésbé vagy egyáltalán nem használt – ötvözők segítségével. A kutatásom során EN 10149-2:2013 szabvány szerint S355MC acélminőség három ötvözesi koncepció szerinti gyártása került összehasonlításra. Az üzemi kísérletek során gyártásra került egy járatos technológia szerint gyártott Nb-mal mikroötvözött, továbbá egy Nb helyett Ti-vel mikroötvözött, valamint egy kombinált mikroötvözesi eljárással gyártott Nb-mal és Ti-vel mikroötvözött adag.

Az ötvözesi koncepció megváltoztatásával a magyarországi fémelőállító üzemek olyan versenyelőnyre tehetnek szert, mellyel ugyan annyi energia felhasználása mellett gazdaságosabban tudnak a konkurens gyártóművekhez képest terméket előállítani, ezzel javulhat a versenyképesség, stabilabbá válhat a vállalat és csökkenhet a munkahelyi bizonytalanság.

2. KÖLTSÉGELEMZÉS

Kezdeként összegyűjtöttem a FeNb, valamint a FeTi huzalok beszerzési költségét az el-múlt 10 évre visszamenőleg.



1. ábra

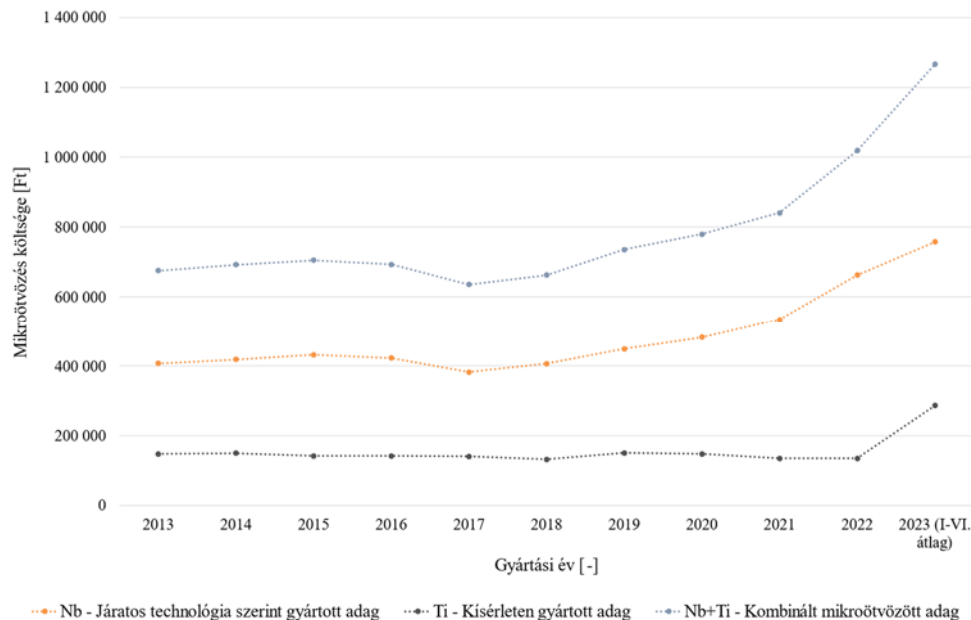
A mikroötvözők beszerzési költségének változása

A FeNb huzal és a FeTi huzal árának alakulását vizsgálva észrevehető, hogy 2017-től kezdve a FeNb huzal ára folyamatosan emelkedett. Ugyanakkor a FeTi huzal ára éveken keresztül stabil maradt, majd hasonlóan a FeNb huzalhoz, az ára 2023 év I. félévében dinamikusan növekedni kezdett. Fontos megjegyezni, hogy bár mind a FeTi, mind a FeNb beszerzési ára emelkedett, a FeNb egységára dinamikusan növekedett, mint a FeTi-é. Ennek eredményeként azt mondhatjuk, hogy az ár-olló, vagyis az árkülönbség a két termék között, folyamatosan nő.

A fenti diagram alapján elmondható, hogy a FeTi beszerzési ára és a FeNb beszerzési ára között ötszörös különbség van. Ha alapul vesszük a szakirodalom, valamint az üzemi kísérletek azon megállapítását, hogy a mechanikai tulajdonságok biztosítására bizonyos mennyiségű Nb helyettesítésére legalább kétszeres mennyiségű Ti-t kell a rendszerbe adagolni, ezért ebben az esetben a ráfordított tonnánkénti költség tekintetében ez a szorzó maximum 2,5-szeres. Tehát a FeTi mikroötvözéssel a FeNb árához képest megközelítőleg 60%-ot meg

lehet takarítani. Ez alapján állítottuk össze a kísérleti tervet. Így a kísérlet során gyártásra került egy járatos technológia szerint Nb-mal, egy Nb helyett Ti- nal, valamint egy kombinált eljárással gyártott Nb-mal és Ti- nal mikroötvözött adag.

A járatos technológia szerint gyártott adagba 68 kg Nb, a kísérleten gyártott Ti-nal mikroötvözött adagba 118 kg Ti, míg a kombinált mikroötvözési eljárással gyártott adagba 94 kg Nb és 90 kg Ti került beadagolásra. Összehasonlító költségelemzést végeztem az egyes adagok esetében, és visszamenőlegesen 10 évre kiterjedően kiszámoltam, hogy mennyibe került a mikroötvözés költsége minden egyes adag esetében. Az eredményeket az alábbi diagramon ábrázoltam.



2. ábra

Az egyes adagok mikroötvözésének költségmegoszlása

A kísérlet során előállított Ti-nal mikroötvözött adag előállítási költsége jelentősen alacsonyabb a járatos technológiával gyártott mikroötvözött anyagok költségeihez képest. Azonban a mechanikai tulajdonságok terén tapasztalt magas inhomogenitás további vizsgálatokat igényel.

A kombinált mikroötvözési eljárással gyártott adag abban az esetben lesz rentábilis, ha a felhasznált Nb mennyiséget körülbelül a felére lehetne csökkenteni, és bizonyos mennyiségben az Nb-t Ti-nal helyettesítenénk. Ezáltal a költségeket a járatos technológia szerint gyártott adag mikroötvözési költségei alá lehetne szorítani. Ezen változtatások lehetővé tennék a költségek csökkentését, és konkurenciaképesé tehetik az előállítást a hagyományos technológiával gyártott mikroötvözött anyagok költségeihez képest.

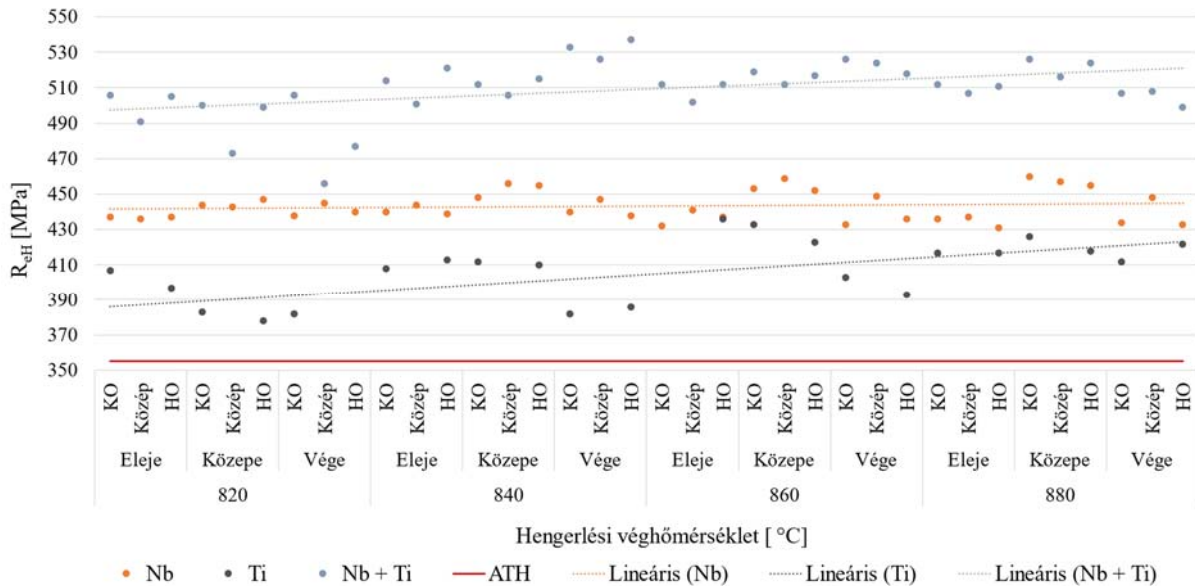
3. A MECHANIKAI EREDMÉNYEK ÁLTALÁNOS ÉRTÉKELÉSE

Az EN 10149–2:2013 szabvány kimondja, hogy S355MC szerkezeti acél előírása szerint a felső folyáshatár (R_{eH}), a szakítószilárdság (R_m), a szakadási nyúlás (A_5), valamint az ütő-munka (KV) esetében a hosszirányú próbák értékei a minősítőek.

1. táblázat Mechanikai tulajdonságok előírásai

Mechanikai tulajdonságok			Ütőmunka KV [J]
R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	Szakadási nyúlás	-20 °C
		A_5 [%]	$6 \leq h^*$
min. 355	430-550	min. 23	min. 40

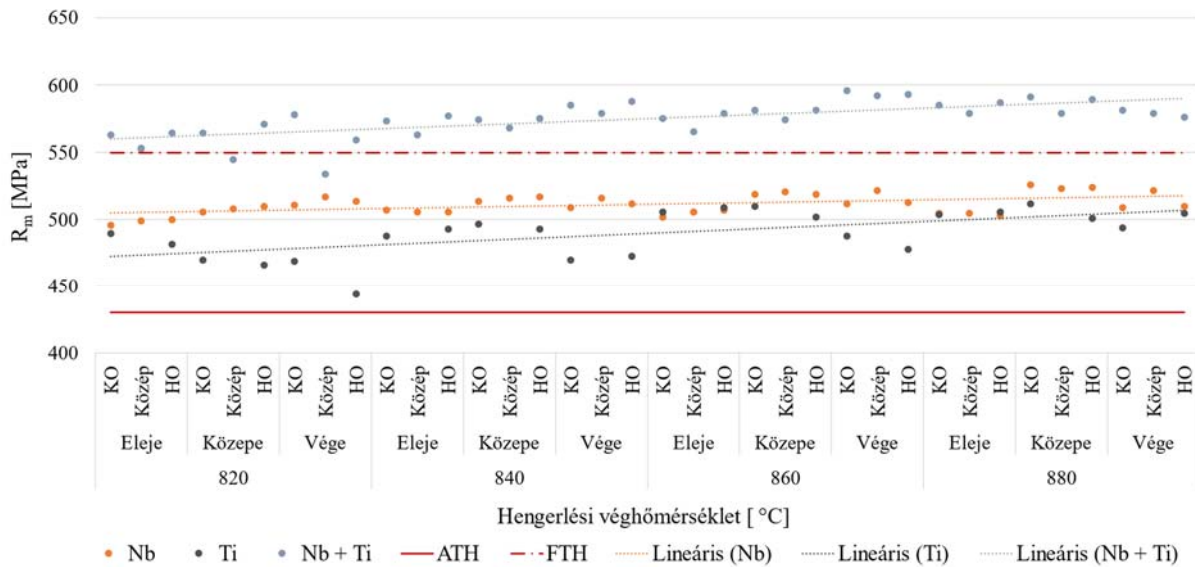
*lemezvastagság



3. ábra

Felső folyáshatár összehasonlítása a hengerlési véghőmérséklet függvényében

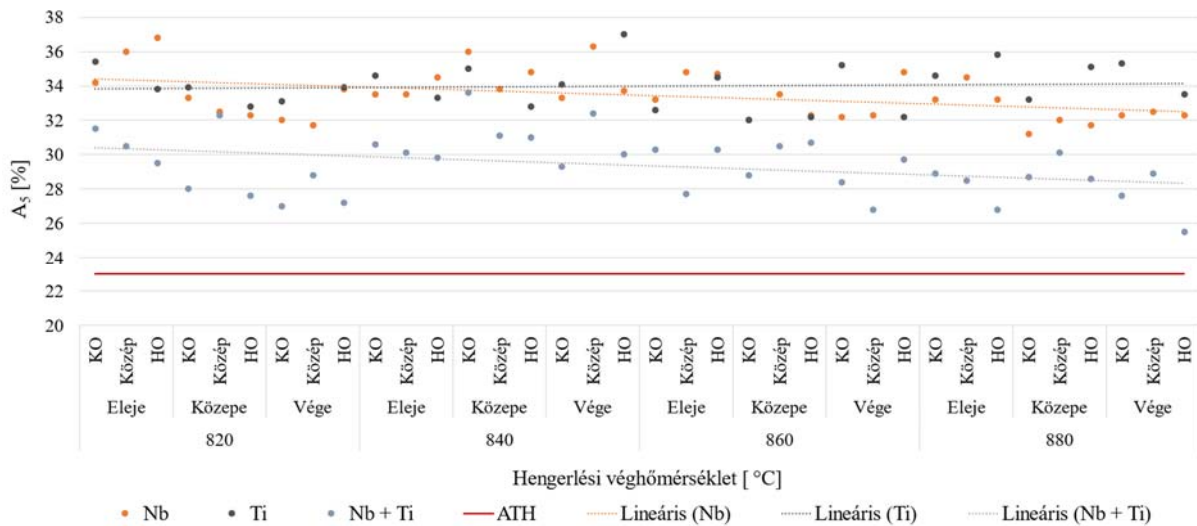
A 3. ábrán a járatos technológia szerint gyártott, nióbbiummal mikroötvözött (Nb), a Nb helyett titánnal mikroötvözött (Ti), valamint a kombinált mikroötvözési eljárással gyártott nióbbiummal és titánnal mikroötvözött (Nb + Ti) négy különböző meleghengerlési hőmérsékletvezetéssel kihengerelt tekercsek felső folyáshatár értékei kerültek összehasonlításra a szalag szélessége és a hossza mentén. A diagramon feltűntetésre került a szabvány szerint előírt alsó tűréshatár (ATH) 355 MPa.



4. ábra

Szakítószilárdság összehasonlítása a hengerlési véghőmérséklet függvényében

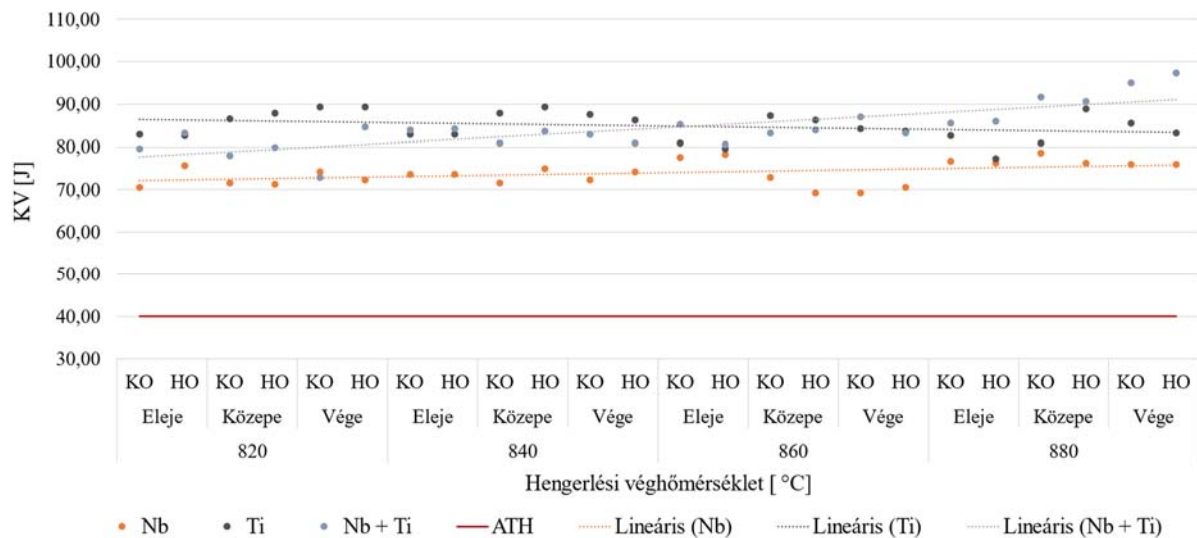
A 4. ábrán a szakítószilárdság értékek figyelhetők meg a szalag szélessége és a hossza mentén. Feltűntetésre került továbbá a szabvány szerinti minimum (ATH) és maximum (FTH) szakítószilárdság követelmény értékek (430-550 MPa).



5. ábra

Szakadási nyúlás összehasonlítása a hengerlési vég hőmérséklet függvényében

A 5. ábrán a szakadási nyúlás értékei láthatóak, a szabvány által előírt alsó tűréshatár (23 %) feltüntetésevel.



6. ábra

Ütőmunka értékek összehasonlítása

A 6. ábrán az ütőmunka értékek összehasonlítása figyelhető meg, jelölve a szabvány szerinti minimális (40 J) határérték.

Elmondható, hogy a titánnal mikroötvözött tekercsek alacsonyabb, míg a kombinált mikroötvözéssel gyártott tekercsekből vett minták magasabb szilárdsági tulajdonságokkal bírnak, mint a járatos technológia szerint gyártott tekercsekből vett minták eredményei. Megfigyelhető, hogy a titánnal mikroötvözött tekercsek ~ 10 – 90 MPa-al alacsonyabb felső folyáshatár értékkel (3. ábra), valamint ~ 5 – 40 MPa-al alacsonyabb szakítószilárdság értékkel rendelkeznek (4. ábra), mint a nióbbiummal mikroötvözött tekercsekből vett minták eredményei. A Nb + Ti tekercsek esetében ~ 70 – 90 MPa-al magasabb felső folyáshatár (3. ábra), valamint ~ 60 – 80 MPa-al magasabb szakítószilárdság értékek figyelhetők meg (4. ábra), mint a járatos technológia szerint gyártott tekercsekből vett minták eredményei.

A szakadási nyúlás tekintetében számottevő különbség nem tapasztalható a titánnal mikroötvözött, valamint a nióbbiummal mikroötvözött tekercsekből vett minták eredményei között (5. ábra). A kombinált mikroötvözéssel gyártott tekercsek esetében azonban ~ 2 – 7 %-kal alacsonyabb szakadási nyúlás figyelhető meg a járatos technológia szerint gyártott tekercsekből vett minták szakadási nyúlás értékeihez képest (5. ábra). Az ütőmunka tekintetében a titánnal mikroötvözött, valamint a kombinált mikroötvözéssel gyártott

nióbiiummal és titánnal is mikroötvözött tekercsekben vett minták ~ 10 J-al magasabb ütőmunkaértékkel rendelkeznek (6. ábra), mint a járatos technológia szerint gyártott tekercsekben vett minták eredményei.

4. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KONKLÚZIÓ

A kutatásom témája az űstmetallurgiai kezelés alatt alkalmazott mikroötvözők megváltoztatása, mellyel célom volt a mikroötvözők metallurgiai és mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásainak vizsgálata, továbbá az azonos acélminőségek fajlagos előállítási költségeinek csökkentése. A dolgozatomban EN 10149-2:2013 szabvány szerint S355MC acélminőség három ötvözési koncepció szerinti gyártása került összehasonlításra.

Összefoglalásként elmondható, hogy bár a Ti-nal mikroötvözött tekercsekben vett mechanikai eredmények alacsonyabbak, mint a járatos technológia szerint gyártott nióbiiummal mikroötvözött tekercsekben vett minták eredményei, ettől függetlenül a vonatkozó szabvány követelményeit teljesítették. Viszont, ami káros lehet a további hidegalakítási technológiai folyamatok során, az az egyes pozíciókból kivett mechanikai eredmények közötti nagy inhomogenitás. Mivel a költségelemzés alapján a gyártás gazdaságosabb, ezért célszerű tovább vizsgálni, optimalizálni a Ti-nal való mikroötvözési koncepciót.

A kombinált ötvözési eljárás esetében javasolt volna további optimalizációt végezni a Nb/Ti arányával. Érdekes lenne három provizórikus adagot előállítani, majd ezen adagok mechanikai tulajdonságait megvizsgálni. A további kísérlet indoka, hogy a költségvizsgálat eredményei alapján ezen mikroötvözési eljárás költségei alacsonyabbak, mint a járatos Nb ötvözési technológia költségei.

Javaslatom szerint mindenképpen meg kellene tartani a Ti-nal történő ötvözési koncepciót a gazdaságossági előnye miatt, azonban további vizsgálatokra van szükség.

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.