

Szakkikk

A hőbevitel hatása az S690QL acél szívóssági tulajdonságaira felrakóhegesztés során

Effect of Heat Input on the Toughness Properties of S690QL Steel during Hardfacing

TERDIK GÁBOR¹, MEILINGER ÁKOS²¹Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Anyagszerkezzettani és Anyagtechnológiai Intézet, Magyarország. gabor.szabolcs.terdik@student.uni-miskolc.hu²Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Anyagszerkezzettani és Anyagtechnológiai Intézet, Magyarország. akos.meilinger@uni-miskolc.hu (kapcsolattartó szerző)

Absztrakt. Az utóbbi években egyre gyakoribbá vált a nagyszilárdságú acélok alkalmazása felrakóhegesztési eljárások során. Ennek egyik tipikus ipari példája az épületbontási munkálatokban használt hidraulikus ollók esete, ahol az alkatrészek nemcsak jelentős koptatóhatásnak, hanem intenzív dinamikus igénybevételnek is ki vannak téve. Az S690QL jelű, nemesített nagyszilárdságú acél alkalmazása e területen különösen elterjedt, elsősorban a felrakott réteg alapanyagaként, a bontóollók legnagyobb terhelésnek kitett zónáiban. A nemesített, nagy szilárdságú acélok azonban rendkívül érzékenyek a hegesztési hőciklus hatásaira, ami elsősorban a hőhatásövezet szövetszerkezetében és mechanikai tulajdonságaiban bekövetkező kedvezőtlen változások formájában jelentkezik. A felrakóhegesztés során érvényesülő hőciklusok jellegükben és lefolyásukban eltérnek a kötőhegesztésre jellemző paraméterektől, következésképpen a kialakuló hőhatásövezet szerkezeti és mechanikai tulajdonságai is különbözhetnek. Emellett a felrakott réteg beolvadási mélysége is változó lehet, amely lényegesen módosíthatja a nagyszilárdságú acél teherviselő keresztmetszetét, és ezáltal az alkatrész üzemi viselkedését. A kísérleti munka során S690QL alapanyagon végeztünk felrakóhegesztéseket különböző hőbevitel mellett, ezzel eltérő beolvadási mélységeket kialakítva. A vizsgálatok célja az volt, hogy meghatározzuk a beolvadási mélység hatását a felrakott alkatrész dinamikus igénybevétellel szembeni ellenállására. A méréseket +20 °C és -40 °C hőmérsékleteken is elvégeztük. Az eredmények egyértelműen igazolták, hogy a nagyobb beolvadási mélységgel rendelkező minták csökkent szívósságot mutatnak mindkét vizsgált hőmérsékleten.

Abstract. In recent years, the use of high-strength steels in hardfacing process has become increasingly common. One typical industrial example is the case of hydraulic shears used in building demolition operations, where the components are exposed not only to significant abrasive wear but also to intense dynamic loading. The use of quenched and tempered high-strength steel grade S690QL has become particularly widespread in this field, primarily as the base material for the hardfacing applied to the most heavily loaded regions of demolition shears. However, quenched and tempered high-strength steels are highly sensitive to the effects of the welding thermal cycle, which typically cause detrimental changes in the microstructure and mechanical properties of the heat-affected zone. The thermal cycles occurring during hardfacing differ from those typical of fusion welding, and consequently, the structure and mechanical properties of the resulting heat-affected zone may also vary. In addition, the penetration depth of the hardface layer can differ, which may significantly alter the load-bearing cross-section of the high-strength steel and,

thus, the in-service behavior of the component. In the experimental work, hardfaced samples were performed on S690QL base material using different levels of heat input, thereby producing varying penetration depths. The aim of the study was to determine the effect of penetration depth on the resistance of the hardfaced component to dynamic loading. The tests were carried out at both +20 °C and –40 °C. The results clearly demonstrated that samples with deeper penetration exhibited reduced toughness at both investigated temperatures.

Kulcsszavak: felrakóhegesztés, nagyszilárdságú acél, S690QL, dinamikus igénybevétel, beolvadási mélység, hőbevitel.

Keywords: Hardfacing, High-Strength Steel, S690QL, Dynamic Load, Penetration Depth, Heat Input.

Bevezetés

A nagyszilárdságú acélok alkalmazása az utóbbi évtizedekben jelentősen elterjedt a nagy igénybevételű gépalkatrészek, például földmunkagépek, daruk és bontóberendezések gyártásában. A szakirodalomban több kutatás is rámutat arra, hogy a nagyszilárdságú acélok mechanikai viselkedése erősen függ a gyártási technológiától és a hőhatásövezet (heat affected zone=HAZ) szerkezetétől, amely döntően befolyásolja a hegesztett kötések minőségét [1], [2], [3]. A felrakóhegesztés az egyik leggyakrabban alkalmazott eljárás a nagy igénybevételű acélalkatrészek élettartamának növelésére. A különböző hozaganyagok – például Cr-, Ni-, Mo- vagy W-tartalmú ötvözetek – használata jelentősen javíthatja a felület kopásállóságát és ütésállóságát, ugyanakkor a felrakóréteg és az alapanyag közötti átmeneti zóna tulajdonságai kritikusak a dinamikus terhelésekkel szembeni ellenállás szempontjából.

A bontóollók esetében a működés során fellépő terhelések komplex jellege fokozott követelményeket támaszt a felrakórétegekkel szemben. A bontóollók vágóéleinek kopása elsősorban adhéziós és abrazív mechanizmusok kombinációjának eredménye, amelyet a dinamikus jellegű terhelések tovább erősítenek. A dinamikus terhelés hatására fellépő lokális képlékeny deformációk és mikrorepedések elősegítik a réteg leválását, ezért a megfelelő felrakóanyag és hegesztéstechnológia kiválasztása alapvető fontosságú [4]. Emellett a felrakóhegesztéshez használt alapanyagként is egyre inkább nagyszilárdságú acélokat (jellemzően nemesített acélok) használnak a nagyobb terhelések elviselése érdekében. Ezek az anyagok meglehetősen érzékenyek a hegesztési hőbevitelre, bizonyos hőhatásövezeti zónákban felkeményedés, míg máshol jelentős kilágyulás tapasztalható [5], [6], [7].

A nemesített nagyszilárdságú acélok hegesztése kihívást jelent a hőhatásövezetben bekövetkező változások miatt, ezért ez a téma gyakran a kutatások középpontjában áll [5], [8]. A hőhatásövezet a felrakóhegesztés során is jelen van, de sokkal összetettebb a többszöri hőciklusok következtében [9].

A hőhatásövezet három jól elkülöníthető alzónára osztható:

- felső kritikus hőhatásövezeti zóna (upper-critical heat affected zone =UCHAZ),
- interkritikus hőhatásövezeti zóna (inter-critical heat affected zone =ICHAZ),
- kilágyulási hőhatásövezeti zóna (sub-critical heat affected zone=SCHAZ).

Az UCHAZ a varratfémhez nagyon közel helyezkedik el, ahol a legmagasabb csúcshőmérséklet mérhető. Ebben a zónában a hűlési sebesség viszonylag nagy [10], [11], és a nagyszilárdságú acéloknak martenzites átalakulás is létrejöhet, [10], [12]. Ez nagy keménységet és alacsony szívósságot

eredményez. Az S690QL acél esetében ez az alzóna elsősorban martenzites és bainites fázisokból áll [12], [13], részben perlit és ferrit keverékével. A legkritikusabb alzóna az ICHAZ, amelyet a kutatók széles körben vizsgáltak [14], [15]. Ebben a zónában a csúcshőmérséklet az A_3 és A_1 hőmérsékletek közé esik, ami részleges ausztenitesezést és összetett mikroszerkezetet eredményez. Az S690QL esetében jellemzően bainites és martenzites fázisok jelennek meg [16]. Ez az alzóna jellemzően alacsony szívósságot és keménységet mutat, ahogy azt a szakirodalom is megállapítja [14], [15]. Érdekes, hogy az SCHAZ-t viszonylag kevesen vizsgálták, mivel ebben a zónában csak kisebb szövetszerkezeti változások mennek végbe - főként a martenzit megeresztése [12]. Bár ebben a zónában lágyulás figyelhető meg [17], a szívósságra vonatkozó információk korlátozottak. A hőbevitel jelentős hatással van a nagyszilárdságú acél alapanyagok szívósságára: nagyobb hőbevitel általában csökkenti a szívósságot. Ez különösen fontos a felrakóhegesztésnél, ahol a HAZ jellemzői befolyásolják az alapanyag teherviselő képességét.

A legtöbb esetben párnaréteg szükséges a felrakóhegesztés során, hogy megfelelő szívósságot biztosítson és javítsa a keményrétegek hegeszthetőségét [4]. A párnaréteg előnyös akkor is, ha lágy alapanyagra kell nagyszilárdságú réteget felrakni, vagy ha nagy ütésnek kitett alkatrészeket hegesztenek, illetve javítási munkák során. Alacsony- és közepes ötvöztetésű acélokból készült párnaréteg közbeni keménységet biztosít az alapanyag és a keményréteg között [4]. Az ausztenites CrNi acél párnaréteggént szintén alkalmazható, mivel képes elnyelni a feszültségeket repedés nélkül, és nincs szükség előmelegítésre [4]. Kutatások kimutatták, hogy a keményfelrakott réteg és az alapanyag közé helyezett párnaréteg javítja a szerkezet teherviselő képességét is [17], [18]. A párnaréteg beolvadási mélysége szintén befolyásolja az alapanyag mechanikai tulajdonságait, azonban ez a tényező eddig kevésbé kutatott, pedig nagy terhelés esetén fontos szerepe lehet.

Ebből adódóan a kutatás célja, hogy felmérje a különböző hőbevitelt alkalmazó felrakóhegesztési technológiák hatását a felrakott alapanyagok dinamikus viselkedésére. A kutatás során elemezzük a hegesztett rétegek szövetszerkezetét, keménységeloszlását, valamint dinamikus terhelés alatti viselkedését két különböző hőmérsékleten. A vizsgálatok eltérő hőmérsékletei arra is rávilágíthatnak, hogy a szélsőséges környezeti hőmérsékleten működő, felrakóhegesztéssel készült alkatrészek dinamikus terhelés alatt mennyire másként viselkedhetnek a szobahőmérsékleten tapasztaltakhoz képest. Az eredmények hozzájárulhatnak a felrakóhegesztett rétegek élettartamának növeléséhez, valamint a hegesztési paraméterek optimalizálásához dinamikus igénybevételű szerkezetek esetében.

1. Alkalmazott anyagok

A kutatómunka során kétféle alapanyagot alkalmaztunk: az S690QL jelű, nemesített nagyszilárdságú acélt, az alapanyag vastagsága 25 mm volt, ami megfelel a bontóollók gyakorlatban alkalmazott legnagyobb falvastagságának. Jelen esetben a felrakott réteg viszonylag rideg, míg az alapanyag érzékeny a hegesztési hőciklusra, ezért egy szívós párnaréteg alkalmazása indokolt. E célra a Lincoln Electric által gyártott LNM19 típusú hegesztőhuzalt használtuk, amelynek szabványos besorolása G CrMo1Si az MSZ EN ISO 21952-A szabvány szerint. Ezzel a választással egy lágy, jó szívósságú és költséghatékony párnaréteg alakítható ki. A felrakott réteg anyaga nagy keménységgel és kopásállósággal rendelkezik, ugyanakkor rideg viselkedésű. Ehhez szintén a Lincoln Electric termékét, a Carbofil A600 típusú hegesztőanyagot használtuk, amely az EN 14700 szabvány szerint S FE8

besorolású felrakó hozaganyag. Az 1. táblázat az alapanyag, a párnaréteg és a felrakott réteg kémiai összetételét mutatja tömegszázalékban, míg a 2. táblázat az alapanyag mechanikai tulajdonságainak összesítését tartalmazza. A párnarétegre és a felrakott rétegre vonatkozóan mechanikai jellemzőket a gyártói műbizonylatok nem tartalmaztak. A táblázatokban feltüntetett adatok a műbizonylatokban megadott értékeket tükrözik.

Jelölés	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni
S690QL	0,150	0,23	1,10	0,013	0,003	0,58	0,05	0,21	0,66
LN19	0,100	0,65	0,97	0,003	0,009	1,18	0,01	0,46	0,02
Carbofil A600	0,470	2,98	0,39	0,020	0,001	9,15	0,06	N/A	0,17

1. táblázat: Az alapanyag, a párnaréteg és a felrakott réteg kémiai összetétele [tömeg%]

Jelölés	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅₀ [%]
S690QL	777	711	18

2. táblázat: Az alapanyag mechanikai tulajdonságai

2. Hegesztési körülmények

A felrakóhegesztési kísérletek elvégzéséhez huzalelektrodás, védőgázos ívhegesztést alkalmaztunk. A hegesztéseket Cloos hegesztőrobot-rendszerrel végeztük, amely biztosította a pontos pozicionálást, az egyenletes hegesztési sebességet, valamint a kísérletek ismételhetőségét és reprodukálhatóságát. A védőgáz minden esetben 80% argon és 20% szén-dioxid keveréke volt. A kísérletsorozat egyik célja a hőbevitel hatásának vizsgálata volt, ezért négy különböző hegesztési paraméter-kombinációt alkalmaztunk, amelyek eltérő hőbevitelt és $t_{8/5}$ hűlési időt eredményeztek. A kísérletek során alkalmazott hegesztési paramétereket a 3. táblázat foglalja össze.

Paraméter sorszáma	Hegesztőáram [A]	Ívfeszültség [V]	Hegesztési sebesség [mm/perc]	Hőbevitel [J/mm]	$t_{8/5}$ [s]
1	130	17,2	160	672	4,7
2	170	19,2	210	751	5,3
3	220	21,3	250	903	6,4
4	280	26,7	280	1284	9

3. táblázat: A kísérletekhez használt hegesztési paraméterek

A hőbevitelt az ISO/TR 17671-1:2002 szabvány szerint számoltuk, 0,8-as termikus hatásfokot alkalmazva. A $t_{8/5}$ hűlési idő számításához az MSZ EN 1011-2:2001 szabvány szerinti képletet (D.2) használtuk 3 dimenziós hőterjedést feltételezve. Az 1. paraméterkombináció esetében a kis hőbevitel ellenére még megfelelő beolvadással elfogadható minőségű kötés hozható létre. A 4. paraméterkombináció már mély beolvadást eredményezett, azonban ennél nagyobb hőbevitel esetén repedések jelentek meg a felrakott rétegben, így ez a beállítás jelölte ki a hőbevitel felső határát. A korábbi gyártási tapasztalatok alapján az előmelegítési és rétegek közti hőmérsékletet 120 °C-on tartottuk. Minden paraméterkombináció esetében 100 × 150 mm méretű felületen végeztük el a felrakóhegesztést, a teljes lemez mérete 200 × 300 mm volt.

3. Vizsgálati körülmények

A felrakóhegesztett próbadarabok keresztmetszeteit köszörüléssel és polírozással (3 μm szemcseméretű gyémántpasztával) készítettük elő, majd 2%-os nital oldattal marattuk. A próbadarab egy párnarétegből és három felrakó rétegből állt, a próbadarab szélessége 80 mm volt. A keresztcsiszolatokról először makrofelvételeket készítettünk Carl Zeiss Stemi 2000-C sztereomikroszkóppal a teljes hőhatásövezet vizsgálata céljából. Ezt követően mikroszerkezeti elemzéseket végeztünk Hitachi TM-1000 SEM pásztázó elektronmikroszkóppal a különböző HAZ-alzónák mikroszerkezetének tanulmányozására. A mikroszkópos vizsgálatokat követően Vickers-keménységméréseket végeztünk a beolvadási vonalban Reicherter UH250 típusú berendezéssel, 100 N terheléssel minden esetben. A lenyomatokat automatikusan készítette a berendezés, míg a átlóméréseket manuálisan végeztük. A lenyomatok közötti távolság 0,5 mm volt minden mérésnél.

A Charpy-féle ütővizsgálathoz a felrakóhegesztett darabokból ütőpróbatesteket is készítettünk a hőbevitel hatásának értékelésére. A V-bemetszésű Charpy-próbatestek (CVN típus) szabványos mérete 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 55 mm az MSZ EN ISO 148-1:2017 szabvány szerint, a bemetszés helyét pedig a beolvadási mélység határozta meg (az 1. ábra szemlélteti). A bemetszés iránya megegyezett a hengerlés irányával. Az ütőpróbatestek bemetszéssel szembeni felületének pozíciója megegyezik az alapanyag felületével. A próbatesteket vágással, marással és köszörüléssel alakítottuk ki.



1. ábra: Az ütőpróbatestek bemetszéseinek helyei

Hőbevitelenként 10 próbatestet vizsgáltunk, így összesen 40 próbatest készült a hegesztett darabokból.

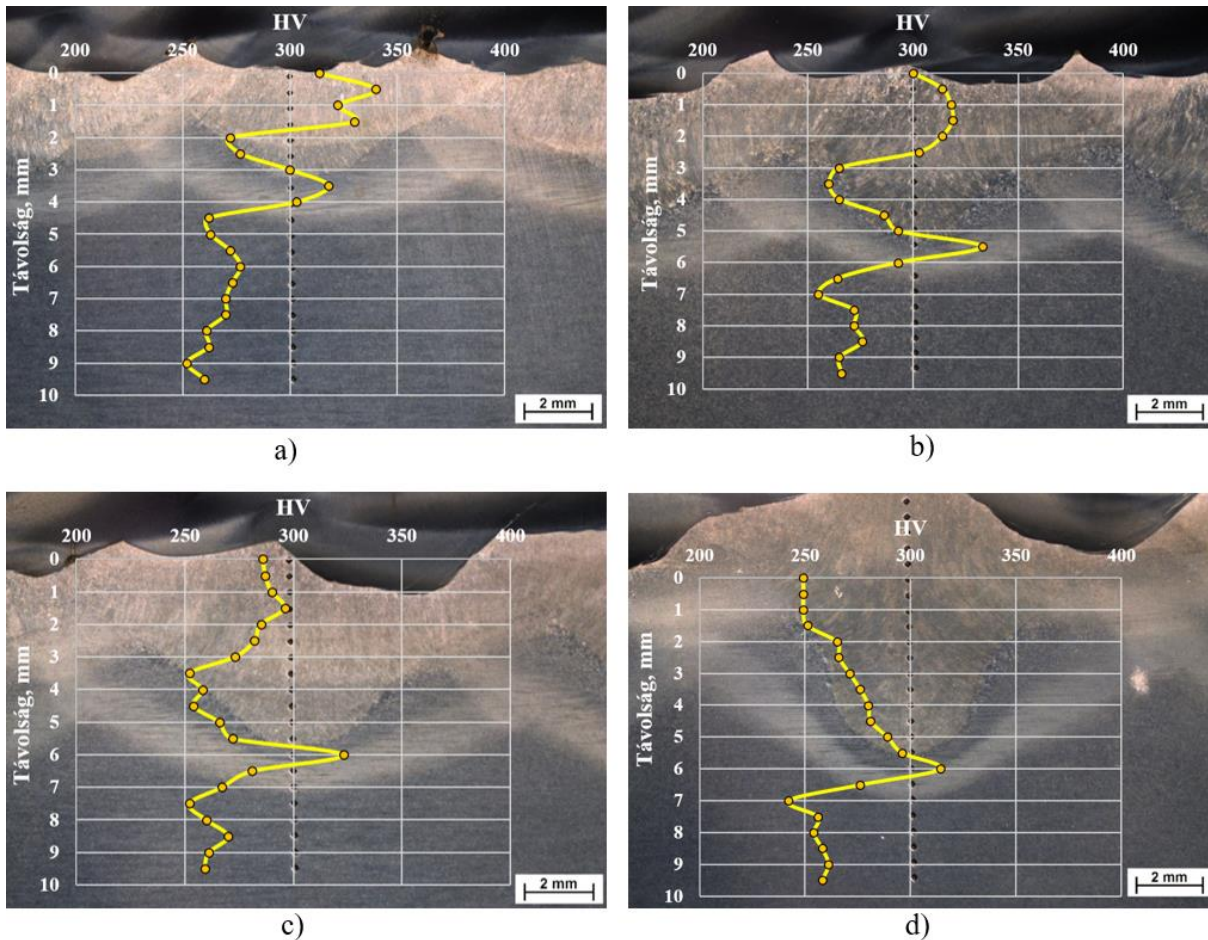
A vizsgálatokat műszerezett ütőművel végeztük, amely rögzítette az erő-idő diagramokat, melyek alapján meghatározható a maximális erőérték. Minden egyes vizsgálat során 2500 adatpontot rögzítettünk 5 ms időtartam alatt oszcilloszkóp segítségével, ami lehetővé tette a nagy sebességű folyamat részletes megjelenítését. Két vizsgálati hőmérsékletet határoztunk meg: +20 °C és -40 °C, ezzel is szemléltetve a dinamikus tulajdonságok hőmérséklet függését.

4. Eredmények

A próbadarabokon keménységmérést, szövetszerkezeti vizsgálatot és ütővizsgálatot végeztünk el.

4.1. A keménységmérés eredményei

A próbadarabok keresztmetszetein keménységméréseket végeztünk a párnaréteg legmélyebb beolvadásánál. Ez fontos adatokat szolgáltatott a párnaréteg, a hőhatásövezet és az alapanyag keménységéről. A mért keménységi értékeket a 2. ábra mutatja be.

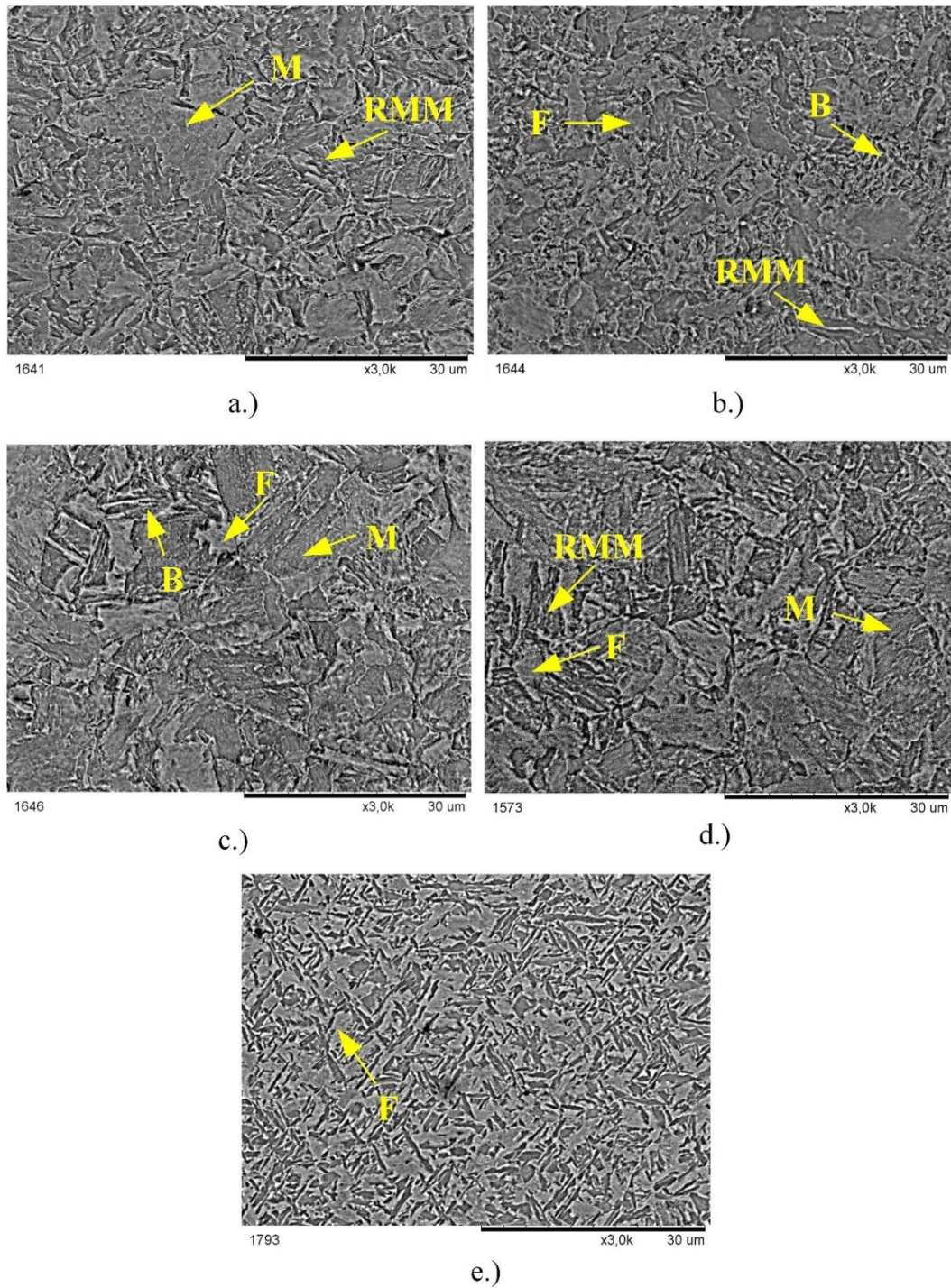


2. ábra: Keménységgörbék a beolvadási vonal közepén különböző hőbevitelűk esetén: a) 672 J/mm, b) 751 J/mm, c) 903 J/mm, d) 1284 J/mm

A párnaréteg keménysége megközelítőleg 260–270 HV, azonban a felette lévő réteg hőciklusa áthőkezelheti, így keménysége 300–330 HV-ra növekedhet. A hőhatásövezet minden esetben hasonló tulajdonságokat mutat: az UHAZ általában 310–330 HV-ra keményedik, az ICHAZ rendelkezik a legalacsonyabb keménységgel, amely 250–260 HV között van, míg az SCHAZ 260–270 HV tartományba esik. Az alapanyag keménysége 255–265 HV között található. Ezek a keménységi eredmények összhangban vannak az irodalomban közölt adatokkal a kötési hegesztés esetében [16]. A legkisebb hőbevitel esetén következett be a legkisebb mértékű keménységváltozás, bár a párnaréteg jelentős része így is felkeményedett. Az ábrából az is jól látható, hogy a hőhatásövezet mérete gyakorlatilag nem változott jelentős mértékben, míg a beolvadási mélységben jelentős különbség van.

4.2. Szövetszerkezeti vizsgálatok eredményei

A pásztázó elektronmikroszkóppal végzett szövetszerkezeti vizsgálatot ugyanazon a vonalon hajtottuk végre, mint a keménységméréseket. Ez az elemzés betekintést nyújt az alapanyag, a hőhatásövezet és a párnaréteg szövetszerkezetébe. A 3. ábra szemlélteti az alapanyag, a hőhatásövezeti zónák, valamint a párnaréteg szövetszerkezetét.



3. ábra: Szövetszerkezeti képek (3000x nagyítás): a) UCHAZ, b) ICHAZ, c) SCHAZ, d) alapanyag, e) párnaréteg

Az S690QL alapanyag elsősorban martenzitból és ferritből áll, emellett részben megeresztett martenzit is megfigyelhető. Az UCHAZ zónában a részben megeresztett martenzit dominál, de a martenzit is megjelenik. Az ICHAZ zónában részben megeresztett martenzit, bainit és ferrit is található, amely hozzájárulhat az ebben a zónában megfigyelt jelentős lágyuláshoz. Az SCHAZ szövetszerkezete is martenzitet, bainitet és ferritet tartalmaz. A megfigyelt mikroszerkezetek jó összhangban vannak az irodalomban közölt eredményekkel [13]. A párnaréteg főként ferritet tartalmaz (a gyártó is ferrites típusú hozaganyagként forgalmazza).

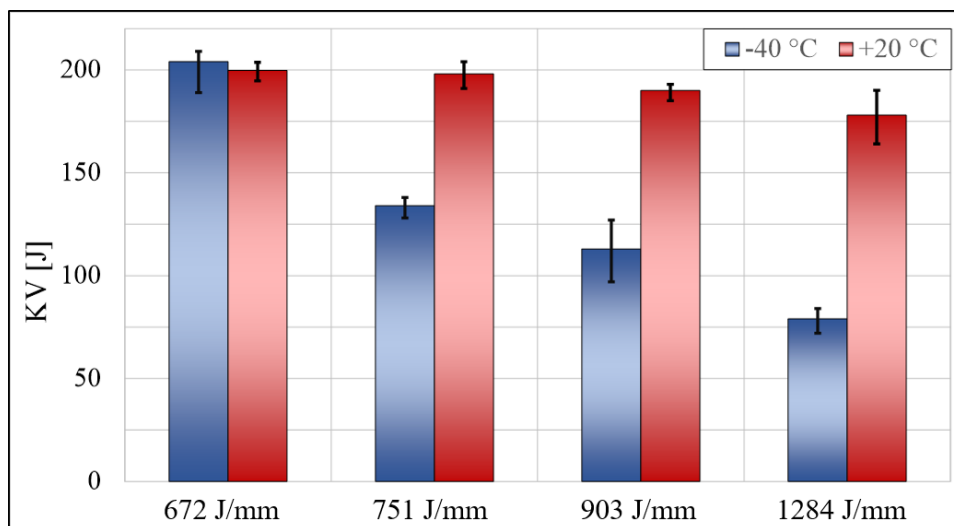
4.3. Ütővizsgálati eredmények

A Charpy-féle ütővizsgálatot végeztünk, hogy összehasonlítsuk a különböző hőbevitellel készült darabok dinamikus igénybevétellel szembeni ellenállását. Emellett a vizsgálati hőmérséklet hatására is kíváncsiak voltunk. A vizsgálatokat +20 °C-on és -40 °C-on hajtottuk végre. A 4. táblázat mutatja be a próbatestek ütővizsgálati eredményeit. A műszerezett ütővizsgálat lehetővé tette mind az ütőmunka (KV), mind a maximális ütőerő ($F_{\max}$) meghatározását. Mindkét paraméter esetében kiszámítottuk a szórás (SD) és a szórási együtthatót (SDC) is.

Hőmérséklet [°C]	Hőbevitel [J/mm]	KV [J]	SD _{KV}	SDC _{KV}	$F_{\max}$ [N]	SD _{$F_{\max}$}	SDC _{$F_{\max}$}
+20 °C	672	200	5,8	2,9	28,1	0,9	3,4
	751	198	7	3,5	27,6	0,3	1
	903	190	5,1	2,7	26,5	0,9	3,4
	1284	178	20,1	11,3	25	0,5	1,9
-40 °C	672	204	13,5	6,6	24,8	1	4,1
	751	134	7,6	5,7	23,5	0,8	3,4
	903	112,8	20	17,7	23,1	0,9	3,7
	1284	79	10,4	13,2	23,5	1	4,3

4. táblázat: Az ütővizsgálatok eredményei

Az ütőmunka adatoknál jól látható, hogy a hőbevitel növelésével csökkent az ütőmunka értéke, ami gyakorlatilag azt jelenti, hogy a mélyebb beolvadás rossz hatással volt a szívósságra mindkét hőmérsékleten. A mért eredmények szórása és szórási együtthatója nem szokatlan az ütővizsgálatoknál. A jobb átláthatóság érdekében az ütőmunka átlagos értékeit mutatja a 4. ábra.

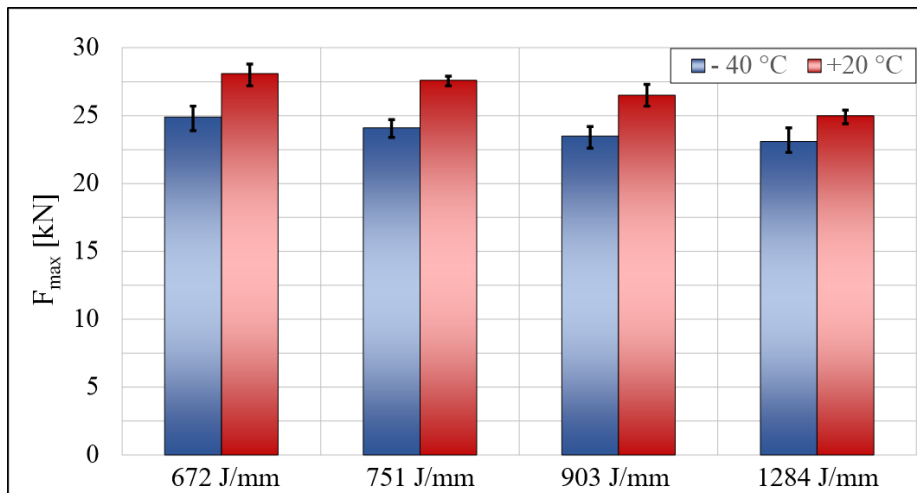


4. ábra: Az ütőmunka értékek különböző hőbevitelnél, mindkét hőmérsékleten

Látható, hogy +20 °C-on az ütőmunka értéke csak kis mértékben romlik a hőbevitel növelésével, míg -40 °C-on jelentős különbségek adódnak. A legkisebb hőbevitelnél gyakorlatilag mindkét hőmérsékleten ugyanolyan eredményt kaptunk. Ebből arra lehet következtetni, hogy a kis mértékben beolvadt párnaréteg nem csökkenti le jelentősen a szívósságot -40 °C és +20 °C között. Ez következhet az alapanyag kis átmeneti hőmérsékletéből, de szerepet játszhat a felrakóhegesztésnél jellemző komplex

hőhatásövezet is. A többi eredmény viszont arra mutat rá, hogy a beolvadási mélység növekedésével kevesebb, mint a felére is lecsökkenhet $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten. Ebből arra lehet következtetni, hogy amennyiben a felrakott alkatrész dinamikus igénybevételnek lesz kitéve alacsony környezeti hőmérsékleten, úgy kritikus lehet a felrakóhegesztésnél alkalmazott hőbeviteli érték.

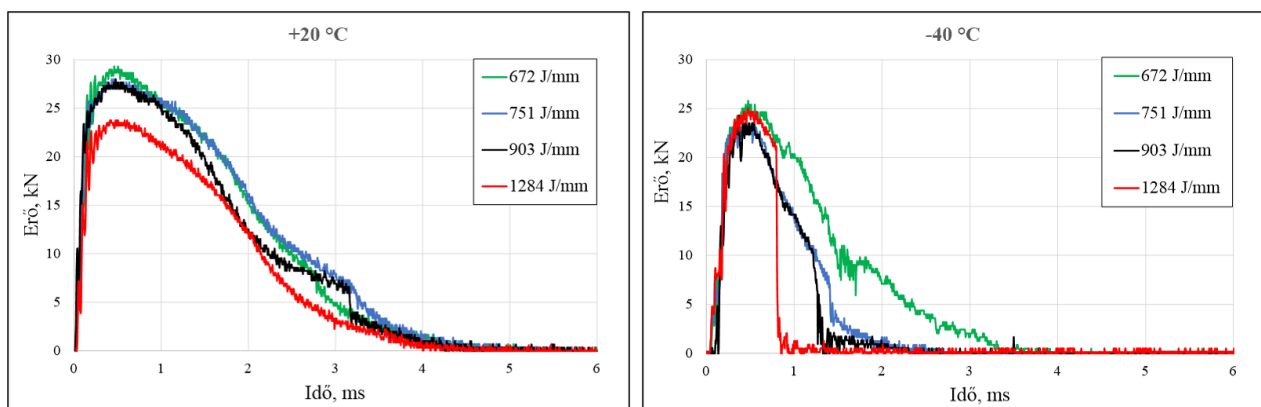
A 4. táblázat tartalmazza a maximális ütéserő értékeit is, melyekben hasonló tendencia figyelhető meg: kisebb hőbevitelnél nagyobb a maximális erő, míg nagyobb hőbevitelnél kisebb értékek adódtak. A maximális ütéserő értékek közti különbség viszont nem annyira jelentős, mint az ütőmunka értékeknél. Az 5. ábra mutatja a maximális ütéserő átlagértékeit a jobb összehasonlíthatóság érdekében.



5. ábra: A maximális ütéserő értékek különböző hőbevitelnél, mindkét hőmérsékleten

A kisebb hőmérsékletű vizsgálatoknál kisebb erők adódtak, viszont az erő értékeket összehasonlítva kisebb különbségek vannak. A nagyobb hőmérsékleten az ütéserő értékek is nagyobbak, valamint az erő értékek közötti különbségek is nagyobbak.

A műszerezett ütésvizsgálat lehetővé teszi, hogy erő – idő diagramokat lehessen felvenni az ütés teljes folyamatáról. A 6. ábra mutatja a $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on és a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ végzett vizsgálatok görbéit különböző hőbevitelnél.



6. ábra: Az ütésvizsgálat erő – idő görbéi $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on

A $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os görbék mindegyik esetben egyértelműen szívós jelleget mutatnak, nincs hirtelen erőváltozás a görbék lefutó ágában. Az 1284 J/mm hőbevitelhez tartozó görbe maximális erő értéke

elmarad a többitől. A $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os görbék már sokkal változatosabbak. Míg a 672 J/mm hőbevitelhez tartozó görbe inkább szívós jellegű, addig a nagyobb hőbevitelenél megfigyelhető az erő drasztikus leesése a lefutó ágakban, ami részben rideg viselkedésre utal. Ezek részek különböző hőbevitelenél más-más időpontokban láthatók, amiből arra lehet következtetni, hogy a beolvadt párnaréteg viselkedik ridegen és a beolvadás mértékétől függ az, hogy mikor esik le az erő értéke. Ez jelentős hatással van az ütőmunka értékére is.

Összegzés

Az elvégzett vizsgálatok eredményei alapján az alábbi következtetéseket lehet levonni:

- minél nagyobb hőbevitelt alkalmazunk, annál mélyebb beolvadásra lehet számítani S690QL acél felrakóhegesztésénél.
- A legkisebb hőbevitelnél (672 J/mm) a hőhatásövezeti keménységértékek kisebb mértékben változtak, mint a nagyobb hőbevitelenél. A hőhatásövezet mérete viszont nem változott meg jelentősen.
- A hőhatásövezeti zónák szövetszerkezete meglehetősen változatos, különböző mértékben találtunk martenzitet, megeresztett martenzitet, bainitet és ferritet. A szövetszerkezet összetétele összhangban van a keménységmérési eredményekkel.
- A hőbevitelnek és ezzel együtt a beolvadási mélységnek egyértelmű hatása van az ütőmunka értékekre: nagyobb hőbevitel kisebb ütőmunkát eredményez, ami kifejezetten kisebb hőmérsékleten okozhat problémát. Kisebb hatása van a maximális ütőerő értékére, itt is csökkenés figyelhető meg a hőbevitel növelésével.
- Az ütővizsgálatok során felvett erő-idő diagramok alapján arra lehet következtetni, hogy a beolvadt hozaganyag rontja az ütőmunka értékét, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on ezek a részek ridegen viselkednek.

Szerzői hozzájárulás

Koncepció, Meilinger Ákos és Terdik Gábor; módszertan, Meilinger Ákos; formális elemzés, Terdik Gábor; vizsgálat, Meilinger Ákos és Terdik Gábor; erőforrások, Terdik Gábor; kézirat eredeti változatának megírása, Terdik Gábor; kézirat felülvizsgálata és szerkesztése, Meilinger Ákos; vizualizáció. Terdik Gábor. Minden szerző elolvasta és jóváhagyta a kézirat végleges változatát.

Finanszírozás

A Kulturális és Innovációs Minisztérium Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program – Kooperatív Doktori Programja keretében, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott támogatással készült.

Összeférhetetlenségek

A szerzők kijelentik, hogy nincs összeférhetlenség.

Hivatkozások

- [1] W. Guo, D. Crowther, J. A. Francis, A. Thompson, Z. Liu, and L. Li, "Microstructure and mechanical properties of laser welded S960 high strength steel," *Mater Des*, vol. 85, pp. 534–548, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.07.037.
- [2] M. Tümer, C. Schneider-Bröskamp, and N. Enzinger, "Fusion welding of ultra-high strength structural steels – A review," Oct. 01, 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jmapro.2022.07.049.
- [3] J. Nowacki, A. Sajek, and P. Matkowski, "The influence of welding heat input on the microstructure of joints of S1100QL steel in one-pass welding," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 777–783, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.acme.2016.05.001.
- [4] D. Tandon, H. Li, Z. Pan, D. Yu, and W. Pang, "A Review on Hardfacing, Process Variables, Challenges, and Future Works," Sep. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/met13091512.
- [5] M. Amraei, A. Ahola, S. Afkhami, T. Björk, A. Heidarpour, and X. L. Zhao, "Effects of heat input on the mechanical properties of butt-welded high and ultra-high strength steels," *Eng Struct*, vol. 198, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109460.
- [6] D. Medvecká, F. Nový, M. Mičian, O. Bokůvka, and D. Preisler, "Microstructural changes in HAZ of weld joints of S960 MC steel," *Mater Today Proc*, vol. 62, pp. 2466–2468, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.595.
- [7] H. Jin *et al.*, "Investigation into mechanical properties of heat-affected zones in high strength S690 steel welded sections," *Eng Struct*, vol. 331, May 2025, doi: 10.1016/j.engstruct.2025.119962.
- [8] M. Pirinen, Y. Martikainen, S. Y. Ivanov, and V. A. Karkhin, "Comparative analysis of the microstructure of the heat-affected zone metal in welding of high-strength steels," *Welding International*, vol. 29, no. 4, pp. 301–305, Apr. 2015, doi: 10.1080/09507116.2014.921377.
- [9] G. Terdik, Á. Meilinger, and M.-E. Hungary, "Hardness Distribution of Heat-Affected Zones Made by Hardfacing on S690QL and S960QL Steel Plates," *Adv. Eng. Forum*, vol. 53, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.4028/p-av27Gm>
- [10] J. Chen *et al.*, "Effect of the Cooling Rate of Thermal Simulation on the Microstructure and Mechanical Properties of Low-Carbon Bainite Steel by Laser-Arc Hybrid Welding," *Coatings*, vol. 12, no. 8, Aug. 2022, doi: 10.3390/coatings12081045.
- [11] S. Afkhami *et al.*, "Thermomechanical simulation of the heat-affected zones in welded ultra-high strength steels: Microstructure and mechanical properties," *Mater Des*, vol. 213, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110336.
- [12] Z. Sun, Y. B. Wang, S. Jiang, R. Stroetmann, and G. Q. Li, "Investigation on the mechanical properties of heat-affected zone of butt-welded joint of Q690 and Q960 steel based on physical thermal simulation," *Constr Build Mater*, vol. 471, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140684.

- [13] N. Schroeder, M. Rhode, and T. Kannengiesser, "Thermodynamic prediction of precipitations behaviour in HAZ of a gas metal arc welded S690QL with varying Ti and Nb content," *Welding in the World*, vol. 67, no. 9, pp. 2143–2152, Sep. 2023, doi: 10.1007/s40194-023-01550-2.
- [14] M. Gáspár, "Effect of welding heat input on simulated haz areas in s960ql high strength steel," *Metals (Basel)*, vol. 9, no. 11, Nov. 2019, doi: 10.3390/met9111226.
- [15] J. Kovács, M. Gáspár, J. Lukács, H. Tervo, and A. Kaijalainen, "Comparative study about the results of HAZ physical simulations on different high-strength steel grades," *Welding in the World*, vol. 68, no. 8, pp. 1965–1980, Aug. 2024, doi: 10.1007/s40194-024-01714-8.
- [16] B. Li, P. Xu, F. Lu, H. Gong, H. Cui, and C. Liu, "Microstructure Characterization of Fiber Laser Welds of S690QL High-Strength Steels," *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, vol. 49, no. 1, pp. 225–237, Feb. 2018, doi: 10.1007/s11663-017-1153-z.
- [17] M. Mičian, M. Frátrik, and M. Brúna, "Softening effect in the heat-affected zone of laser-welded joints of high-strength low-alloyed steels," *Welding in the World*, vol. 68, no. 6, pp. 1497–1514, Jun. 2024, doi: 10.1007/s40194-024-01730-8.
- [18] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian, G. Madhusuhan Reddy, and K. Sivakumar, "Effect of buttering and hardfacing on ballistic performance of shielded metal arc welded armour steel joints," *Mater Des*, vol. 32, no. 2, pp. 469–479, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.08.037.
- [19] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian, and G. Madhusudhan Reddy, "Effect of PTA hardfaced interlayer thickness on ballistic performance of shielded metal arc welded armor steel welds," *J Mater Eng Perform*, vol. 22, no. 3, pp. 806–814, Mar. 2013, doi: 10.1007/s11665-012-0338-5.



© 2026 by the authors. Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).