

Hozaganyagos fiber lézeres hővezetési hegesztési vizsgálatok előkészítése szerkezeti acélokon

Preparation of Filler Wire Fiber Laser Conduction Mode Welding Investigations on Structural Steels

HANICH Szabolcs

Pannon Egyetem, 8200 Veszprém, Egyetem u. 10., hanich.szabolcs@mk.uni-pannon.hu

Abstract

This paper presents the preparation of a systematic experimental programme for filler wire fiber laser conduction mode welding of structural steels (S235/S355) in 2, 3 and 4 mm thicknesses. Using a DenaliWeld 2000 W fiber laser system with dual-wire feeder and nitrogen shielding gas, four sequential optimisation phases are defined: focal distance, laser power, beam oscillation amplitude, and validation. The programme comprises 292 samples and forms part of a two-year industrial R&D collaboration.

Keywords: conduction mode laser welding, fiber laser, filler wire, S235/S355 steel, beam oscillation

Kivonat

A cikk hozaganyagos fiber lézeres hővezetési hegesztés szisztematikus kísérleti programjának előkészítését mutatja be S235/S355 szerkezeti acélokon, 2, 3 és 4 mm vastagságban. A DenaliWeld 2000 W-os fiber lézeres rendszerrel, dupla szál as hozaganyag-adagolóval és nitrogén védőgáz alatt négy szekvenciális optimalizálási fázis kerül meghatározásra: fókusz távolság, lézerteljesítmény, lengetési amplitúdó és validálás. A program 292 mintát foglal magában, és egy két éves ipari K+F együttműködés részét képezi.

Kulcsszavak: hővezetési lézerhegesztés, fiber lézer, hozaganyagos hegesztés, S235/S355 acél, lengetési hegesztés

1. BEVEZETÉS

A lézeres hegesztés két alapvetően különböző üzemmódban mehet végbe: a hővezetési (conduction mode) és a keyhole (kulcslyukhegesztési) üzemmódban. A hővezetési üzemmódban a lézersugár teljesítménysűrűsége 10^4 – 10^6 W/cm² tartományban marad, gőzcatorna nem alakul ki, az olvadákfürdő félgömb szerű, lapos (mélység/szélesség arány $d/w < 0,5$), és a varrat felszíne lényegesen simább, mint keyhole esetén [1, 2]. Ez a tulajdonsága különösen vonzóvá teszi a technológiát esztétikai követelményeket is kielégítő, vékonylemez-alkalmazásokban.

Az irodalomkutatás alapján megállapítható, hogy a fókusz távolság (defókuszálás) a hővezetési üzemmód elsődleges szabályozó paramétere: pozitív defókuszálással az effektív foltméret megnő, a teljesítménysűrűség csökken és az üzemmód stabilan tartható [3]. A lézerteljesítmény és a hegesztési sebesség aránya (fajlagos energiabevitel $HI = P/v$) lineárisan befolyásolja az olvadákfürdő geometriáját – ez előnyt jelent a keyhole nemlineáris viselkedéséhez képest [4]. A lézersugár szinuszos lengetése (beam oscillation) hővezetési üzemmódban növeli az olvadákfürdő szélességét és egyenletesíti a Marangoni-konvekciót anélkül, hogy a teljesítménysűrűség lokálisan a keyhole tartományba emelkedne [5]. A hozaganyag (G3Si1, Ø1,0 mm) bevitele kompenzálja a sekélyebb behatolásból adódó varrathianyot és javítja a hézag-tűrő-képességet [6]. Az S235/S355 acélokra vonatkozó szisztematikus hővezetési adatbázis az irodalomban hiányos, különösen a lengetési, hozaganyagos konfiguráció vonatkozásában [7].

Jelen cikk célja a DenaliWeld 2000 W-os fiber lézeres rendszerrel tervezett, négyfázisú kísérleti program bemutatása, amely S235/S355 acélok hővezetési üzemmódu, hozaganyagos, lengetési hegesztési technológiai ablakát kívánja meghatározni 2, 3 és 4 mm lemezvastagságokon.

2. A KÍSÉRLETI BERENDEZÉS ÉS ALAPANYAGOK

A kísérletekhez rendelkezésre álló DenaliWeld fiber lézeres hegesztőrendszer maximális folyamatos (CW) teljesítménye 2000 W (hullámhossz: 1070–1080 nm, $M^2 < 1,3$). A névleges fókuszolt-átmérő 150–250 μm ; szándékos pozitív defókuszálással az effektív foltátmérő 400–800 μm -re növelhető, így a hővezetési üzemmóddhoz szükséges 10^4 – 10^6 W/cm²-es teljesítménysűrűség-tartomány elérhető. A berendezés szinuszos lézergusár-lengetési funkcióval rendelkezik (0–100 Hz, 0–5 mm amplitúdó).

A dupla szálas hozaganyag-adagoló egység két független csatornán, 0,5–20 m/perces előtolási sebességgel adagolja a G3Si1 minőségű, $\varnothing 1,0$ mm-es hegesztési drótot (40°-os, előretolt elrendezés). A védelmi gáz nitrogén, 18–30 l/perces áramlási sebességgel.

Az alapanyagok S235JR és S355J2 minőségű szerkezeti acél lemezek (EN 10025-2), 2, 3 és 4 mm vastagságban. A hozaganyag G3Si1 minőségű (EN ISO 14341), $\varnothing 1,0$ mm-es drót (C \leq 0,08%; Si 0,70–1,00%; Mn 1,40–1,70%). Két varrat-konfiguráció vizsgálandó: tompavarratok (butt joint) és sarokvarratok (T-joint).

3. A KÍSÉRLETI PROGRAM

3.1. A négyfázisú szekvenciális optimalizálás felépítése és indoklása

A kísérleti program négyfázisú szekvenciális logikán alapul: minden fázis az előző fázis optimális paramétereit rögzíti, és egyetlen tényezőt változtat szisztematikusan öt szinten. Ez az ún. OFAT (One Factor At a Time) megközelítés a lézerhegesztési paramétoptimalizálás irodalmában jól bevált módszer, különösen akkor, amikor az egyes paraméterek hatása egymástól viszonylag jól szétválasztható, és a kísérletsorozat fő célja nem egy globális matematikai modell felállítása, hanem egy robusztus, iparilag alkalmazható paraméterkészlet meghatározása [8]. A teljes faktoriális terv ugyanis $5^4 = 625$, a Box-Behnken terv 25 futást igényelne vastagságonként és varrat-konfigurációnként – a szekvenciális megközelítéssel ez $5 \times 3 = 15$ futásra csökken fázisonként, ami közel negyedannyi kísérleti ráfordítást jelent.

Minden fázisban három ismétlés biztosítja a statisztikai megbízhatóságot, lehetővé téve egyszempontos varianciaelemzés (one-way ANOVA) elvégzését az egyes szintek közötti szignifikáns különbségek azonosítására. Az összes fázisban állandóan rögzített paraméterek: impulzuszóda = folyamatos (CW); hozaganyag-előtolás = 1,2; 1,4 és 1,8 m/perc; védőgáz = nitrogén, 18; 25 és 30 l/perc. A hozaganyag-előtolási sebességek és a védőgáz-áramlási értékek az állandó paraméterek körén belül szintén variálódhatnak – ez lehetővé teszi, hogy az egyes fázisok főparamétere ne keveredjen a hozaganyag-adagolás vagy a védőgázellátás esetleges hatásával.

Vizsgált tényezők és rögzített paraméterek fázisonként

1. táblázat

Fázis	Vizsgált tényező (szintek)	Rögzített értékek	Hegesztési sebesség [m/perc]
1. Fázis	Fókusz távolság: 2mm \rightarrow +4..+8; 3mm \rightarrow +2..+10; 4mm \rightarrow +4..+12 mm	P: 800/1200/1500 W; WFS: 1,2–1,8 m/perc; N ₂ : 18–30 l/perc	2mm: 0,4 / 3mm: 0,35 / 4mm: 0,25
2. Fázis	Teljesítmény: 2mm \rightarrow 600–1000W; 3mm \rightarrow 800–1500W; 4mm \rightarrow 1000–1800W	f _{opt} ; WFS: 1,2–1,8 m/perc; N ₂ : 18–30 l/perc	2mm: 0,4 / 3mm: 0,35 / 4mm: 0,25
3. Fázis	Lengetés ampl.: 2mm \rightarrow 1,0–3,0mm; 3mm \rightarrow 1,0–4,0mm; 4mm \rightarrow 2,0–5,0mm	f _{opt} ; P _{opt} ; frekvencia: 70/60 Hz; WFS: 1,2–1,8 m/perc	2mm: 0,4 / 3mm: 0,35 / 4mm: 0,25
4. Fázis	Validálás: minden paraméter optimális értéken	f _{opt} ; P _{opt} ; L _{opt}	2mm: 0,7 / 3mm: 0,5 / 4mm: 0,3

A minden mintára kötelezően elvégzendő üzemmód-azonosítás – makrometallográfiai csiszolat d/w arányának mérése 2%-os nitároltatos maratás és digitális képelemzés (ImageJ) után – biztosítja, hogy az egyes fázisok eredményei valóban a hővezetési tartományra vonatkoznak. Ha egy adott paraméterkombinációnál d/w > 0,5, az üzemmód keyhole-ra váltott; ezek a minták az optimalizálásból kizárandók, és egyúttal kijelölik a hővezetési tartomány felső határát az adott vastagságon. Ez az információ önmagában is értékes eredmény, hiszen az irodalomban az üzemmód-átmenet pontos pozíciója a DenaliWeld rendszerre vonatkozóan nem ismert.

3.2. 0. fázis – alapanyag- és hozaganyag-karakterizálás

A hegesztési kísérletek megkezdése előtt az összes alapanyag és a hozaganyag teljes körű jellemzése szükséges. A 0. fázis kettős célt tölt be: egyrészt referenciaalapot biztosít a hegesztési eredmények értékeléséhez (pl. a HAZ keménységprofil értelmezéséhez az alapanyag keménysége nélkülözhetetlen), másrészt feltárja az esetleges tételközi összetétel-variációkat, amelyek a kísérletek megismételhetőségét befolyásolhatják.

XRF-analízissel (röntgenfluoreszcencia-spektrometria) meghatározom mindhárom lemezzvastagság (BM-2mm-01, BM-3mm-01, BM-4mm-01 jelű minták) és a G3Si1 hozaganyag (FM-01 jelű minta) pontos kémiai összetételét, különös tekintettel a C, Mn, Si, P, S elemtartalomra. Az S235JR és S355J2 acélok névleges összetétele (EN 10025-2) ugyan ismert, azonban a tényleges gyártási tétel értékei eltérhetnek, és a szénegyenérték ($CE = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$) pontos ismerete a HAZ martenzitképződési hajlamának előrejelzéséhez szükséges.

Metallográfiai vizsgálattal – mechanikai polírozás (SiC csiszolópapír sorozat, végső polírozás 1 μ m gyémántsuszpenzióval) és 2%-os nitáldatos maratás után – azonosítom az alapanyag ferrites-perlites szövetszerkezetét és meghatározom az átlagos szemcseátmérőt az ASTM E112 szabvány szerinti összehasonlító módszerrel. A szemcseméret befolyásolja a HAZ-ban végbemenő ausztenitációs és visszaalakítási folyamatokat, ezért az értéke a hegesztési ciklus metallurgiai értelmezésénél felhasználásra kerül.

Vickers-keménységméréssel (HV10, legalább tíz mérési pont az alapanyag keresztmetszetén) dokumentáljuk a kiindulási keménységet; ez az érték a hegesztési keménységprofilok értékelésének abszolút referenciája. Különös figyelmet fordítok a lemezfelület állapotára – hengerelt, savmaratott vagy polírozott felszín esetén az abszorpciós együttható akár 15–20%-kal is eltérhet, ami hővezetési üzemmódban közvetlenül megváltoztatja az olvadékfürdő méretét és geometriáját.

3.3. 1. fázis – fókusz távolság optimalizálás és az üzemmód-határ azonosítása

Az 1. fázis elsődleges célja a hővezetési üzemmód stabil tartományának azonosítása minden lemezzvastagság–varrat típus kombinációhoz, és a fókusz távolság optimumának meghatározása ezen a tartományon belül. A fókuszpozíció (defókuszálás, Δf) a lézeres hővezetési hegesztés egyik legtöbbet vizsgált, mégis sokszor mellőzött paramétere. Pozitív defókuszálás esetén a fókuszpont a munkadarab felszíne felett helyezkedik el: a folt átmérője megnő, a teljesítménysűrűség csökken, az olvadékfürdő laposabb és szélesebb lesz. Negatív defókuszálás ezzel szemben fokozza a keyhole-képződés hajlamát, ezért az 1. fázisban kizárólag pozitív Δf értékek kerülnek vizsgálatra.

A vizsgált fókusz távolság-tartományokat az irodalmi adatok és a berendezés fókuszfolt-átmérő jellemzői alapján határoztuk meg. A DenaliWeld rendszer névleges fókuszfolt-átmérője $\sim 200 \mu$ m; +6 mm defókuszálásnál az effektív foltátmérő kb. 400–500 μ m-re becsülhető, amelynél a 800 W-os teljesítmény mellett a teljesítménysűrűség $\sim 5 \times 10^5$ W/cm² – ez éppen az üzemmód-átmenet határán helyezkedik el 2 mm-es S235 acélnál. Minden vastagsághoz és varrat-konfigurációhoz öt fókuszpozíciót vizsgálok, három ismétléssel (összesen 90 minta, mintaazonosítók: P1-[x]T/C-01–05).

Az 1. fázis értékelési kritériumrendszere: (1) $d/w < 0,5$ – hővezetési üzemmód teljesül; (2) a varratkeresztmetszet makrometallográfiai csiszolaton gözcsatorna-nyomot nem mutat; (3) a varrat felszíne folyamatos, bevágódástól (undercut) és felületi porozitástól mentes. Az optimális fókusz távolság (f_{opt}) az a Δf érték, amelynél a d/w arány minimális (legsekélyebb, legszélesebb olvadékfürdő), miközben a behatolás még eléri a lemezzvastagság legalább 80%-át tompavarratok esetén, ill. a láb hossz (throat) eléri a névleges értéket sarokvarratok esetén.

3.4. 2. fázis – lézerteljesítmény optimalizálás

A 2. fázisban a fókusz távolság az 1. fázisból meghatározott f_{opt} értéken rögzített, és a lézerteljesítmény változik öt szinten, minden esetben ellenőrizve, hogy az üzemmód a hővezetési tartományban marad-e. A fajlagos energiabevitel ($HI = P/v$) hővezetési üzemmódban lineárisabb kapcsolatban áll a behatolási mélységgel, mint keyhole esetén – ez lehetővé teszi a teljesítmény hatásának viszonylag egyértelmű azonosítását.

A teljesítménytartományok megválasztásánál figyelembe vettem, hogy a DenaliWeld rendszer maximális teljesítménye 2000 W, és az 1. fázis várható eredménye alapján a 4 mm-es lemeznél a teljesítmény felső határa valószínűleg 1700–1900 W közelében húzódik (a keyhole-átmenet határán). A 4. táblázat a részletes kísérlettervet mutatja.

A 2. fázis kimeneti jellemzői az 1. fázishoz képest kiegészülnek a Vickers-keménység mérésével (HV0,3, szisztematikus rács a varrat keresztmetszetén, 0,1–0,2 mm lépésköz). A keménységprofil lehetővé teszi a HAZ kiterjedésének és keménységcsúcsainak azonosítását; az EN ISO 15614-11 szerinti megengedhető maximum HV380. Az optimális teljesítmény (P_{opt}) kiválasztásánál három szempont érvényesül egyidejűleg: (1) $d/w < 0,5$ (hővezetési üzemmód); (2) behatolási mélység $\geq 80\%$ lemezvastagságnál tompavarratok esetén; (3) HAZ-keménységcsúcs $< HV380$. Ha e három feltétel egyszerre teljesül, az adott szint az elfogadható tartományba esik; az optimum a feltételhatároktól legtávolabb eső, azaz a legstabilabb üzemmódot adó szint.

3.5. 3. fázis – lengetési amplitúdó optimalizálás

A 3. fázisban a fókusztávolság és a teljesítmény egyaránt az előző fázisokból meghatározott optimális értéken rögzített, és a lézersugár szinuszos elhajlításának amplitúdója (A) kerül vizsgálat alá öt szinten. A lengetés fizikai hatása hővezetési üzemmódban eltér a keyhole esetétől: nem a gőzcsatorna stabilitásán, hanem az olvadátküldő szélességén és a Marangoni-áramlás mintázatán keresztül hat. Nagyobb amplitúdó \rightarrow szélesebb olvadátküldő \rightarrow egyenletesebb hozaganyag-elkeveredés és kisebb felszíni porozitás, de egyúttal csökkenő csúcs-teljesítménysűrűség, ami a behatolási mélységet korlátozhatja.

A lengetési frekvencia rögzített értékeken áll: 2 és 3 mm-es lemezeknél 70 Hz, 4 mm-es lemezeknél 60 Hz. A frekvencia megválasztásának indoka: 70 Hz-nél az olvadátküldő egy szinuszos periódus alatt megtett útja kb. egyenlő az olvadátküldő szélességével, ami az irodalom szerint optimális elkeveredési feltételeket teremt; 4 mm-es lemeznél a nagyobb energiabevitel miatt az olvadátküldő lassabb mozgása 60 Hz-es frekvenciát indokol.

Az amplitúdó felső korlátját az a fizikai feltétel szabja meg, hogy a lézerfolt szélső pozícióiban ($\pm A/2$) is a hővezetési tartományban maradjon a teljesítménysűrűség. Ezt a feltételt az 1. fázis eredményeiből meghatározott, hővezetési üzemmóddhoz szükséges minimális foltátmérből visszszámítva ellenőrizzük. Az optimális lengetési amplitúdó (L_{opt}) az a szint, amelyenél a varrat porozitása minimális (RT-vizsgálat alapján EN ISO 5817 B szint), a varratszélesség a 2-es fázis optimumánál legalább 20%-kal nagyobb (jobb hézag-töltő képesség), és a behatolási mélység nem csökkent 80% alá. A 3. fázis szintén 90 mintát tartalmaz (mintaazonosítók: P3-[x]T/C-01–15).

3.6. 4. fázis – validálás és reprodukálhatóság

A validálási fázisban minden paraméter a három optimalizálási fázisból meghatározott optimális értéken kerül beállításra (f_{opt} , P_{opt} , L_{opt}), és a kísérletek mindkét varrat-konfigurációban, mindhárom lemezvastagságon háromszoros ismétléssel elvégzésre kerülnek (6 kombináció \times 3 ismétlés = 18 minta, azonosítók: V-[x]T/C-01–03).

A 4. fázis mintáin a teljes minőségértékelési spektrum elvégzésre kerül: makrometallográfia (d/w arány, HAZ kiterjedés, varraterősítés magassága); Vickers-keménységprofil (HV0,3, szisztematikus rács); húzóvizsgálat (EN ISO 4136, a varrat merőlegesen metszi a próbatest tengelyét); sarokhajlítás (EN ISO 5173); röntgenvizsgálat (EN ISO 17636-1, EN ISO 5817 B szint szerinti értékelés); penetrációs vizsgálat (PT, felszíni hibák); 3D optikai szkener (varrat topográfia, felszíni egyenetlenség); K-típusú termoelemek (t/s hűlési idő meghatározása 1, 3 és 5 mm távolságban a varrat mellől).

A reprodukálhatóság értékelése a mért kimeneti jellemzők szórásértékei (s), relatív szórása (RSD%) és a folyamatképeségi mutató (Cpk) alapján történik, ahol a specifikációs határokat az EN ISO 5817 B szint, ill. a HV380 keménység-határ adja. $Cpk \geq 1,33$ értéknél az adott jellemző gyártási bevezethetőnek minősíthető. Ezek az adatok a kétéves K+F együttműködés ipari partnere számára a WPS (Welding Procedure Specification) elkészítésének közvetlen alapját képezik, és lehetővé teszik a hegesztési eljárás EN ISO 15614-11 szerinti minősítési eljárásának előkészítését.

3.7. Mintaelőkészítés és hegesztési műveletek

A kísérleti minták előkészítése szabványos eljárásrend szerint történik, amelynek következetes betartása elengedhetetlen a kísérletek megismételhetőségéhez. A lemezeket vízugaras vágással (waterjet cutting) vagy precíziós körfűrészrel méretre vágjuk: tompavarratok esetén 150×75 mm-es, sarokvarratok esetén 150×75 mm (talplemez) + 150×50 mm (szárlemez) méretre. A kötési felületeket saválcsapolással (10%-os sósavoldat, 60 s) vagy gépi polírozással (P600 SiC papír) homogenizálom, majd acetonos zsirtalanítással tisztítom. A felszínkezelés módját és időpontját a kísérleti naplóban rögzítem, mivel hővezetési üzemmódban az abszorpciós viszonyok reprodukálhatósága különösen kritikus.

A tompavarratok előkészítésénél a lemezszeleket lézeres vágással ($\pm 0,05$ mm tűrés) derékszögűre munkáljuk, és a hézag zárásához varrócsavarokat alkalmazunk 30 mm-es osztással. A megengedhető

hézagnagyság hővezetési üzemmódban hozaganyag nélkül max. 0,1 mm; hozaganyag alkalmazásával ez 0,3–0,5 mm-re növelhető, ami az egyik fő motiváció a dupla szálas adagoló alkalmazására. A sarokvarratoknál (T-joint) a szárlemez merőlegességét szögprofás befogóval biztosítom ($\pm 0,5^\circ$), és a gyökérhézag max. 0,2 mm.

A hozaganyag-adagoló beállítása minden hegesztési sorozat előtt kalibrálásra kerül: a tényleges előtolási sebességet 60 s mérési idővel gravimetrikusan ellenőrzöm (a kiadott drótmennyiség tömegéből számított sebesség $\pm 2\%$ -os eltéréssel belül fogadható el). A fókuszpozíció beállítása érintkezésmentes lézeres távolságmérővel ($\pm 0,1$ mm pontosság) történik, közvetlenül a hegesztési sorozat megkezdése előtt. A védőgáz-áramlást rotaméterrel és digitális tömegáram-szabályozóval egyaránt ellenőrzöm; a nitrogén tisztasága min. 99,999% (5.0 minőség).

A hegesztési menetirányt minden mintán rögzítem (bal \rightarrow jobb), és a minták befogószerkezetbe helyezése standardizált: a varrat közepe a befogó referenciapontjától mért távolsága állandó ($\pm 0,5$ mm). A hőmérséklet-méréshez alkalmazott K-típusú termoelemeket (0,5 mm átmérőjű hüvelyes kivitel) az 1., 3. és 5. mm-es pozíciókba a lézervágott furatokba ragasztjuk (kerámia ragasztó, kikeményítési hőmérséklet: 120°C , 30 perc), és az elhelyezés pontosságát műszaki mikroszkóppal ellenőrzöm ($\pm 0,1$ mm).

3.8. A hozaganyag és a védőgáz szerepe a kísérleti programban

A G3Si1 minőségű hozaganyag (EN ISO 14341) alkalmazása hővezetési üzemmódban kettős funkciót tölt be. Egyrészt geometriai feltöltési funkció: a sekélyebb behatolásból adódó varrathiany (underfill) kompenzálja, biztosítva, hogy a varrat keresztmetszetének területe elérje a lemezkeresztmetszet legalább 100%-át tompavarratok esetén. A szükséges hozaganyag-mennyiség a varrat mértani adataiból (varratszélesség, varraterősítés, lemezvastagság) egyszerűen számítható, és az előtolási sebesség ennek megfelelően választható meg. Másrészt metallurgiai dezoxidációs funkció: a G3Si1 drót magasabb Mn- és Si-tartalma (Mn: 1,40–1,70%, Si: 0,70–1,00%) fokozott dezoxidáló képességet biztosít, ami hővezetési üzemmódban különösen fontos, mivel az olvadékfürdő hosszabb életideje több lehetőséget ad a zárványok felszínre úszására.

A dupla szálas adagolórendszerben a két drótesatorna előtolási sebessége egymástól független lehet. A kísérleti programban az állandó paraméterek között megadott három WFS érték (1,2; 1,4; 1,8 m/perc) az összesített előtolási sebességre vonatkozik. A szimmetrikus konfiguráció biztosítja az egyenletes hozaganyag-eloszlást az olvadékfürdő szélességén belül, és lehetőséget ad arra, hogy egy következő kísérletsorozatban az arány aszimmetrikussá tételével az egyik oldal preferenciális feltöltése vizsgálható legyen.

A nitrogén védőgáz alkalmazása hővezetési üzemmódban speciális szempontokat vet fel az argonhoz képest. A nitrogén alacsonyabb ionizációs potenciálja (14,53 eV), fokozottabb plazmakölcsönhatást eredményezhet; azonban hővezetési üzemmódban ez a hatás csökkentett jelentőségű. A nitrogén fő előnye a felszíni oxidáció hatékony megakadályozása: az olvadékfürdő felszínét és a HAZ-t egyaránt védi a levegő oxigénjétől és nedvességtartalmától. Emellett a nitrogén olcsóbb, mint az argon, ami ipari szempontból kedvező. A kutatás várható mellékterméke annak kvantifikálása, hogy a nitrogén a varrat szövetébe beépülve (nitridfázis képzés) befolyásolja-e mérhetően a mechanikai.

3.9. Adatrögzítés, minta-azonosítás és az eredmények értékelési folyamata

A kísérleti program teljes folyamata szigorú dokumentációs rendszer szerint kerül végrehajtásra. Minden egyes minta egyedi azonosítót kap a következő logika szerint: [Fázis]-[Vastagság][Varrat típus]-[Sorszám], pl. P1-2T-07 az 1. fázis, 2 mm-es tompavarrat, 7. mintáját jelenti. Az azonosítók kiosztása a hegesztési sorozat sorrendjében történik, és minden mintához hegesztési napló lap kerül kitöltésre, amely tartalmazza: a beállított paramétereket, a tényleges mért értékeket (teljesítmény, sebesség, WFS, gázáramlás), a hegesztés időpontját, a kezelő nevét és a felszínelőkészítés módját.

A mintákon elvégzendő vizsgálatok sorrendje minden fázisban azonos: (1) vizuális vizsgálat – felszíni hibák, varratkontinuitás azonosítása; (2) 3D optikai szkener – varrat topográfia és felszíni érdességi profil; (3) komputertomográf (CT) – belső hibák (porozitás, zárványok, repedések); (4) metallográfiai csiszolat készítése – a varrat közepén, merőleges keresztmetszeten, EN ISO 17639 szerint; (5) d/w arány mérése – az üzemmód azonosítása; (6) Vickers-keménységmérés HV0,3 terhelésen – keménységprofil felvétele. A 4. (validálási) fázis mintáin ezekhez járul még a roncsolásos mechanikai vizsgálatok sorozata.

Az összegyűjtött adatok feldolgozása Microsoft Excel és R statisztikai szoftver kombinációjával történik. Minden fázisban egyszempontos ANOVA (one-way analysis of variance) kerül elvégzésre a vizsgált paraméter szintjei között fennálló szignifikáns különbségek azonosítására (szignifikanciaszint: $\alpha = 0,05$). Páros összehasonlítások Tukey HSD (Honest Significant Difference) post-hoc teszttel történnek, amelyek megadják, hogy pontosan mely szintpárok között van statisztikailag igazolható különbség. A d/w arány, a behatolási mélység, a varratszélesség és a HAZ-keménységcsúcs értékeit a paraméter szintjének függvényében

grafikusan is megjelenítem, lehetővé téve az optimum szemléletes azonosítását. Az összes nyers adat és feldolgozott eredmény archiválása a kétéves K+F projekt megosztott adattárában történik, verziókövető rendszerrel.

4. A VARRATMINŐSÉG ÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREI ÉS VÁRHATÓ EREDMÉNYEK

4.1. Vizsgálati módszerek

Az üzemmód post-process verifikálása minden mintán makrometallográfiai csiszolat d/w arányának mérésével (2%-os nitárlódat, ImageJ képelemzés) történik. A varrat geometriai jellemzői (behatolási mélység, varratszélesség, HAZ kiterjedés) digitális képelemzéssel mérhetők. A Vickers-keménységmérés (HV0,3, 0,1–0,2 mm lépésköz) azonosítja a HAZ keménységcsúcsait; az EN ISO 15614-11 szerinti maximum megengedhető érték HV380. Röntgenvizsgálat (RT, EN ISO 17636-1) minden mintán a belső porozitás dokumentálásához, az EN ISO 5817 B minőségi szint értékelési alapon. A 4. fázis mintáin húzóvizsgálat (EN ISO 4136) és sarokhajlítás (EN ISO 5173) is elvégzésre kerül.

4.2. Várható eredmények és tudományos hozzájárulás

A kísérleti program legfontosabb várható eredménye a hővezetési üzemmód technológiai ablakának pontos meghatározása 2–4 mm vastagságú S235/S355 acélra a DenaliWeld 2000 W-os rendszeren. Ilyen részletességű, szisztematikus hővezetési adatbázis ebben a vastagság- és teljesítménytartományban az irodalomban nem elérhető. A lengetési, hozaganyagot hővezetési lézerhegesztés három technológiai elem szimultán alkalmazása S235/S355 acélok szintén hiánypótló hozzájárulást jelent. A nitrogén védőgáz hatása hővezetési üzemmódban – a varrat nitridtartalmára és szívósságára – a kutatás várható mellékterméke. A validálási fázis eredményei a kétéves K+F együttműködés ipari partnere számára a gyártási bevezethetőség alapját nyújtják a WPS elkészítéséhez.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

2024-1.1.1-KKV_FÓKUSZ-2024-00063 azonosítószámú projekt az NKFI Hivatal és a Nemzeti Innovációs Ügynökség konzorciumában, a Magyar Állam támogatásával társfinanszírozásával valósul meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Dowden, J. M.: The Theory of Laser Materials Processing. Springer, Dordrecht, 2009.
- [2] Katayama, S.: Fundamentals and Details of Laser Welding. Springer Japan, Tokyo, 2013.
- [3] Shao, J., Yan, Y.: Review of techniques for on-line monitoring and inspection of laser welding. J. Phys.: Conf. Ser., 15, 101–107, 2005. DOI: 10.1088/1742-6596/15/1/017
- [4] Benyounis, K. Y. et al.: Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile. J. Mat. Proc. Tech., 164–165, 978–985, 2005. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.060
- [5] Hügel, H. et al.: Beam oscillation in laser beam welding – an overview. J. Laser Appl., 32(1), 012001, 2020. DOI: 10.2351/1.5131528
- [6] Salminen, A.: The filler wire – laser beam interaction during laser welding with low alloyed steel filler wire. Mechanika, 4(84), 67–74, 2010.
- [7] Lloberas, J. et al.: Weld quality of structural steel S355 using an Nd:YAG laser. J. Achievements Mat. Manuf. Eng., 36(2), 140–146, 2009.
- [8] Rosenthal, D.: Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. Welding Journal, 20(5), 220s–234s, 1941.
- [9] Zhao, Y. et al.: Optimization of laser welding thin high-strength steel via RSM. Opt. Lasers Eng., 50(9), 1267–1273, 2012. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2012.03.010
- [10] Quintino, L. et al.: Welding with high power fiber lasers – A preliminary study. Materials and Design, 28(4), 1231–1237, 2007. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.12.017