

SIMON VIRÁG
A TELJESÍTMÉNY ÉS A HALADÁSI SEBESSÉG HATÁSA A
VARRATGEOMETRIÁRA KÉZI LÉZERSUGARAS HEGESZTÉS ESETÉN

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLÓGIA TANSZÉK



TDK-DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLÓGIA TANSZÉK

SIMON VIRÁG
TDK-DOLGOZAT

A teljesítmény és a haladási sebesség hatása a
varratgeometriára kézi lézersugaras hegesztés esetén

Konzulens:

Dr. Gyura László
Hegesztéstechnológiai vezető
c. egyetemi docens

Témavezető:

Dr. Varbai Balázs
Adjunktus
tanszékvezető helyettes

Budapest, 2023

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	1
2. A lézersugaras eljárások jellemzői	1
2.1. A lézersugár jellemzői, előállítása (lézersugárforrások)	1
2.1.1. Gázlézerek.....	3
2.1.2. Szilárdtest-lézerek	3
2.1.3. Diódalézerek	4
2.2. Lézersugaras alkalmazások.....	4
2.2.1. Lézersugaras hegesztés	6
2.3. Lézerek biztonságtechnikai kérdései	8
2.4. Kézi lézersugaras hegesztés	10
3. Kísérleti terv	10
4. Hegesztés és kiértékelés menete.....	12
5. Kiértékelés eredményei	16
6. Összefoglalás.....	27
7. Felhasznált források	28
8. Summary	29

1. BEVEZETÉS

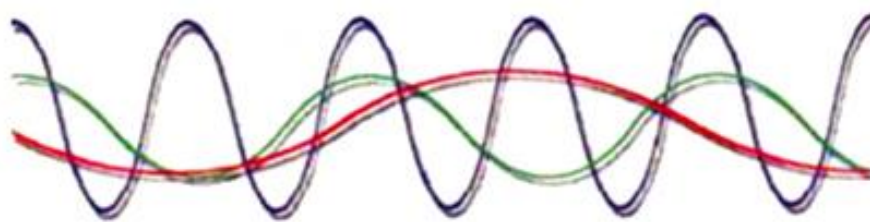
Egyetemi tanulmányaimat elkezdve találkoztam életemben először a hegesztéssel, amikor első félévben csatlakoztam a BME Hegesztési Szakosztályhoz. Szakosztályos féléveim alatt sokat tanulhattam a hegesztésről, azonban a laborfoglalkozások és az egyéb szakmai programok keretein belül főként az elterjedtebb ívhegesztési eljárásokkal foglalkoztunk. Szakmai gyakorlatomat 2023 júliusában kezdtem meg a Linde Gáz Magyarország Zrt. Illatos úti telephelyén, ahol betekintést nyerhettem az addig számomra még ismeretlen lézersugaras hegesztés világába. Ezen belül is a kézi lézersugaras hegesztést nyílt lehetőségem kipróbálni. Úgy döntöttem, hogy a TDK-dolgozatom, majd későbbi szakdolgozatom témájaként is a kézi lézersugaras hegesztést választom. Magyarországon egyre több kézi lézersugaras berendezés van használatban, azonban rendkívül kevés a tapasztalat ezzel az eljárásvaltozattal kapcsolatban. Minden cég a saját tapasztalataiból próbál következtetéseket levonni. Úgy gondolom, hogy hasznos lesz kísérletsorozatokat végezni a különböző paraméterek változtatása mellett, ezzel egy átfogó képet kapva a kézi lézersugaras hegesztésben rejlő lehetőségekről.

2. A LÉZERSUGARAS ELJÁRÁSOK JELLEMZŐI

A következőkben áttekintem a lézersugaras eljárások legfontosabb szakirodalmát. Elsőként a lézersugarak jellemzőit és lehetséges előállítási módjait veszem sorra, jellemezve az iparban elterjedt lézersugárforrásokat. Ezután áttekintem a lézersugaras eljárások alkalmazási területeit és alkalmazásának előnyeit, különös tekintettel a lézersugaras hegesztésre. Kitérek a lézersugaras berendezések biztonságtechnikájára is, végül pedig következik dolgozatom témájának, a kézi lézersugaras hegesztésnek a szakirodalmi áttekintése.

2.1. A lézersugár jellemzői, előállítása (lézersugárforrások)

A lézer szó az angol LASER (=Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) betűszóból ered, melynek jelentése fényerősítés a sugárzás stimulált vagy indukált emissziójával. A lézersugár monokromatikus, azaz egy hullámhosszúságú fényből áll, koherens, tehát azonos hullámhelyzet és periódus jellemzi a terjedés irányára merőleges síkon áthaladó fotonokat, valamint kis divergenciájú, közel párhuzamos elektromágneses nyaláb, ahogy az 1. ábrán is látható.



Napsugárzás (több különböző szín)



LED fény: monokromatikus, de nem koherens



Lézersugárzás: monokromatikus és koherens

1. ábra: A lézersugár jellemzői a napsugárzással és a LED fényvel összehasonlítva [2]

Előállításuk a rezonátorban történik, a következőképpen: szükség van egy lézeraktív közegre, azaz lézermédiumra, melynek részei a hordozó anyag és egy gerjesztésre alkalmas szennyező. A lézeraktív közeggel energiát közlünk, azaz gerjesztjük, más szóval pumpáljuk, ennek hatására megnő a gerjesztett részecskék aránya. Ha a gerjesztett részecskék túlsúlyba kerülnek, már nem tud minden kibocsátott foton elnyelődni az anyagon belül, ezt a jelenséget nevezzük populációinverzióknak. A rezonátor két végén egy-egy tükör található. A zárótükör minden ráeső sugárzást visszaver, míg a másikkal oldali nyitótükör csak a sugárzás egy bizonyos hányadát engedi át, így lehetővé téve a stimuláció folyamatos fenntartását. [1]

A lézersugaras megmunkáló rendszerek felépítése általánosan – akár vágó-, akár hegesztőberendezésekre, vagy egyéb lézersugaras megmunkáló berendezésekre vonatkozóan – a következő: a rezonátorban előállított lézersugarat a sugárvezető rendszer juttatja el a megmunkáló fejig, melynek feladata a nyaláb formálása és a munkagázok megmunkálás helyére való vezetése. Maga a megmunkáló berendezés pedig a megmunkáló fej, illetve a munkadarab mozgásának és pozícionálásának szerepét tölti be. [2]

A lézersugárzás előállítása többféle lézersugárforrás segítségével történhet. A gerjesztett közeg alapján megkülönböztetünk gázlézereket, szilárdtest-lézereket és diódalézereket, valamint egyéb típusú, például excimer- vagy folyadéklézereket, de

jelen dolgozatban csak az első három típusra térek ki, mivel azok a leggyakrabban használt lézersugárforrás-típusok. [3] Az irodalomkutatásban nagy segítséget nyújtott és fő forrásom volt a Buza Gábor által 2012-ben publikált *Lézersugaras technológiák I.* című könyv, melyet [3]-ként hivatkozom. A szakirodalom áttekintését az e könyvben leírtakat további forrásokból kiegészítve állítottam össze.

2.1.1. Gázlézerek

A gázlézerek, vagy más néven CO₂-lézerek a lézersugaras hegesztés- és vágás területén közkedvelten használt lézersugárforrások, az általuk kibocsátott lézersugarat 10,6 µm távoli infravörös tartománybeli hullámhossz jellemzi. A kibocsátott lézersugár nem látható. Ezen lézersugárforrások esetében a lézermédium egy gáz halmazállapotú elegy, mely He, N₂ és CO₂ gázok keveréke, ezen gázokat rezonátorgázoknak is nevezzük. A gerjesztés jellemzően elektromos kisülés útján történik, létrehozható folyamatos üzem vagy impulzus üzem is. A N₂ gáz szerepe, hogy a CO₂ molekulának ütközve annyi energiát adjon át, aminek révén az arra az energiaszintre kerül, ahonnan többletenergiáját leadva a folyamat szempontjából lényeges fényt sugároz ki. Miután a CO₂ többletenergiáját elektromágneses sugárzás formájában leadta, a He segít a CO₂ molekulát helyreállítani és újra energiafelvételre képessé tenni. [2] Az előállított nyalábot hűtött réz tükrökből álló tükrrendszer vezeti a felhasználás – megmunkálás – helyére. [4]

2.1.2. Szilárdtest-lézerek

A szilárdtest-lézerekben a lézeraktív közeg olyan szilárd befogadó anyag, melyben gerjesztésre alkalmas szennyező van szétszórva. A klasszikus villanólámpás gerjesztésű Nd:YAG szilárdtest-lézerekben a lézermédium egy kristályos YAG, azaz ittrium-alumínium-gránát rúd neodímium szennyezővel. A szilárdtest-lézerek optikai úton gerjeszthetők (villanó)lámpák vagy lézerdiódák fényével, a gerjesztés módja alapján megkülönböztetünk lámpapumpált és diódapumpált lézereket. Villanólámpás gerjesztéssel csak impulzus-, lézerdiódás gerjesztéssel impulzus- és folyamatos üzem is elérhető. A diódapumpált szilárdtest-lézerek fő előnyei a lámpapumpált változathoz képest a nagyjából kétszeres sugárminőség, négyszeres hatásfok és az akár nagyságrenddel kedvezőbb szervizigény, mely annak köszönhető, hogy nem kell jelentős leállási idővel számolni a kis élettartamú lámpa cseréje miatt. Magasabb beruházási költségeihez alacsonyabb üzemeltetési költségek társulnak, így összességében elmondható, hogy a diódapumpált lézerek gazdaságosabbak lámpapumpált társaiknál, ezáltal elterjedtebbek is, a korszerű szál- és diszk-lézereket így gerjesztik. A szilárdtest-lézerek által előállított, nem látható lézersugár hullámhossza 1064 nm, mely a közeli infravörös tartományba tartozik. A fiber lézerek, azaz szállézerek esetén a lézermédium szennyezett optikai kábel. A több, eltérő törésmutatójú anyagból készülő szál magja a legnagyobb törésmutatójú lézermédium. A pumpáló lézersugár az ezt körülvevő, kisebb törésmutatójú köpenyben halad. E körül található egy még kisebb törésmutatójú réteg, melynek feladata, hogy a pumpáló

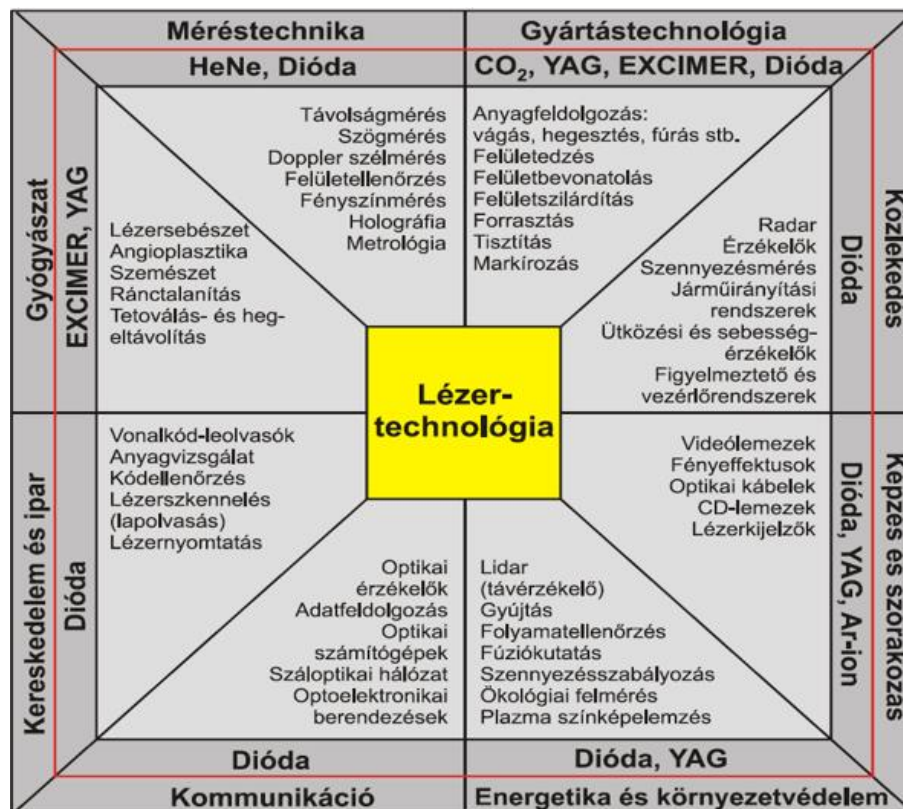
sugár teljesítménye se vesszen kárba. A mechanikai védelem biztosítására további burkolórégeket találunk az optikai szál körül. Léteznek továbbá diszk-lézerek, melyeknél az ösztérfogathoz képest lényegesen nagyobb felületen intenzívebb hűtés valósítható meg. A diszk-lézerek esetén a pumpáló sugárzás egy áthaladás alkalmával csak részben tud elnyelődni, így azt egy erre a célra kifejlesztett tükörrendszer segítségével 16, esetleg 32 alkalommal átvezetik a korongon, melynek hatására az energiája szinte maradéktalanul elnyelődik. [3]

2.1.3. Diódalézerek

A diódalézerek esetén a félvezető diódán átfolyó áram közvetlenül fénnyé, sőt lézersugárrá alakul. Mivel egy diódával viszonylag kis fényteljesítmény állítható elő, így anyagmegmunkálási célokra, ahol nagy teljesítménysűrűsége van szükség, tömbösítve készítik. Ilyen módon a legkorszerűbb diódapumpált lézerek esetén akár 10 kW teljesítmény is elérhető. A diódalézerek legnagyobb problémája a maradékhő elvezetése, nagy hatásfokuk ellenére a maradékhő csaknem a keletkező fényteljesítménnyel egyenlő. Emiatt a diódalézerek esetén a hűtésre különösen nagy figyelmet kell fordítani. [3]

2.2. Lézersugaras alkalmazások

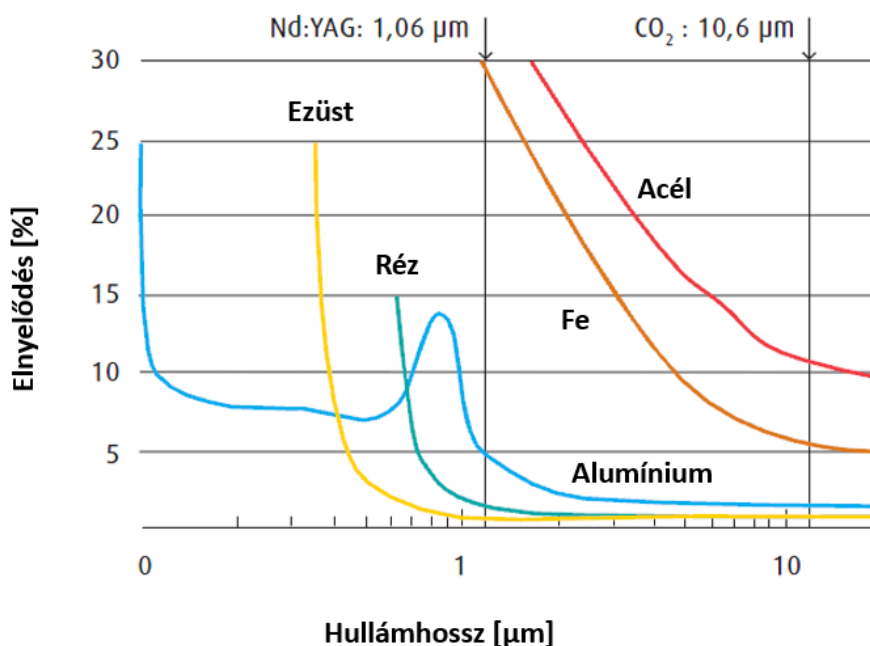
A lézersugarak különböző típusait számos területen elterjedten alkalmazzák, melyeket a 2. ábra szemléltet.



2. ábra: A lézersugaras technológiák alkalmazási területei [3]

Mivel kísérleteimet kézi lézersugaras hegesztéssel végeztem, szakdolgozatomban a lézersugaras anyagmegmunkálásokra, azon belül is a lézersugaras vágásra és hegesztésre fogok bővebben kitérni, mely a kettő leggyakrabban alkalmazott lézersugaras fémmegmunkáló technológia. A lézersugaras anyagmegmunkálások fizikai elve a következő: a fém felületére érkező lézersugár a fémes anyagba behatolva kölcsönhatásba lép az elektronokkal, miközben energiája disszipálódik, az elektronok energiája pedig megnő. A megnövekedett energiájú elektronok a rácspontokon rezgő fémionoknak ütközések útján átadják energiájukat, melynek eredményeképpen a fém felmelegszik. [1] A lézersugaras anyagmegmunkáló eljárásokat számos előnyüknek köszönhetően igen elterjedten használják, közülük a legfontosabbak a lézersugaras vágás, a lézersugaras hegesztés, illetve a lézersugaras felületmódosító technológiák, például a lézersugaras edzés, -felületötvözés, és -felülettisztítás. A lézersugaras anyagmegmunkáló technológiák használatának hatalmas előnye, hogy a megmunkáló szerszám (fény) teljesen kopásmentes, így jóval gazdaságosabbak, mint a hagyományos technológiák, és a kopóalkatrészek (fúvóka, optikai elemek) költsége is sokkal kisebb. További előny, hogy a lézersugaras megmunkálás során a munkadarabra a mechanikai megmunkálásokhoz képest jóval kisebb erő hat, így csekély deformációval és maradó feszültségekkel lehet számolni. A lézersugaras megmunkálások előnye továbbá az elérhető nagy megmunkálási sebesség, mely a lézersugár által a fémnek átadott nagy teljesítménysűrűségből fakad. Szintén a nagy lézersugár-intenzitásból és a nagy megmunkálási sebéségből következik, hogy csekély lesz a fajlagos hőterhelés a munkadarabon, ezáltal a deformáció is. A lézersugaras technológiákra általánosságban jellemző, hogy kiválóan automatizálhatóak, a technológiai paraméterek rendkívül precízen szabályozhatók és nagyon jó megmunkálási minőség érhető el a használatukkal. [3]

Az egyes alapanyagok megmunkálhatósága erősen függ a lézersugár alapanyagban történő elnyelődésétől. A szilárdtest-lézer, illetve gázlézer segítségével előállított lézersugár elnyelődési hányada a hullámhossz függvényében az egyes anyagcsoportokra a 3. ábrán látható.



3. ábra: Szilárdtest-lézer és gázlézer által előállított lézersugár elnyelődése az egyes anyagcsoportok esetén, melyből következik a megmunkálhatóság [2]

2.2.2. Lézersugaras hegesztés

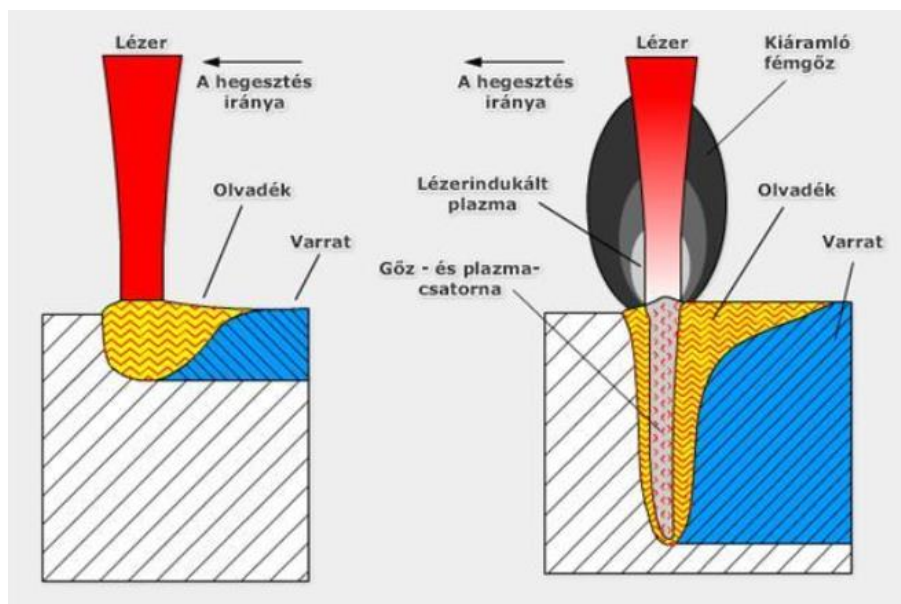
A lézersugaras hegesztés a lézersugaras vágást követően a fémmegmunkálások közül a legelterjedtebb lézersugaras anyagmegmunkáló technológia. A hagyományos hegesztési módszerekkel összehasonlítva a lézersugaras hegesztésnek számos előnye van. Az erősen koncentrált lézersugár kis területre fókuszál, így a fémnek csak egy kis felületét olvasztja meg, ezáltal a hőhatásövezet kisebb lesz. A lézersugaras hegesztési eljárás alacsonyabb hőbevitelt igényel a hagyományos hegesztéshez képest, ami minimálisra csökkenti a hő által kiváltott belső feszültséget és a munkadarab torzulását. Bár a kezdeti beruházás magas, az eljárás költséghatékonyabbnak bizonyul, mint a hagyományos hegesztés, ugyanis a lézersugaras hegesztés gyorsabb feldolgozási sebességet kínál, ami nagyobb termelést és gyorsabb átfutást eredményez. A nagy pontosság, a gyorsabb feldolgozási idő, a széleskörű felhasználhatóság és az állandó kiváló minőség miatt a lézersugaras hegesztés számos alkalmazási területtel rendelkezik, és jelentősége napjainkban egyre nő. Fő felhasználási területei az autóipar, az acélszerkezet- és hajógyártás, illetve a szerszámgyártás. [5]

Két változatát különböztetjük meg a darab felületén kialakuló teljesítménysűrűség szempontjából: a hővezetési és a mélyvarratos lézersugaras hegesztést. A két változat közötti határt a 10^6 W/cm^2 teljesítménysűrűség képezi, e határ alatt hővezetési, felette pedig mélyvarratos hegesztésről beszélünk.

Hővezetési hegesztés esetén a darab felszínére érkező fotonok $<1 \text{ mm}$ mélységben elnyelődnek, felhevítve ezzel a felszíni réteget. A felszíni rétegbe jutó lézersugár energiája csak hővezetéssel tud a mélyebb rétegekbe jutni. A hőforrásunk ebben az

esetben a lézersugár darab felületén megjelenő foltjának megfelelő átmérőjű, nagyon vékony korong lesz, melybe a lézersugárból folyamatosan, mindig azonos mennyiségű energia érkezik. Amennyiben adott időegység alatt a korongba jutó energia és hőmennyiség nagyobb, mint amennyit az anyag el tud vezetni, a korong és környezete folyamatosan melegszik, végül megolvad. A lézersugár olvadékfilm felületére jutó nagy teljesítménysűrűsége intenzív olvadékáramlást okoz, gyorsan nő az olvadék mennyisége. A hővezetési hegesztéssel kialakítható varrat fél lencse alakú. A hővezetési hegesztést jellemzően vékony lemezek, csövek tompakötéseinek kialakítására használják, hozaganyag hozzáadása nélkül.

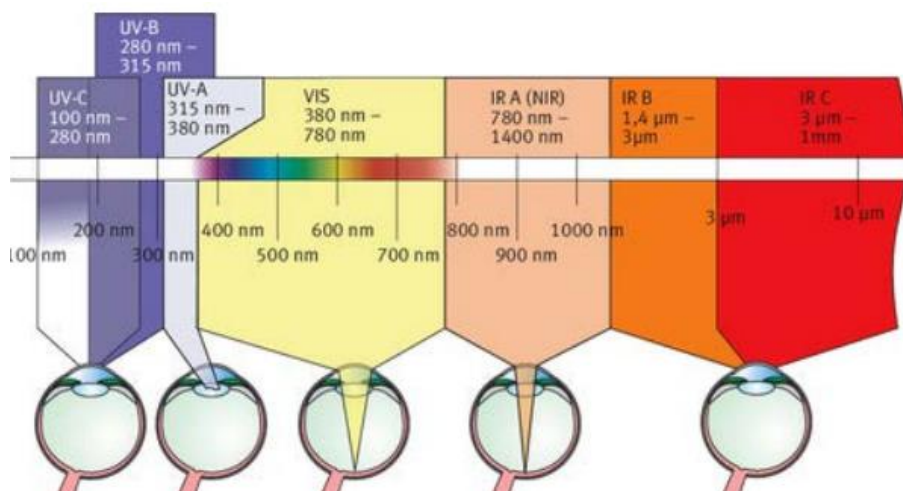
Mélyvarratos hegesztés esetében a folyamat kezdete azonos a hővezetési lézersugaras hegesztés folyamatával. Kellően nagy lézersugár-intenzitás (a 10^6 W/cm²-es határ) esetén a kialakult olvadék felszínének hőmérséklete elérheti a forráspontot, az olvadék felszíne túlhevülve gőzhalmazállapotba jut. Az intenzíven képződő fémgőz az olvadék felszínén növekvő nyomást eredményez, melynek hatására az olvadék felszíne behorpad. A behorpadás következtében nő az abszorpciós felület, tehát az olvadék több energia elnyelésére képes azonos lézersugár teljesítmény mellett. A fémgőzképződés intenzitása nő, melynek hatására nő a gőznyomás az olvadék felszínén és még jobban behorpad az olvadék, még jobban nő az abszorpciós felület. Ezt a folyamatot a fémgőzképződés intenzitása tartja fent, kialakul egy „mélyedés”. A nagy teljesítménysűrűségnek köszönhetően a bemélyedés mélysége jellemzően lényegesen nagyobb, mint a tócsa átmérője, így alakul ki a karcsú varratalak. A bemélyedés, más szóval gőzcsatorna aljára a lézersugár folyamatos tükröződésekkel jut. Az angol nyelvterületen a gőzcsatornára elterjedt „keyhole”, azaz kulcslyuk szó használatának köszönhetően a mélyvarratos lézersugaras hegesztést kulcslyukhegesztésnek is nevezik. [3] A 4. ábrán látható a hővezetési és a mélyvarratos lézersugaras hegesztés elvi ábrája.



4. ábra: A hővezetési és a mélyvarratos lézersugaras hegesztés összehasonlítása [3]

2.3. Lézerek biztonságtechnikai kérdései

A lézersugárforrásokat az általuk kibocsátott teljesítmény és az emberi szemre gyakorolt hatásuk alapján soroljuk osztályokba. Minden lézersugaras berendezésen kötelező feltüntetni annak osztályba sorolását, melyre a vonatkozó MSZ EN 60825-1:2014/A11:2021 [6] jelölésű, Lézergyártmányok biztonsága 1. rész: Készülékosztályozás és követelmények című szabvány ad utasítást. Ezen szabvány az 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B és 4 osztályokat különbözteti meg. [7] Az 1-es osztályba sorolható lézersugárforrások által kibocsátott sugárzás teljesen ártalmatlan, az ilyen berendezések 0,1 W-nál kisebb teljesítmény leadására képesek. Az 1, 1M, 2, 2M és 3R osztályú berendezések által előállított sugárzás az emberi szemet nem veszélyezteti, használatuk nem vet fel biztonságtechnikai kérdéseket. A 3B és 4 osztályba sorolható lézersugaras berendezések által kibocsátott sugárzás azonban már ártalmas az emberi szemre, a 4-es osztály esetén a szórt visszaverődés is káros a szemre, valamint bőrkárosodást is okozhat. [3] Az anyagmegmunkálási célokra használt lézersugaras vágó- és hegesztőberendezések kivétel nélkül a 4-es osztályba sorolhatók, így használatuk közben, különös tekintettel a szabad pisztolyozgású kézi lézersugaras hegesztésre, speciálisan a lézersugarak szórt visszaverődése ellen védelmet biztosító védőszemüveg használata kötelező és a teljesen fedett bőrfelületet biztosító ruházat, valamint védőkesztyű viselése erősen ajánlott. Ahogy az 5. ábra szemlélteti, a közeli infravörös tartományba eső lézersugárzás veszélye abban rejlik, hogy az emberi szem az ilyen hullámhosszúságú sugárzást a retinára fókuszálja, melynek eredményeképpen megnő a sugárzás teljesítménysűrűsége.

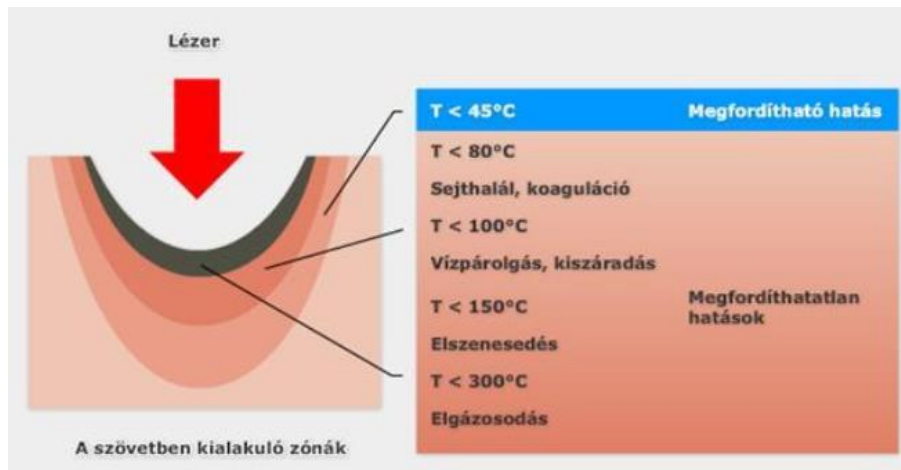


5. ábra: A különböző hullámhosszúságú fénysugárzások szemre gyakorolt hatása [3]

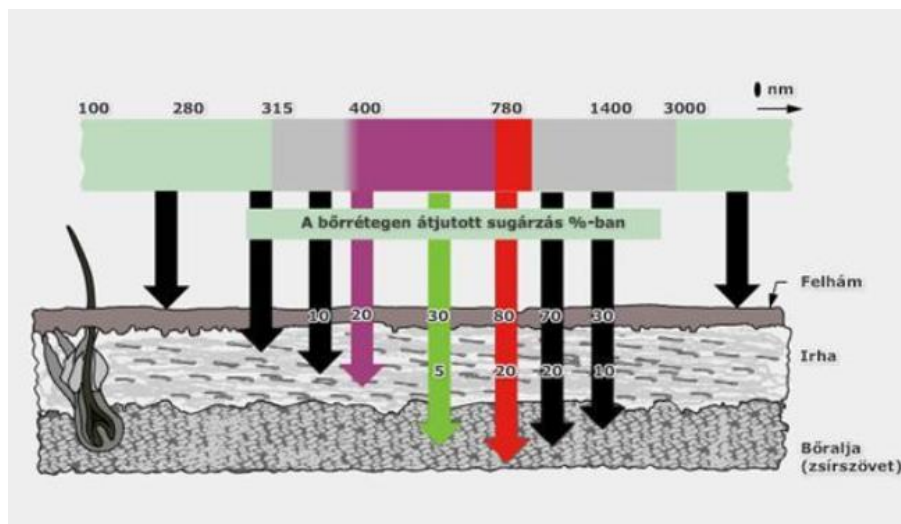
A retinánál található látóidegek igen könnyen károsodhatnak, amennyiben a szem direkt vagy szórt sugárzásnak van kitéve, amely ideiglenes vagy végleges vaksághoz vezethet. [3]

Fontos megjegyezni, hogy a szilárdtest-lézerekkel előállítható lézersugárzás hullámhossza ($\sim 1 \mu\text{m}$) a közeli infravörös tartományba esik, míg a CO_2 -lézerek lézersugarainak hullámhossza ($10,6 \mu\text{m}$) a távoli infravörös tartományba. A

gázlézerekkel előállított lézersugárzás szintén ártalmas a szemre, csak az ilyen lézersugárzás nem a retinánál, hanem a szemlencse előtt, a szaruhártyánál vagy a csarnokvízben nyelődik el, a szaruhártya megégését és esetlegesen szintén vakságot okozva. Ahogy a 6. és 7. ábrákon is látszik, a teljesítménysűrűség növelésével, azaz a lézersugár fókuszálásával visszafordíthatatlan hatások következnek be az emberi bőrszövetben, ami miatt kiemelkedő fontossággal bír a megfelelő védőruházat viselése. A CO₂-lézerek által kibocsátott lézersugárzás bőrrel érintkezve elsősorban a felületen okoz égési sérülést, míg a szilárdtest-lézerek lézersugarai bőrrel érintkezve mély égési sérüléseket okoznak, roncsolják a vörös vértesteket. [8]



6. ábra: A lézersugárzás hatása a teljesítménysűrűség növelésével az emberi bőrszövetre [3]



7. ábra: A különböző hullámhosszú fénysugárzások elnyelődése az emberi bőrszövetben [3]

A kézi lézersugaras hegesztő munkahely kialakításánál megfogalmazható célként, hogy a megfelelő sugárvédelmi rendszer alkalmazásával a 4-es osztályú lézersugaras berendezést körülvevő „burkolaton” kívül 1-es osztályba sorolható, azaz teljesen ártalmatlan sugárzás valósuljon meg. Ez elérhető a lézersugár véletlenszerű

kijutásának megakadályozásával függöny, zárt tető és megfelelő festés, valamint a visszaverő felületek megszüntetésének segítségével. Ezen kívül fontos a biztonságos üzemelés érdekében a megfelelő elszívás, tűzjelző rendszer és biztonsági kijelzők, kapcsolók alkalmazása is. [9]

2.4. Kézi lézersugaras hegesztés

A dolgozatom témájaként szolgáló kézi lézersugaras hegesztés is rendelkezik a lézersugaras hegesztésről elmondható előnyökkel (kisebb hőhatásövezet, csekély torzulás, nagy feldolgozási sebesség, nagy pontosság, széleskörű felhasználhatóság, állandó kiváló minőség), melyeknek köszönhetően napjainkban egyre elterjedtebbé válik, de mégis egy viszonylag új eljárásváltozatnak számít a hegesztés területén. A kézi lézersugaras hegesztés számos olyan iparágban használható, mely összetett és rendhagyó hegesztési folyamatokat igényel, emellett pedig fontos a varratok esztétikája, például járműipar, konyhaiipari berendezések, védőkoriátok és rozsdamentes acél házak, burkolatok gyártása. [9] Amennyiben a geometriai kialakítás lehetővé teszi, érdemes a hozaganyag hozzáadása nélküli eljárásváltozatot választani, ugyanis ebben az esetben lehet a lézersugaras hegesztés kedvező tulajdonságait maximálisan kihasználni.

Napjainkig az iparban a lézersugaras hegesztésnek a gépesített változata volt elterjedt, kontrollált pisztolymozgásokkal és leburkolt munkatérrel annak érdekében, hogy a lézersugár ne juthasson ki belőle és a nagy energiájú direkt vagy szórt lézersugárzás ne tehesen kárt a kezelő személyzetben. A lézersugaras hegesztés kézi változata, azaz a hegesztőpisztoly kézzel való irányítása munkavédelmi és biztonságtechnikai kérdéseket vet fel, emiatt használata kevésbé elterjedt az iparban.

3. KÍSÉRLETI TERV

Két, egyenként 10 db hernyóvarratból álló kísérletsorozatot készítek két különböző haladási sebesség mellett. Egy 80 mm hosszúságú csőre 5 db hernyóvarratot készítek.

Az első kísérletsorozat lehegesztését $t=33$ s körbefordulási idő mellett végzem, amelyből a következő módon számítható a v haladási sebesség, figyelembe véve, hogy a felhasznált csövek külső átmérője $D=42$ mm:

$$v = \frac{D \cdot \pi}{t} = \frac{42 \text{ mm} \cdot \pi}{33 \text{ s}} = 4 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 24 \frac{\text{cm}}{\text{min}} \quad (1)$$

Ahogy az 1. táblázatban látható, jelen kísérletsorozat esetén állandó a haladási sebesség, a lézersugár mozgatósi módja, a felhasznált védőgáz típusa, valamint annak nyomása is. Az egyetlen beállítás, ami változtatásra kerül, a lézersugár által leadott teljesítmény, melyet P -vel jelölök. Ennek beállítására a hegesztőgép kezelőfelülete százalékos formában ad lehetőséget, ezért így tüntetem fel a táblázatban. Azonban annak ismeretében, hogy a maximális leadott teljesítmény 1000 W, könnyedén kiszámolhatóak a teljesítmény értékek.

1. táblázat: Az első kísérletsorozat beállításai és egyéb adatai

Sorszám	v, cm/min	mozgatási mód	védőgáz típusa	gáznyomás, bar	P, %
1	24	pont	N ₂	2,5	100
2	24	pont	N ₂	2,5	90
3	24	pont	N ₂	2,5	80
4	24	pont	N ₂	2,5	70
5	24	pont	N ₂	2,5	60
6	24	pont	N ₂	2,5	50
7	24	pont	N ₂	2,5	40
8	24	pont	N ₂	2,5	30
9	24	pont	N ₂	2,5	20
10	24	pont	N ₂	2,5	10

A második kísérletsorozat elkészítését $t=20$ s körbefordulási idő mellett végzem, amelyből az első kísérletsorozatnál már ismertetett módon, az (1) egyenlet segítségével számítható a haladási sebesség, figyelembe véve, hogy a felhasznált csövek külső átmérője $D=42$ mm:

$$v = \frac{D \cdot \pi}{t} = \frac{42 \text{ mm} \cdot \pi}{20 \text{ s}} = 6,6 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \approx 40 \frac{\text{cm}}{\text{min}} \quad (1)$$

Ahogy a 2. táblázatban látható, jelen kísérletsorozat esetén is állandó a haladási sebesség, a lézersugár mozgatási módja, a felhasznált védőgáz típusa, valamint annak nyomása. Az egyetlen beállítás, ami fokozatosan, 10%-onként változtatásra került, a lézersugár által leadott teljesítmény. Ennek beállítására a hegesztőgép kezelőfelülete százalékos formában ad lehetőséget, ezért így tüntetem fel a táblázatban. Azonban annak ismeretében, hogy a maximális leadott teljesítmény 1000 W, könnyedén kiszámolhatóak a teljesítmény értékek.

2. táblázat: A második kísérletsorozat beállításai és egyéb adatai

Sorszám	v, cm/min	mozgatási mód	védőgáz típusa	gáznyomás, bar	P, %
1	40	pont	N ₂	2,5	100
2	40	pont	N ₂	2,5	90
3	40	pont	N ₂	2,5	80
4	40	pont	N ₂	2,5	70
5	40	pont	N ₂	2,5	60
6	40	pont	N ₂	2,5	50
7	40	pont	N ₂	2,5	40
8	40	pont	N ₂	2,5	30
9	40	pont	N ₂	2,5	20
10	40	pont	N ₂	2,5	10

4. HEGESZTÉS ÉS KIÉRTÉKELÉS MENETE

A kísérleteket a kínai Jinan Xintian Technology Co. nevű cég által gyártott XTW-1000 típusú optikai szálás kézi lézersugaras hegesztőgéppel végeztem, melynek fényképe a 8. ábrán és adattáblájának fényképe a 9. ábrán látható. A hegesztőgép maximálisan 1000 W teljesítményű monokróm, koherens és kis divergenciájú lézersugár előállítására képes, melynek hullámhossza 1080 nm. A gép 4-es besorolású lézerberendezésnek minősül, mely azt jelenti, hogy az általa kibocsátott teljesítmény folytonos üzemben meghaladja a 0,5 W teljesítményt. A 4-es osztályba tartozó gépek által kibocsátott lézersugárzás bőrkárosodást okozhat, valamint direkt- és szórt formában is károsítja a szemet, így a szükséges védőeszközök – speciális védőszemüveg, kesztyű és zárt ruházat – használata kötelező. [3]



8-9. ábra: A kísérletekhez használt lézersugaras hegesztőgép és annak adattáblája

A gépen szabályozható a teljesítményszint, beállítható, hogy a maximálisan rendelkezésre álló 1000 W-os teljesítménynek hány százalékát adja le a lézersugár. Rendezésre állnak különböző lézersugár mozgató módok, összesen 7 darab. A beállítható mozgató módokat a 10. ábra szemlélteti.

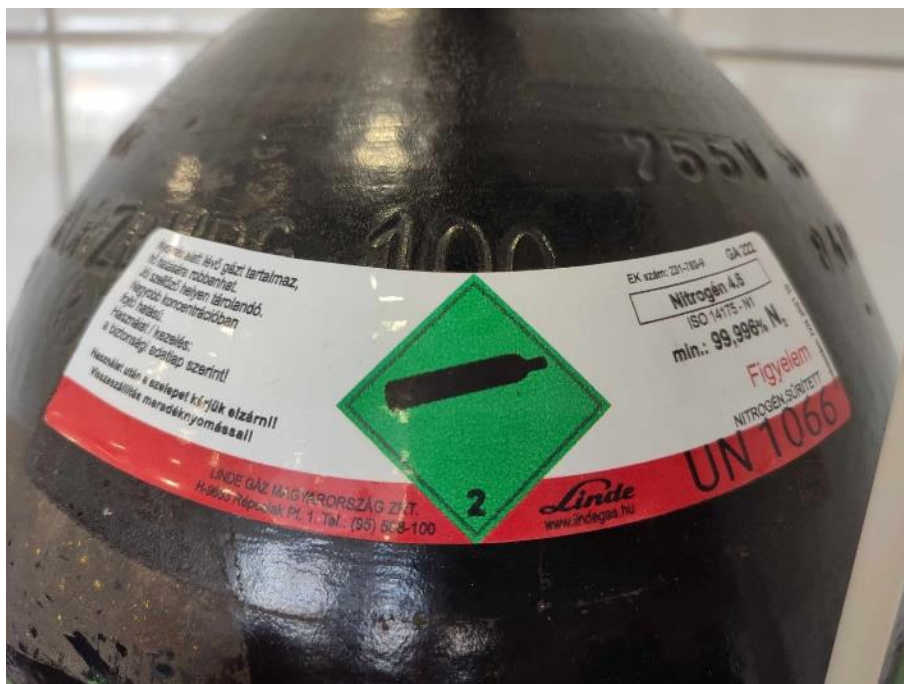


10. ábra: A lehetséges lézersugár mozgató módok

Ezen kívül változtatható a lézersugár mozgató frekvenciája, valamint a mozgató tartomány szélessége is. A hegesztőgép impulzus üzemi, a gyártó által ajánlott lézerfrekvencia 3000 Hz.

A jelen dolgozatban tárgyalt varratok elkészítésekor csak a teljesítményszint került változtatásra, a gép egyéb beállításai állandók voltak. A további paraméterek változtatása mellett elkészült varratokkal a 2024. januárjában publikálandó szakdolgozatomban foglalkozom.

A varratok elkészítéséhez 4.6 tisztaságú nitrogén gázt használtam, melynek banáncímkejéről készült fénykép a 11. ábrán látható.



11. ábra: A varratok elkészítéséhez használt nitrogén gázpalack banáncímkeje

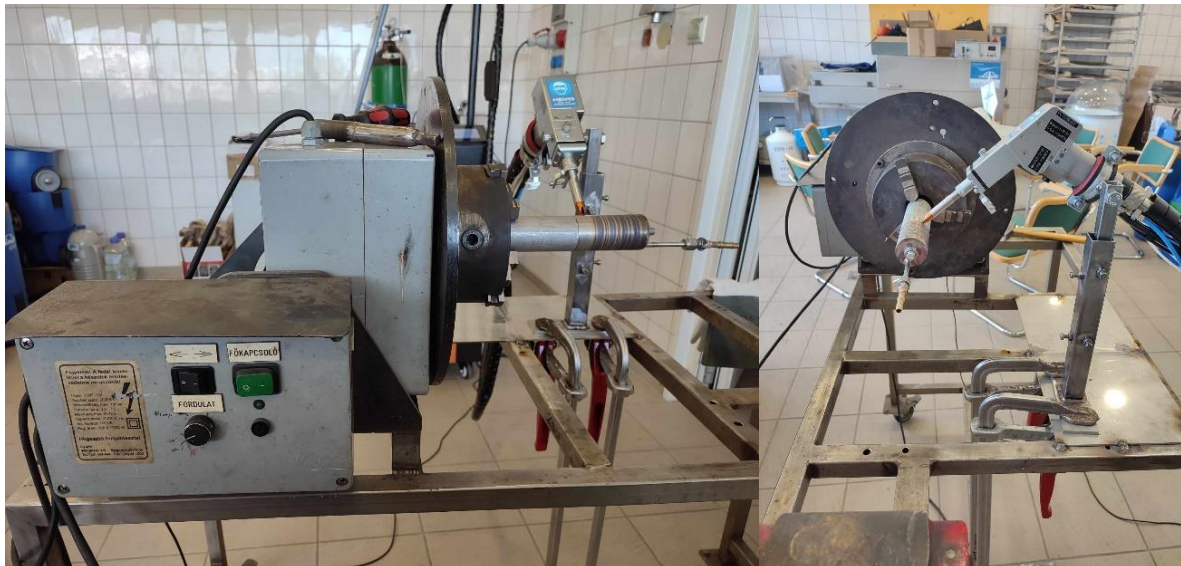
A vizsgálandó hernyóvarratokat forgató berendezés segítségével forgatott, 2,7 mm falvastagságú, 42 mm külső átmérőjű, 80 mm hosszúságú, a 12. ábra szerinti összetételű, 1.4301 anyagminőségű ausztenites rozsdamentes acél csövekre készítettem el, hozaganyag alkalmazása nélkül, a kézi lézersugaras hegesztőpisztolyt a stabilitását biztosítandó készülékbe befogva.

Az 1.4301 rozsdamentes acél kémiai összetétele

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	Mo	Ni	Ti
≤ 0,07	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,03	≤ 0,10	17,5 - 19,5	-	-	8,0 - 10,5	-

12. ábra: Az 1.4301 anyagminőségű ausztenites rozsdamentes acél kémiai összetétele [10]

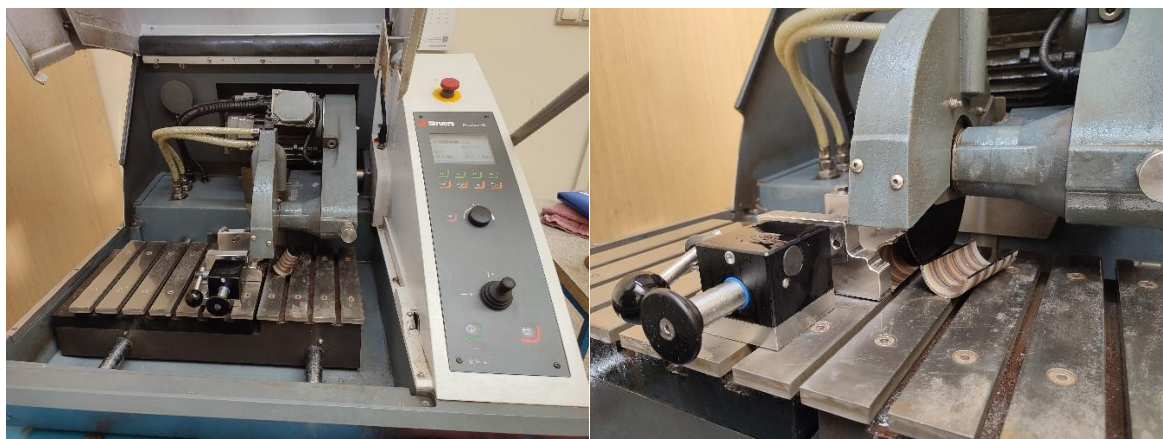
A 13. ábrán látható forgató berendezés által biztosított forgatási sebesség fokozatmentesen, tekerőgomb segítségével állítható. A befogó készülék szerepét a 14. ábrán látható állítható magasságú, zártszelvényből készült tartóra erősített gumiszorítóbilincs töltötte be.



13-14. ábra: A forgató berendezés és a befogó készülék fényképe

Fontos kiemelni, hogy a kézi lézersugaras hegesztőpisztolyt a készülékbe úgy van befogva, hogy a kibocsátott lézersugár ne merőlegesen essen a hegesztendő felületre, mert ilyen esetben a visszaverődő sugár tönkretethetné az optikát.

A kiértékeléshez szükséges csiszolatokat a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék metallográfiai laboratóriumában készítettem el. Annak érdekében, hogy a vizsgált keresztmetszetek pozíciója minden hernyóvarrat esetén megegyezzen, a próbatesteket hossz tengelyük mentén ugyanott vágtam el. Azért, hogy minimális vágás közbeni hőbevitel mellett jó minőségű vágási felületet kapjunk, a vágást a 15.-16. ábrán látható Struers Discotom-10 típusú vízzel hűthető tárcsás vágógéppel végeztem.



15-16. ábra: Fotók a vízzel hűthető tárcsás vágógépről

A vágás során keletkező félcsöveket lesorjaztam, megtisztítottam és az egyszerűbb csiszolás érdekében beagyaztam. Ezután következett a beagyazott minták csiszolása. Mivel jó vágási felületet értünk el az abrazív vizes vágással, így elég volt P600-as csiszolópapírral kezdeni, és innen egyre finomabb szemcseméretű papírra váltva értem el a P2500-as finomságú csiszolópapírig. A finom csiszolási karcok eltüntetése érdekében 3 μm -es gyémánszemcséket tartalmazó szuszpenzió alkalmazásával políroztam a mintákat, végül tükrös, szinte teljesen karcmentes felületet elérve. A varratgeometriát maratás segítségével tettem láthatóvá. A csiszolatok megmaratásához a következő összetételű Adler megnevezésű marószert használtam:

- 9 g réz-ammónium-klorid
- 150 ml sósav
- 45 g vas III.-klorid 6-hidrát
- 75 ml desztillált víz

A marószert segítségével – a mintákat 2-3 másodpercig szobahőmérsékleten maratva - sikeresen előhívtam a varratok geometriáját, melyet Olympus SZX 16 típusú sztereomikroszkóp alatt vizsgáltam. A varratokról végül a Stream Essentials nevű program segítségével fényképeket készítettem, melyeken le tudtam mérni a kiértékeléshez szükséges varratszélesség, beolvadási mélység, varratterület, valamint hővezetési és mélyvarratos terület értékeit.

A kiértékelést először szemrevételezés útján, a varratok kinézetét értékelve végzem el, ezután a mellékletben található mikroszkópi képeket értékelem ki. Végül a mért varratszélesség, beolvadási mélység, varratterület, valamint hővezetési és mélyvarratos terület értékek segítségével – a vágási felület által létrehozott két varratkeresztmetszeten mért értékek átlagolásával – diagramokat hozok létre, melyek ezen értékeket ábrázolják a lézerteljesítmény és a haladási sebesség függvényében, majd ezek alapján vonok le következtetéseket.

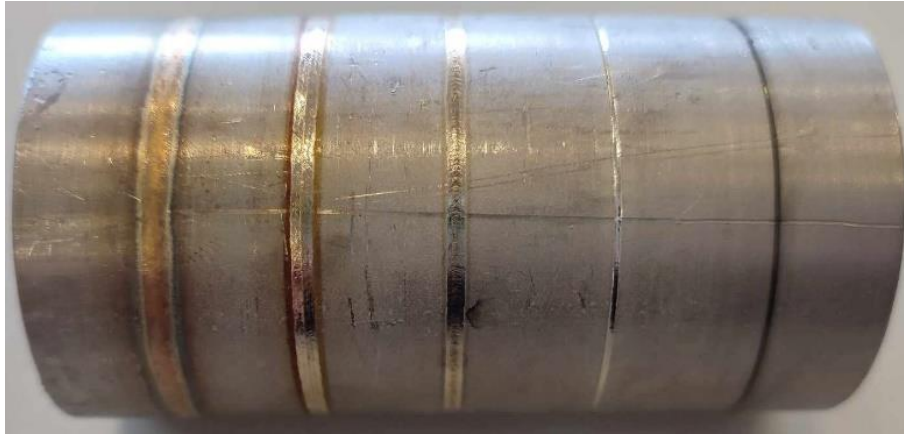
5. KIÉRTÉKELÉS EREDMÉNYEI

Az alábbi 17., 18., 19. és 20. ábrákon láthatóak a 24 cm/min haladási sebesség, a lézersugár pisztolyon belüli mozgata nélkül, azaz pont alakú mozgási mód alkalmazása, 2,5 bar nyomású, 4.6 tisztaságú nitrogén védőgáz használata mellett hegesztett hernyóvarratokról készített fényképek a varratok kiindulási és befejezési helyének irányából, valamint a varratok közepe felől fotózva.



17-18. ábra: 24 cm/min haladási sebesség mellett készített varratok fényképe, balról jobbra 100%-tól 60%-ig 10%-onként csökkentve a leadott lézerteljesítményt





19-20. ábra: 24 cm/min haladási sebesség mellett készített varratok fényképe, balról jobbra 50%-tól 10%-ig 10%-onként csökkentve a leadott lézerteljesítményt

A hernyóvarratokat megfigyelve megállapítható, hogy a 100% és a 70% közötti teljesítményszint tartományban a varratok felülete matt és jelentős hőhatásövezet látható, a hőbevitel ez alapján túlságosan nagy volt, a 80%-os és a 70%-os teljesítményszint mellett készített varratok esetén szemmel látható koronaoldali anyagihiány figyelhető meg. A mikroszkópi képek ezt igazolják, a mellékletben található 1.80.1., 1.80.2., 1.70.1. és 1.70.2. jelölésű fényképeken egyértelműen látszik a koronaoldali anyagihiány, ezen kívül jelentős gyökátfolyás látható. Érdekes megfigyelni, hogy a 100-90%-os (melléklet 1.100.1., 1.100.2., 1.90.1. és 1.90.2.), valamint a 80-70%-os (melléklet 1.80.1., 1.80.2., 1.70.1. és 1.70.2.) teljesítményszinten hegesztett varratok formája között különbség van. Az 1.100.1., 1.100.2., 1.90.1 és 1.90.2 varratok sokkal szélesebbek mind a felülethez közelebbi hővezetési részben, mind pedig a varrat alsó mélyvarratos részében. Ezzel szemben az 1.80.1., 1.80.2., 1.70.1. és 1.70.2. hernyóvarratok esetén a mélyvarratos rész jóval karcsúbb, ezen kívül megfigyelhető az említett jelentős gyökátfolyás. A 90%-os teljesítményszinten készített varratok mikroszkópi képein a varratok középtengelyén látható egy kis területű sötét rész. Ezen jelenség okának feltárása további kutatómunkát igényel. A 60% és a 20% közötti teljesítményszint tartományban készített varratok felülete jóval fényesebb, mint a nagyobb teljesítményeknél, a hőhatásövezet is kisebb. A mellékletben található mikroszkópi képeken látható, hogy 60%-os teljesítményszintnél stabilizálódik a varratalak. A 60%-os és az 50%-os teljesítményszint mellett készített varratoknál (melléklet 1.60.1., 1.60.2., 1.50.1. és 1.50.2.) még teljes átolvasás esete áll fenn, 40% és 20% teljesítményszint között (melléklet 1.40.1., 1.40.2., 1.30.1., 1.30.2., 1.20.1. és 1.20.2.) már nem, 20%-os teljesítményszinten az átolvasztott terület igen csekély, és csak hővezetési részből áll.

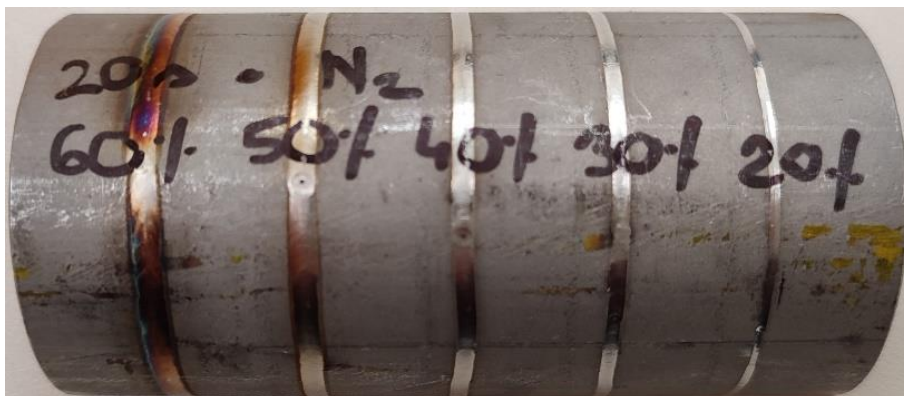
Látható továbbá, hogy a 10%-os teljesítmény esetén nem jött létre varrat, a lézersugár nem tudta megolvasztani a cső anyagát, így ezt a teljesítményszintet a diagramok segítségével történő kiértékelésnél nem fogom figyelembe venni. Emiatt a megfigyelés miatt a második kísérletsorozat elkészítésénél nem mentem le 10%-ig, csak a 20%-os teljesítményszintig. Helyette egy köztes haladási sebességgel ($t=24$ s körbefordulási

időből következő $v=33$ cm/min haladási sebesség) készítettem még egy 100%-os teljesítményszintű hernyóvarratot. Ezt azonban a kiértékelésnél, mivel csak egy varrat készült ilyen haladási sebesség mellett, szintén nem fogom figyelembe venni.

Az alábbi 21., 22., 23. és 24. ábrákon láthatóak az első hernyóvarrat kivételével 40 cm/min haladási sebesség, a lézersugár pisztolyon belüli mozgata nélkül, azaz pont alakú mozgási mód alkalmazása, 2,5 bar nyomású, 4.6 tisztaságú nitrogén védőgáz használata mellett hegesztett hernyóvarratokról készített fényképek a varratok kiindulási és befejezési helyének irányából, valamint a varratok közepe felől fotózva.



21-22. ábra: 40 cm/min haladási sebesség (első varrat kivétel – 33 cm/min) mellett készített varratok fényképe, balról jobbra 100%-tól 70%-ig 10%-onként csökkentve a leadott lézerteljesítményt





23-24. ábra: 40 cm/min haladási sebesség mellett készített varratok fényképe, balról jobbra 60%-tól 20%-ig 10%-onként csökkentve a leadott lézerteljesítményt

A varratokat megfigyelve megállapítható, hogy esztétikai szempontból sokkal kedvezőbbek, mint az első kísérletsorozat varratai, a hőhatásövezet is kisebb. A 100%-os és 90%-os teljesítményszint mellett készített varratok felülete matt, az első kísérletsorozat első négy varratára emlékeztető, de a 80% és a 20% közötti teljesítményszint tartományban fényes, a 70-60%-os teljesítményszinten kékes-lilás futtatási színek megjelenésével. A mellékletben található mikroszkópi képek alapján megállapítható, hogy ezen kísérletsorozat esetében is szélesebb és kisebb beolvadással bíró varratalak alakul ki a 100-90%-os teljesítmény tartományon, mint 80-70%-os teljesítményszint mellett hegesztett varratok esetén. Látható, hogy a 100% és a 70% közötti teljesítményszint tartományban teljes átolvadás következik be, míg az ennél kisebb teljesítményeknél nem, de az első kísérletsorozatnál megfigyeltekkel ellentétben itt a 20%-os teljesítményszint mellett készített varrat is két részből áll, a hővezetési rész alatt található egy csekély mélyvarratos alakra emlékeztető rész is.

A sztereomikroszkóphoz tartozó Stream Essentials nevű program lehetőséget biztosít egyenes vonalak menti egy dimenziós méretek, valamint kézzel körberajzolt zárt geometriák területének kétdimenziós mérésére század milliméter, illetve század négyzetmilliméter pontossággal.

Ilyen módon a félbevágott csövek vágási felületén található mindkét varratkeresztmetszetet méreteztem. A varratszélesség és a beolvadási mélység, a varratterület, valamint a hővezetési és mélyvarratos varratterület méretezésének menetéről egy-egy szemléltető kép a 25., 26. és 27. ábrán látható, a többi méretezett mikroszkópi képet a mellékletben helyeztem el.



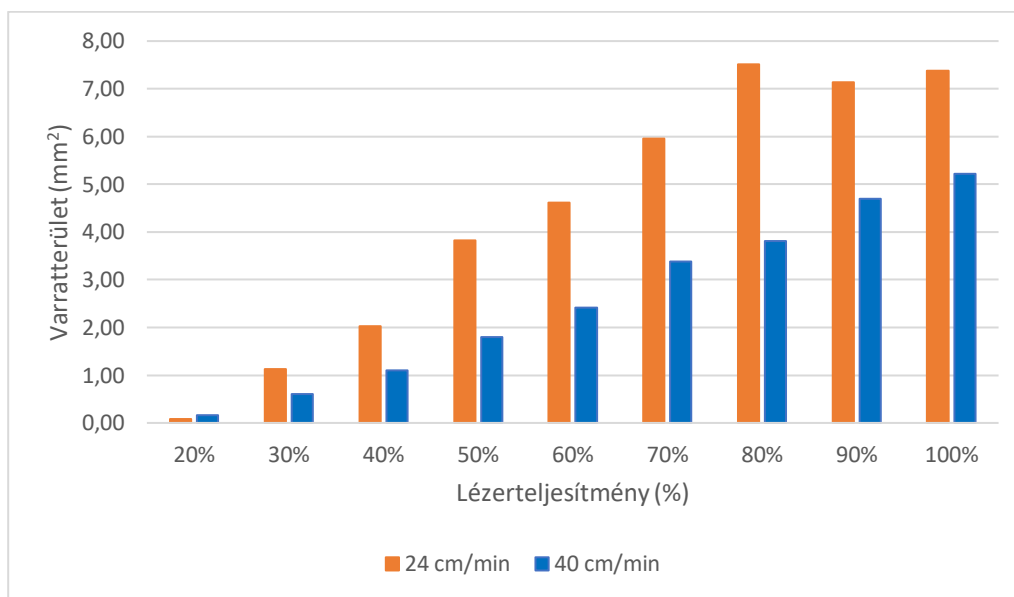
25-27. ábra: 24 cm/min haladási sebesség és 100%-os lézerteljesítmény mellett készített varrat keresztmetszeti képeinek méretezése

Az egyes mért mennyiségek és a leadott lézerteljesítmény, valamint a haladási sebesség közötti összefüggést diagramok segítségével szemléltetem.

A 28. ábra a varratterület alakulását ábrázolja a lézerteljesítmény és a haladási sebesség függvényében. A diagram alapján megállapítható, hogy a 40 cm/min haladási

sebesség mellett készített varratok területe közel lineárisan nő a lézerteljesítmény függvényében, míg a 24 cm/min haladási sebesség mellett hegesztett varratoké érdekes eloszlást mutat: a 80%-os teljesítményszint eléréséig közel lineárisan nő, azonban a 90%-os és 100%-os lézerteljesítmény mellett készített varratok területe a vártnál jóval kisebb lesz, sőt a 80%-nál keletkezett átolvasztott területnél is kisebb. Feltételezésem szerint ennek a jelenségnek egy lehetséges oka az, hogy a kis haladási sebesség, és emiatt viszonylagosan nagy hőbevitel miatt a hegesztőgép túlmelegszik, és nem adja le a 90%-100%-os tartománynak megfelelő teljesítményt.

Ezen kívül egyértelműen látszik a diagramot szemlélve, hogy – az elvárásoknak megfelelően – a kisebb haladási sebesség nagyobb átolvasztott területet, a nagyobb haladási sebesség pedig kisebb varratterületet eredményez.



28. ábra: Varratterület (T) a lézerteljesítmény és a haladási sebesség függvényében

A 29. ábra szemlélteti a varratok formatényezőjét a lézerteljesítmény és a haladási sebesség függvényében. A hegesztési varratok Φ formatényezőjét a következőképpen számolhatjuk:

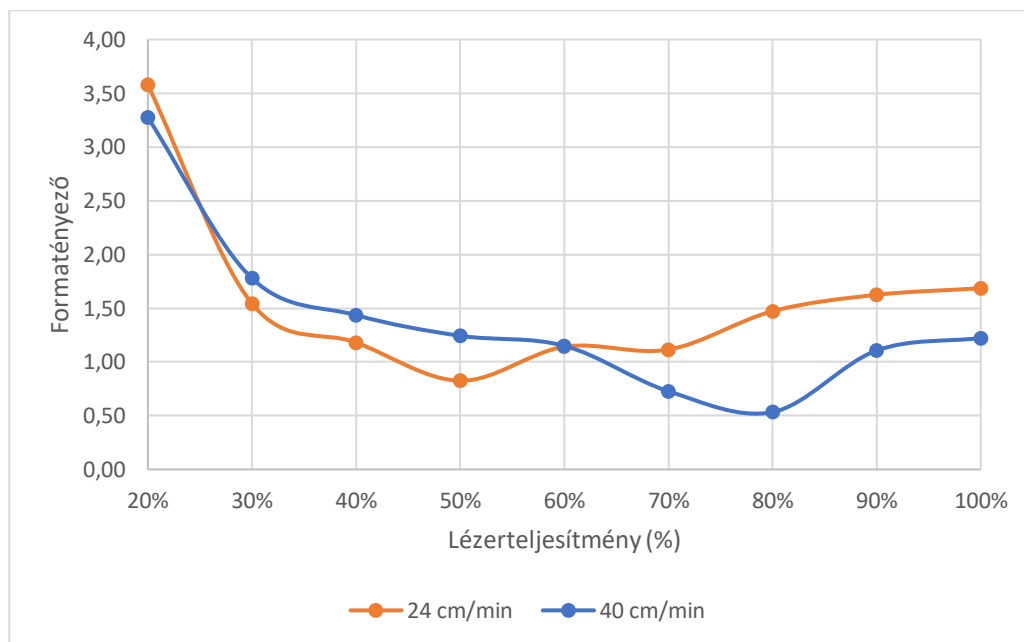
$$\Phi = \frac{B}{H} \quad (2)$$

ahol B a varrat szélessége és H a beolvadási mélység.

Tehát minél nagyobb a formatényező értéke, annál szélesebb és sekélyebb a varrat, minél kisebb, annál keskenyebb és mélyebb.

A diagramot megfigyelve látható, hogy a formatényező kezdetben mindkét haladási sebesség esetén közel exponenciális csökkenést mutat a lézerteljesítmény növelésével, azaz a varratok egyre keskenyebbek és mélyebbek lesznek. Az értékek ingadozást mutatnak, de ennek lehetséges oka lehet az, hogy a varratoknak csak két keresztmetszetén végeztem mérést, így nincs elég adat a valósághű átlagoláshoz. Ugyanakkor érdekes megfigyelni, hogy a görbe egy bizonyos teljesítményszintet

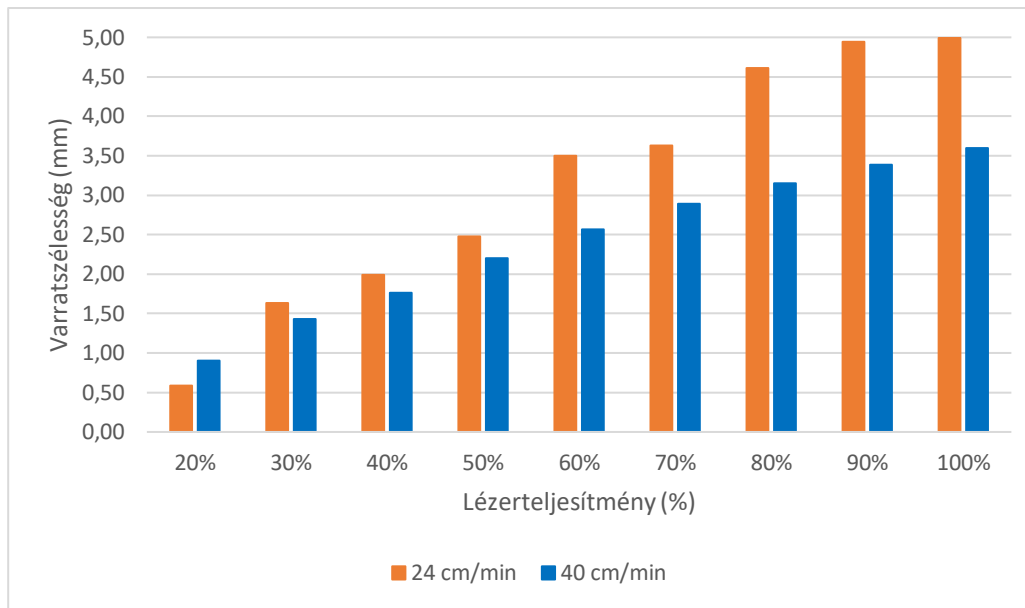
elérve mindkét haladási sebesség mellett felfelé kanyarodik, tehát ezen a tartományon a varratok egyre szélesebbek lesznek. Összefüggést találhatunk a korábbi megfigyeléssel, hogy a 90-100%-os tartományon mindkét kísérletsorozat esetén szélesebb és sekélyebb lett a varratalak, mint a 70-80%-os lézerteljesítmény tartományon. Valamint a varratterület diagramnál is megállapítható volt, hogy a 24 cm/min haladási sebesség mellett végzett kísérletsorozat esetén 80% teljesítmény felett visszaesett az átolvasztott terület. Feltételezésem szerint a formatényező növekedés lehetséges oka is a hegesztőgép lézerteljesítmény szabályozásában keresendő: 80% felett feltehetőleg nem adja le a beállított teljesítményszintnek megfelelő teljes energiát.



29. ábra: Formatényező (Φ) a lézerteljesítmény és a haladási sebesség függvényében

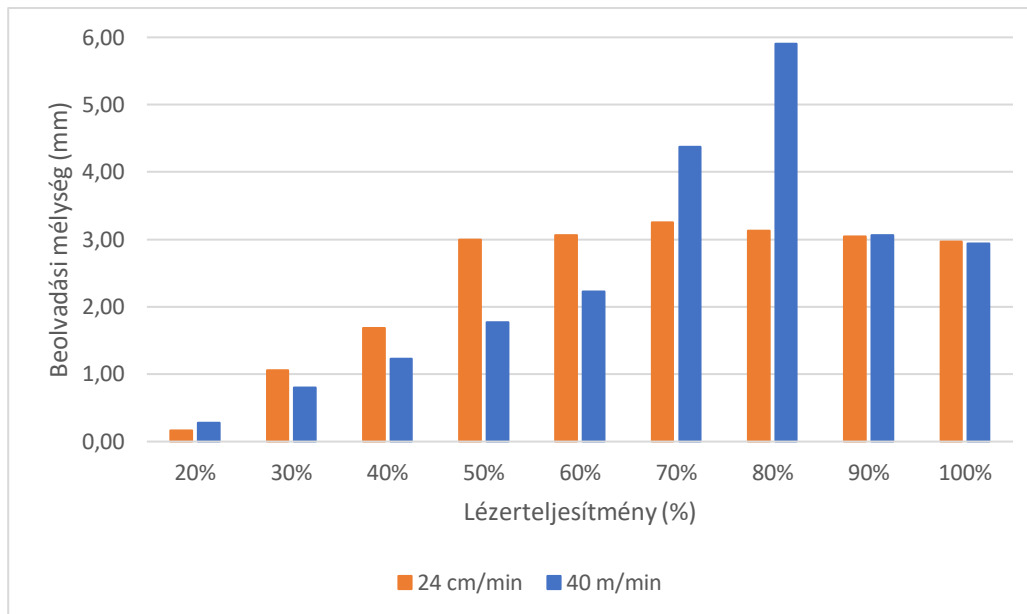
A 30. ábrán látható a kialakuló varrat szélességének alakulása a lézerteljesítmény és a haladási sebesség függvényében. A diagram alapján megállapítható, hogy a teljesítmény növelésével mindkét haladási sebesség esetén nő a varratszélesség, de eltérő mértékben, a 24 cm/min haladási sebesség mellett meredekebb lesz az értékekre illeszthető – közel lineáris – görbe, míg a 40 cm/min haladási sebesség esetén laposabb.

Levonható a következtetés, hogy mind a lézerteljesítmény növelése, mind a haladási sebesség csökkentése a varratszélesség növekedését eredményezi.



30. ábra: Varratszélesség (B) a lézerteljesítmény és a haladási sebesség függvényében

A 31. ábra a beolvadási mélység alakulását ábrázolja a lézerteljesítmény és a haladási sebesség függvényében. A diagram alapján megállapítható, hogy ennek maximuma egyik kísérletsorozat esetén sem a 100%-os teljesítményszinten van. A 24 cm/min haladási sebesség esetén 70-80%-nál veszi fel maximális értékét, addig fokozatosan növekszik, 90-100%-nál megint enyhén csökken. A 40 cm/min haladási sebesség mellett készített varratok esetén a 80%-os teljesítményszinten éri el a többi érték közül kiugró maximumát, kisebb teljesítmények esetén itt is fokozatosan növekszik, 80% felett pedig ebben az esetben is kisebb értéket vesz fel. Összességében tehát elmondható, hogy a beolvadási mélység 70-80%-os teljesítményszint esetén maximális, kisebb teljesítményeknél fokozatosan nő, 80% felett pedig megint csökken. Itt megint párhuzamot lehet vonni az eddigi megállapításokkal, hogy a varratalak mindkét kísérletsorozat mikroszkópi képeit megfigyelve 70-80% esetén karcsú és mély, 90-100% esetén pedig szélesebb és kisebb beolvadású, 24 cm/min esetén a varratterület visszaesik 80% felett, valamint a formatényező mindkét haladási sebesség esetén növekszik 80% felett.



31. ábra: Beolvadási mélység (H) a lézerteljesítmény és a haladási sebesség függvényében

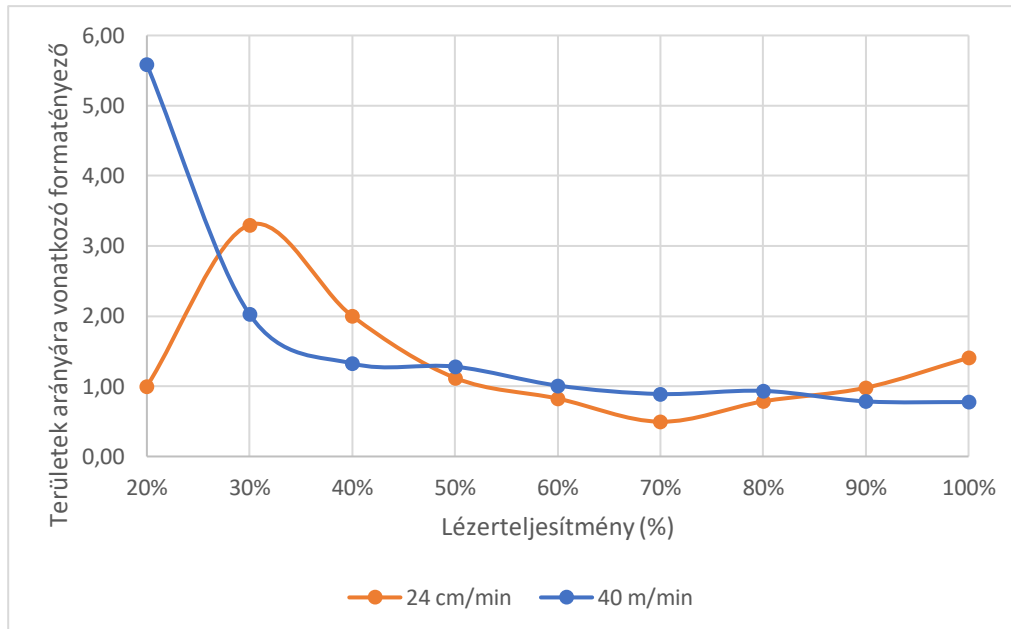
A sztereomikroszkóphoz tartozó Stream Essentials nevű program segítségével készített, mellékletben található mikroszkópi képeken megfigyelhető, hogy a 24 cm/min haladási sebesség mellett hegesztett első kísérletsorozat 20%-os teljesítményszinthez tartozó varratán kívül minden hernyóvarrat két részből áll: a csövek külső átmérő felőli felső részén egy szélesebb és sekélyebb, hővezetési hegesztés varratalakjára hasonlító rész, míg a belső átmérő felőli alsó részén egy keskenyebb és mélyebb, mélyvarratos hegesztésre emlékeztető rész látható. Definiálok egy új mennyiséget, melynek segítségével e két területrészt aránya kifejezhető, ezt a továbbiakban területek arányára vonatkozó formatényezőnek fogom nevezni, Ψ -vel jelölöm és a következőképpen számolom:

$$\Psi = \frac{T_{\text{hővezetési}}}{T_{\text{mélyvarratos}}} \quad (3)$$

ahol $T_{\text{hővezetési}}$ a hővezetési hegesztésre jellemző alakú felső rész, $T_{\text{mélyvarratos}}$ pedig a mélyvarratos hegesztés varratalakját felvevő alsó rész területe. Minél nagyobb a területek arányára vonatkozó formatényező értéke, annál inkább hővezetési, minél kisebb, annál inkább mélyvarratos hegesztésre emlékeztető varratalakról beszélhetünk.

A 32. ábra azt szemlélteti, hogy a területek arányára vonatkozó formatényező hogyan változik a lézerteljesítmény és a haladási sebesség függvényében. A diagram alapján elmondható, hogy a lézerteljesítmény növelésével a 40 cm/min haladási sebesség esetén a területek arányára vonatkozó formatényező egyértelműen csökkenő tendenciát mutat, tehát a lézerteljesítmény növelésével a varratalak egyre inkább mélyvarratos hegesztésre emlékeztető lesz, egyre nagyobb lesz a varrat alsó, karcsú része. A 24 cm/min haladási sebesség mellett hegesztett varratok esetén ezzel szemben nem látható ilyen egyértelmű összefüggés, Ψ értéke ingadozik, kevésbé stabil a varratalak. 20%-os teljesítményszinten kifejezetten kis értéket vesz fel, 30%-nál

kiugrik, 70%-os teljesítményig csökken, ebben a tartományban egyre inkább mélyvarratos hegesztésre emlékeztető varratot kapunk, aztán 100%-ig megint növekszik az értéke, azaz egyre inkább a hővezetési varratok felé térnek el a hernyóvarratok. Ez szintén összeegyeztethető a korábbi megfigyelésekkel.



32. ábra: Területek arányára vonatkozó formatényező (Ψ) a lézerteljesítmény és a haladási sebesség függvényében

A kialakuló két részből álló varratok hővezetési része kötővarratok esetén a résáthidalás szempontjából kedvező, hiszen szélessége miatt segíti azt, a mélyvarratos résznek pedig a megfelelő beolvadási mélység biztosításában van jelentősége.

A hegesztési kísérletek megkezdése előtt, a gép jellemzőinek ismeretében számításokkal meghatároztam, hogy hővezetési- vagy mélyvarratos hegesztéssel lesz-e dolgunk. Az alábbiakban ismertetem a számításaimat.

A kísérleteket 3 mm foltátmérőjű lézersugárral végezzük, így a darab felületén a folt területe:

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{3^2 \cdot \pi}{4} = 7,07 \text{ mm}^2 \approx 0,07 \text{ cm}^2$$

ahol A-val jelölöm a folt területét és d-vel a foltátmérőt.

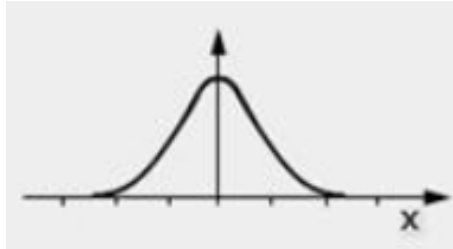
A rendelkezésre álló kézi lézersugaras hegesztőgép teljesítménye: $P = 1000 \text{ W}$.

Így a p teljesítménysűrűség, azaz a lézersugár intenzitása:

$$p = \frac{P}{A} = \frac{1000}{0,07} = 14286 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \approx 1,4 \cdot 10^4 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

Kijött, hogy a teljesítménysűrűség valóban a 10^6 W/cm^2 -es határ alatt van, a számérték alapján egyértelműen hővezetési hegesztés esete áll fenn. Felmerül a kérdés, hogy ennek ellenére hogyan alakulhat ki mégis mélyvarratos hegesztés?

A jelenség egy lehetséges oka a lézersugár intenzitáseloszlásában rejlik: a számítás elvégzésekor azt az egyszerűsítést tettem, hogy a lézersugár teljesítménysűrűsége a teljes keresztmetszetében homogénean oszlik el. Azonban a sugárforrás által kibocsátott lézersugár feltételezhetően közelítőleg Gauss-eloszlást követ, azaz a lézersugár közepén koncentrálódik annak energiája, míg a szélek felé közeledve egyre kisebb teljesítménysűrűséggel bír. Ilyen módon a lézersugár közepén létre tud jönni olyan teljesítménysűrűség, ami elegendő a mélyvarratos hegesztés kialakulásához. [3]



33. ábra: Gauss-eloszlás sematikus ábrája [3]

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatómunkám során az volt a célom, hogy megvizsgáljam a lézerteljesítmény és a haladási sebesség varratgeometriára gyakorolt hatását kézi lézersugaras hegesztés esetén. Ennek érdekében két, egyenként 10 db hernyóvarratból álló kísérletsorozatot készítettem két különböző haladási sebesség és a lézerteljesítmény változtatása mellett ausztenites rozsdamentes acél csövekre.

A csöveket a hegesztés után hossz tengelyük mentén elvágtam és elkészítettem a kiértékeléshez szükséges csiszolatokat. A csiszolatokat sztereomikroszkóp alatt vizsgáltam és a hozzátartozó program segítségével fényképeket készítettem, melyeken ezután felvettem a kiértékeléshez szükséges méreteket.

A kiértékelést először szemrevételezéssel végeztem, ezután a mért varratszélesség, beolvadási mélység, varratterület, valamint hővezetési és mélyvarratos varratterület értékek segítségével diagramokat hoztam létre, melyek ezen értékeket ábrázolják a lézerteljesítmény és a haladási sebesség függvényében, majd ezek alapján vontam le következtetéseket.

A kiértékelések alapján összességében elmondható, hogy a lézersugár pisztolyon belüli mozgása nélkül, azaz pont alakú mozgási mód alkalmazása mellett két részből – egy szélesebb és sekélyebb, hővezetési részből, valamint egy keskenyebb és mélyebb, mélyvarratos részből – álló varratalak alakul ki. A vizsgált haladási sebességek mellett 60%-os teljesítményszintig stabil varratalak érhető el, a 70-80%-os tartományban kiugróan karcsú és mély, míg a 90-100%-os teljesítményszint mellett széles és kisebb beolvadású varratalak keletkezik.

7. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] BAY ZOLTÁN ALKALMAZOTT KUTATÁSI ALAPÍTVÁNY (2000): *Lézer oktató videó.*
- [2] ABAFFY KÁROLY (2015.05.08.): *Szóbeli előadás a Denso Kft. részére tartott továbbképzésen Lézersugaras technológiák címmel, Székesfehérvár.*
- [3] BUZA GÁBOR (2012): *Lézersugaras technológiák I.* Edutus Főiskola, 2800 Tatabánya, Stúdium tér 1.
- [4] KREISZ ISTVÁN (2011): *Lézersugár-vezetés,* Edutus Főiskola, 2800 Tatabánya, Stúdium tér 1.
- [5] ESAB Kft. honlapja (esab.com/hu/eur_hu): *Lézersugaras hegesztés.* (Utolsó megtekintés dátuma: 2023.11.04.)
- [6] MSZ EN 60825-1:2014/A11:2021 *Lézergyártmányok biztonsága. 1. rész: Készülékosztályozás és követelmények.*
- [7] VAVRA GÁBOR (2023.10.26.): *Szóbeli előadás a Nagy energiasűrűségű hegesztés ankéton A kézi lézeres hegesztés biztonsági szempontjai címmel, Kecskemét.*
- [8] R+C Zrt. honlapja (epilog.hu): *Lézerbiztonság.* (Utolsó megtekintés dátuma: 2023.11.04.)
- [9] HALÁSZ GÁBOR (2023.10.26.): *Szóbeli előadás a Nagy energiasűrűségű hegesztés ankéton Kézi lézer berendezések alkalmazási területei, biztonsági kihívásai és fejlesztési trendek címmel, Kecskemét.*
- [10] AGST Draht & Biegetechnik GmbH honlapja (agst.de): *Rozsdamentes acél 1.4301 adatlap.* (Utolsó megtekintés dátuma: 2023.11.04.)

A forrásmegjelöléssel el nem látott képeket magam készítettem.

8. SUMMARY

The aim of my thesis was to investigate the effects of laser power and travel speed on the weld geometry in case of manual laser beam welding. For this purpose, two series of experiments were performed, each consisting of 10 bead-on-plate welds, on austenitic stainless steel tubes at two different travel speeds and varying laser power.

After welding, the tubes were cut along their longitudinal axis and the grindings for evaluation were prepared. The grindings were examined under a stereomicroscope and photographs were taken using the associated software, on which the dimensions for the evaluation were recorded.

The evaluation was first carried out by visual inspection and then, using the measured values for seam width, fusion depth, seam area, as well as conduction and deep penetration area, I created diagrams showing these values as a function of laser power and travel speed, and drew conclusions.

Overall, the evaluations show that without moving the laser beam inside the gun, i.e. using a point-shaped wobbling mode, a weld geometry consisting of two parts - a wider and shallower conduction area as well as a narrower and deeper deep penetration area - is formed. At the tested travel speeds, stable weld geometry is obtained up to 60% power level, with a narrow and deep weld geometry in the 70-80% range and a wide and shallow weld geometry at 90-100% power level.

Keywords: manual laser beam welding, laser power, travel speed, weld geometry

MELLÉKLET

Jelen mellékletben a hegesztési varratok számozása a következőképpen történik: az első szám vonatkozik a kísérletsorozat számára, azaz a haladási sebességre, a második szám a leadott lézerteljesítményt jelöli, a harmadik szám pedig arra utal, hogy a varrat a félbevágott csőnek melyik oldalán található (az 1-es jelöli azt a keresztmetszetet, amit korábban, a 2-es pedig azt, amelyiket később hegesztettem).

Példa: 1.100.1. első kísérletsorozatba tartozó, tehát 24 cm/min haladási sebesség mellett készített varrat, 100%-os leadott lézerteljesítmény, a félbevágott csőnek azon a keresztmetszetén található, amit előbb hegesztettem.

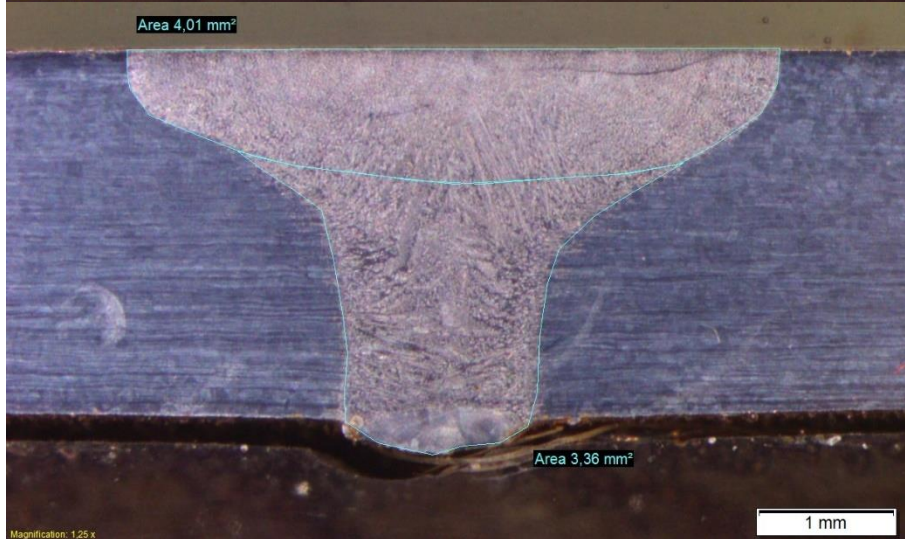
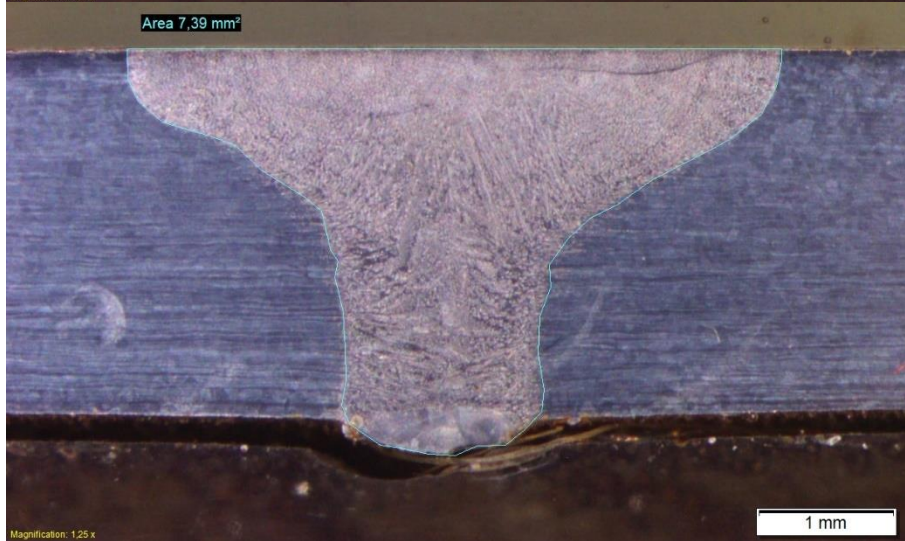
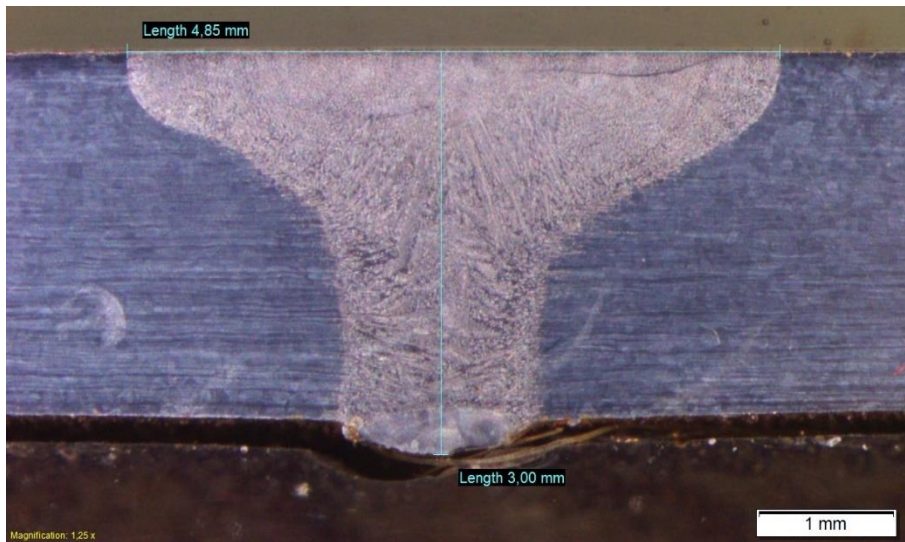
Minden varrat esetén az első képen a varratszélesség és beolvadási mélység, a második képen a varratterület, a harmadik képen pedig a hővezetési és mélyvarratos rész területének méretezése szerepel.

Mivel az első kísérletsorozat esetén a 20%-os teljesítményszinten – a 1.20.1. és a 1.20.2. jelű varratok esetén – tisztán hővezetési hegesztés esete áll fenn, ezeknél a varratoknál nem értelmezhető külön-külön a hővezetési és mélyvarratos rész területe, emiatt nem is készült ilyen fénykép.

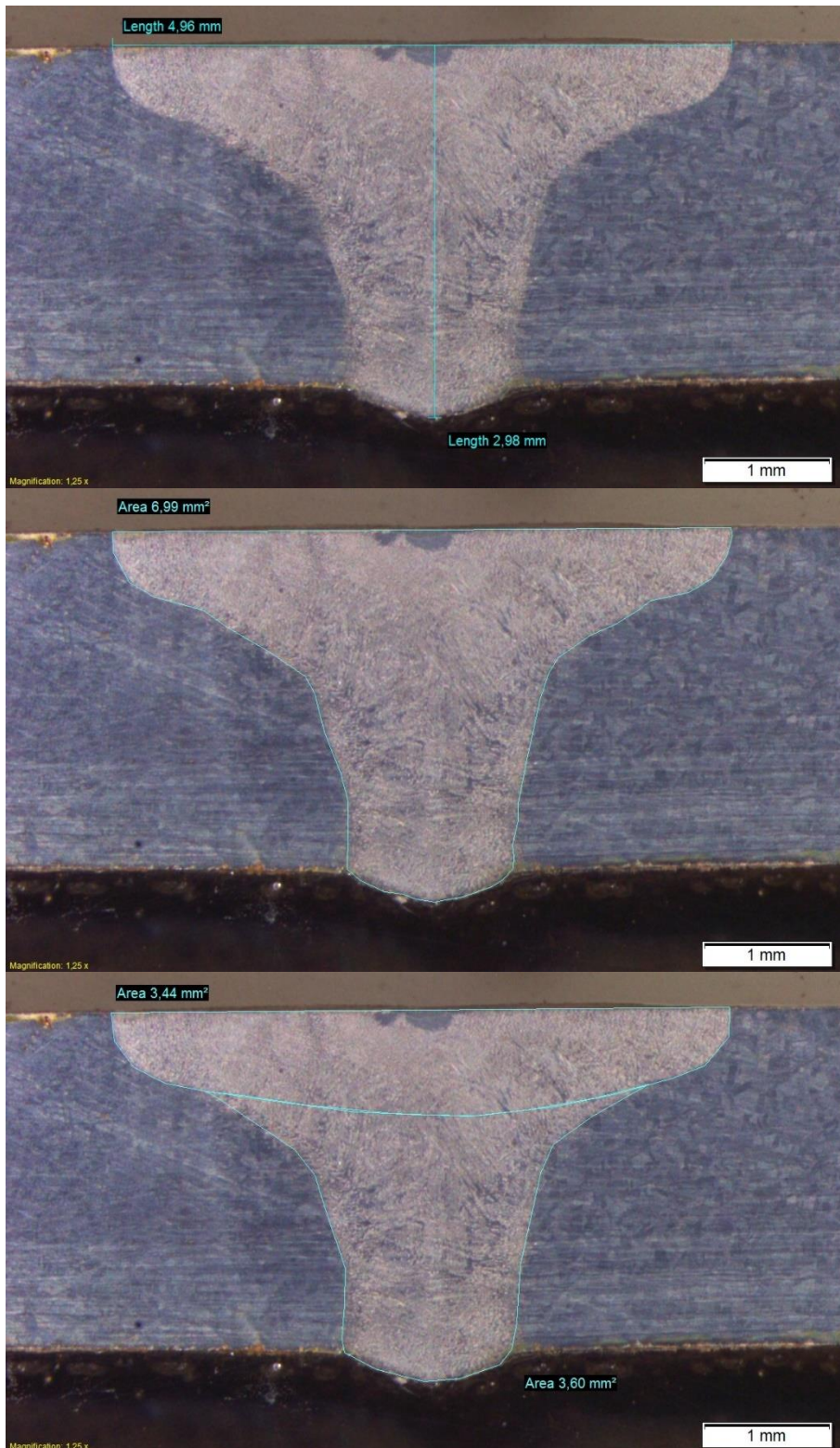
Az első kísérletsorozat ($v=24$ cm/min) mikroszkópi képei:



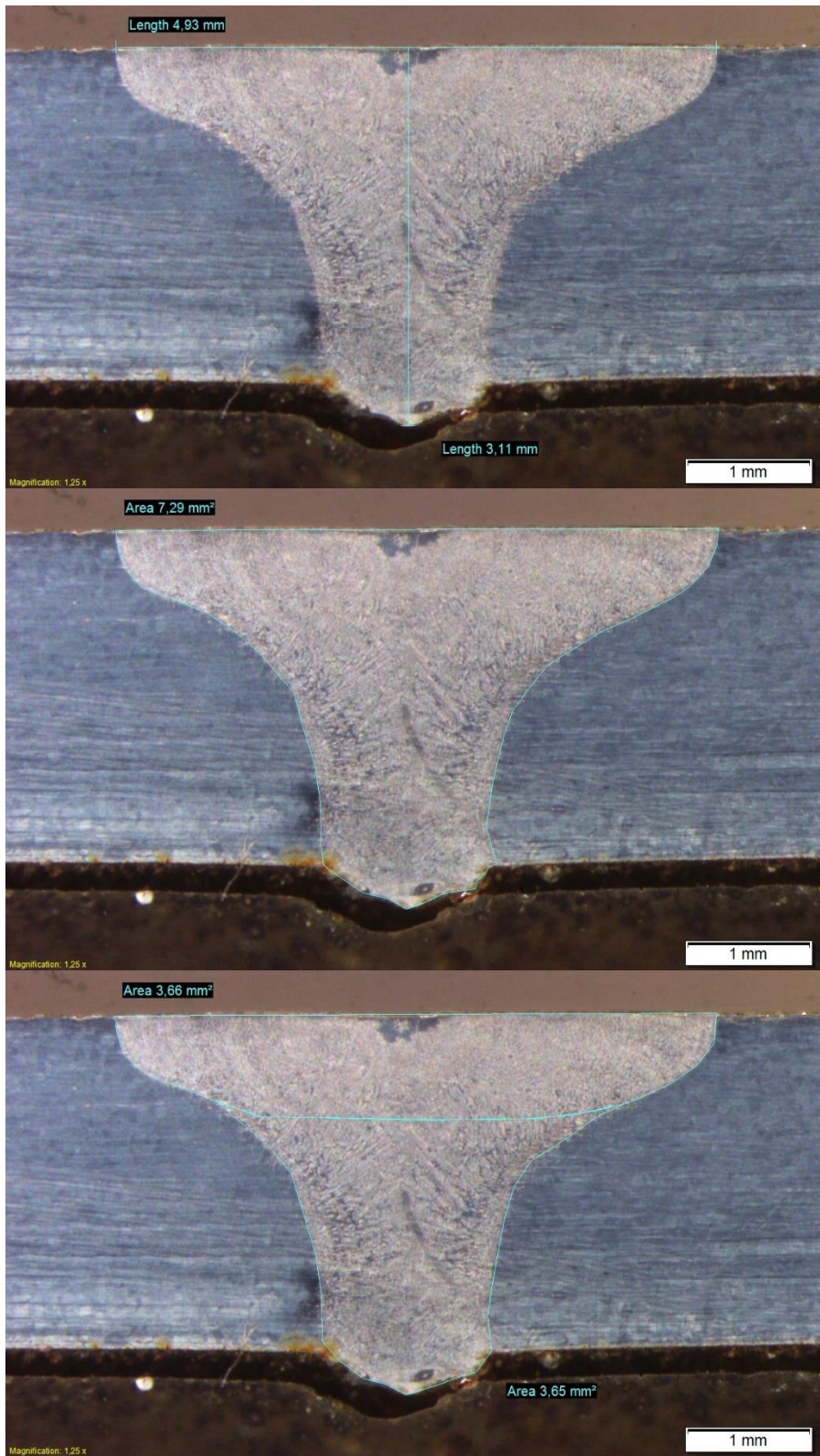
1.100.1.



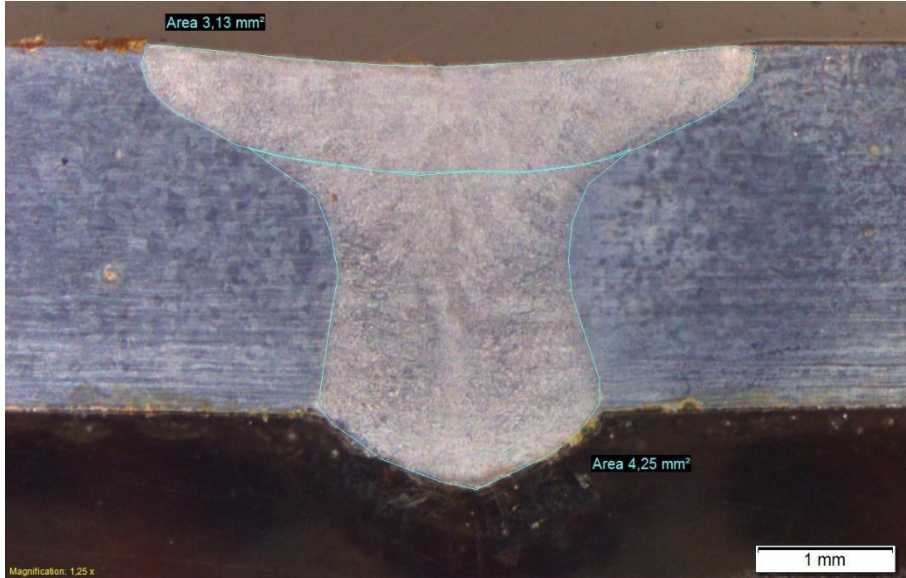
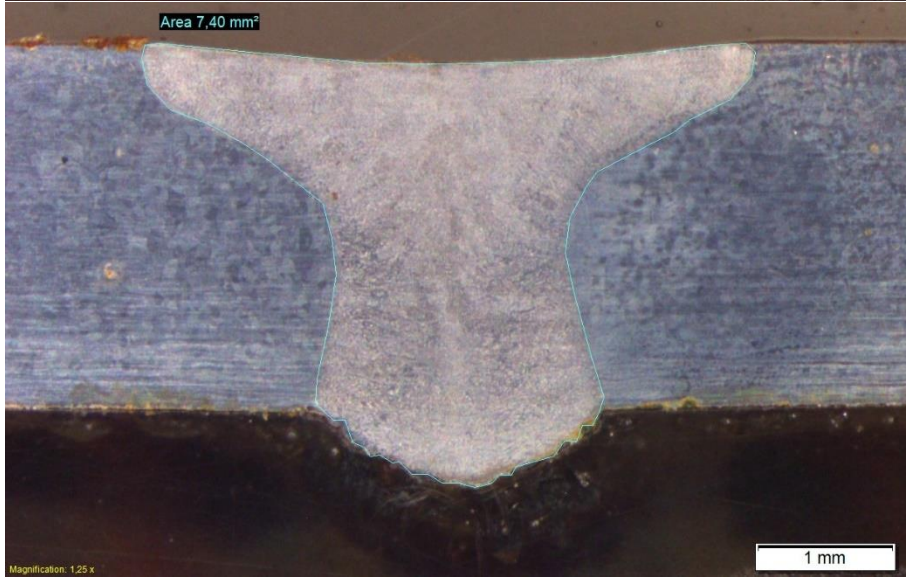
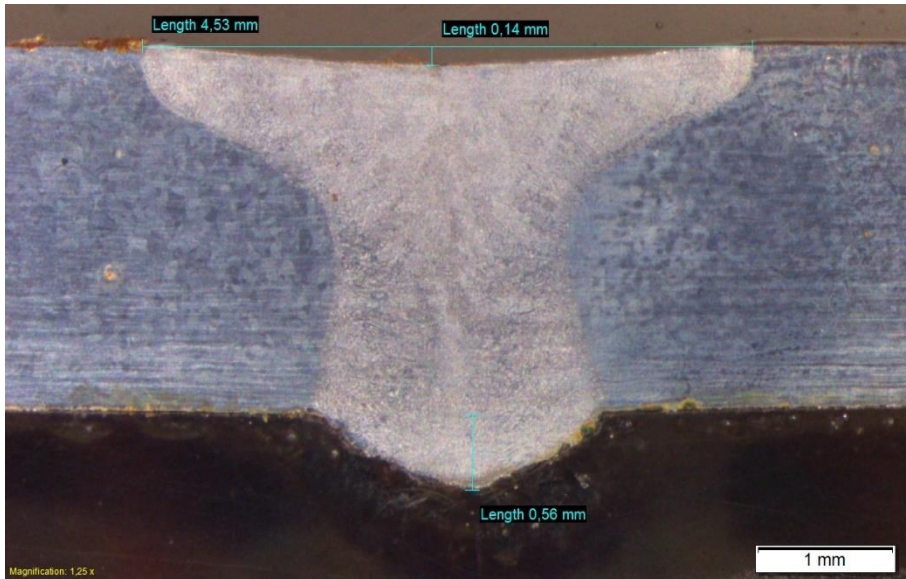
1.100.2.



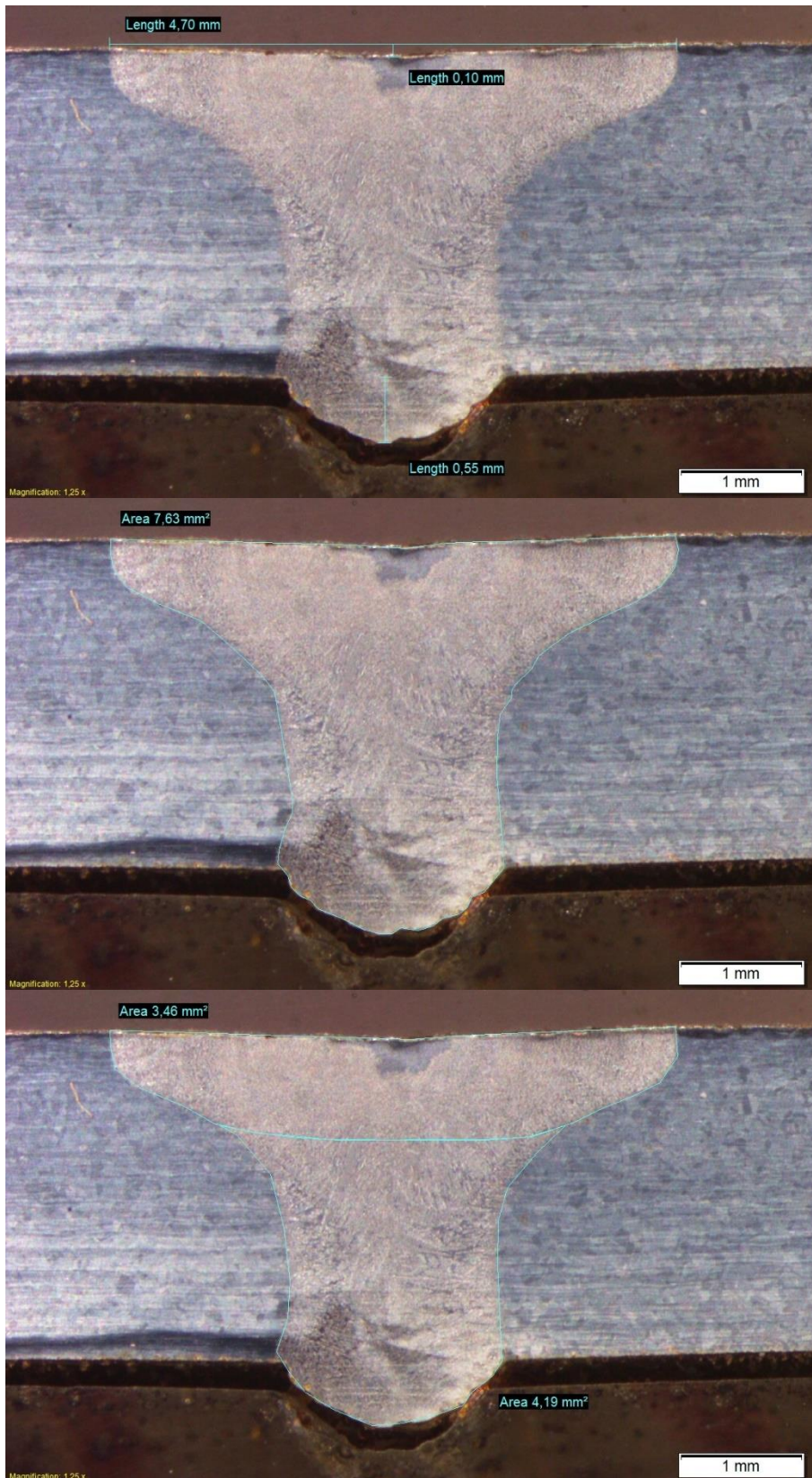
1.90.1.



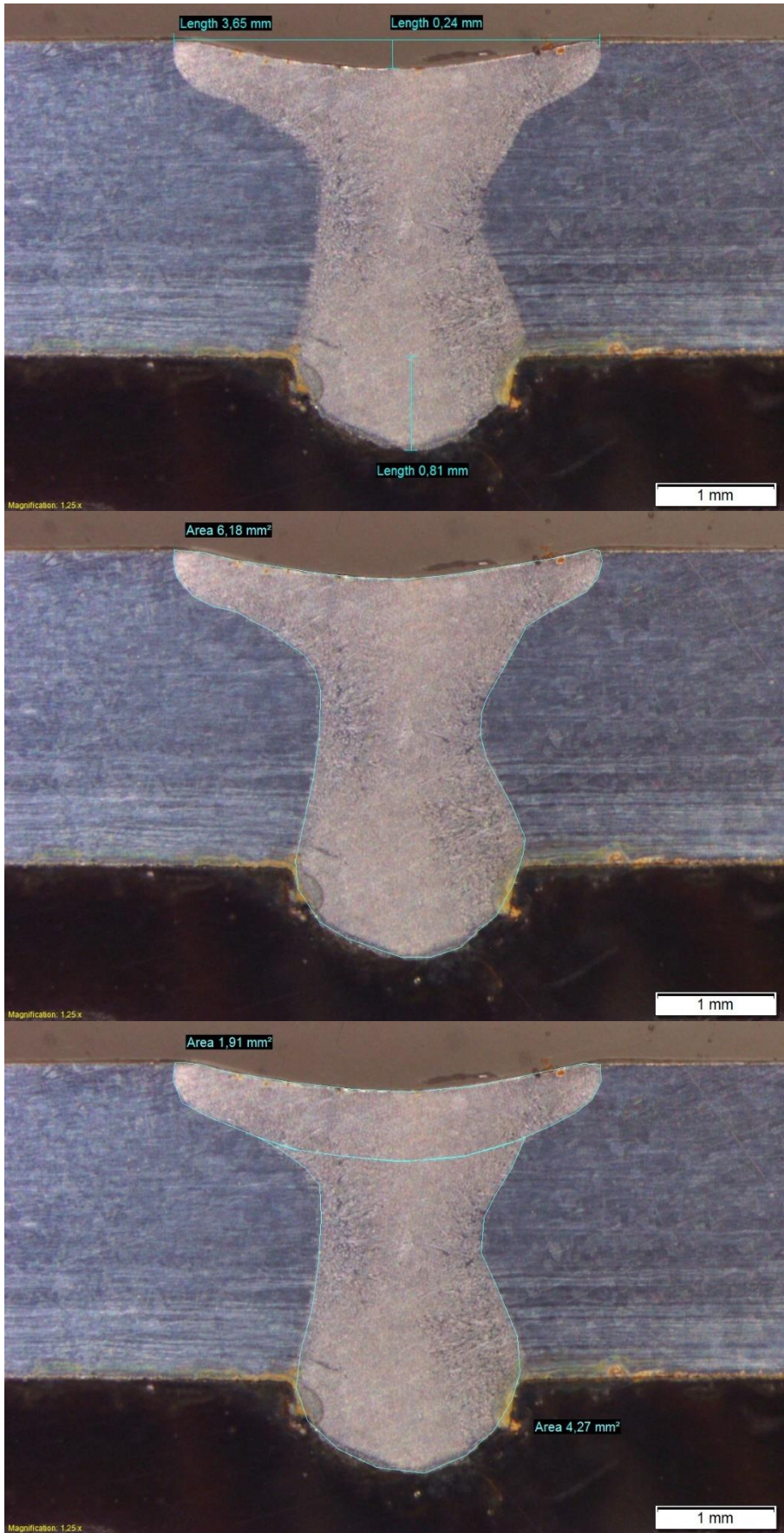
1.90.2.



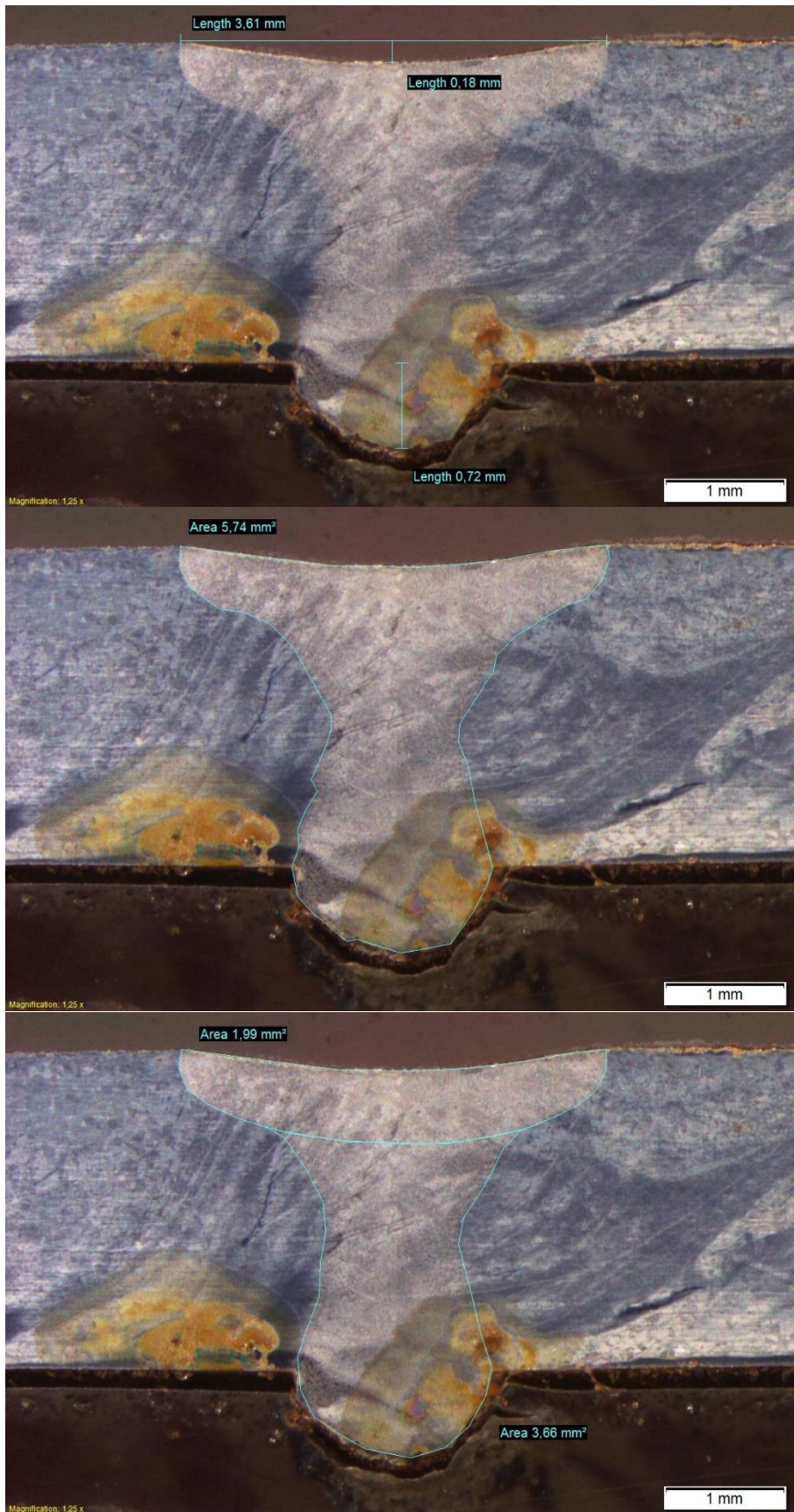
1.80.1.



1.80.2.



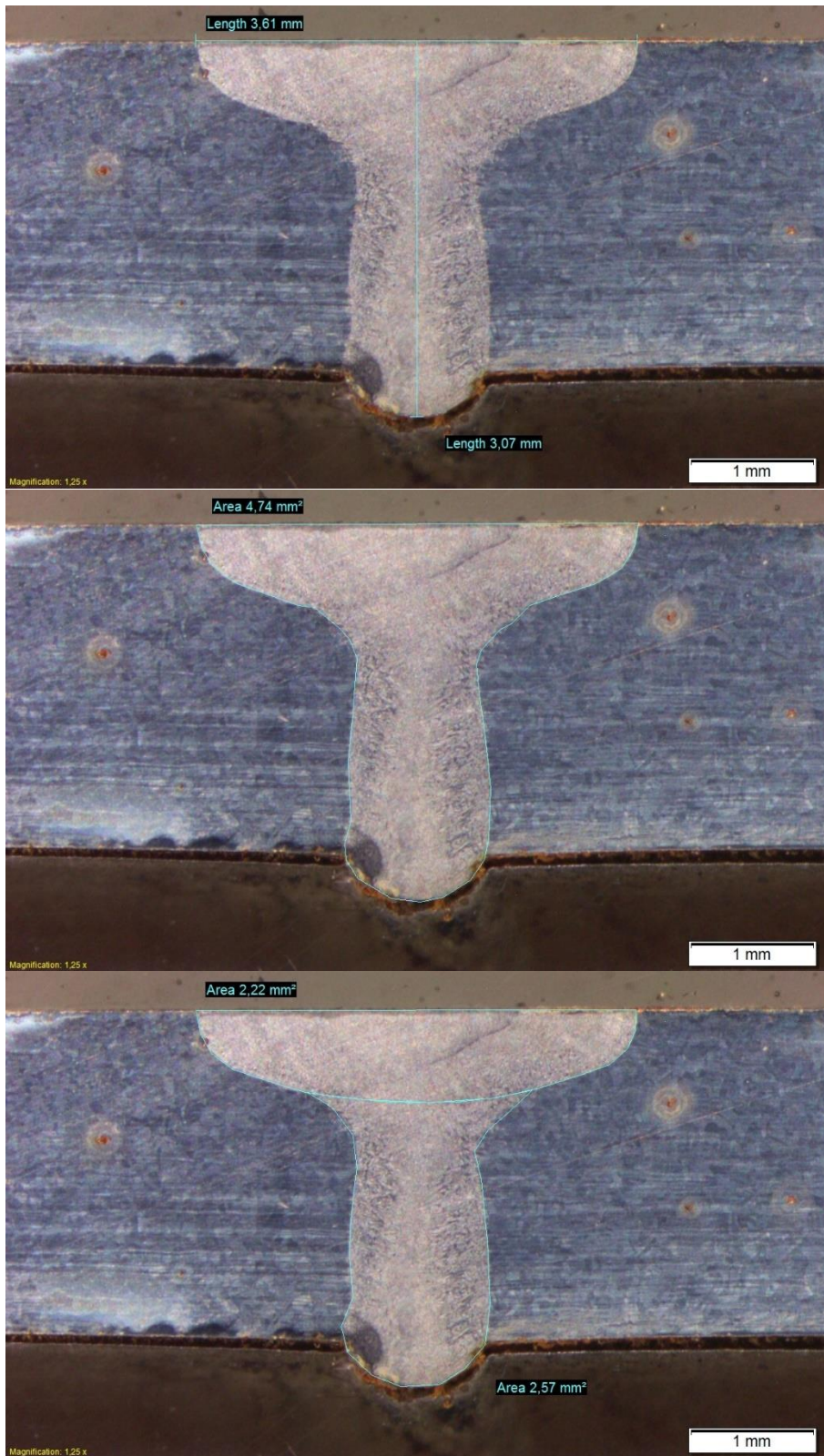
1.70.1.



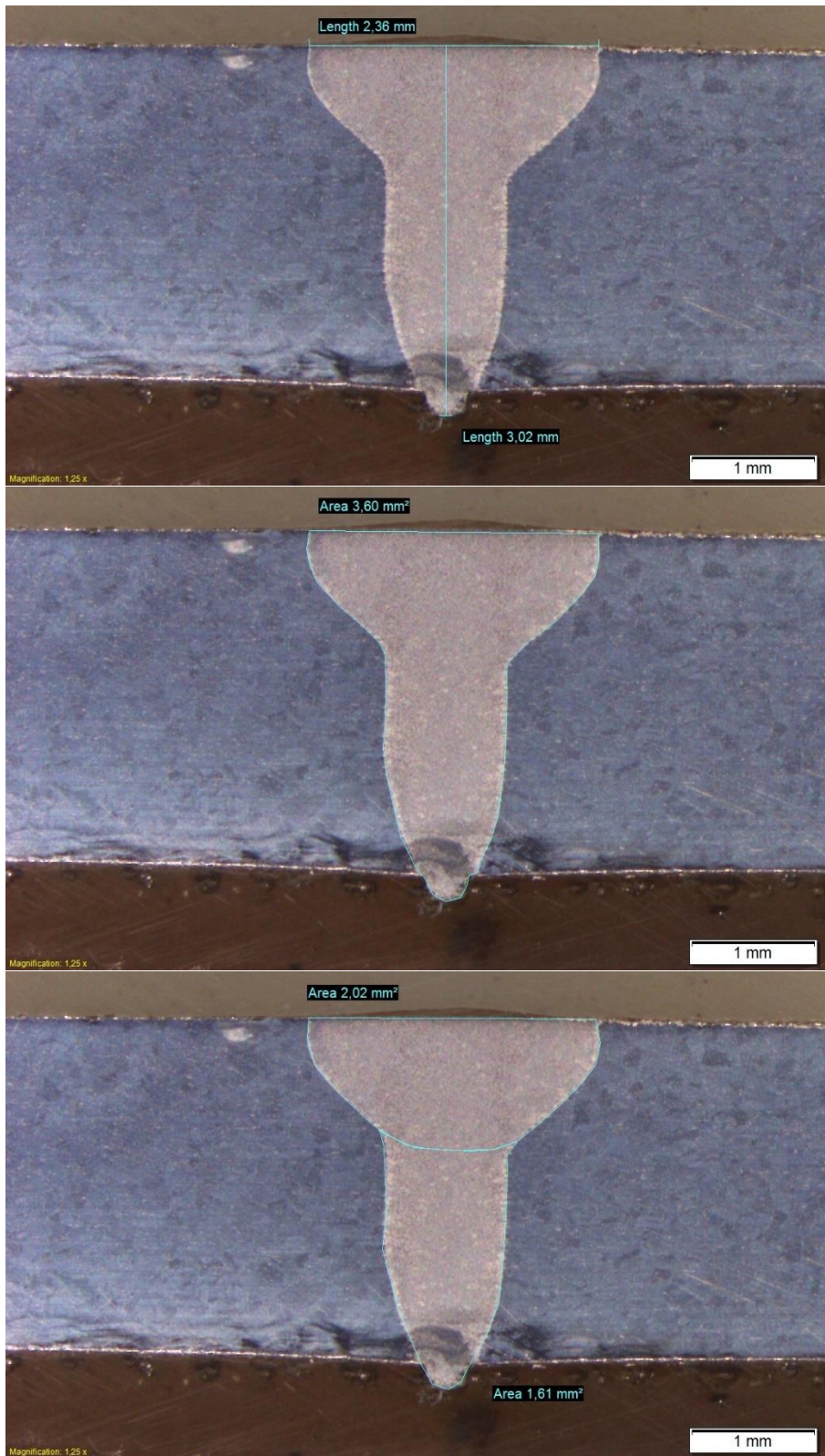
1.70.2.



1.60.1.



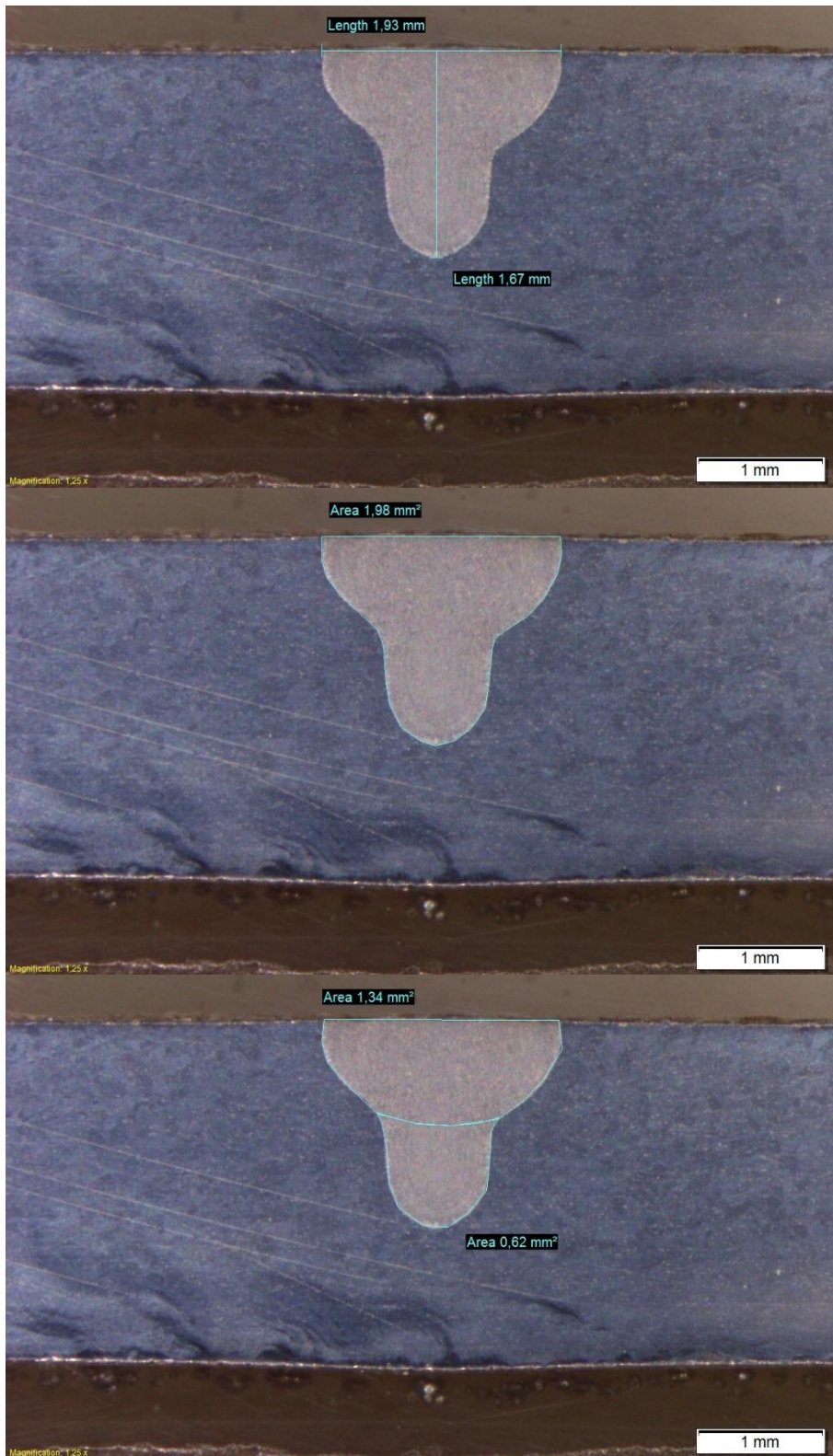
1.60.2.



1.50.1.



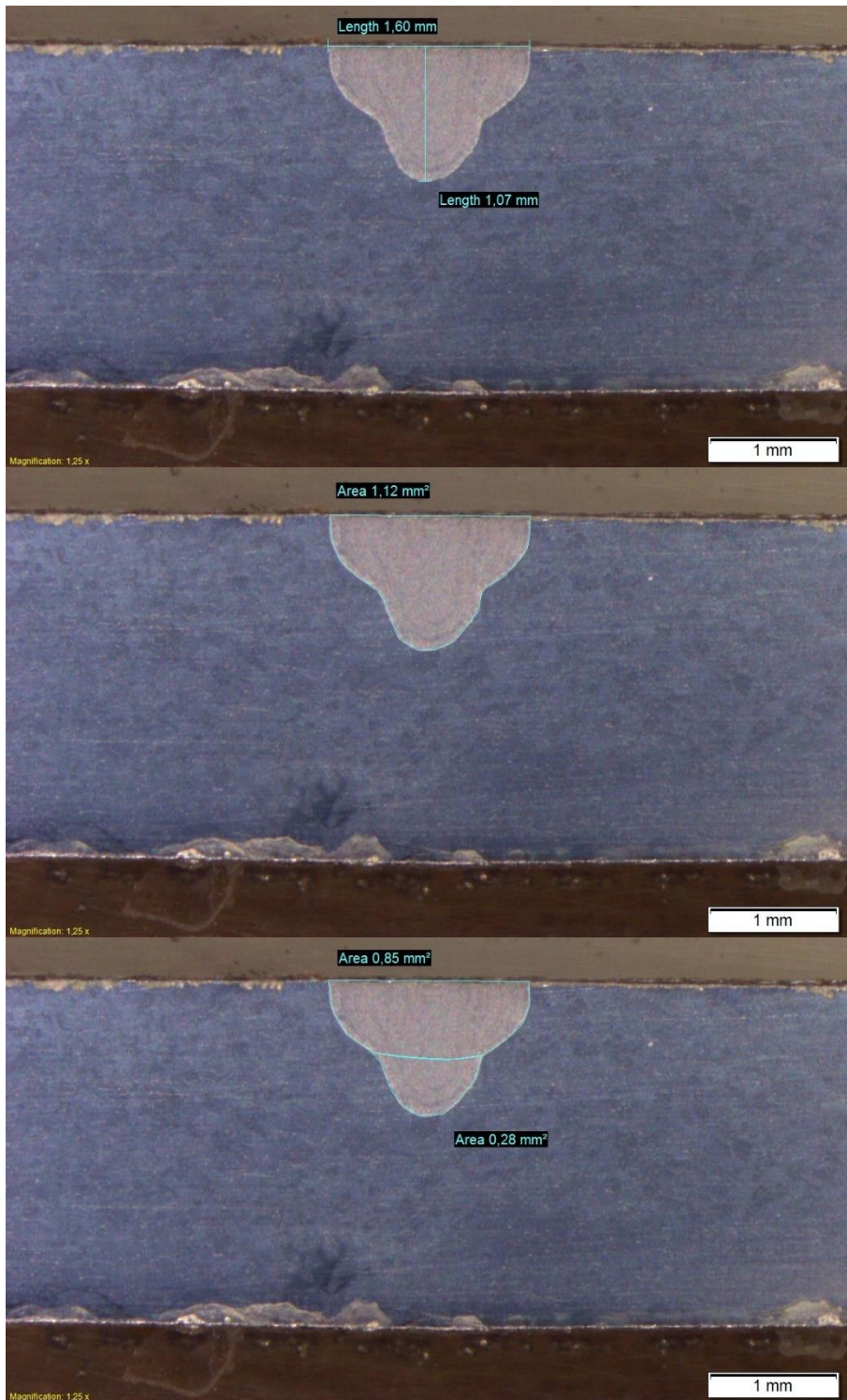
1.50.2.



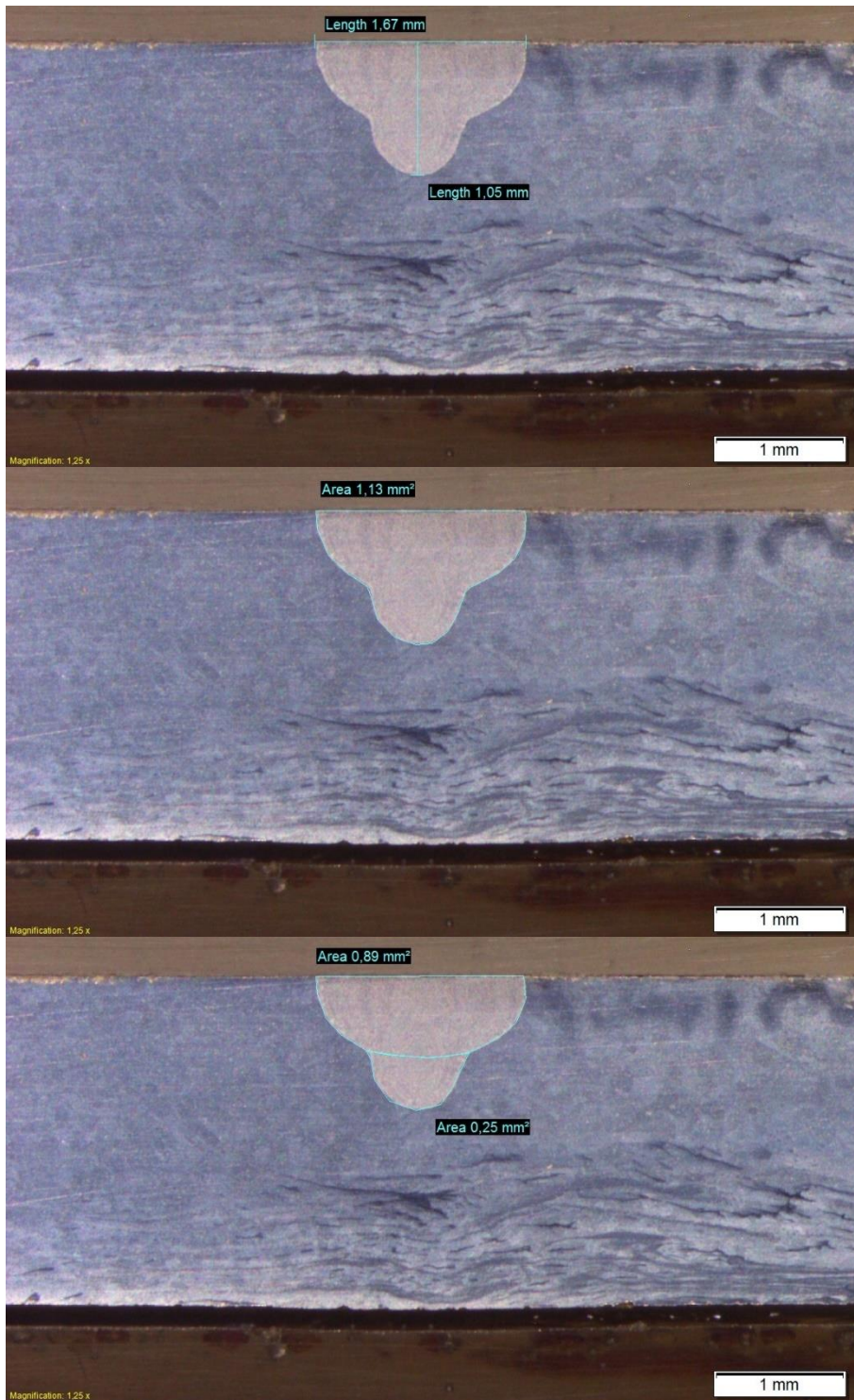
1.40.1.



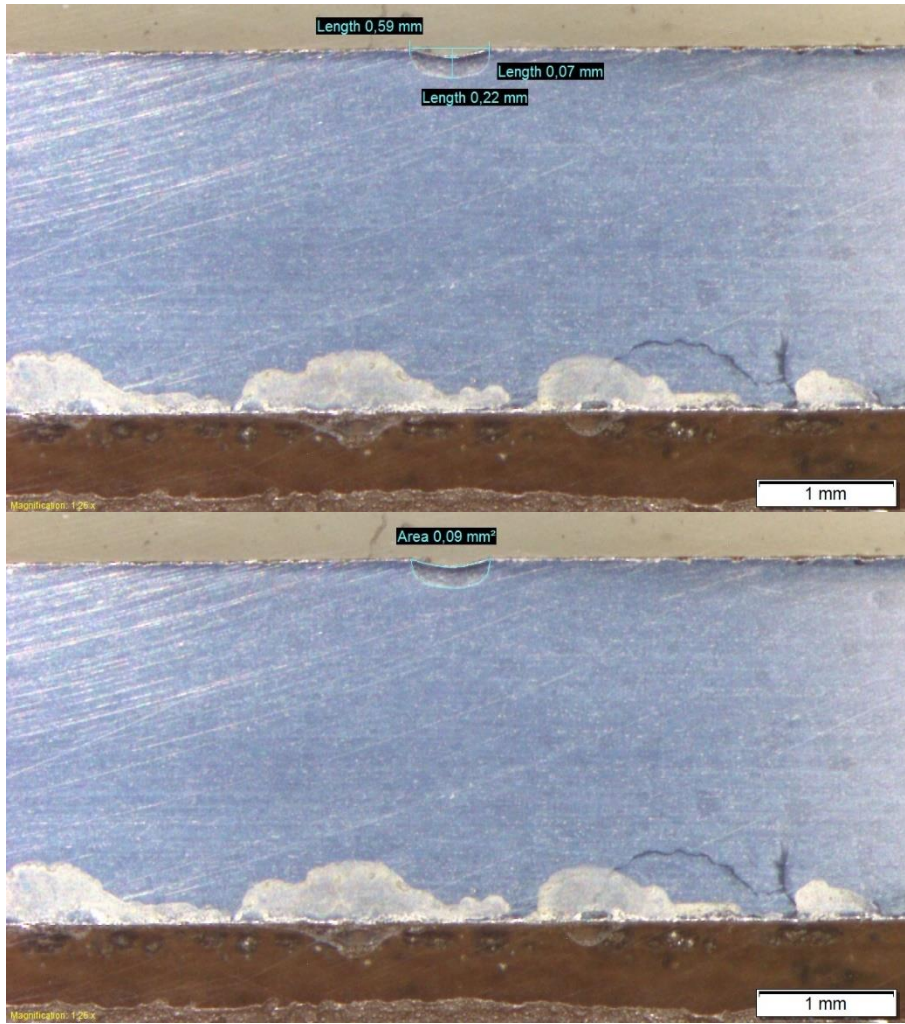
1.40.2.



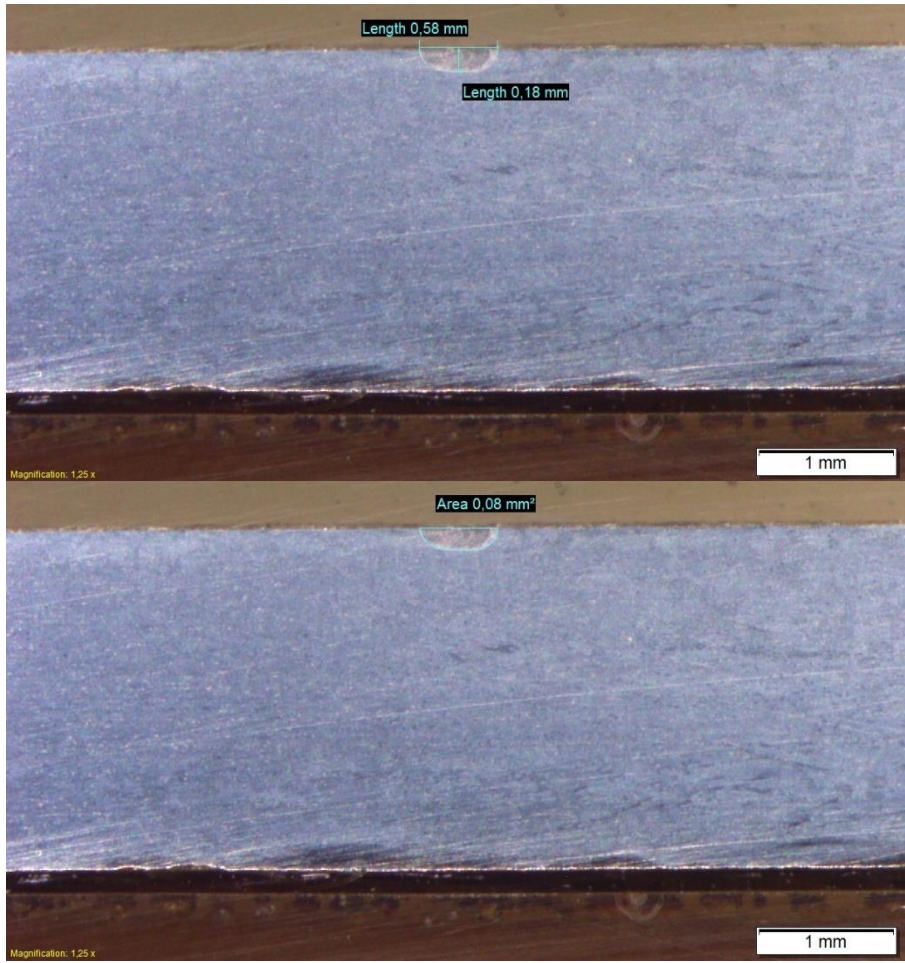
1.30.1.



1.30.2.



1.20.1.

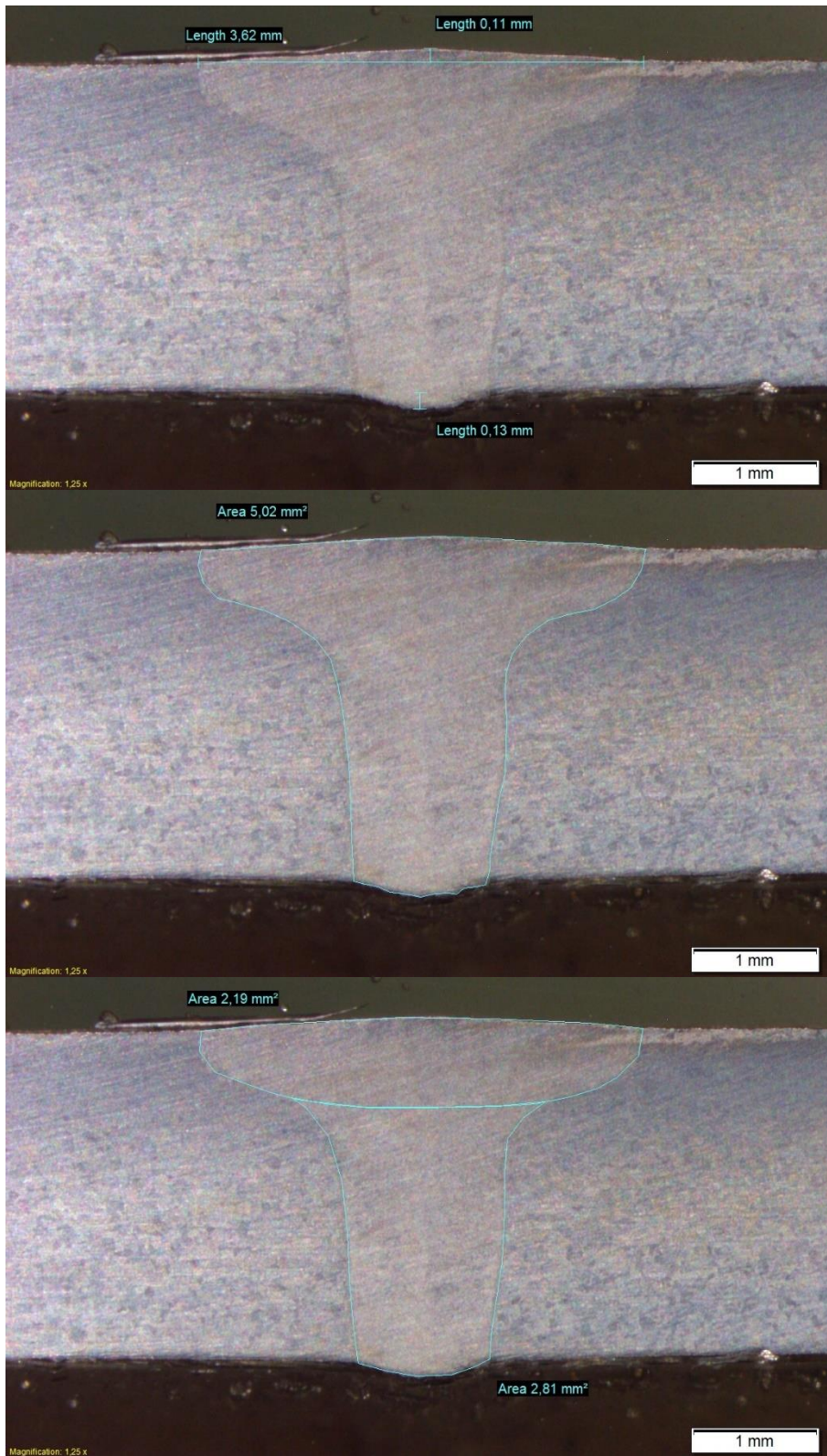


1.20.2.

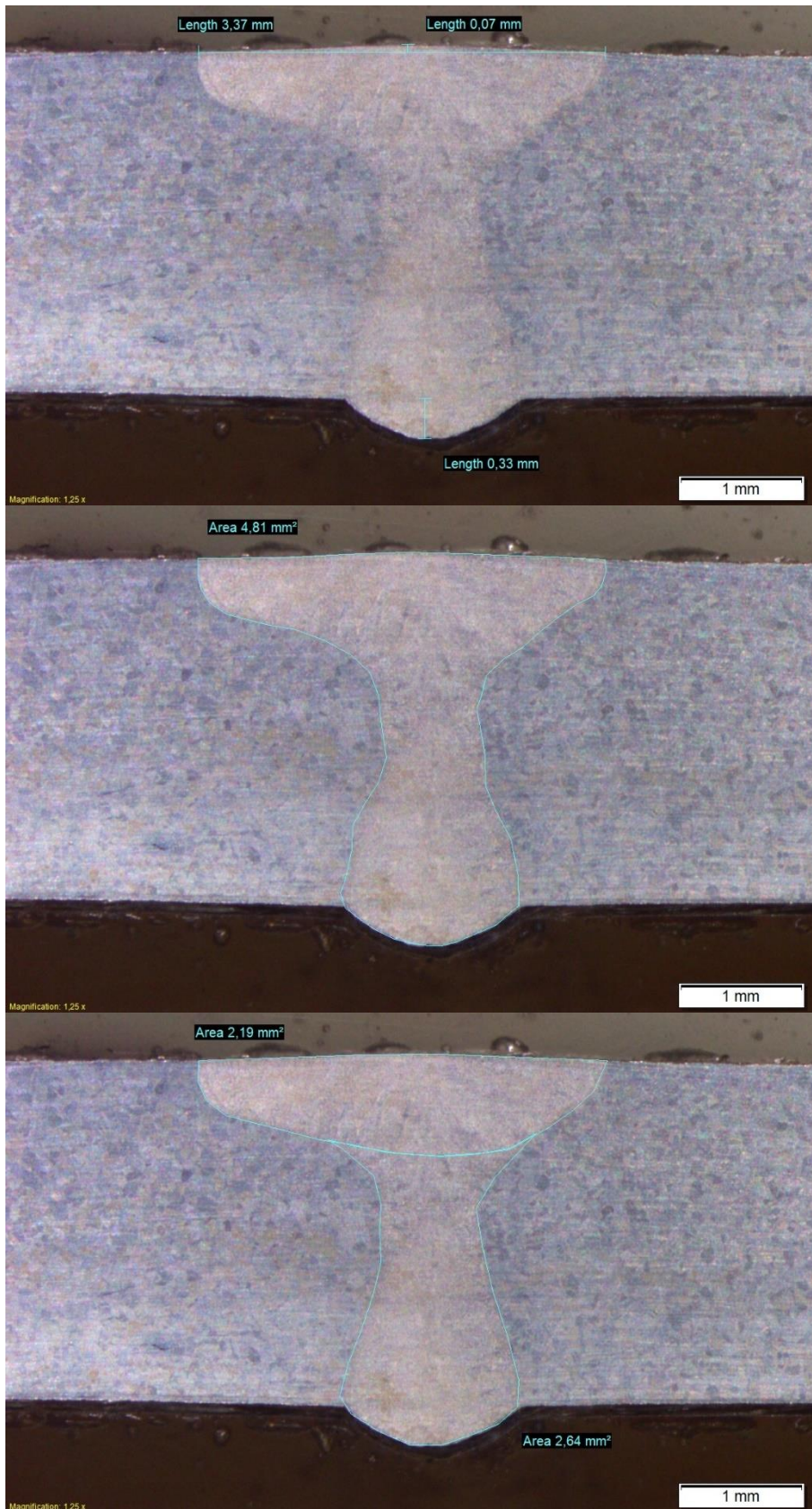
A második kísérletsorozat ($v=40$ cm/min) mikroszkópi képei:



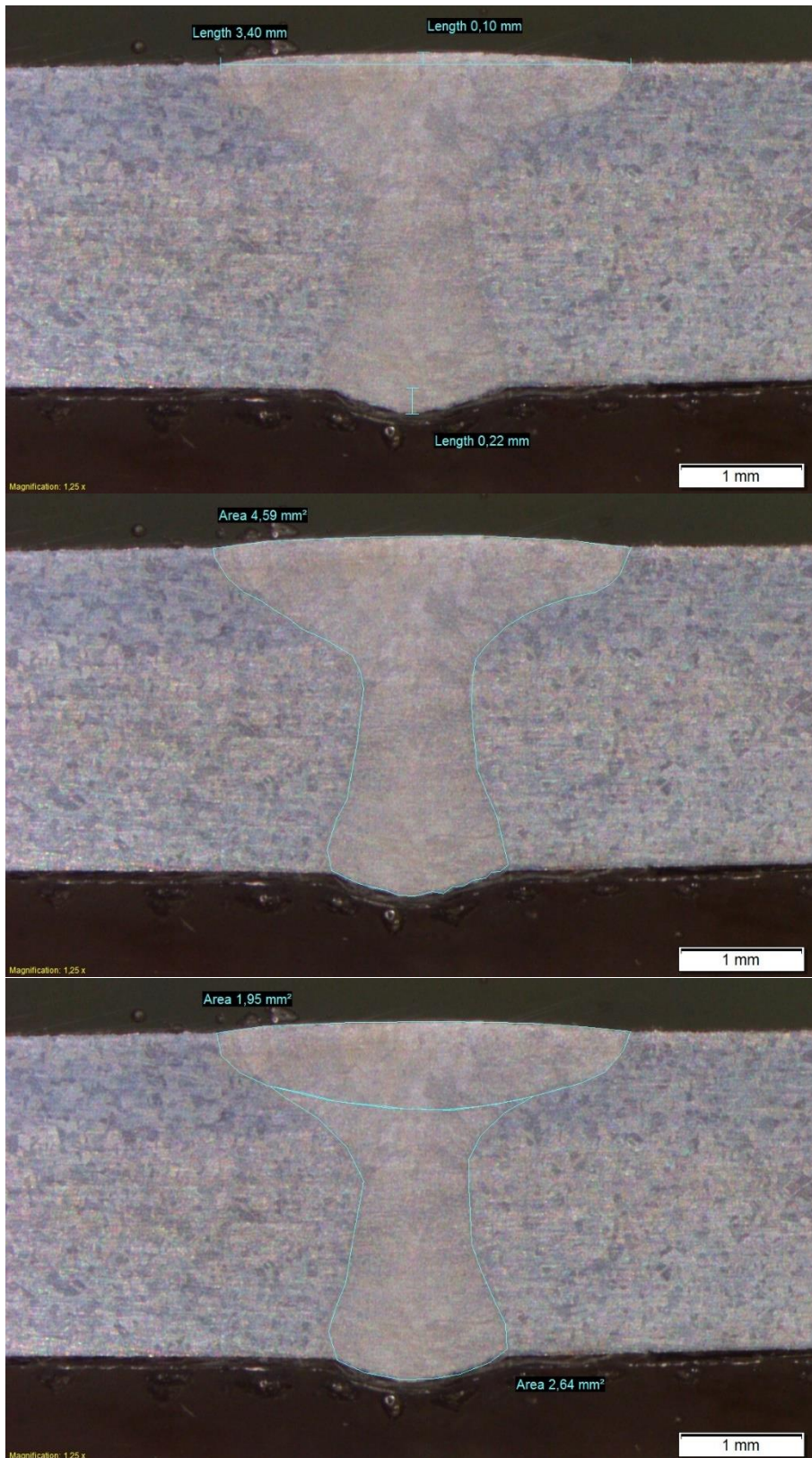
2.100.1.



2.100.2.



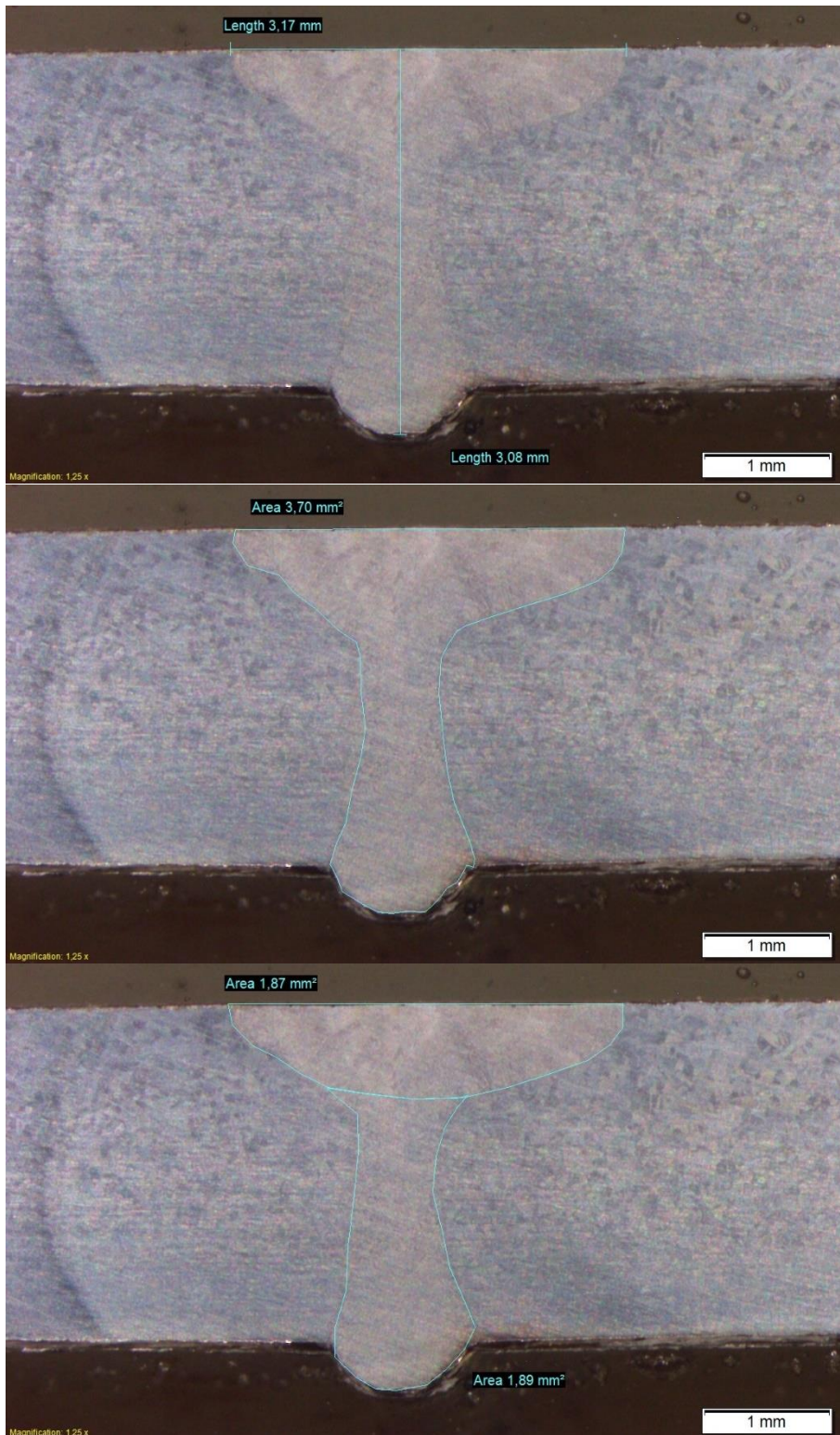
2.90.1.



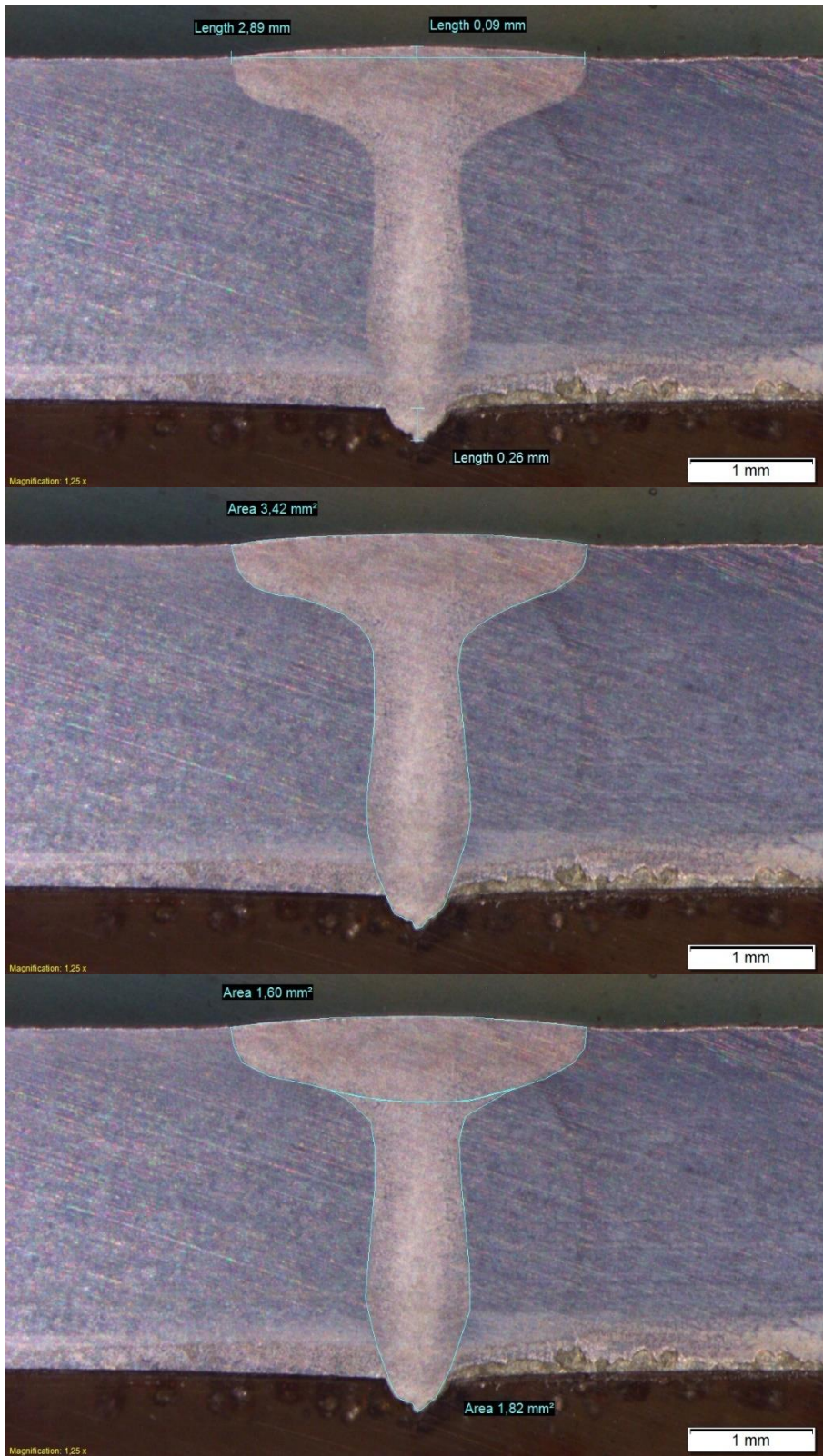
2.90.2.



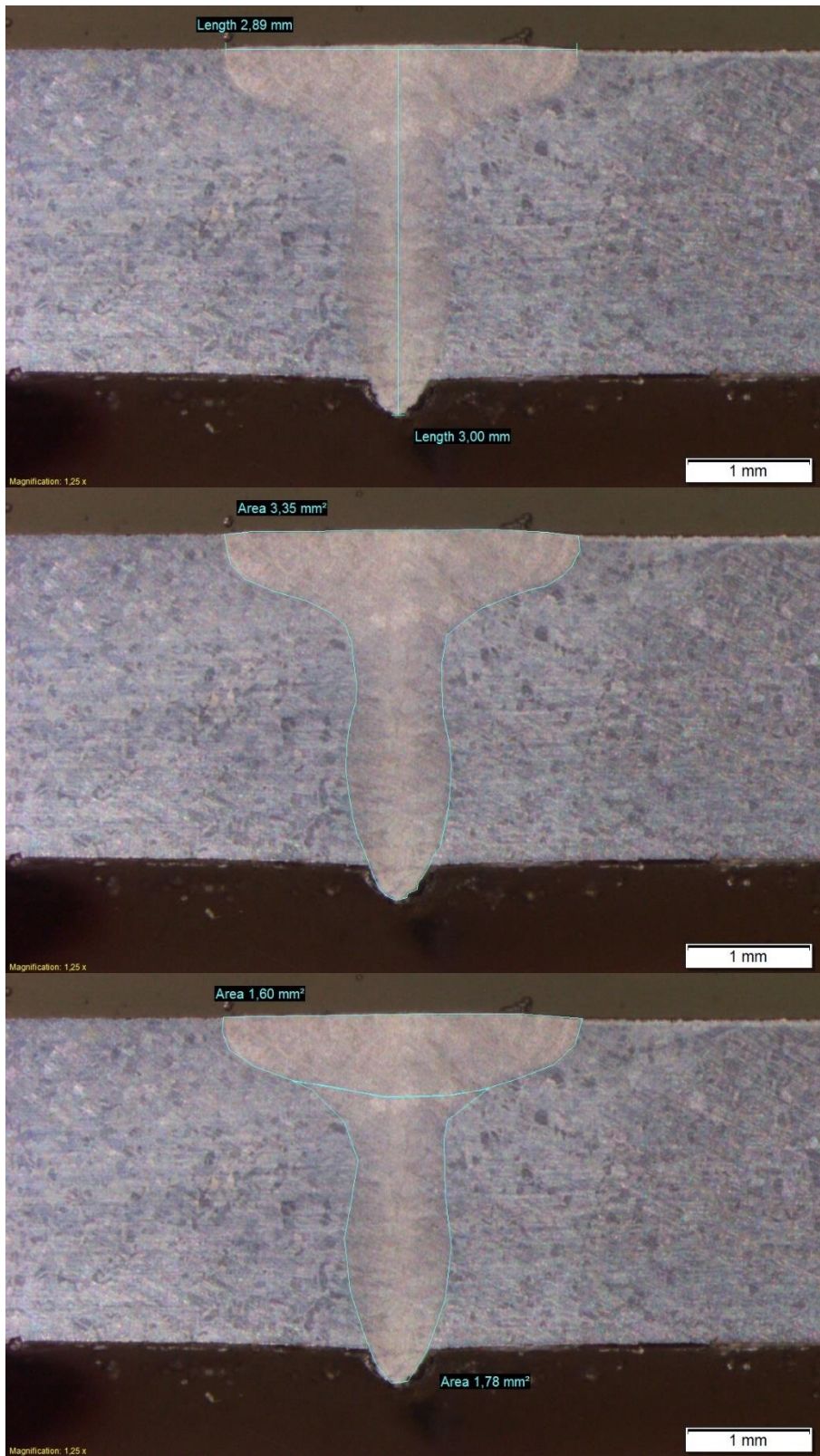
2.80.1.



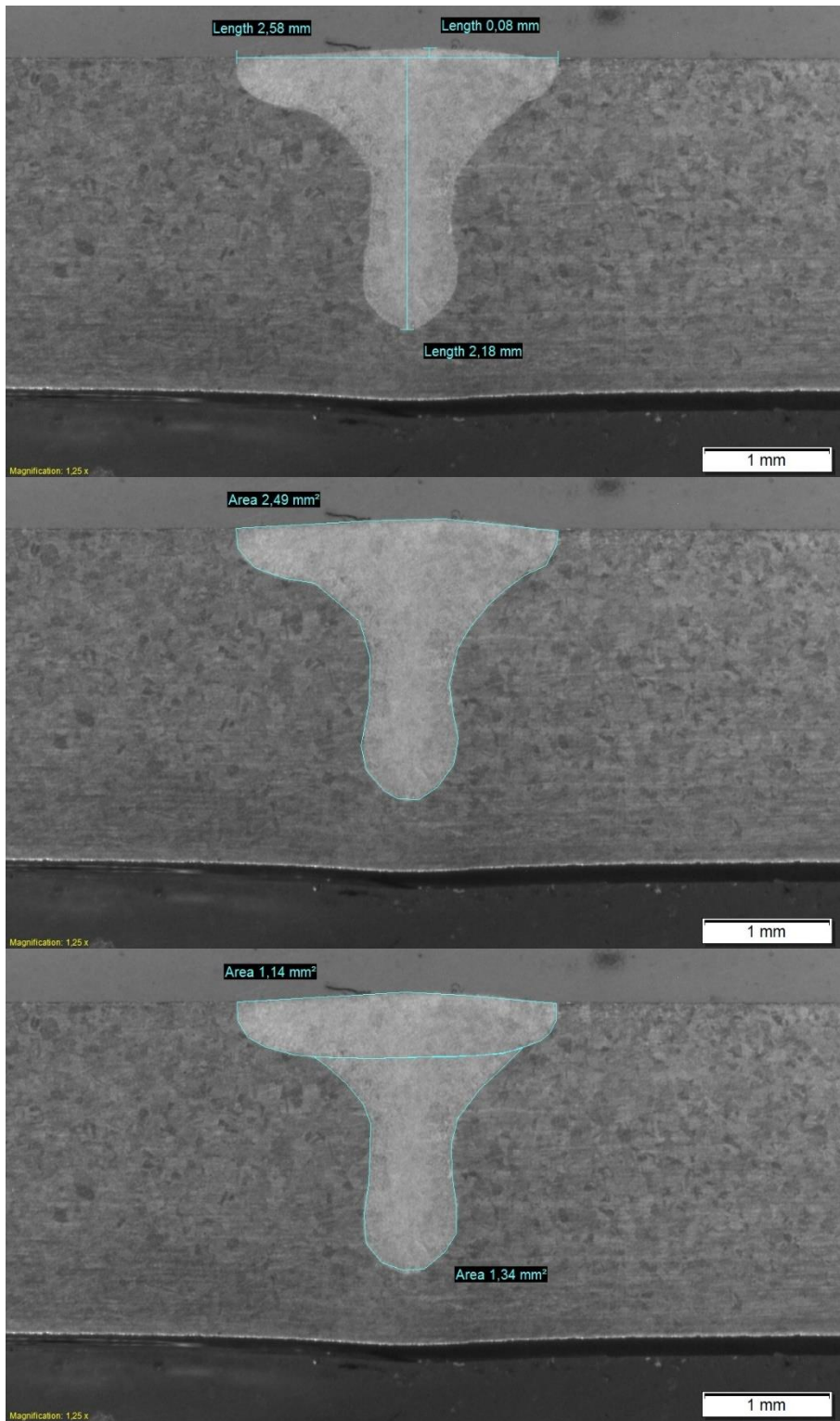
2.80.2.



2.70.1.



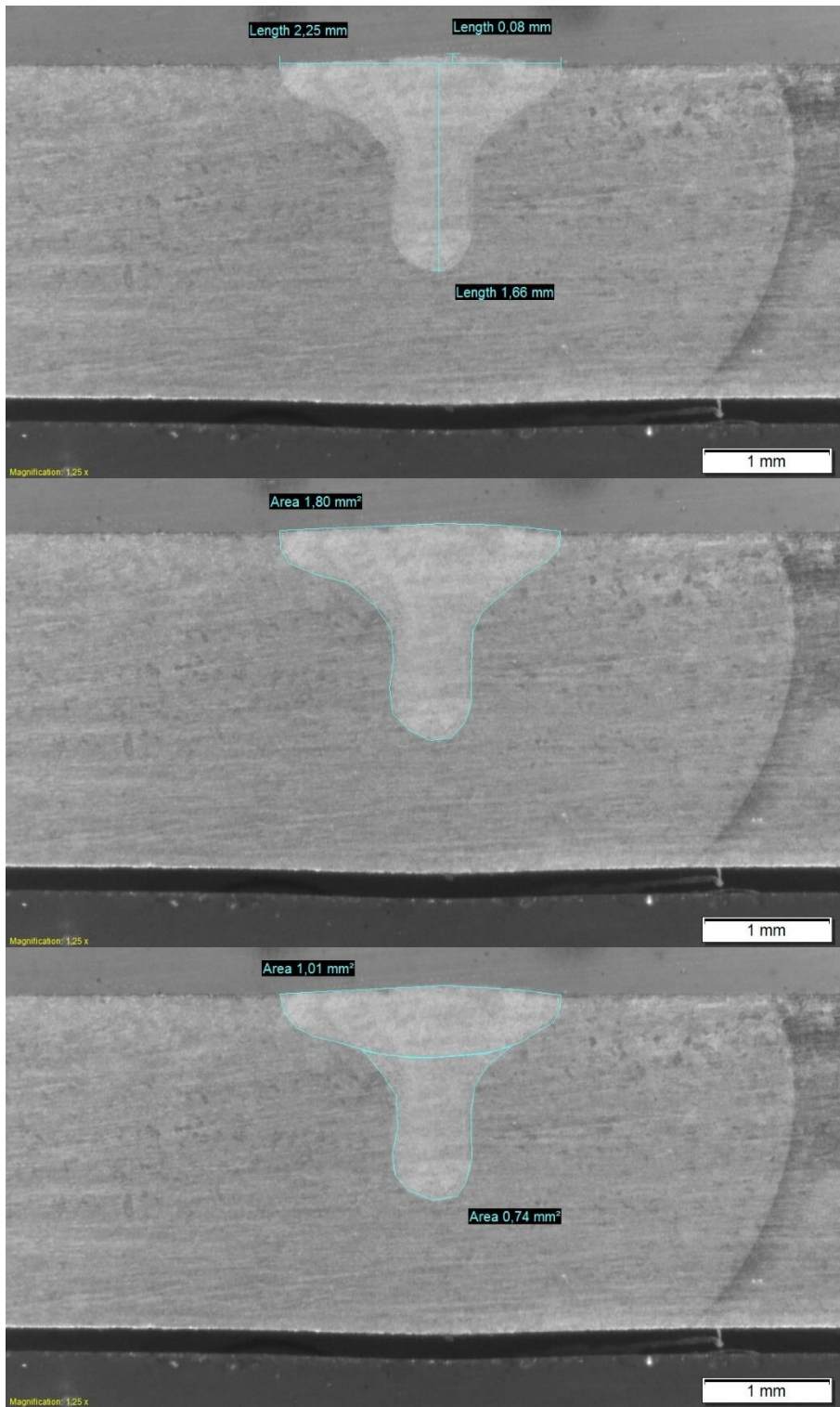
2.70.2.



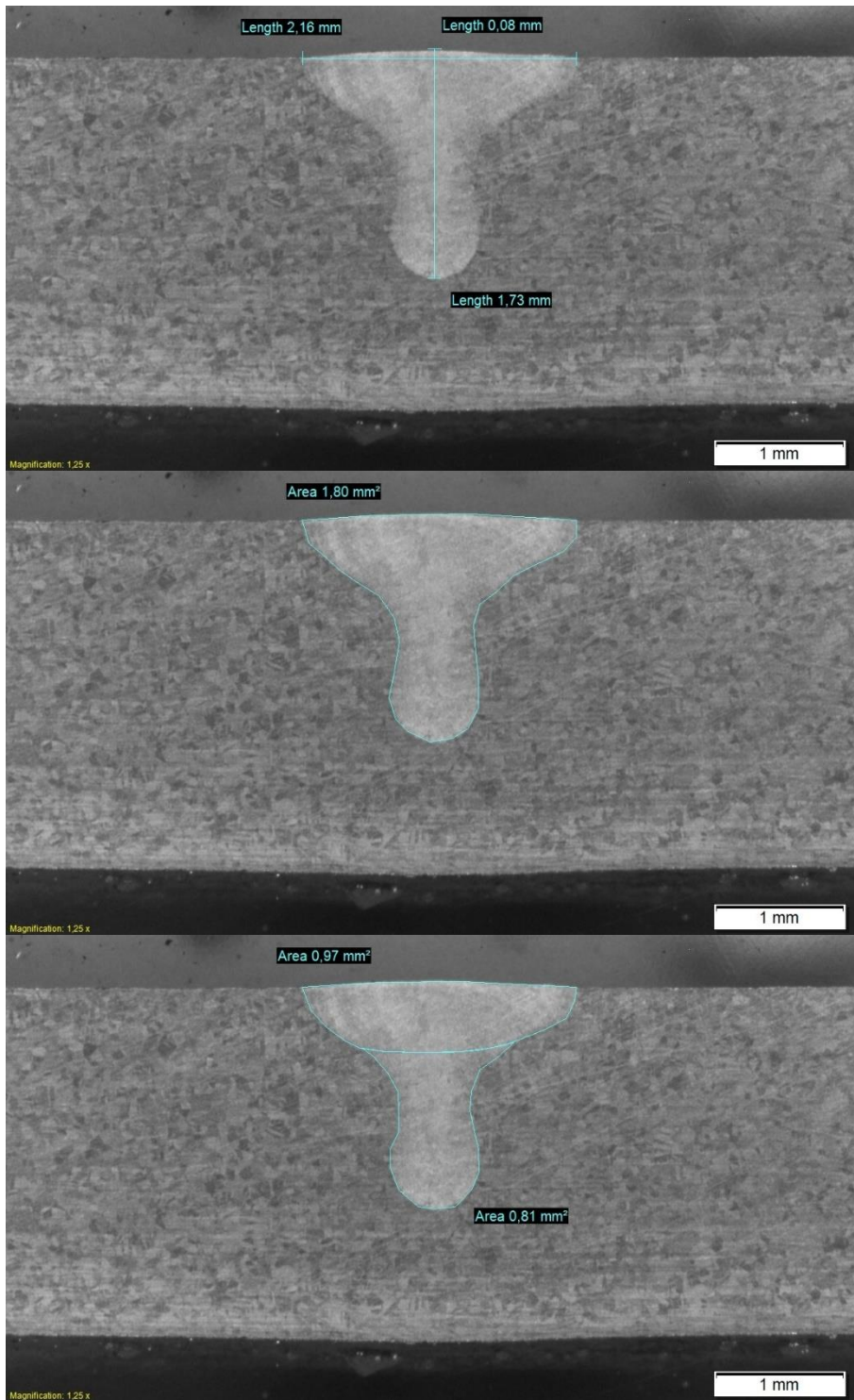
2.60.1.



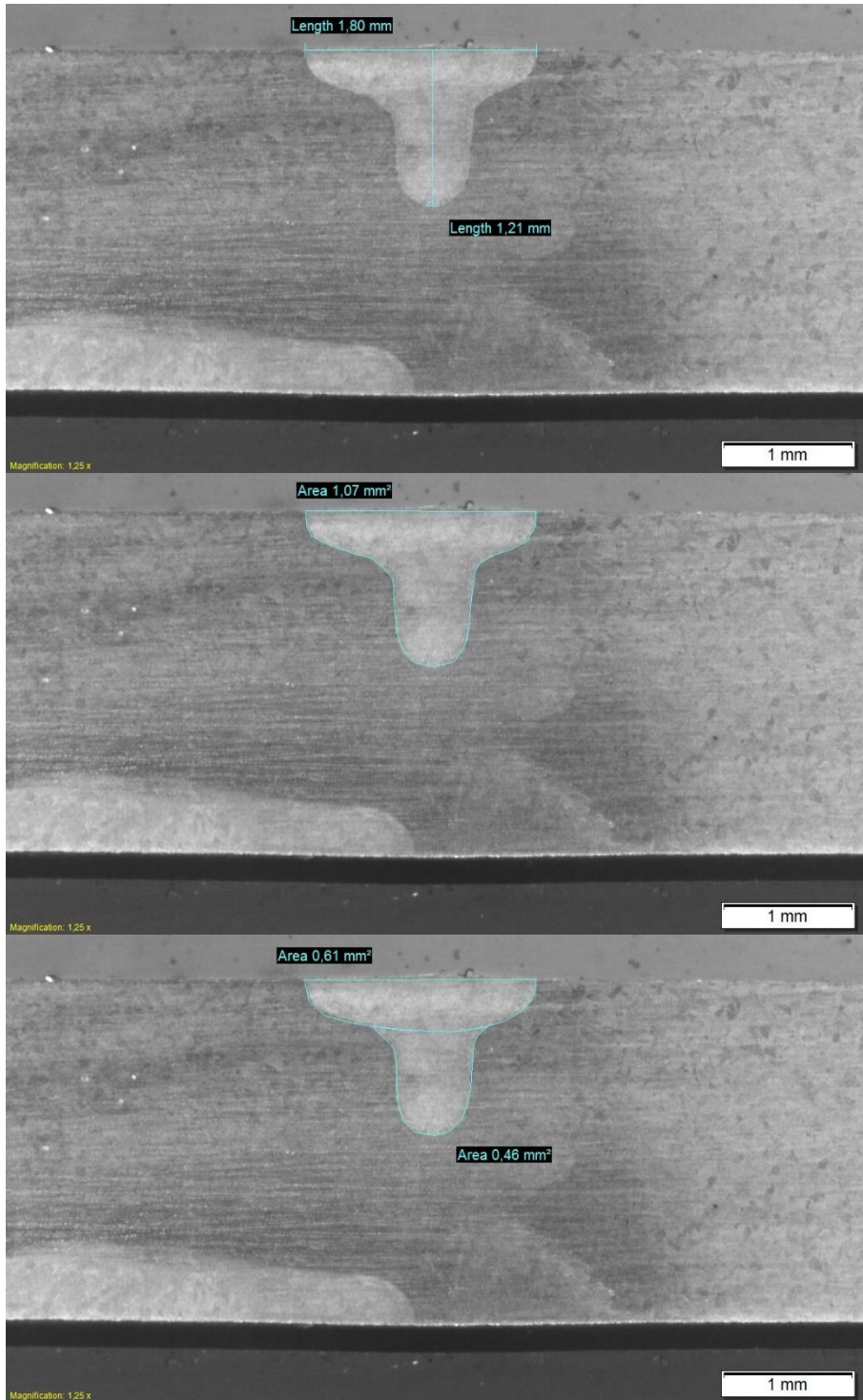
2.60.2.



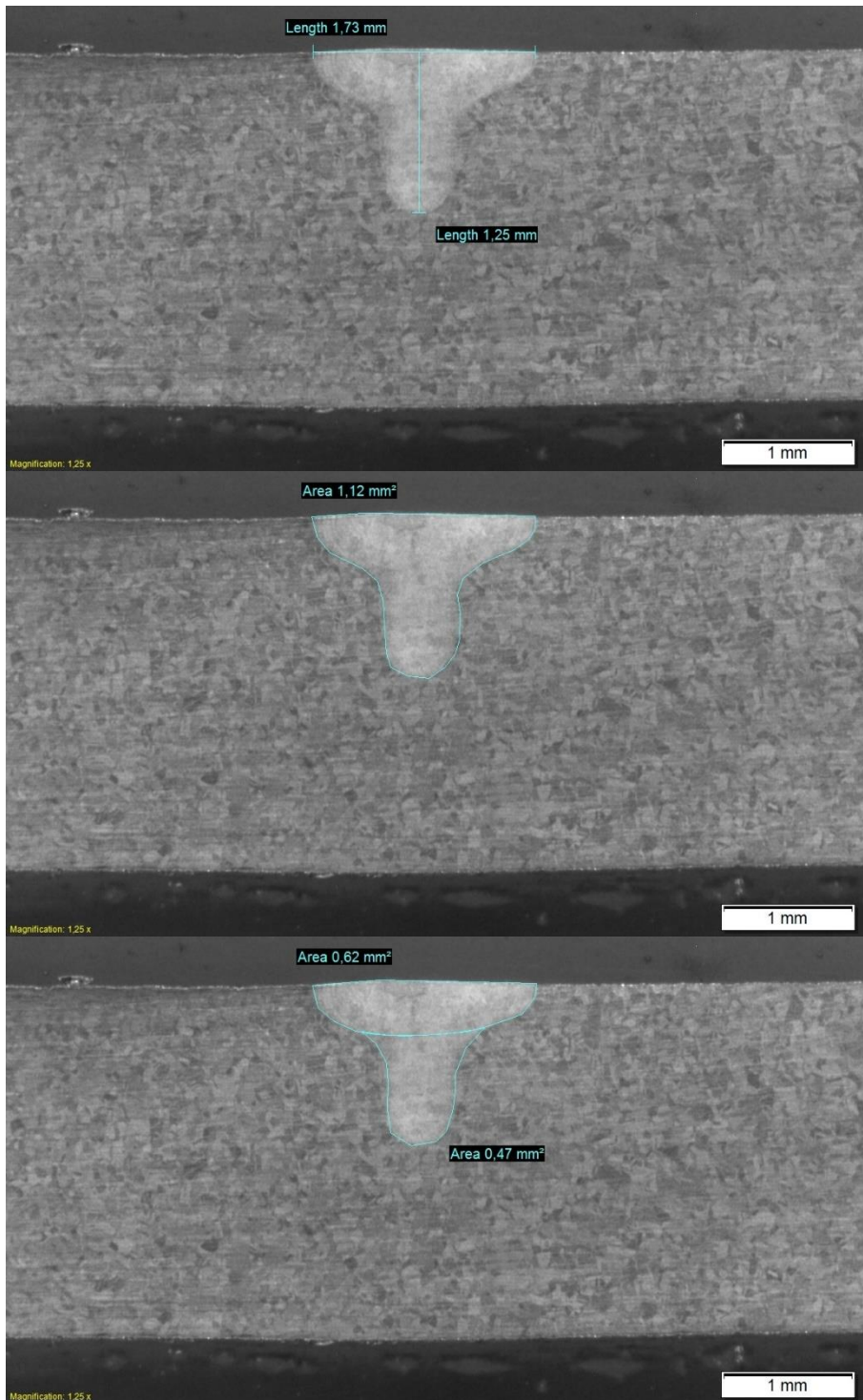
2.50.1.



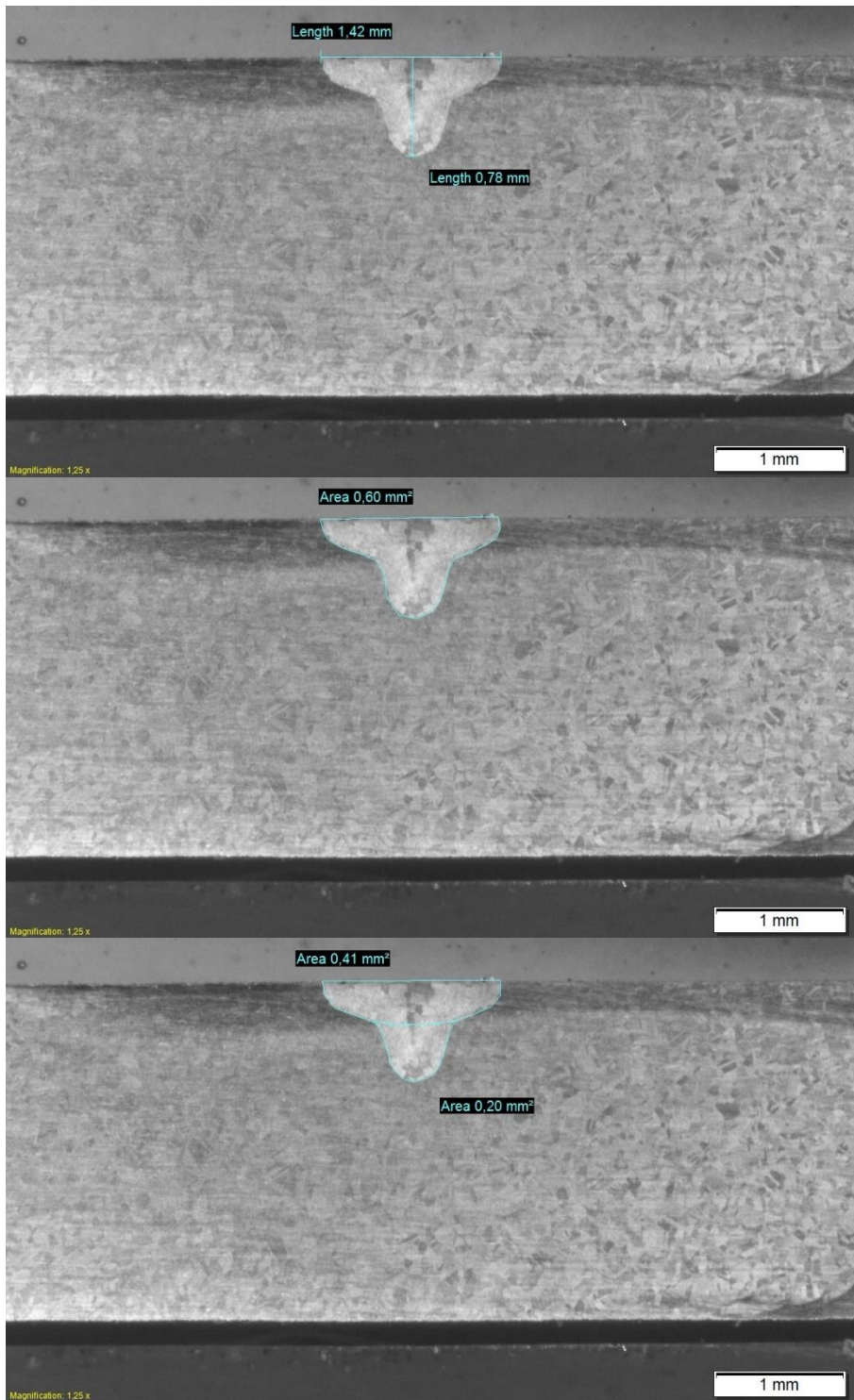
2.50.2.



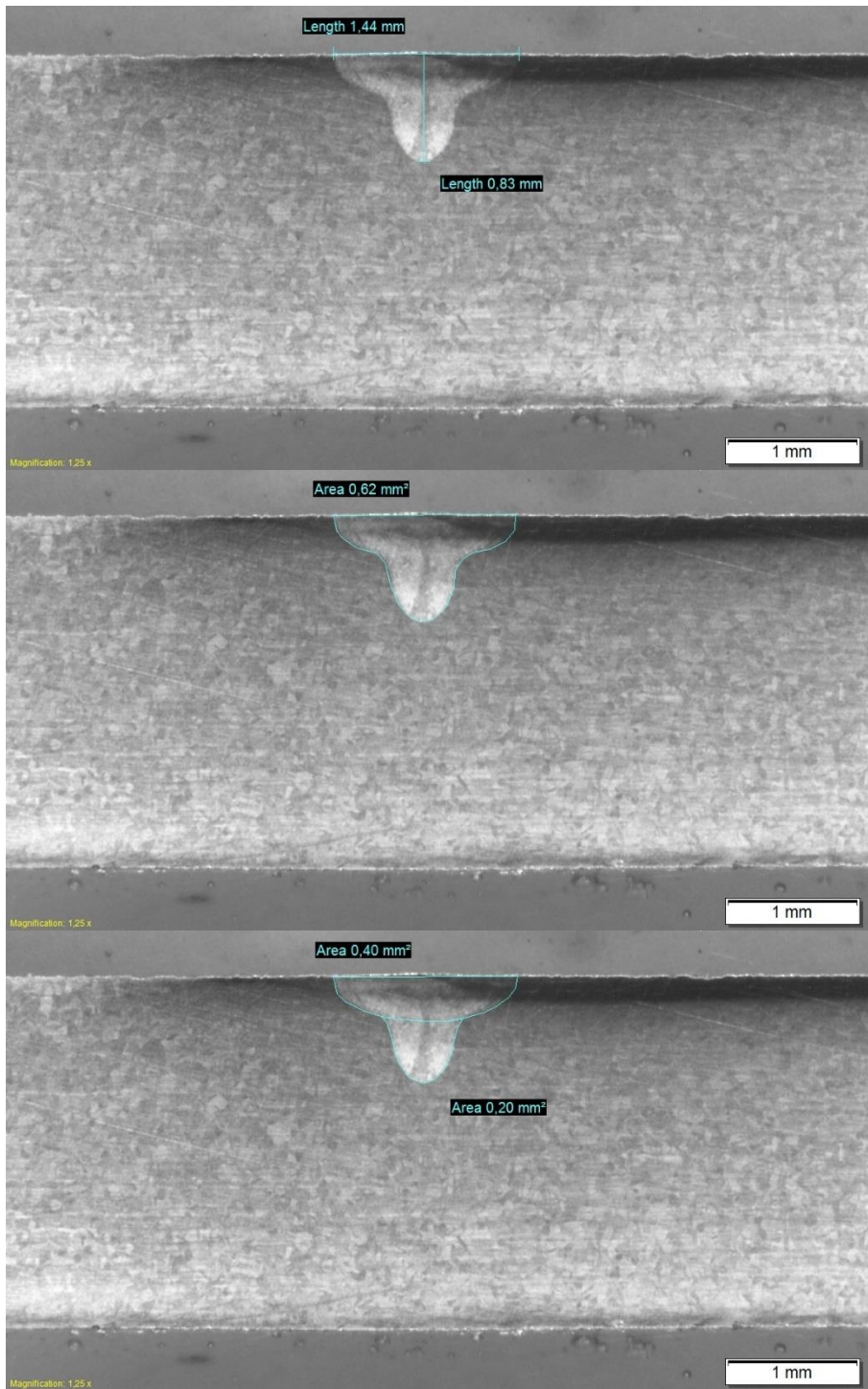
2.40.1.



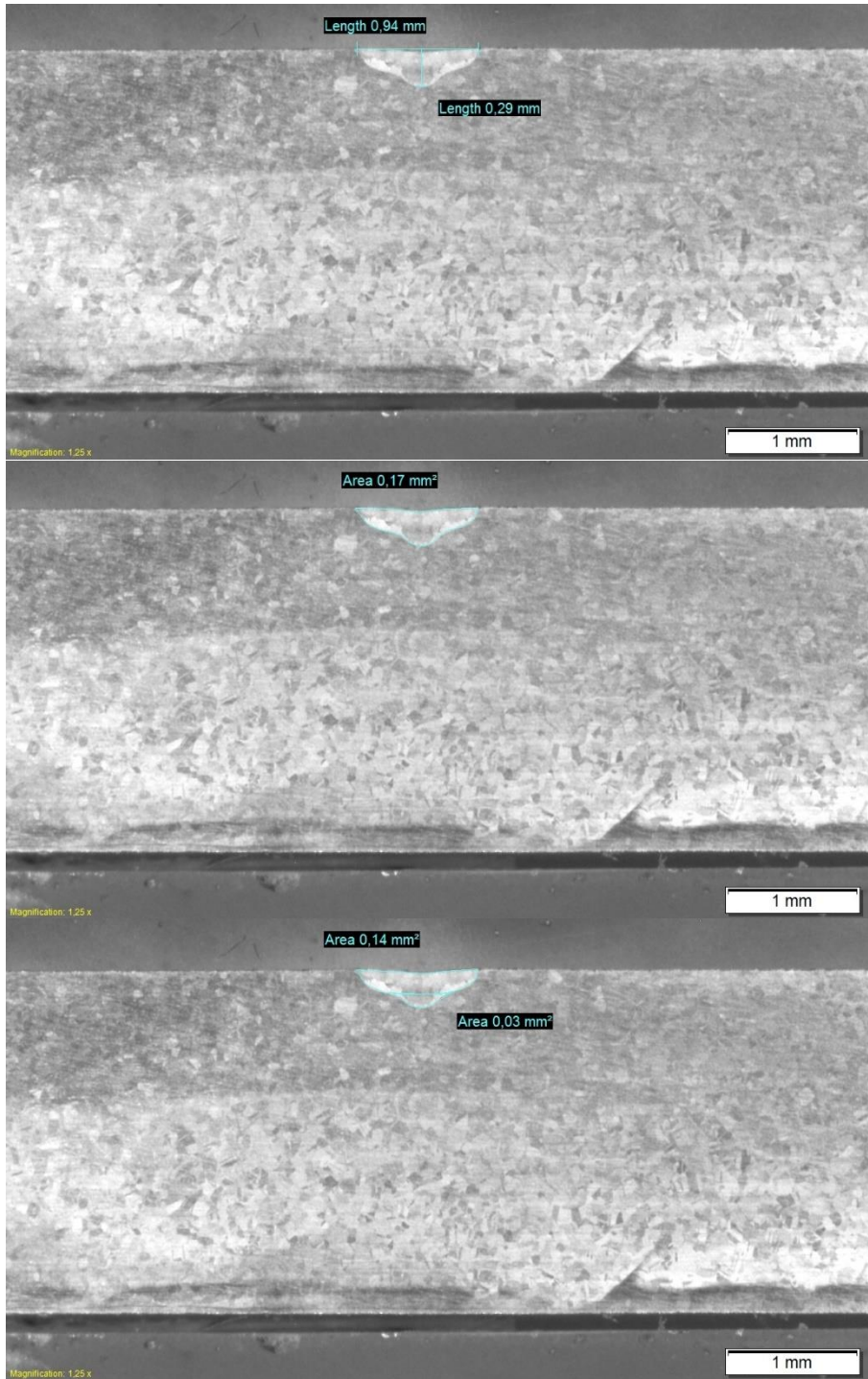
2.40.2.



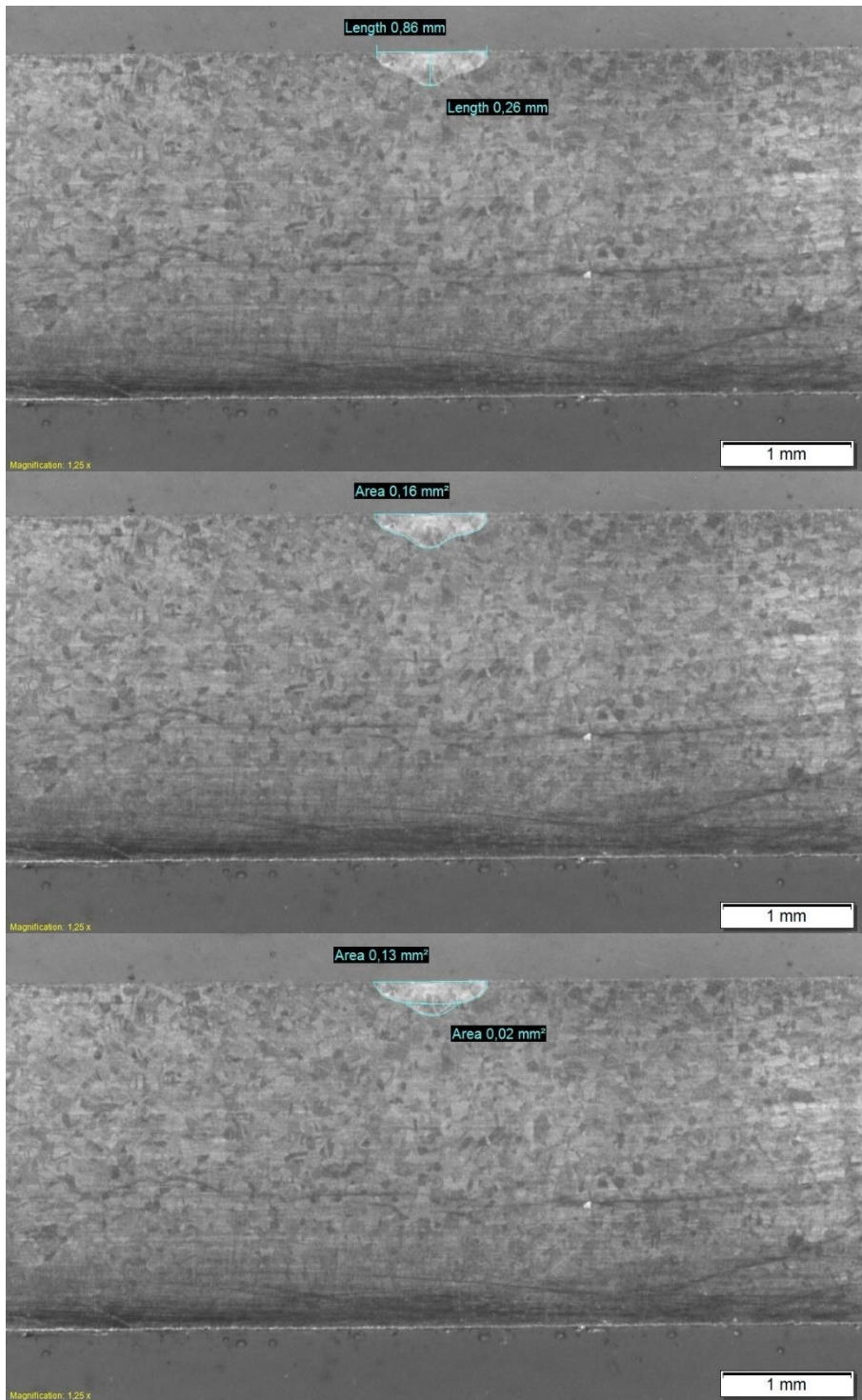
2.30.1.



2.30.2.



2.20.1.



2.20.2.