# ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA

# Anyagtudományi Közlemények

7. évfolyam, 2024. 2. szám



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET Kolozsvár 2024 A folyóirat megjelenését támogatta a Communitas Alapítvány, a Magyar Tudományos Akadémia, a Bethlen Gábor Alapkezelő Zrt. és az EME Műszaki Tudományok Szakosztálya / The publication of this magazine was supported by the Communitas Foundation, by the Hungarian Academy of Sciences, by the Bethlen Gábor Fund and by the TMS – Department of Engineering Sciences.



#### Főszerkesztő / Editor-in-Chief: Bitay Enikő

#### Nemzetközi Tanácsadó testület / International Editorial Advisory Board:

Prof. Biró László Péter, MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest, Magyarország
Prof. emer. B. Nagy János, University of Namur, Namur, Belgium
Prof. Czigány Tibor, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Magyarország
Prof. Diószegi Attila, Jönköping University, Jönköping, Svédország
Dobránszky János, HUN-REN–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Budapest, Magyarország
Prof. Dusza János, Institute of Materials Research of Slovak Academy of Sciences, Kassa, Szlovákia
Prof. Kaptay György, Miskolci Egyetem, Miskolc, Magyarország
Dr. Kolozsváry Zoltán, Plasmaterm Rt., Marosvásárhely, Románia
Prof. Mertinger Valéria, Miskolci Egyetem, Miskolc, Magyarország
Prof. Porkoláb Miklós, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA
Prof. emer. Réti Tamás, Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország
Prof. emer. Roósz András, Miskolci Egyetem, Miskolc, Magyarország
Prof. spenik Sándor, Ungvári Nemzeti Egyetem, Ungvár, Ukrajna
Prof. Zsoldos Ibolya, Széchenyi István Egyetem, Győr, Magyarország

#### Lapszámszerkesztők / Editorial Board:

Dobránszky János, HUN-REN–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Budapest, Magyarország Csavdári Alexandra, Babeș–Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár, Románia Gergely Attila, Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhely, Románia Kovács Tünde, Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország

Kiadó / Publisher: Erdélyi Múzeum-Egyesület
Felelős kiadó / Responsible publisher: Biró Annamária
Olvasószerkesztő / Proofreader: Szenkovics Enikő (magyar), David Speight (English)
Szerkesztőségi titkár / Editorial secretary: Kisfaludi-Bak Zsombor
Borítóterv / Cover: Könczey Elemér
Nyomdai munkálatok / Printed at: F&F International Kft., Gyergyószentmiklós
Copyright © a szerzők / the authors, EME/ TMS 2024
ISSN 2601-1883, ISSN-L 2601-1883
DOI: 10.33923/amt-2024-02
A folyóirat honlapja: https://www.eme.ro/publication-hu/acta-mat/mat-main.htm
The journal website: https://www.eme.ro/publication/acta-mat/mat-main.htm

Az Acta Materialia Transylvanica. Anyagtudományi Közlemények az Erdélyi Múzeum-Egyesület (EME) Műszaki Tudományok Szakosztályának folyóirata, amely az anyagtudományok területéről közöl tudományos közleményeket: szakcikkeket, összefoglalókat (szemléket), tanulmányokat. A folyóirat célja összképet adni kiemelten a Kárpát-medencei kutatási irányokról, tudományos eredményeiről, s ezt széles körben terjeszteni is. A folyóirat az EME felvállalt céljaihoz híven a magyar szaknyelv ápolását is támogatja, így a nyomtatott folyóirat magyar nyelven jelenik meg, mely az Erdélyi digitális adattárban elérhető (https://eda.eme.ro/handle/10598/30356). A széles körű nemzetközi terjesztés érdekében a folyóirat teljes angol nyelvű változatát is közzétesszük.

*Acta Materiala Transylvanica* – Material Sciences Publications – is a journal of the Technical Sciences Department of the Transylvanian Museum Society, publishing scientific papers, issues, reviews and studies in the field of material sciences. Its mission is to provide and disseminate a comprehensive picture focusing on research trends and scientific results in the Carpathian basin. In accordance with the general mission of the Transylvanian Museum Society it aims to support specialized literature in Hungarian. The printed version of the journal is published in Hungarian and is available in the Transylvanian Digital Database (https://eda.eme.ro/handle/ 10598/30356). However, we would like to spread it internationally, therefore the full content of the journal will also be available in English.

# Tartalom / Content

KERÉNYI GÁBOR, RÁCZI VIKTOR GERGELY	59
CNC-marógépen végzett mérés pontosságának meghatározása	
Determining the Accuracy of Measurement on a CNC Milling Machine	
KERTÉSZ OLIVÉR GÁBOR, TÓTH LÁSZLÓ	66
Öntőszerszámok élettartamának növelése mélyhűtéses hőkezeléssel	
Extending the Lifetime of Die Casting Tools with Cryogenic Heat Treatment	
KISS ATTILA, WELTSCH ZOLTÁN	71
A hidrogén-benzin-levegő keverék hatása a belső égésű motorok emissziós értékeire – áttekintés és perspektívák	
Effect of the Hydrogen-Gasoline-Air Mixture on the Emission Values of Internal Combustion Engines. Overview and Perspectives	
KORSÓS KRISZTIÁN, KOVÁCS DORINA	77
A kopási tulajdonságok vizsgálata duplex felületkezelésű 42CrMo4 acélon	
Investigation of Wear Properties on Duplex Surface-treated 42CrMo4 Steel	
KUTI JÁNOS, FÁBIÁN ENIKŐ RÉKA, GÁTI JÓZSEF	82
A vágógázok hatása a termikusan vágott, nagy szilárdságú acélok keménységére	
Effect of Cutting Gases on the Hardness of Thermally Cut High Strenght Steels	
MÉSZÁROS BÉLA, FÁBIÁN ENIKŐ RÉKA	88
A felületmegmunkálás hatása a lézeres felületedzés eredményességére	
The Effect of Surface Machining on he Efficiency of Laser Surface Treatment	
NAGY DÁNIEL, KATULA LEVENTE TAMÁS	94
Acél és alumínium vékony lemezek hegesztőforrasztott kötéseinek vizsgálata	
Examination of the Weld Brazed Joints of Steel and Aluminium Thin Plates	
RÁCZI VIKTOR GERGELY, MIKÓ BALÁZS	100
Lézeres gravírozás CNC-marógépen	
Laser Engraving on a CNC Milling Machine	

# SCHRAMKÓ MÁRTON, STADLER RÓBERT GÁBOR, PINKE PÉTER, KOVÁCS TÜNDE ANNA ......109

Polipropilénlemezek ultrahangos hegesztésének optimalizálása

Optimization of Ultrasonic Welding of Polypropylene Sheets

# VACZKÓ DÁNIEL, WELTSCH ZOLTÁN, KERESZTES RÓBERT ......113

Femtoszekundumos lézerrel végzett felületkezelés hatásai pultrúzióval gyártott üvegszállal erősített kompozitokon

*Effects of Femtosecond Laser Surface Treatment on Glass Fiber Reinforced Composites Produced by Pultrusion* 





# CNC-marógépen végzett mérés pontosságának meghatározása

# Determining the Accuracy of Measurement on a CNC Milling Machine

Kerényi Gábor,<sup>1</sup> Ráczi Viktor Gergely<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Budapest, Magyarország, gaborkerenyi5@gmail.com

<sup>2</sup> Óbudai Egyetem, Anyagok és Technológiák Doktori Iskola. Budapest, Magyarország, raczi.viktor@bgk.uni-obuda.hu

## Abstract

This article describes the difference between coordinate measurement results obtained on a coordinate measuring machine and on a CNC milling machine. It also includes the raw materials used for measurement, the geometry of the workpiece used, the tools used, the principles used to evaluate the measurement and the measurement results. In terms of measurement results, machine measurement has been shown to be more accurate. For flatness, the deviation between the two measurements averaged 4  $\mu$ m, for circularity 4  $\mu$ m, for single-interpolation machining with one axis 3  $\mu$ m, their parallelism 5  $\mu$ m, for machining two ten-slots together 2  $\mu$ m, their parallelism 5  $\mu$ m. The difference between the errors proves that milling and measuring machine measurement do not differ to such an extent as to require investment in a measuring machine, if circumstances do not require it.

Keywords: metrology, coordinate measurement, CNC milling machine, accuracy.

# Összefoglalás

A cikk bemutatja a koordinátamérő gépen és a CNC-marógépen végzett koordinátamérés-eredmények közötti különbséget. Tartalmazza továbbá a méréshez használt alapanyagokat, a felhasznált munkadarab-geometriát, felhasznált eszközöket, a mérés kiértékeléséhez alkalmazott alapelveket és a mérési eredményeket. A mérések eredményét tekintve a mérőgépes mérés pontosabbnak bizonyult. Síklapúság esetében az eltérés a két mérés között átlagosan 4  $\mu$ m, körkörösségi hibánál 4  $\mu$ m, az egyenesinterpolációra egy tengellyel történő megmunkálás esetén 3  $\mu$ m, párhuzamosságuk 5  $\mu$ m, két tengely együttes megmunkálása esetén 2  $\mu$ m, párhuzamosságuk 5  $\mu$ m. A hibák közti eltérés azt bizonyítja, hogy a marógépes és a mérőgépes mérés nem tér el olyan mértékben egymástól, ami megkövetelné egy mérőgépre történő beruházást, ha a körülmények ezt nem teszik indokolttá.

Kulcsszavak: méréstechnika, koordinátamérés, CNC-marógép, pontosság.

# 1. Bevezetés

A gyártás fontos alapelve a méretpontosság és a pontosság elérése valamely eszköz segítségével. Ezek az eszközök lehetnek bármely, a gyártástechnológiában használt gépek, akár emberi erő, hő, elektromosság hajtja, vagy legyen ez a földön való létezésünk óta felfedezett bárminemű energiaforrás. Az egyik legfontosabb probléma, amivel szembe kell néznünk, mindig is a kellő pontosság elérése volt és lesz.

Az ipar 4.0 és az automatizálás világában a méréstechnika is szerepet kapott, ezáltal a mérőgépek gyártásba való integrálásának gyakorisága is megnőtt. Mind a gyártásközi, mind pedig a gyártás utáni mérések nagyban elősegítik a pontosság növelését. Az iparban két rendszer terjedt el: a szerszámgépen végzett mérés (angolul OMM = on-machine measurement) és a koorrdinátamérő gépen végzett mérés (angolul CMM = coordinate machine measurement).

Az OMM egy olyan eljárás, amely lehetővé teszi, hogy a megmunkálógépek mérjék és értékeljék a munkadarabok méreteit és geometriai tulajdonságait közvetlenül a gyártási folyamat után, és gyártásközi mérésekre is használják. Ennek eredményeként az OMM-rendszer segítségével a gyártók valós idejű visszacsatolást kaphatnak a gyártás pontosságáról, és azonnal alkalmazhatnak korrekciókat, amennyiben szükségesek. Ezáltal az OMM hozzájárulhat a gyártási hatékonyság növeléséhez és a minőség javításához.

A CMM kifejezés a koordinátamérő gépen történő mérést jelenti. A koordinátamérő gép egy olyan eszköz, amelyet a gyártási folyamat közben és azt követően használnak a munkadarabok méreteinek és geometriai tulajdonságainak mérésére és ellenőrzésére. A CMM nagy pontosságú, CNC-vezérelt rendszer, amely képes az objektumok X, Y és Z koordinátáinak pontos mérésére. A CMM-ek segítségével a gyártók ellenőrizhetik a munkadarabokat a tervezési specifikációkkal összhangban, és értékelhetik a termelési folyamat pontosságát és minőségét. Azonban egy ilyen mérőgép ára nagyban eltér a fent említett OMM-eljárásban alkalmazott eszközökétől, valamint használatát szigorúbb és kötöttebb szabványok szabályozzák. A mérőgép kezeléséhez továbbá szakember szükséges, akinek alkalmazásával még tovább drágítjuk az alkatrészek gyártását.

Az ipar 4.0 keretein belül lehetőség van arra, hogy automatizált rendszereket alkalmazzunk. A rendszerbe integrált OMM-eszközök esetében fontos megvizsgálni, hogy milyen mértékben megbízható és pontos az adott eszköz, továbbá mérlegelni kell, hogy megéri-e a költségcsökkentést. Az additív gyártásban ezzel szemben előszeretettel alkalmazott az OMM, abban az esetben, ha egy olyan hibrid gép áll rendelkezésre, amely képes additív gyártásra és forgácsolásra egyaránt. Ilyenkor nem célszerű kivenni az alkatrészt a gépből, ezért kell OMM-t alkalmazni, és ezzel tovább csökkentjük a bevitt hibák számát.

A jelen tanulmány célja, hogy összehasonlítsuk az OMM- és a CMM-mérések pontosságát.

A gyártásban és annak ellenőrzésében mindig is kérdés volt, hogy szükség van-e egy drága, de pontos koordinátamérő gépre, vagy megelégszünk a manapság már elterjedt és viszonylag olcsón elérhető, a megmunkálógépbe helyezhető tapintóegységekkel. Az OMM-rendszerek használatánál a cégek nagy többségben a tapintós mérőműszereket csak nullpontbemérés céljából alkalmazzák, valamint kis százalékuk megpróbálja a gyártásba olyan szinten beilleszteni, hogy a megmunkálás után a méretkompenzációs értéket megállapíthassák. Így gyorsabban kapnak pontos értéket a korrekció elvégzéséhez, mintsem a gépkezelők mérését követően. A tanulmány kitér továbbá arra, hogy milyen módon kívánjuk megvizsgálni az adott problémát, és milyen eszközöket használunk fel a gyakorlat végrehajtásához.

A következő fejezetekben tovább taglalom a felhasznált anyagok specifikációit és a felhasznált mérési metódusokat és irányelveket.

#### 2. A méréskiértékelés módszerei

A mérés során használt két gép között a kiértékelési módszer is különbözött. A CNC-gépben használt Renishaw-mérőfejnél nem alkalmaztuk a gyártó által felkínált kiértékelési módokat, és ezért az OMM esetében az Excel programot használtunk. A koordinátamérő gépen történő mérés kiértékelését a Mitutoyo programjával (Geopak v2.3 R10) végeztük el. Mind a két esetben ugyanazokat a pontokat mértük, és az eredményeket is ugyanazon módszerrel számítottuk.

A mérés során kapott pontok kiértékelésére többféle módszer létezik. Mi az iparban is előszeretettel használt illesztési módszert alkalmaztuk, a Gauss-féle legkisebb négyzetek elvét. A módszer alkalmazásához fel kellett használni a következő alapegyenleteket a különböző geometriai elemekre:

Sík:	Ax + By + C = 0	(1)
------	-----------------	-----

Egyenes: Ax + By + Cz + D = 0 (2)

Kör:  $Ax^2 + Ay^2 + Cx + Dy + E = 0$  (3)

ahol *A*, *B*, *C*, *D*, *E* a normálvektor-komponensek és x, y, z az adott pont koordinátái (1), (2), (3) [1].

#### 2.1. A Gauss-féle illesztés

A természetben (a centrális határeloszlási tétel miatt) általában a mérhető mennyiségeknek Gauss-eloszlása van, azaz ha egy mérhető mennyiség várható/elméleti értéke  $\mu$ , akkor a mért értékek eloszlása egy  $\mu$  körüli Gauss-görbe szerinti lesz, melynek szélessége arányos a mérés hibájával.

Azonban ha nem egy mérést végzünk el egymás után megismételhető módon, hanem adatpárokat vizsgálunk, azaz egy mennyiséget egy adott függvény értelmében, akkor egy módosított  $\chi^2$  próbát alkalmazunk (4).

$$\chi^{2} = \sum_{i=1}^{N} \left( \frac{f_{i} - f(x_{i})}{\Delta f_{i}} \right)^{2}$$
(4)

Az elméleti függvény, amit alapul veszünk, az  $f(x_i)$  és  $x_i$  az adott pontban a függvény értéke. A képlettel megvizsgálhatjuk, hogy a megadott elméleti függvény mellett mekkora a valószínűsége, hogy a gyakorlatban is kapott mérési pontok jöjjenek ki. A  $\chi^2$  értéke adja meg a valószínűséget és két paramétere van. Az egyik maga az elméleti függvény, a másik a mérési pontok száma, vagyis a szabadsági fokok száma. Ha a valószínűség értéke 0,1%-nál kisebb, akkor az elmélet nem megfelelő és el lehet vetni, de más esetben alátámasztja a feltevésünket.

Az általunk használt Gauss-illesztés a fordítottja ennek az összefüggésnek. Abban az esetben, ha a függvényt keressük a paraméterek változtatásával, akkor a  $\chi^2$ -nek a minimális értékét keressük (minimalizáljuk), így megkapjuk az optimális paramétereket. Ezt nevezzük illesztésnek [2].

#### 2.2. A Gauss-féle egyenesillesztés

A Gauss-illesztéshez OMM esetében az Excel Solver nevű numerikus algoritmusát használtuk fel. Ahol egyenes mentén helyezkedtek el a pontok, ott egy egyenest illesztettünk Excel segítségével a mért pontokra. Ebben az esetben a minimalizálni kívánt mennyiség összefüggése (5):

$$\chi^{2}(a,b) = \sum_{l=1}^{N} \left( \frac{f_{l} - ax_{l} - b}{\Delta f_{l}} \right)^{2}$$
(5)

A minimalizálás ellenőrzése miatt más módszerrel is kiszámítottuk az optimális paramétereket, az egyenes egyenletét felhasználva, nem numerikus módszerrel. Az egyenes egyenlete (6):

$$Y = ax + b \tag{6}$$

ahol az *a* a meredekség, *b* az a pont, ahol az egyenes metszi az *Y* tengelyt. A meredekség meghatározásához a következő műveletet kell elvégezni; itt a mért pontok *x* és *y* koordinátáival és azok átlagával ( $\bar{x}$ ) kell számolni (7).

$$a = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2}$$
(7)

A *b* értéket az alábbi egyenlettel kell megoldani. Ennek lényege, hogy az  $\bar{x}$  és az  $\bar{y}$  pontjában kell az egyenesnek áthaladnia, ezért az egyenes egyenletébe ezt fogjuk behelyettesíteni. Majd az egyenletet rendezzük, és megkapjuk az *Y* tengely metszetét (8).

$$\bar{y} = a\bar{x} + b \to b = \bar{y} - a\bar{x} \tag{8}$$

Mind a két módszerrel 4 tizedesjegyig kiíratva ugyanazt az eredményt kaptuk, így a kiértékelési módszer helyesnek tekinthető.

A vizsgált geometriai elem egyenességét a mért pontok maximuma és minimuma közti különbséggel határoztuk meg.

#### 2.3. A Gauss-féle körillesztés

Kör esetében is minimalizálást alkalmaztunk, viszont más paramétereket változtattunk és közelítettünk, hogy megkapjuk az optimális értékeket.

A számításhoz 24 mérési pontot használtunk fel, amiket x és y koordinátákkal definiáltunk.

A Pitagorasz-tétel segítségével kiszámoltuk az  $R_i$ (x és y-hoz tartozó sugár) értékét a mérési pontok függvényében (9). A kör közepe  $x_0$  és  $y_0$  indexszel szerepel a számításban, és ezek alapértelmezett értéke 0.

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$$
(9)

Szükségünk volt továbbá a  $\Delta R$  értékére, ami az R névleges értéke és az  $R_i$  különbsége (10).

$$\Delta R = R - R_{\rm i} \tag{10}$$

Valamint szükség volt a  $\Delta R$  összegnégyzetére is. A minimalizálás során az  $x_0, y_0$  és R értékét változtattuk a  $\sum \Delta R$  függvényében. A körkörösséget a  $\Delta R_i$  maximum és minimum különbsége adta.

# 3. Az alkalmazott eszközök

#### 3.1. A NASA-teszt

A megmunkálás pontosságára nagy befolyással bír a munkadarab–gép–készülék–szerszám-(MGKSZ-) rendszer elemei. Az amerikai űrkutatással foglalkozó hivatal (NASA) kidolgozott egy tesztdarabot e rendszer pontosságának a meghatározásához. A tesztdarab olyan felületeket és méreteket tartalmaz, amikkel a gép megmunkálás közbeni pontosságát lehet minősíteni. A tesztdarab alapja egy négyzet, azon egy kör, és a körön egy 45°-kal elforgatott négyzet helyezkedik el. A tesztdarabot az **1. ábra** mutatja.



1. ábra. A NASA tesztdarabja (munkadarab)

Az alulról nézve első szint négyzet alakú, megmunkálásával az asztal hossz- és keresztirányú merőlegessége mérhető ki. A felette elhelyezkedő körrel a körinterpoláció hibáit mérhetjük ki, valamint a körkörösség hibáiból adódóan a tengelyek letapadását, és az irányváltás hibáiról is értéket kapunk. A darab legfelső szintjén kimart, elforgatott négyzet pedig az egyenesinterpoláció hibáit mutatja meg. A teraszok a Z tengely mentén való pozicionálási pontosságot határozzák meg [3, 4].

A munkadarab anyaga Necuron 651 (műfa) volt. ami egy poliuretánhab. Választásunk azért erre az anyagra esett, mert kis forgácsolási erő szükséges a megmunkálásához, így elhanyagolhatóak a forgácsolási paraméterekből adódó hibák. Valamint a hőtágulási együtthatója is kedvezőbb az acélhoz képest; erre azért volt szükség, mert a vizsgált két gép nem légkondicionált térben helyezkedett el, és másik szobában is voltak.

A Necuron 651 főbb tulajdonságai:

- forgácsolási erő ( $kc_{11} = 120 \text{ N/mm}^2$ );
- könnyű forgácskezelés;
- nyomószilárdság (25 N/mm<sup>2</sup>);
- hőtágulási együttható (40·10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>).

# 3.2. A Renishaw-tapintóegység

Mind az OMM- (Renishaw OMP40-2) és CMM-(Renishaw MH20i) mérés során felhasznált tapintóegység kapcsoló típusú. Az iparban a legelterjedtebbek az áruk és egyszerű működési elvük miatt, ezért is ezt választottuk a mérések elvégzéséhez. A gyártó a kinematikai tapintó elnevezést használja. Ellenállás-változáson alapuló mérőeszközök, és a következő elven működnek.

A 2. ábrán látható tapintófejben három, azonos távolságban elhelyezkedő rúd fekszik hat, edzett W-karbidgolyón, amely hat kapcsolási pontot biztosít az áramkörben. Egy elektromos áramkör jön létre ezeken a kapcsolódási pontokon keresztül (2. ábra a). A szerkezet egy rugó által előfeszített helyzetben van, így az áramkör zárt. A rugós terhelés miatt kapcsolódási felületek jönnek létre, amelyeken keresztül áram folyik (2. ábra b). A tapintás pillanatában a munkadarabbal ellentétes irányban fellépő reakcióerő a tapintószerkezetében a kapcsolódási felület csökkenéséhez vezet (2, ábra c), ennek következtében az ellenállás azon a ponton megnő (2. ábra d). A felületre ható, változó erőt az áramkörben észlelhető változásként mérjük. Amikor az ellenállás-változás elér egy határt, akkor a tapintó kimenete jelez, és a PLC-vezérlőnek küld egy "tapint" jelet [5, 6].

A tapintóegység az OMM esetében optikai jelátvitellel kommunikál a vezérlővel, a koordinátamérő gép ezzel szemben közvetlenül kapcsolódik a vezérlővel.

A tapintógömb ipari rubintból készült.

#### 3.3. A HAAS CNC-marógép

Az OMM-méréshez Haas Mini Mill Edu típusú, háromtengelyes megmunkálóközpontot használtunk. Ez a szerszámgép oktatási célra tervezett marógép.A gépválasztás során azt vettük alapul, hogy melyik gépen van kiépítve az OMM-méréshez szükséges, optikai jelátvitelre képes mérőrendszer, valamint hogy a marógép egy újonnan gyártott modell, ezért az esetleges kopási hibák is elhanyagolhatók. A főorsó csak egy pozícióban indexálható. A gépet a 3. ábra mutatja [7].

Az általunk használt tapintóegység a Renishaw OMP40-2, amelynek az ismétlőképessége 1 µm. A tapintó hossza 50 mm [8].

2. ábra. Kapcsoló típusú tapintó működési elve [5]

3. ábra. Haas Mini Mill Edu megmunkálóközpont







# 3.4. A koordinátamérő gép

A koordinátamérő gépet a lehetőségeink szerint választottuk ki. A választás Mitutoyo Crysta-plus M574 típusú mérőgépre esett (4. ábra).

A mérőgép minden tengelyén légcsapággyal van felszerelve, és mérőléccel biztosítja a pontosságot. A munkatér  $500 \times 700 \times 400$  mm. A mérőgép pontossága E = 3,5 + 4,5L/100 µm. Felbontása 0,5 µm [9].

A koordinátamérő gépben Renishaw MH20i típusú tapintóegységet használtunk. A rubintgömb mérete 3 mm volt. A tapintó ismétlőképessége 1,5 μm [10].

#### 3.5. A tapintóegységek vezérlése

A koordinátamérő gép esetében a tapintani kívánt pontokat betanítva hoztuk létre a programot. Az OMM- és a CMM-méréseknél is ugyanazon stratégiát és ráállási hosszt alkalmaztunk, hogy az esetleges pozicionálási pontatlanságok és géphibák ugyanolyan feltételek mellett hassanak a mérésre (pl. irányváltási hiba stb.). A mérések során a munkadarab nullpontja a munkadarab felső síkjában középen helyezkedett el.

A CNC-gép esetében G-kódos programozással hoztuk létre a pontfelhőt. A G-kódokat, amiket használtunk, a Renishaw saját alprogramjai közül hívtuk meg a G65-ös, egyszerű makrohívással [11].

- A Renishaw-alprogramok:
- P9832 tapintó bekapcsolása;
- P9810 védett mozgás;
- P9811 egyszerű felületmérés;
- P9821 egyszerű felület szögmérés.



4. ábra. Mitutoyo Crysta Plus 574 mérőgép

# 4. Eredmények

A mérés során több mérést is végeztünk, melyek átlagát foglaltuk össze a táblázatokban.

#### 4.1. OMM- és CMM-mérési eredmények

Az OMM-mérések kiértékeléséhez az Excel egyik bővítményét, a Solvert alkalmaztuk. A kapott értékek (egyenesség, párhuzamosság) helyességét elemi számításokkal is ellenőriztük.

Síklapúságot mértünk a munkadarab felső síkjában, ennek az értékét az **1. táblázat**ba beírtuk. A mérési pontok száma mind a két esetben 9 db volt (**1. táblázat**).

Paraméter	OMM-érték (mm)	CMM-érték (mm)
Síklapúság	0,0033	0,0070
Max	-0,0159	0,0050
Min	-0,0192	-0,0020

**1. táblázat.** A felső síkon nyert mérési eredmények

Az 5. ábra a 45°-kal elforgatott, négyzet alapú sziget mérési pontjait és a pontokra illesztett regressziós egyenest mutatja, illetve az egyenesek egyenletét írja le. A mérésből látszik, hogy a CNC-gép tengelyei nincsenek még olyan szinten kikopva, hogy azt egy ilyen méréssel ki lehessen mutatni. A tengelyek nagy pontossággal együtt mozognak. Ez látszik a regressziós egyenesek meredekségéből is. A meredekségben az eltérés csak az E3-as egyenesnél éri el az 0,0001 értéket. A többi egyenesnél kevesebb az eltérés. Az egyenes egyenletében a konstans érték eltér a névleges értéktől (40 mm), ennek az az oka, hogy a ma-



5. ábra. A 45°-kal elforgatott négyzet OMM-mérési eredménye

rószerszám, amellyel a megmunkálást végeztük, nem volt pontosan bemérve, így a maró átmérője eltért a korrekciós táblában szereplő értéktől [12].

A 2. táblázat összehasonlítja az OMM- és a CMM-mérési eredményeket.

A körsziget mérésénél 24 mérési pontot vettünk fel egymástól 15°-ra. A mérési eredményekre Gauss-féle illesztési módszert alkalmaztunk. A tapintott átmérő 80 mm volt. A **6. ábra** a körszigetméréshez használt pontfelhőt ábrázolja.

Meghatároztuk a mért kör paramétereit, ahol a  $x_0 y_0$  a kör közepének koordinátái, *R* a kör sugara, *D* a kör átmérője, *Min* a Gauss-körtől való eltérés minimális és *Max* a maximális eltérés, valamint *RND* a körkörösségi hiba (**3. táblázat**).

A négyzet alapú sziget marásánál a tengelyek egyenként, egymástól függetlenül mozogtak, így csak egy tengely mentén történt az elmozdulás (4. táblázat).

A kör alakú sziget felületét is ellenőriztük síklapúság szempontjából. A felületen térnegyedenként 3 pontot vettünk fel, így kaptunk 12 mérési

2. táblázat. A 45°-kal elforgatott sziget mérési eredménye

Egyenesség és párhuzamosság			
Egyenes OMM-érték (mm)		CMM-érték (mm)	
E1 (-X; -Y)	0,0028	0,0060	
E2 (X; Y)	0,0030	0,0043	
E3 (–X; Y)	0,0038	0,0038	
E4 (X; –Y)	0,0027	0,0035	
E1×E2	0,0031	0,0113	
E3×E4	0,0034	0,0069	



6. ábra. A körsziget OMM-mérése 24 ponttal

pontot. A mért pontokra síkot illesztettünk, és a kiértékelést a következő táblázatban ábrázoltuk (5. táblázat).

A legalsó Z szinten is mértünk síklapúságot, 4 pontból. Ebben az esetben is a pontokra illesztett síkot értékeltük ki (6. táblázat).

<ol> <li>táblázat. Körszigetmérési eredményel</li> </ol>	k
----------------------------------------------------------	---

Kör paraméterei	OMM-érték (mm)	CMM-érték (mm)
<i>x</i> <sub>0</sub>	-0,0014	0,0020
<i>y</i> <sub>0</sub>	-0,0035	0,0040
R	39,9772	39,9860
D	79,9544	79,9720
Min	0,0020	-0,0050
Max	-0,0047	0,0050
RND	0,0067	0,0110

4. táblázat. A négyzet alakú sziget mérési eredményei

Egyenesség és párhuzamosság			
Egyenes OMM-érték CMM-ér (mm) (mm		CMM-érték (mm)	
E1 (X+)	0,0030	0,0069	
E2 (X–)	0,0036	0,0068	
E3 (Y+)	0,0050	0,0066	
E4 (Y–)	0,0047	0,0073	
E1×E2	0,0067	0,0207	
E3×E4	0,0058	0,0103	

5. táblázat. A kör alakú sziget felső síkján kapott mérési eredmények

Kör alakú sziget síklapúsági mérése			
Paraméterek	OMM-érték CMM-érték (mm) (mm)		
Síklapúság	0,0047	0,0070	
Max	-8,0034	-8,0040	
Min	-7,9986	-7,9970	

 táblázat. Négyzet alakú sziget felső síkján kapott mérési eredmények

Négyzet alakú sziget síklapúsága			
Paraméterek	OMM-érték CMM-érté (mm) (mm)		
Sík	0,0037	0,0000	
Max	-16,0055	-16,0000	
Min	-16,0018	-16,0000	

# 5. Következtetések

Az adatokat összehasonlítva, a mérőgépen történő koordinátamérés mindig jobban eltér a névleges értéktől (max. 0,004 mm), mint a CNC-gépen mért eredmények (max. 0,003 mm), ami a mérés pontosságától függ. A CMM-mérésnek nagyobb a felbontása a tapintó rubintgömb mérete (3.3. fejezet és 3.4. fejezet) miatt. Mivel az kisebb, ezért érzékenyebb az eltérésekre, és ennek értelmében nagyobb lesz az eltérés is. A CNC esetében az eltérést okozhatja a gép forgó jeladójából következő felbontáskülönbség is: a mérőgép mérőléccel van felszerelve, ezért a nagyobb felbontás szintén a nagyobb érzékenységhez vezet.

A síklapúság és annak maximum és minimum értékeinél megfigyelhető ugyan ez a tendencia, miszerint a CMM-méréseknél nagyobb volt a hiba (7 μm), mint az OMM-méréseknél (4 μm).

A mérési eredmények relevánsak az ipari alkalmazások számára, mivel a koordinátamérések költségei eltérőek az alkalmazott berendezések szerint. Az alkalmazott CNC-gép és az arra szerelt Renishaw OMP40-2 mérőeszközzel végzett mérések gazdaságosabban elvégezhetők megfelelő pontossággal.

## Szakirodalmi hivatkozások

- Hocken R. J., Pereira P. H. (eds.): Coordinate Measuring Machines and Systems. Manufacturing Engineering and Materials Processing, CRC Press, New York, 2011. https://doi.org/10.1201/b11022
- [2] ELTE. Környezetfizika méréskiértékelés (letöltve: 2023. április 30.) https://atomfizika.elte.hu/kornyfizlab/docs/mereskiertekeles.pdf
- [3] Hervay P.: Szerszámgép sajátpontosságának vizsgálata II. NSZFI. (letöltve: 2023. április 30.) https://www.nive.hu/Downloads/Szakkepzesi\_dokumentumok/Bemeneti\_kompetenciak\_meresi\_ertekelesi\_eszkozrendszerenek\_kialakitasa/5\_0275\_010\_101215.pdf

- [4] Barnfather J. D., Goodfellow M. J., Abram T.: Photogrammetric measurement process capability for metrology assisted robotic machining. Measurement, 78. (2016) 29–41. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.09.045
- [5] Renishaw.com: Probing systems for CNC machine tools. (letöltve: 2023. április 30.) https://www.renishaw.com/resourcecentre/ download?data=117597&lang=en&userLanguage=en
- [6] Marcelo Del Guerra, Reginaldo Teixeira Coelho: Development of a low cost Touch Trigger Probe for CNC Lathes. Journal of Materials Processing Technology, 179/1–3. (2006) 117–123. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.093.
- [7] Haas Automation gyártócég weboldala: Haas Mini Mill EDU (letöltve: 2023. május 21.) https://www.haascnc.com/hu/machines/vertical-mills/mini-mills/models/minimill-edu.html
- [8] Renishaw OMP40-2 műszaki dokumentáció (letöltve: 2024. május 21.) https://www.renishaw.com/resourcecentre/en/ details/Data-sheet-OMP40-2--131542?lang=en
- [9] Mitutoyo Mitutoyo Crysta-plus M574 típusú mérőgép adatlap. (letöltve: 2024. május 7.) https://shop.mitutoyo.hu/web/mitutoyo/hu\_HU/ mitutoyo/CRYSTA-APEX%20S900%20Series/ CRYSTA-Apex%20V544%20CNC%20CMM/\$catalogue/mitutoyoData/PR/191-121/index.xhtml
- [10] Renishaw MH20i műszaki dokumentáció (letöltve: 2024. május 21.) https://www.renishaw.com/resourcecentre/ en/details/Data-sheet-MH20-and-MH20i--18222?lang=en
   [11] Renishaw, programogáci, útmutató, (letöltve);
- [11] Renishaw programozási útmutató (letöltve: 2024. május 21.) https://www.haascnc.com/content/dam/haascnc/ en/service/reference/probe/renishaw-inspection-plus-programming-manual---2008.pdf
- [12] Choi J. P., Min B. K., Lee S. J.: Reduction of machining errors of a three-axis machine tool by on-machine measurement and error compensation system. Journal of Materials Processing Technology, 155–156. (2004) 2056–2064.

https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.402





# Öntőszerszámok élettartamának növelése mélyhűtéses hőkezeléssel

# Extending the Lifetime of Die Casting Tools with Cryogenic Heat Treatment

Kertész Olivér Gábor,<sup>1</sup> Tóth László<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Budapest, Magyarország, k.oliver0917@gmail.com
- <sup>2</sup> Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Gépészeti és Technológiai Intézet, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék. Budapest, Magyarország, toth.laszlo@bgk.uni-obuda.hu

#### Abstract

In our work, we aimed to increase the lifespan of tools used in pressure die casting. We conducted experiments on test specimens made from two types of base materials, which were subjected to various heat treatments, followed by material testing on the specimens. In parallel, the final tools were also produced, and parts were manufactured using these tools. Based on the results of the experiments and production, considering both quality and economic aspects, the most suitable base material proved to be the electroslag remelted tool steel, for which we applied cryogenic heat treatment. To enhance the tool lifespan, we performed additional heat treatments on the optimal material, as well as optical microscopy examinations and hardness measurements.

Keywords: tool steel, die, lifetime, cryogenic treatment.

# Összefoglalás

Munkánk során a nyomásos öntés szerszámai élettartamának növelését céloztuk meg. Kísérleteket végeztünk kétféle alapanyagból készült próbatesteken, melyeket különböző hőkezelésnek vetettünk alá, és a próbatesteken anyagvizsgálatokat végeztünk. Ezzel párhuzamosan a szerszámok is elkészültek, amelyekkel alkatrészek gyártását is elvégezték. A kísérletek és gyártás eredményei alapján, minőségi és gazdaságossági szempontokat figyelembe véve, a legmegfelelőbb alapanyagnak az elektrosalakos átolvasztással gyártott szerszámacél bizonyult, amelynél mélyhűtéses hőkezelést alkalmaztunk. Az élettartam-növeléshez legmegfelelőbb anyagon hőkezeléseket végeztünk, továbbá optikai mikroszkópos vizsgálatot és keménységméréseket is.

Kulcsszavak: szerszámacél, öntőszerszám, élettartam, mélyhűtéses hőkezelés.

## 1. Bevezetés

A nyomásos öntést precíz, bonyolult geometriájú öntvények gyártásánál alkalmazzák, amelyek nagyrészt járműipari alkatrészek. A termék megfelelő tisztaságához, homogenitásához és az optimális szövetszerkezet eléréséhez fontos a gondosan kiválasztott alapanyag meghatározása, valamint a megfelelő gyártási technológia megtervezése [1, 2]. Az öntőszerszám-alapanyag minősége függ az acélgyártási technológiától is, amely lehet hagyományosan gyártott, átolvasztott vagy porkohászati úton legyártott alapanyag [3]. Kísérleteink során egy hagyományosan öntött és egy elektrosalakosan átolvasztott anyagminőségen végeztünk vizsgálatokat. Az elektrosalakosan átolvasztott acél abban különbözik a hagyományosan gyártottól, hogy tisztább, szennyezőktől mentes, majdnem zárványmentes és szerkezetileg homogénebb. Az elektrosalakos átolvasztás további jellemzői: nincs makrodúsulás, csekély a mikrodúsulás, kitűnő anyagtulajdonságok [4]. A kiválasztott alapanyagok a melegalakító szerszámacélok családjába tartoznak, melyek három legfontosabb jellemzője: a melegszilárdság, a melegszívósság és a meleg-kopásállóság. E tulajdonságokat a vegyi összetételük és a megfelelő hőkezelés segítségével érhetjük el. A melegalakító szerszámacélokra jellemző, hagyományos hőkezelési eljárás feszültségcsökkentésből, edzésből és megeresztésből áll. Egy, a hagyományostól eltérő eljárás a mélyhűtéses hőkezelés. Vizsgálataink során mind a kétfaita hőkezelést alkalmaztuk. Ezek közül a mélyhűtéses hőkezelés bizonyult a legjobbnak, melyet az elért keménységi értékek és a megfelelő szövetszerkezet is igazol. A mélvhűtés utáni szövetszerkezetben a maradék ausztenit mennyisége minimális. Az öntőszerszámok élettartamának jellemzésére az ún. lövésszám szolgál, ami azt adja meg, hogy az adott szerszám optimális működtetés mellett és beavatkozás nélkül hány lövést képes elviselni. A szakirodalom szerint alumíniumöntvények esetében ez a szám 75 000 és 150 000 lövés közé tehető [1, 2].

# 2. Anyagok, eszközök, berendezések, módszerek

#### 2.1. Anyagválasztás

Tanulmányunk során egy gépkocsi-szimeringház alumíniumöntvény nyomásos öntőszerszámával kísérleteztünk. Ez bonyolult alakú szerszám, különböző falvastagságokkal, emiatt is érzékeny a hőre, a nyomásra és a különböző igénybevételekre. A szerszám anyagválasztása során figyelembe kell vennünk az anyag azon tulajdonságait, amelyek befolyásolják az élettartamát. A cél a kopási folyamat csökkentése, valamint a repedések, szerszámtörések megelőzése. A melegalakító szerszámacélok esetében a fellépő igénybevételek mellett fontos tényező a termikus kifáradással szembeni ellenállás is, amely megelőzi a repedések kialakulását [5].

A szerszámacélok legfontosabb ötvözőeleme a szén, ami nagy hatással van az ötvözet tulajdonságaira. A széntartalom növelésével nő a szilárdság, az edzhetőség, valamint csökken a nyúlás, az alakíthatóság, a hegeszthetőség és a megmunkálhatóság. A szilícium elsősorban dezoxidál, ezenkívül növeli a szilárdságot, a kopásállóságot és a hőállóságot. A mangán dezoxidál, a kénnel mangán-szulfidot képezve gátolja a vöröstörékenységet, csökkenti a kritikus hűtési sebességet és javítja az edzhetőséget. A króm karbidképző ötvöző. A mangánhoz hasonlóan csökkenti a kritikus sebességet, ezáltal növeli az edzhetőséget és az átedzhetőséget. Javítja a melegszilárdságot és a reveállóságot. A molibdén karbidképző ötvöző, amely szintén a kritikus hűtési sebesség csökkentésére szolgál, így az edzhetőséget és az átedzhetőséget is javítja. Elősegíti a finom szemcseképződést, növeli a szilárdságot és a kopásállóságot. A vanádium egy nagyon erős karbidképző, amely javítja a szívósságot, növeli a melegszilárdságot és a megeresztésállóságot [6].

Kezdetben a Böhler W302 anyagminőségű szerszámacélt használtuk. Ez hagyományos öntéssel készült melegalakító szerszámacél. Az ebből az anyagból gyártott szerszám hagyományosan hőkezelve működése során 6000 lövést volt képes produkálni hibamentesen. Ekkor mikrorepedések jelentkeztek a szerszám kritikus keresztmetszetében, melyek felrakóhegesztéssel lettek kijavítva, de az élettartam így is csak minimálisan volt növelhető [7]. Ezek után próbálkoztunk az Uddeholm Unimax anyaggal, amely elektrosalakosan átolvasztott szerszámacél. Ezen acélok vegyi összetételét az 1. táblázat szemlélteti.

#### táblázat. Az alkalmazott szerszámacélok vegyi összetételei

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)
W302	0,39	1,0	0,40	5,20	1,40	0,95
UNIMAX	0,50	0,20	0,50	5,00	2,30	0,50

#### 2.2. Eszközök, berendezések

#### 2.2.1. A hőkezelő kemence

A szerszámok hőkezelése Schmetz típusú vákuumkemencében zajlott (**1. ábra**). Az elektromos vákuumkemence fűtése vákuumban, hűtése nitrogéngázzal, mélyhűtése folyékony nitrogén porlasztásával és annak befecskendezésével történik.



1. ábra. A hőkezelő kemence

#### 2.2.2. Mikroszkópos szövetszerkezet-vizsgálat

Az optikai mikroszkópos szövetszerkezet-vizsgálatot egy Neophot 2 fénymikroszkóppal végeztük el, és a képeket 1000-szeres nagyításban készítettük.

#### 2.2.3. Böhler W302 szerszámacél hőkezelése

A hőkezelést általában csak egy kész méretre való simítás követi, ezért is nagyon fontos a hőkezelési technológia megtervezése, ugyanis ez határozza meg a szerszám végső tulajdonságait. A hőkezelések hevítésekből, hőn tartásokból és hűtésekből állnak. Egy nyomásos öntőszerszám esetében feszültségcsökkentést, edzést és megeresztést alkalmaznak.

#### 2.2.3.1. Feszültségcsökkentő izzítás

Feszültségcsökkentésre azért van szükség, hogy a szerszám gyártása során képződött maradó feszültségeket feloldjuk. Edzés után is képződhetnek termikus belső feszültségek, melyek összeadódhatnak a gyártás során képződő maradó feszültségekkel. E feszültségek összessége mikrorepedések, törések okozói lehetnek. Ezért is fontos a gyártás és a hőkezelés előtti feszültségcsökkentés. A feszültségcsökkentés során a szerszámot lassan hevítettük 2 bar nyomású nitrogén védőgázban 650 °C-ig, ezt követően 2 órát hőn tartottuk, majd lassan szobahőmérsékletre hűtöttük (2. ábra).

#### 2.2.3.2. Edzés

A feszültségcsökkentést az edzés követte, amely során a vákuumban háromlépcsős hevítést alkalmaztunk, hogy a szerkezeti átalakulások előtt kiegyenlítődjön a hőmérséklet a felület és a mag között, a fázisátalakulás okozta feszültségek megelőzésének céljából. Az edzési hőmérsékletet a Böhler W302 anyagból készült szerszám esetében 1020 °C-ra határoztuk meg. Ennek elérése után 15 perces hőn tartás következett a homogén ausztenit kialakulása céljából (**3. ábra**).

#### 2.2.3.3. Megeresztések

A megeresztések célja a keménység-szívósság arány beállítása, a feszültségek csökkentése és a maradék ausztenit mennyiségének csökkentése. A Böhler W302 anyagú szerszám esetében a háromszori, nagy hőmérsékletű megeresztést alkalmaztuk (4. ábra) [8, 9, 10].

#### 2.3. Uddeholm UNIMAX szerszámacél hőkezelése

A mélyhűtéses hőkezelés célja a maradék ausztenit mennyiségének csökkentése, ami a homo-



2. ábra. Feszültségcsökkentő izzítás



3. ábra. Edzés



4. ábra. Megeresztések



 ábra. Az Uddeholm UNIMAX szerszám hőkezelési diagramja

genitás javulásához, szerkezeti stabilitásához, a keménység és a szívósság növeléséhez is vezet, e tényezők javításával a szerszám élettartama is növekszik. A mélyhűtésnek több lehetséges módja van, amelyek közül mi a folyékony nitrogén elpárologtatását és befúvatását alkalmaztuk, melynek lényege, hogy a kemence terének hűtése porlasztott nitrogén befúvatásával zajlik, így a szerszám –150 °C-ra hűthető. Az Uddeholm UNIMAX szerszámacél esetében az edzési hőmérsékletet 1050 °C-ra határoztuk meg, és ezen a hőmérsékleten 20 percig tartottuk hőn [8, 11]. A hőn tartást követően 8 bar-os nitrogéngázzal hűtöttük 50 C°-ig, amely után következett a mélyhűtés folyékony nitrogén segítségével. A nagy hőmérsékletű megeresztéseket 2 bar nyomású nitrogéngázban végeztük el (5. ábra).

# 3. Mérési eredmények

## 3.1. Keménységmérés

A Böhler W302 szerszám hőkezelés utáni keménysége 45 HRC, az Uddeholm UNIMAX acélból készült szerszám hőkezelés utáni keménysége pedig 48 HRC lett, ezen eredményeket a 2. táblázat szemlélteti.

#### 2. táblázat. A keménységek táblázatos formában

Szerszámanyag	Átlagos keménység (HRC)
Böhler W302	45
Uddeholm UNIMAX	48



6. ábra. Böhler W302 szerszámacél szövetszerkezete hagyományos hőkezeléssel

#### 3.2. Mikroszkópos szövetszerkezet-vizsgálat

A szövetszerkezet-vizsgálatot próbatest-előkészítés után optikai mikroszkóppal végeztük, melyeket a **6.** és **7. ábrá**k szemléltetnek. A mikroszkópos képeken megfigyelhető, hogy az átolvasztott és mélyhűtött acélminőség esetében a maradék ausztenit minimalizálódott és a szekunder karbidok mennyisége megnövekedett.

# 4. Következtetés

A nyomásos öntőszerszám élettartama növelhető a megfelelő gyártástechnológiával készült alapanyag kiválasztásával, mint például az elektrosalakosan átolvasztott acél. A szerszám hőkezelése során alkalmazott mélyhűtéssel a maradék ausztenit mennyisége csökkenthető és az optimális szövetszerkezet elérhető, ami szintén a szerszám élettartamának növeléséhez vezet. A szóban forgó gépkocsi szimeringház-öntőszerszám élettartama a jól kiválasztott alapanyaggal és megfelelő hőkezelésekkel gazdaságossági szempontból is kiváló eredményeket képes mutatni. Így a szerszám élettartamát közel 47-szeresére sikerült növelni (3. táblázat).

3. táblázat. Élettartamok táblázatba foglalva

Szerszámanyag	Élettartam (lövésszám)
Böhler W302	6000
Átlag	75 000–150 000
Uddeholm UNIMAX	280 000

A további élettartam-növelési lehetőséget a felületkezelésben látjuk. Egy megfelelő PVD-bevo-



7. ábra. Uddeholm UNIMAX szerszámacél szövetszerkezete mélyhűtéses hőkezeléssel

nat alkalmazásával tovább növelhető a felületi keménység, a kopásállóság, és ezáltal a szerszám élettartama is **[12, 13]**.

#### Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karának a labor használatáért, illetve támogatásáért. Továbbá köszönettel tartozunk még az Erdélyi Múzeum-Egyesületnek, mely a XXIX. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka konferencia keretein belül lehetőséget adott a téma előadására és a cikk megvalósulásítására.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Dúl J.: *Nyomásos öntészeti ismeretek* (digitális tananyag). Miskolci Egyetem, 2009.
- [2] Szabó R.: Öntéstechnikai és hőtechnikai paraméterek hatása az alumínium nyomásos öntvény szilárdsági tulajdonságaira. (Phd-értekezés) Miskolc, 2012.
- [3] Pribulova A., Futas P., Barosová M.: Cleanness and Mechanical Properties of Steel after Remelting under Different Slags by ESR. Key Engineering Materials, 655. (2014) 112–117. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ KEM.635.112
- [4] Halfa H. A., Reda A. M.: Electroslag Remelting of High Technological Steels. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 3. (2015) 444–457. https://doi.org/10.4226/jmmac.2015.20047

https://doi.org/10.4236/jmmce.2015.36047

- [5] Uddeholm AB: Broshure Uddeholm UNIMAX. 2015.
- [6] Hawryluk M., Lachowicz M., Zwierzchowski M., Janik Marta, Gronostajski Z., Filipiak J.: Influence

of the grade of hot work tool steels and its microstructural features on the durability of punches used in the closed die precision forging of valve forgings made of nickel-chrome steel. Wear, 528-529. (2023) 204963.

https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204963

- [7] Böhler Edelstahl GMBH: Broshure W302 Hot Work Tool Steel. 2006.
- [8] Tóth L.: Reduction of retained austenite in tool steels. Műszaki Tudományos Közlemények, 16. (2022) 52–57.

https://doi.org/10.33894/mtk-2022.16.10

- [9] Artinger I.: Szerszámacélok és hőkezelésük. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.
- [10] Szombatfalvy Á.: A hőkezelés technológiája. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1985.
- [11] Mohan L. D.. Renganarayanan S., Kalanidhi A.: Cyrogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels. Cryogenics 41/3. (2000) 149– 155.

https://doi.org/10.1016/S0011-2275(01)00065-0

[12] Dobrzański L. A., Polok M., Adamiak M.: Structure and properties of wear resistance PVD coatings deposited onto X37CrMoV5-1 type hot work steel. Journal of Materials Processing Technology, 164–165. (2005) 843–849.

https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.164

[13] Bitay E., Tóth L., Kovács T. A., Nyikes Z., Gergely A. L.: Experimental Study on the Influence of TiN/ AlTiN PVD Layer on the Surface Characteristics of Hot Work Tool Steel. Open Journal of Applied Sciences 11/19 (2021).

https://doi.org/10.3390/app11199309

- [14] Schwam D., Wallace J. F.: Improving Tool Life for Aluminium Die Casting Dies. 1995.
- [15] Arh B., Podgornik B., Burja J.: Electroslag Remelting: A Process Overview. 2016.





# A hidrogén-benzin-levegő keverék hatása a belső égésű motorok emissziós értékeire – áttekintés és perspektívák

# Effect of the Hydrogen-Gasoline-Air Mixture on the Emission Values of Internal Combustion Engines. Overview and Perspectives

Kiss Attila,<sup>1</sup> Weltsch Zoltán<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék. Kecskemét, Magyarország, kiss.attila@nje.hu

<sup>2</sup> Széchenyi István Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Tanszék; Járműipari Kutatóközpont. Győr, Magyarország, weltsch.zoltan@sze.hu

# Abstract

The urgency to combat climate change and reduce dependence on fossil fuels has spurred intense interest in alternative fuels and advanced propulsion technologies. Among these innovations, hydrogen-gasoline dual fuel mode stands out as a transformative approach with the potential to revolutionize internal combustion engines (ICEs) and paves the way for sustainable mobility. This paper provides a comprehensive analysis of the multifaceted implications of hydrogen-gasoline dual fuel combustion, encompassing engine performance optimization, emissions reduction strategies, combustion dynamics elucidation, technological hurdles to overcome, potential applications across diverse sectors, market perspectives, and future research directions.

Keywords: hydrogen, dual fuel, internal combustion engine.

# Összefoglalás

Az éghajlatváltozás elleni küzdelem és a fosszilis tüzelőanyagoktól való függőség csökkentésének sürgető igénye élénk érdeklődést vált ki az alternatív tüzelőanyagok iránt. Ezen innovációk közül a hidrogén-benzin keverékes üzemmód kiemelkedik mint olyan átalakító megközelítés, amely forradalmasíthatja a belső égésű motorokat, és utat törhet a fenntartható mobilitás felé. Ez a tanulmány átfogó elemzést nyújt a hidrogén-benzin keverékes üzemmód sokrétű következményeiről, beleértve a motor teljesítményének optimalizálását, a kibocsátáscsökkentési stratégiákat, az égésdinamikát, a leküzdendő technológiai akadályokat és a jövőbeli kutatási irányokat.

Kulcsszavak: hidrogén, kettős üzemanyag, belső égésű motor.

# 1. Bevezetés

Egy olyan korszakban, amelyet az éghajlatváltozás kezelésének és a fenntartható fejlődés előmozdításának kényszere határoz meg, egyre kritikusabbá válik a mobilitás és a környezetvédelem metszéspontja. Ennek fényében a hidrogén sokoldalú és ígéretes alternatív üzemanyagként jelenik meg, amely páratlan lehetőségeket kínál a közlekedés szén-dioxid-mentesítésére és a fenntartható mobilitás új korszakának bevezetésére. A hidrogén-benzin-levegő keverékes, azaz a kettős vagy hibrid üzemanyagos üzemmód a hagyomány és az innováció találkozását jelenti, kihasználva mind a hidrogén, mind a benzin erősségeit a motorok hatékonyságának maximalizálása és a károsanyag-kibocsátás minimalizálása érdekében.

# Hidrogén-benzin kettős üzemanyag: a hatékonyság és a teljesítmény maximalizálása

A kettős, másként hibrid üzemanyaggal működő motorok hatékonyságának és teljesítményének optimalizálásában kihasználjuk mind a hidrogén, mind a benzin egyedi tulajdonságait. A kettőstüzelőanyag-égetés lényege a hidrogén és a benzin egyidejű égetése a motor égésterében, olyan tüzelőanyag-keveréket hozva létre, amely javítja az égési jellemzőket [1–4].

#### 2.1. Az égés tökéletesítése

A hidrogén kis gyulladási energiája és széles gyúlékonysági tartománya miatt a benzin-levegő keverékbe keverve égésfokozóként hat. A hidrogén hozzáadása felgyorsítja az égési folyamatot, elősegítve a láng gyorsabb terjedését és az égés rövidebb időtartamát. Ez a katalitikus hatás fokozza az általános égési hatékonyságot, ami jobb termikus hatásfokot és kisebb üzemanyag-fogyasztást eredményez [5, 6].

# 2.2. Hőtani hatásfok javítása

A termikus hatásfok maximalizálása a motor optimális teljesítményének és üzemanyag-takarékosságának eléréséhez kiemelkedő fontosságú. A hidrogén és a benzin kettős tüzelőanyaggal történő égetés számos lehetőséget kínál a termikus hatékonyság növelésére, beleértve a szegény égést, a nagyobb sűrítési arányt és a hulladékhő visszanyerését. Ezen kívül a hidrogén a kopogással szembeni ellenállása által lehetővé teszi a nagyobb sűrítési arányokat, ami tökéletesebb égést és nagyobb termikus hatásfokot eredményez [7, 8].

#### 2.3. Szegény keverékes üzemmód

A hibrid üzemanyagos üzemmódú égés egyik legfontosabb előnye, hogy lehetővé teszi az extraszegény keverékes üzemmódot, amikor a levegő-tüzelőanyag keverék az üzemanyaghoz képest nagyobb arányban tartalmaz levegőt. A hidrogén nagy oktánszáma és gyors égése lehetővé teszi a stabil égést szegény keverékekkel, ami csökkenti az üzemanyag-fogyasztást és a károsanyag-kibocsátást, miközben fenntartja a motor teljesítményét [9, 10].

#### 2.4. A sűrítési arány optimalizálása

A hidrogén hozzáadása az égési folyamathoz nagyobb sűrítési arányt tesz lehetővé a motor kopogásának veszélye nélkül. A hidrogén öngyulladással szembeni ellenállása nagyobb sűrítési arányokat tesz lehetővé, ami jobb termikus hatásfokot és nagyobb teljesítményt eredményez. A sűrítési arányt a hibrid üzemanyagos keverékképzés mellett szélesebb spektrumon lehet optimalizálni, annak függvényében, hogy a mérnökökkel szemben milyen felhasználói elvárásokat támasztanak [4, 9].

## 2.5. Égési stabilitás és lángterjedés

A hidrogén nagy lángsebessége és a gyulladásához szükséges kis gyulladási energia hozzájárul a fokozott égési stabilitáshoz és a lángterjedési jellemzőkhöz. A hidrogén jelenléte az égéstérben felgyorsítja a lángterjedést, biztosítva az egyenletesebb és gyorsabb égést az égési ciklus során. Ez a jobb égési stabilitás egyenletesebb motorüzemet, kisebb vibrációt és jobb vezethetőséget eredményez **[4, 9]**.

#### 2.6. Veszteséghő-hasznosítás

Az égés hatékonyságának optimalizálása mellett a veszteséghő hasznosítására is figyelmet kell fordítani. A hibrid üzemanyag égetésével járó nagy kipufogógáz-hőmérsékletet különböző hőhasznosítási alkalmazások, például kipufogógáz-visszavezetés (EGR), turbófeltöltés vagy hulladékhő-visszanyerő rendszerek számára lehet hasznos. A hulladékhő hatékony felhasználásával és hasznosításával tovább javítható a motor hatékonysága és a jármű általános teljesítménye [5].

# Károsanyagkibocsátás-csökkentési stratégiák

A környezeti fenntarthatóságra való törekvés során az ilyenfajta keverékképzési eljárás számos lehetőséget kínál a károsanyag-kibocsátások mérséklésére és a belső égésű motorok ökológiai lábnyomának csökkentésére. Ez a fejezet konkrét stratégiákat és eljárásokat vizsgál, amelyek célja a kulcsfontosságú szennyező anyagok kezelése és a környezeti rugalmasság előmozdítása a kettőstüzelőanyag-égetéssel [11, 12].

#### 3.1. A hőtani hatásfok javítása

A nitrogén-oxidok  $(NO_x)$  kibocsátása jelentős kihívást jelent a levegő minőségére és az emberi egészségre gyakorolt káros hatásai miatt. A hibrid üzemanyag égetése számos lehetőséget kínál az  $NO_x$  csökkentésére, beleértve az égési hőmérséklet szabályozását, a kipufogógáz-visszavezetést (EGR) és a szelektív katalitikus redukciót (SCR). Az égési paraméterek optimalizálásával a csúcshőmérséklet csökkentése és az EGR alkalmazásával az égési keverék inert gázokkal történő hígítása érdekében minimalizálható az  $NO_x$ -képződés az égés során. Az ammóniaalapú katalizátorokat használó SCR-rendszerek emellett szelektíven nitrogénre és vízre bontják az  $NO_x$ -t, tovább csökkentve ezzel a környezeti hatásokat [2, 5].

#### 3.2. Káros részecskék (PM) csökkentése

A mikrorészecskékből és aeroszolokból álló részecskék (PM) kibocsátása jelentős egészségügyi kockázatot jelent, és hozzájárul a légszennyezéshez. A kombinált tüzelőanyagok elégetése az égés hatékonyságának javításával és a részecskeszűrő eljárások révén csökkentheti a PM-kibocsátást. Az égési stabilitás fokozásával és a tüzelőanyag teljesebb oxidációjának elősegítésével a hibrid tüzelőanyaggal működő motorok kevesebb koromrészecskét termelnek, és kisebb PM-kibocsátást eredményeznek. Emellett a fejlett részecskeszűrők és részecskecsapdák képesek a PM-kibocsátást felfogni és eltávolítani a kipufogógázból, biztosítva a szigorú kibocsátási előírások betartását és a levegőminőség védelmét [1].

# 3.3. A szénhidrogének (HC) és szén-monoxid (CO) csökkentése

A szénhidrogén- (HC-) és szén-monoxid- (CO-) kibocsátás, amely a tökéletlen égési folyamatokból származik, a hibrid tüzelőanyagos motorok kibocsátáscsökkentésének fő célpontjai. A levegő-tüzelőanyag arányok, az égési fázisok és a gyújtás időzítésének optimalizálása javítja az égés tökéletességét, és minimalizálja a HC- és CO-kibocsátást. Ezen kívül a katalizátorok és oxidációs katalizátorok a HC és CO szennyező anyagokat kevésbé káros vegyületekké oxidálják, tovább csökkentve ezzel a környezeti hatásukat [6, 8].

#### 3.4. Az üvegházhatású gázok kibocsátásának mérséklése

A hidrogén használatával csökkenteni tudjuk az üvegházhatású gázokat, hiszen az égése során nem keletkezik olyan üvegházhatású gáz, amit ma már működő utókezelési eljárásokkal ne lehetne semlegesíteni. A hibrid tüzelőanyaggal hajtott motorok általános környezeti hatása az elsődleges tüzelőanyag-forrás szén-dioxid-intenzitásától függ. Az elektrolízisből vagy biomaszszából származó, zöldhidrogén felhasználásával a hibrid motorok szén-dioxid-semleges vagy akár szén-dioxid-negatív kibocsátási üzemállapotot is elérhetnek, mérsékelve ezzel az éghajlatváltozáshoz való hozzájárulásukat. Emellett a szén-dioxidleválasztási és -hasznosítási (CCU) eljárások képesek a kipufogógázból származó CO<sub>2</sub>-t újrafelhasználás céljából megkötni, ami tovább csökkenti az üvegházhatású gázok nettó kibocsátását [13, 14].

#### 3.5. Szabályozási és tanúsítási megfelelőség

A kettős üzemanyaggal működő motorok kibocsátáscsökkentési stratégiáinak kritikus szempontjai a jogszabályi megfelelés biztosítása és a kibocsátási tanúsítvány megszerzése. A kettős üzemanyaggal működő rendszereket úgy kell megtervezni, hogy azok megfeleljenek a szabályozó hatóságok, például a Környezetvédelmi Ügynökség (EPA) és az Európai Unió (EU) által meghatározott szigorú kibocsátási előírásoknak, vagy meghaladják azokat. E szigorú kibocsátási vizsgálatok validálást és tanúsítási folyamatokat foglalnak magukba. Valós vezetési körülmények között kell bizonyítani a kibocsátási határértékeknek való megfelelést. A szabályozási követelmények betartásával és a kibocsátásszabályozás legjobb gyakorlatainak elfogadásával a gyártók biztosíthatják a kettős üzemanyaggal működő motorok környezeti fenntarthatóságát és piaci elfogadottságát [15, 16].

# 4. Jövőbeni kutatási irányok

A következőkben a jövőbeli kutatások konkrét területeit vázolom fel, melyek: az égésoptimalizálás, az infrastruktúra-fejlesztés és az úgynevezett zöldhidrogén előállítása.

#### 4.1. Korszerű égésmodellezés és szimuláció

Az égésmodellezés és szimuláció korszerűségének fejlesztése kulcsfontosságú a kettős tüzelőanyaggal működő égési folyamatok optimalizálásához és az összetett égési jelenségek megértéséhez. A jövőbeni kutatási erőfeszítéseknek olyan nagy pontosságú számítási modellek kidolgozására kell összpontosítaniuk, amelyek pontosan számítják a hidrogén és a benzin égése közötti kölcsönhatásokat, valamint az égéstér geometriájának, az üzemanyag-befecskendezési stratégiáknak és a turbulenciának az égés hatékonyságára és a kibocsátások kialakulására gyakorolt hatását. A számítási modellek és módszerek finomításával a kutatók mélyebb betekintést nyerhetnek a kettős tüzelőanyag égésdinamikájába, és felgyorsíthatják a következő generációs motorok fejlesztését [17, 18].

## 4.2. A hidrogén elérhetőségének biztosítása

A hidrogén elérhetőségének biztosítása alapvető fontosságú a hidrogént energiaforrásként felhasználó eszközök széles körű elterjedésének érdekében. A jövőbeni kutatásoknak a költséghatékony hidrogéngyártási, -tárolási és -elosztási technológiák fejlesztésére, valamint a hidrogén-utántöltési infrastruktúra optimalizálására kell összpontosítaniuk. Az infrastrukturális akadályok elhárításával és az iparági szereplők közötti együttműködés elősegítésével megkönynyíthető a kettős üzemanyaggal működő motorok bevezetése. Mindemellett felgyorsítja a hidrogénalapú gazdaságra való átállást [15].

#### 4.3. A zöldhidrogén előállítása

A hidrogén mint energiaforrás fenntartható elteriedése a zöldhidrogén rendelkezésre állásától függ. Amennyiben a hidrogént fenntartható és környezetbarát energiaforrásként szeretnénk használni, mindenképpen olyan előállítási formát kell választanunk, aminek a környezetre gyakorolt hatása a lehető legalacsonyabb. Ilyen előállítási módok például a megújuló energiaforrásokkal működő elektrolízis, a biomassza elgázosítása és az atomerőművek által termelt elektromos áramának völgyidőszaki hasznosítása. A zöldhidrogén-előállítási technológiák fejlesztésével olyan fenntartható és szén-dioxid-semleges üzemanyag-ellátást biztosíthatunk, ami lehetővé teszi a kis szén-dioxid-kibocsátású, kettős tüzelőanyag-ellátású belső égésű motorok elterjedését [15].

#### 4.4. Fejlett meghajtásmódok

A kettős (hibrid) tüzelőanyag alkalmazásán túl másféle, fejlett meghajtási módok feltárása is alapvető fontosságú a hosszú távú fenntarthatósági célok eléréséhez és a változó közlekedési igények kielégítéséhez. Mivel a személyközlekedés célja, minősége és lokációja is változik, ezért fontos megemlíteni, hogy nem minden esetben a hibridizált belső égésű motorok lesznek a legoptimálisabb energiaforrások. Egyes esetekben az üzemanyagcellák, az elektromos hibridek vagy a tisztán elektromos hajtások lesznek a legkedvezőbbek. Ezekből következik, hogy szükségszerű az összes alternatív hajtáslánc fejlesztése a felhasználóigények sokszínűsége miatt.

# 5. Alkalmazási lehetőségek az egyes szektorokban

#### 5.1. Autóipar

Az autóiparban a kettős üzemanyagos motorüzemmódok forradalmasíthatják a járművek meghajtását, mivel tisztább és hatékonyabb alternatívát kínálnak a hagyományos benzinmotorok helyett. A hibridüzemanyag-ellátású motorok zökkenőmentesen beépíthetők a személygépkocsikba, teherautókba, buszokba és kereskedelmi járművekbe, ami egyenes utat jelent a szén-dioxid-mentesítés és a kibocsátáscsökkentés felé. A hidrogén-benzin keverékkel mint kettős tüzelőanyaggal történő égés kihasználásával az autógyártók jobb üzemanyag-fogyasztású, csökkentett kibocsátású és nagyobb teljesítményű járművek széles választékát kínálhatják a fogyasztóknak, felgyorsítva a fenntartható mobilitás felé való átmenetet.

#### 5.2. Hajózás

A tengeri hajók a kettős üzemanyaggal működő motorok másik ígéretes alkalmazási területét jelentik a hajózási ágazatban. Az ilyen típusú motorok számos tengeri hajót, köztük teherhajókat, kompokat is képesek meghajtani, és a hagyományos tengeri dízelmotoroknál tisztább és fenntarthatóbb alternatívát kínálni. A hidrogén-benzin kettős tüzelőanyaggal történő égetéssel a hajóüzemeltetők csökkenthetik a szén-dioxid-kibocsátásukat. A káros szennyezőanyagok, például a kén-oxidok (SO<sub>x</sub>) és a nitrogén-oxidok (NO<sub>x</sub>) kibocsátását pedig kipufogógáz-utókezeléssel semlegesíthetik. Mindemellett javíthatják az üzemanyag-hatékonyságot és az üzemeltetési rugalmasságot is.

#### 5.3. Energiatermelés

A kettős tüzelőanyaggal működő berendezések képesek átalakítani az energiatermelő rendszereket, mivel hatékony és környezetbarát megoldásokat kínálnak a villamosenergia-termeléshez. Ilyen berendezések a stabil belső égésű motorokkal működő aggregátorok. A kettős tüzelőanyaggal működő aggregátorokat olyan elosztott energiatermelési alkalmazásokban lehet alkalmazni, mint a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP), a mikrohálózatok és a tartalék generátorok, amelyek megbízható és rugalmas villamos- energia-ellátást biztosítanak. A hibrid tüzelőanyagot felhasználó motorral hajtott generátorok alkalmazásával a villamosenergia-termelő létesítmények csökkenthetik az üvegházhatású gázok és a kritériumok szerinti szennyező anyagok kibocsátását, miközben az üzemanyag rugalmasságának és az energiabiztonságnak a javulásából is profitálhatnak [19].

#### 5.4. A különböző ipari felhasználások

A kettős tüzelőanyagos motorok a hagyományos közlekedési és energiatermelési ágazatokon túl az építő, a vasútipari, a mezőgazdasági és bányászati gépeket is működtethetik, ezzel a hagyományos dízelmotorok tisztább és hatékonyabb alternatíváit kínálják. A hidrogént tartalmazó kettős tüzelőanyaggal történő égetés bevezetésével ezek a szektorok is csökkenthetik a kibocsátást, javíthatják az üzemanyag-hatékonyságot és növelhetik a termelékenységet, miközben megfelelnek a szabályozási követelményeknek és a fenntarthatósági céloknak [19].

#### 5.5. Repülés és űrhajózás

A légi és űrhajózási ágazatban a kettős üzemanyaggal működő motorok ígéretesek a kibocsátások csökkentésére és a légi járművek meghajtási rendszerei üzemanyag-hatékonyságának növelésére. A kettős tüzelőanyaggal történő égés koncepciói alkalmazhatók a repülőgép-hajtóművekben, és így utat kínálnak a szén-dioxid-mentesítés és a fenntarthatóság felé a légi közlekedésben. A hidrogénnek a hagyományos repülőgép-üzemanyagokhoz, például a sugárhajtóművekhez való üzemanyagba keverésével a kettős üzemanyaggal működő motorok csökkenthetik az üvegházhatású gázok és szennyező anyagok kibocsátását. Az ilyen hajtóműrendszerek lehetővé teszik a repülőgépek számára a tisztább és fenntarthatóbb légi üzemanyagokra való áttérést [20].

# 6. Következtetés

Összefoglalva, a hidrogén-benzin keverékkel való tüzelési eljárás olyan paradigmaváltást jelent a belső égésű motorok területén, amely környezetebarát, fenntartható átmenetet képez a teljesen fosszilis üzemanyagot mellőző rendszerek és a hagyományos belső égésű motorok között. Kutatásaim és számításaim alapján nem feltétlenül a személyközlekedés területén fog teret nyerni ez az eljárás, sokkal inkább a nagy invesztíciót igényelt munkagépek, mozdonyok és ipari energiatermelő egységek átalakítása lesz kifizetődő.

# Szakirodalmi hivatkozások

 Purayil S. T. P., Mohammad O. Hamdan, Al-Omari S. A. B., Selim M. Y. E., Elnajjar E.: *Review of hydrogen–gasoline SI dual fuel engines: Engine performance and emission*. Energy Reports, 9. (2023) 4554–4566.

https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.054

[2] Vasu Kumar, Dhruv Gupta, Naveen Kumar: Hydrogen use in internal combustion engine: a review. International Journal of Advanced Culture Technology, 3/2. (2015) 87–99.

https://doi.org/10.17703/IJACT.2015.3.2.87

[3] Joonsuk Kim, Kwang Min Chun, Soonho Song, Hong-Kil Baek, Seung Woo Lee: Hydrogen use in internal combustion engine. The effects of hydrogen on the combustion, performance, and emissions of a turbo gasoline direct-injection engine with exhaust gas recirculation. International Journal of Hydrogen Energy, 42/39. (2017) 25074–25087.

https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.097

- [4] Kanga Rui, Zhoua Lei, Huaa Jianxiong, Fenga Dengquan, Weia Haiqiao, Chena Rui: Experimental investigation on combustion characteristics in dual-fuel dual-injection engine. Energy Conversion and Management, 181. (2019) 15–25. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.057
- [5] Velmurugan A., Rajamurugan T. V., Rajaganapathy C., Murugapoopathi S., Kassian T. T. Amesho: Enhancing performance, reducing emissions, and optimizing combustion in compression ignition engines through hydrogen, nitrogen, and EGR addition: An experimental study. International Journal of Hydrogen Energy, 49/2. (2024) 1363–1366. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.159
- [6] Das L. M.: Hydrogen engines: A view of the past and a look into the future. International Journal of Hydrogen Energy, 15/6. (1990) 425–443. https://doi.org/10.1016/0360-3199(90)90200-I
- [7] White C. M., Steeper R. R., Lutz A. E.: Hydrogen engines: The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review. International Journal of Hydrogen Energy, 31/10. (2006) 1292–1305. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.001
- [8] Sun Zehao, Hong Jichao, Zhang Tiezhu, Sun Binbin, Yang Binbin, Lu Liqun, Li Lin, Wu Kaiwei: Hydrogen engine operation strategies: Recent progress, industrialization challenges, and perspectives. International Journal of Hydrogen Energy, 48/1. (2023) 366–392.

https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.256

[9] Ghosh Anupam, Munoz-Munoz Natalia M., Chatelain Karl P., Lacoste Deanna A.: Laminar burning velocity of hydrogen, methane, ethane, ethylene, and propane flames at near-cryogenic temperatures. Applications in Energy and Combustion Science, 12. (2022) 110.

https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100094

[10] Sementa Paolo, Vargas Antolini Jácson Beltrão de, Cinzia Tornatore, Catapano Francesco, Vaglieco Bianca Maria, López Sánchez José Javier: Exploring the potentials of lean-burn hydrogen SI engine compared to methane operation. International Journal of Hydrogen Energy, 47/59. (2022) 25044–25056.

https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.250

- [11] Ugurlu Adem: An emission analysis study of hydrogen powered vehicles. International Journal of Hydrogen Energy, 45/50. (2020) 26522–26535. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.156
- [12] Hosseini Seyed Ehsan, Wahid Mazlan Abdul: Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57. (2016) 850–866. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112

[13] Verhelst Sebastian, Wallner Thomas: Hydrogen-fueled internal combustion engines. Progress in Energy and Combustion Science, 35/6. (2009) 490–527.

https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001

[14] Gao Jianbing, Wang Xiaochen, Song Panpan, Tian Guohong, Ma Chaochen: *Review of the backfire occurrences and control strategies for port hydrogen injection internal combustion engines.* Fuel, 307. (2022) 121553.

https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121553

- [15] Halde Pobitra, Babaie Meisam, Salek Farhad, Haque Nawshad, Savage Russell, Stevanovic Svetlana, Bodisco Timothy A., Zare Ali: Advancements in hydrogen production, storage, distribution and refuelling for a sustainable transport sector: Hydrogen fuel cell vehicles. International Journal of Hydrogen Energy, 55. (2024) 973–1004. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.204
- [16] Marcus Newborough, Graham Cooley: Green hydrogen: water use implications and opportunities. Fuel Cells Bulletin, 2021/12. (2021) 12–15. https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00658-1

[17] Shravan K. Vudumu, Umit O. Koylu: Computational modeling, validation, and utilization for predicting the performance, combustion and emission characteristics of hydrogen IC engines. Energy, 36/1. (2011) 647–655.

https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.051

- [18] Li Hailin, Karim Ghazi A.: Knock in spark ignition hydrogen engines. International Journal of Hydrogen Energy, 29/8. (2004) 859–865. https://doi.org/10.1016/j.jihydene.2003.09.013
- [19] Hwang Joonsik, Maharjan Krisha, Cho HeeJin: A review of hydrogen utilization in power generation and transportation sectors: Achievements and future challenges. International Journal of Hydrogen Energy, 48/74. (2023) 28629–28648. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.024
- [20] Yusaf Talal, Shadate Faisal Mahamude Abu, Kadirgama Kumaran, Ramasamy Devarajan, Farhana Kaniz, Dhahad Hayder A., Talib ABD Rahim Abu: Sustainable hydrogen energy in aviation – A narrative review. International Journal of Hydrogen Energy, 52/C. (2024) 1026–1045. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.086





# A kopási tulajdonságok vizsgálata duplex felületkezelésű 42CrMo4 acélon

# Investigation of Wear Properties on Duplex Surface-treated 42CrMo4 Steel

Korsós Krisztián,<sup>1</sup> Kovács Dorina<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék. Budapest, Magyarország, krisztian.korsos@edu.bme.hu
- <sup>2</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék. Budapest, Magyarország, kovacs.dorina@gpk.bme.hu

## Abstract

During the research, 42CrMo4 steel specimens were compared based on surface properties; after three types of duplex surface treatment, and in the untreated state. The treatments included combinations of surface polishing, chemical passivation, and direct current plasma nitriding. The coefficient of friction, wear resistance, and surface hardness properties were determined during the analysis. Scanning electron microscope and stereomicroscope were used to evaluate the results further. Based on the results, it has been proven that all samples with duplex surface treatment in a different way have unique, significantly different surface properties from the other samples, which raises the possibility of widely modifying the surface properties of materials used in industry through the targeted application of duplex surface treatments.

Keywords: duplex surface treatment, 42CrMo4, direct current plasma nitriding.

# Összefoglalás

Kutatásunk során háromféle duplex felületkezelésen átesett, valamint kezeletlen, referenciaként szolgáló, 42CrMo4 acél próbatesteket hasonlítottunk össze felületi tulajdonságok alapján. A kezelések felületi polírozás, kémiai passziválás, illetve hagyományos plazmanitridálás kombinációiból álltak össze. A vizsgálatok során felületi súrlódási együttható, kopásállóság és felületi keménység tulajdonságok mérése történt valamennyi próbatestre, illetve pásztázó elektron- és sztereomikroszkópos vizsgálatokat végeztünk. A vizsgálati eredmények alapján bebizonyosodott, hogy valamennyi, eltérő módon duplex felületkezelt mintán egyedi, a többi próbatesttől jelentősen eltérő felületi tulajdonságok alakultak ki, melyek az iparban használt anyagok felületi tulajdonságainak széles körben való módosítási lehetőségét vetik fel a duplex felületkezelések célzott alkalmazásával.

Kulcsszavak: duplex felületkezelés, 42CrMo4 acél, plazmanitridálás.

# 1. Bevezetés

A műszaki ipar folyamatos fejlődése és a versenypiaci igények folyamatos növekedése arra ösztönzi az ipari kutató szakembereket, hogy állandóan fejlesszék a meglévő technológiákat, valamint új technológiákat alakítsanak ki, melyek célja a jobb és nagyobb teljesítményű ipari alkatrészek és gépelemek előállítása. Amennyiben a kérdéses alkatrész felületi igénybevételeknek van kitéve, legyen az mechanikai vagy korróziós, kézenfekvő és teljesítménynövelő műszaki megoldás a szerkezet felületének célzott módosítása, különösen olyan alkalmazási területeken, ahol az alkatrész felületét és térfogatát eltérő igénybevételek terhelik.

#### 1.1. Irodalmi áttekintés

Plazmanitridálást számos helyen alkalmaznak acélok kopásállóságának javítására, a felületen keletkező, vas-nitrid tartalmú vegyületi réteg és az alatta található diffúziós zóna miatt [1, 2]. A felület passziválása [3, 4] már bevett módszer a rozsdamentes acélok körében, amellyel a környezeti korrózió okozta foltokat, kezdődő bemaródásokat akadályozza meg a felületen, azonban más acéltípusnál is alkalmazzák, ahogyan a következő kutatásokban kitérünk rá.

Molinari és társai [5] gáz-, valamint plazmanitridálással kezelt, 42CrAlMo7 acél próbatestek kopási tulajdonságait vizsgálták, különös tekintettel a diffúziós és vegyületi réteg eltérő kopási viselkedésére. Kutatásukban megállapították, hogy a diffúziós réteg esetén a súrlódási tulajdonságokra nagyobb hatást gyakorol a réteg mikroszerkezeti homogenitása, mintsem keménysége. A vegyületi réteg tekintetében megállapították, hogy a vékony, porozitásmentes, kétfázisú felületi rétegeknek jelentősen jobbak a súrlódási tulajdonságaik a porózus, egyfázisú vegyületi rétegekkel szemben.

Landek és társai [4] 42CrMo4 anyagú nitridált, valamint nitridált és foszfátozott próbatestek súrlódási és korróziós tulajdonságainak vizsgálatát végezték el. Kutatásuk során megállapították többek között, hogy a plazmanitridáláson átesett próbatesten jelentős javulás figyelhető meg kopásállóság tekintetében, míg a plazmanitridáláson és foszfátozáson átesett próbatesteknek a nitridálthoz viszonyítottan kisebb a kopásállósága és a súrlódási együtthatója.

Flis [6] kutatásában AISI 321 és 431 típusú, plazmanitridált acélok korróziós vizsgálatát és paszsziválását kísérelte meg. Kutatási eredményeként felmutatható, hogy sikeresen hozott létre nitridált próbatesteken mind a korróziós tulajdonságokat, mind feltehetőleg a kopási tulajdonságokat javító foszfát- és oxidrétegeket.

Kapuścińska [7] 42CrMo4 összetételű nitridált, majd foszfátozott acél felületi morfológiáját és korróziós tulajdonságait vizsgálta. Kutatásában összefüggést talált a kialakított vegyületi réteg vastagsága és a foszfátozás során keletkező felületi foszfátkristályok morfológiája között, illetve megállapította a nitridált rétegen létrehozott foszfátréteg jelentős korrózióállóság-növelő hatását.

# 2. Kísérleti módszertan

A következő fejezetben ismertetjük a kutatásban alkalmazott anyagot, a kivitelezett felületkezeléseket és a kísérleti módszereket.

# 2.1. Az alapanyag

A kutatáshoz választott anyag az 1.7225 számjelű acél, vagy az anyagminőségjelével a 42CrMo4 nemesíthető acél az autóiparban széles körben elterjedt, nagy szívósságú és kedvező árú anyag. Az anyagból jellemzően kifáradásnak és felületi kopásnak, súrlódásnak kitett autóipari alkatrészeket, tengelycsuklókat, hajtótengelyeket, fogaskerekeket és fogasléceket készítenek.

Valamennyi felhasználás esetén közös, hogy a felületi tulajdonságok célzott módosítása nagymértékben növelheti az alkalmazási élettartamot.

A kutatásban alkalmazott acél vegyi összetétele az EN 10083-as szabvány alapján a következő összetevőket tartalmazza: 0,38–0,45% C, <0,4% Si, 0,6–0,9% Mn, <0,025% P, <0,035% S, 0,9–1,2% Cr és 0,15–0,3% Mn.

Az alapanyagot ø20 mm-es köracél formában, nemesített állapotban használtuk, vízhűtéses vágógéppel daraboltuk; négy darab, 10 mm vastagságú próbatestet állítottunk elő.

#### 2.2. Az alkalmazott felületkezelések

A próbatestek előállítása során három, egymástól jelentősen eltérő felületmódosító kezelést végeztünk. A rendelkezésre álló három próbatestből kettőt 1 µm szemcsenagyságú polírozópasztával políroztunk, kettőt 40 órán keresztül, 525 °C-on, 1:3 nitrogén-hidrogén összetételű atmoszférában nitridáltunk, valamint két próbatestet tisztítást és 5 percig történő 10%-os HCl-oldatos pácolást követően 75 °C-os foszforsavas közegben foszfátoztunk 30 percen keresztül. A próbatestek a rendelkezésre álló három kezelésből egyenként két különböző felületkezelésen esetek át, oly módon, hogy valamennyi lehetséges kombináció megvalósuljon. A polírozáson át nem esett próbatesteket, a referencia próbatestet is beleértve, a kezeléseket megelőzően, fokozatosan csökkenő szemcseméretű csiszolópapírral, P4000-es szemcseméretig való csiszolással készítettük elő. A kutatáshoz előállított próbatesteket az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. A kutatáshoz előállított próbatestek

Jelölés	1. kezelés	2. kezelés		
R	_	_		
PF	Polírozás	Foszfátozás		
PN	Polírozás	Nitridálás		
NF	Nitridálás	Foszfátozás		

#### 2.3. A vizsgálati módszerek

A próbatestek előállítását követően a mintákat 5 N terhelés mellett, 25 m kopási úton, 2 mm átmérőjű keményfémgolyóval, kenőanyag alkalmazása nélkül koptattuk Anton Paar TRB3 márkájú, pin-on-disc típusú tribométerrel. A koptatás teljes időtartama alatt a próbatesteket jellemző felületi súrlódási együttható értékeket regisztráltuk, majd kiértékeltük. A koptatást követően a kopási nyomvonal Olympus SZX16 típusú sztereomikroszkóppal értékeltük ki. A minták keménységét Lynx típusú Rockwell keménységmérővel határoztuk meg. A felületi vizsgálatokat követően a felület és a kopási nyomvonal kémiai összetételét, valamint a keresztmetszetről készült képeket Zeiss EVO MA 10 típusú pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk.

# 3. Vizsgálati eredmények

A nitridálás során kialakult vegyületi réteg jól látható, fehér, egybefüggő rétegként jelenik meg a felületen (1. ábra). Jelen kutatásunkban a nitridálás vagy foszfátozás technológiájával előállított rétegek vastagságát, összetételét, szerkezetét nem vizsgáltuk, csupán a kezeléskombinációk okozta eltérést a kopási tulajdonságokban.

# 3.1. Keménységmérés

Megállapítottuk, hogy a referenciamintához mérten nagymértékű keménységnövekedés figyelhető meg a PN jelzésű próbatesten. A foszforsavban történő foszfátozást követően keménységcsökkenés figyelhető mind a PF, mind az NF jelzésű mintán az R és PN mintához viszonyítva. Ezeket a keménységmérési eredményeket a 2. ábra szemlélteti.

A foszfátozás utáni keménységcsökkenés elsősorban a kezelést követően kialakult porózus felületnek (3. ábra) tudható be, míg a nitridálás esetén tapasztalt keménységnövekedés a kialakult vegyületi és diffúziós rétegnek köszönhető.

# 3.2. Tribológiai vizsgálat

A tribológiai vizsgálatok eredményét a 4. ábra szemlélteti.

A koptatás során regisztrált súrlódásiegyüttható-értékeknek a megtett kopási útvonal függvényében való ábrázolását követően megállapítható az eltérő súrlódási rendszerek tribológiai viselkedése a mérési tartomány, valamint a mérési paraméterek mellett.



1. ábra. A PN jelölésű mintán megfigyelhető vegyületi réteg



2. ábra. A mintákat jellemző keménységi értékek



3. ábra. A PF mintán kialakult pórusokat tartalmazó felület



4. ábra. A tribológiai vizsgálatok eredményei

Az R jelzésű referenciamintát jellemzi a legnagyobb, statikus súrlódási együttható, melynek értéke 0,56. A súrlódási együttható fokozatos csökkenése a súrlódási rendszer kezdeti bejáratási időszaka, mely során a felületi érdességének simulása és a kontakfelületek kialakulása zajlik. 5 méter súrlódási útvonalat követően a felületi súrlódási együttható 0,54 értéken állandósulni látszik.

A PF jelölésű, polírozáson és foszfátozáson átesett minta esetén tapasztalható a legkisebb statikus súrlódási együttható 0,29 értéken. A kopási vizsgálat során a PF minta súrlódási együtthatójának fokozatos növekedése figyelhető meg, majd az R mintához hasonlóan ugyancsak 5 méteres súrlódási útvonal megtételét követően állandósul 0,47 értéken.

A PN jelölésű polírozáson és plazmanitridáláson átesett minta esetében a mért statikus súrlódási együttható 0,20 értéket vesz fel, ugyanakkor közel 0 és 5 méteres súrlódási távolságon belül nagymértékű növekedés figyelhető meg az értékében. Az 5 és 22 méteres tartományon fokozatos csökkenés figyelhető meg a minta súrlódási együtthatójában. A kezdeti hirtelen értéknövekedés és -csökkenés együttesen jellemzi a minta bejáratási időszakát, amely alatt az 5-től 22 méterig tartó fokozatos csökkenés a nitridált felületen lévő kemény felületi érdességcsúcsok simulását, lekopását jelzi. A minta 22 méteren eléri állandósult kopási együtthatóját 0,59 értéken.

AZ NF jelölésű nitridáláson és foszfátozáson átesett minta esetén kezdeti 0,38 értékű statikus súrlódási együttható értéken követően gyorsan, mindössze 1 méter megtétele után állandósul a minta súrlódási együtthatója 0,50 átlagos értéken. Megállapítható, hogy a plazmanitridálás kisebb statikus súrlódási együtthatót követően nagymértékben növeli a felületi súrlódási együtthatót a bejáratási időszakban, majd állandósult súrlódási viszonyok mellett is növelt értéket eredményez a referenciamintához viszonyítva. A foszfátozás elvégzése alapvetően csökkenti mind a statikus, mind az állandósult súrlódási együtthatót, a referenciamintához mérten. A nitridálás és foszfátozás együttes alkalmazása csökkent hosszúságú bejáratási időtartamot, a referencia- és a plazmanitridáláson átesett mintához viszonyított csökkent állandósult súrlódási együtthatót eredményez. A felületből kiszakadt szemcsék helyén a pórusokat betömték, ami az **5. ábrá**n látható.

#### 3.4. Kopásállósági vizsgálatok

A kopási nyomvonalak szélességének és hoszszának, valamint a koptató golyó átmérőjének ismeretében meghatározásra kerültek a kopási térfogatok. A mérési eredményeket a 6. ábra szemlélteti.

Az eredményekkel kapcsolatban megállapítható, hogy a kopásállóság korrelációt mutat a felületi keménységi értékekkel. A PN jelzésű minta rendelkezik a legkisebb kopási térfogattal, míg keménységcsökkenésével arányos szintű növekedés figyelhető meg az NF minta esetén. Ugyancsak kismértékű növekedés figyelhető meg a foszfátozáson átesett mintán a referenciamintához viszonyítva.

#### 5. Következtetések

A mérési eredmények során megállapítható, hogy a foszfátozás mint másodlagos felületkezelés képes csökkenteni az alapfelület súrlódási



 ábra. A passzivált minták kopási nyomvonalában megtalálható, kopási termékekkel töltött pórusok



6. ábra. A kopásállósági vizsgálatok eredményei

együtthatóját, ugyanakkor ezzel egy időben csökkenti annak kopásállóságát. Megfigyelhető, hogy a nitridált minták passziválását követően a súrlódási együttható értékében a javulás jelentősen nagyobb, mint a keménységi értékben látható csökkenés. A foszfátozással létrehozott felületi rétegek mindkét esetben kiemelkedő súrlódási együtthatót mutattak.

Ugyanakkor a foszfátozást követően romlás figyelhető meg mind a keménységi, mind a kopásállósági tulajdonságok tekintetében. A kutatás eredményeként megállapítható, hogy a plazmanitridálással, majd foszforsavas közegben végzett felületkezeléssel előállított duplex réteg mint súrlódási együttható jelentős javulást mutat a referencia- és csak plazmanitridáláson átesett mintákhoz viszonyítva, szintén ugyancsak javulás figyelhető meg a duplex felületkezelésen átesett minta kopásállóságában a referencia- és a csak foszfátozáson átesett mintákhoz viszonyítva.

#### Köszönetnyilvánítás

Ezt a munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatta az OTKA-PD\_21 142307 támogatási szerződés keretében.

Jelen, a Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Program (DKÖP) által támogatott projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem közös támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatallal kötött támogatási szerződés alapján valósult meg.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- Szilágyiné B. A.: Active Screen Plasma Nitriding - State of the Art. Production Processes and Systems, 7. (2014) 103–114.
- [2] Ni J., Ma H., Wei W, An X, Yu M., Hu J.: Novel Effect of Post-Oxidation on the Comprehensive Performance of Plasma Nitriding Layer. Coatings, 14/1. (2024) 86.

https://doi.org/10.3390/coatings14010086

- [3] Kusmic D., Thanh D., Hruby V.: Corrosion and Wear Resistance of Plasma Nitrided and Duplex Treated 42CrMo4 Steel. Manufacturing Technology, 18. (2018) 259–265. https://doi.org/10.21062/ujep/88.2018/a/1213-2489/MT/18/2/259
- [4] Landek D., Kurtela M., Stojanović I., Jačan J., Jakovljević S.: Corrosion and Micro-Abrasion Properties of an AISI 316L Austenitic Stainless Steel after Low-Temperature Plasma Nitriding. Coatings, 13/11. (2023) 1854.

https://doi.org/10.3390/coatings13111854

[5] Molinari A., Straffelini G., Pellizzari M., Pirovano M.: Wear behaviour of diffusion and compound layers in nitrided steels. Surface Engineering, 489–496. (1998) 6–14.

https://doi.org/10.1179/sur.1998.14.6.489

- [6] Flis J.: Corrosion and passivation of plasma nitrided stainless steels. Surface Engineering, 26. (2010) 103–113.
- [7] Kapuścińska A., Kwiatkowski L., Wach P., Mazurek A., Diduszko R.: Anticorrosion Properties and Morphology of Phosphate Coating Formed on Nitrided Surface of 42CrMo4 Steel. Archives of Metallurgy and Materials, (2020) 65. https://doi.org/ 10.24425/amm.2020.131749





# A vágógázok hatása a termikusan vágott, nagy szilárdságú acélok keménységére

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

Kuti János,<sup>1</sup> Fábián Enikő Réka,<sup>2</sup> Gáti József<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Óbudai Egyetem, Anyagtudományi Doktori Iskola. Budapest, Magyarország, janos.kuti@gmail.com

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

# Abstract

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

Keywords: flame cutting, hardening, high strength steel.

# Összefoglalás

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

Kulcsszavak: lángvágás, keményedés, nagy szilárdságú acél.

# 1. Bevezetés

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

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Budapest, Magyarország, gati.jozsef@bgk.uni-obuda.hu

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

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

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

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

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

#### 2. Kísérleti anyagok és technológiák

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

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

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

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

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

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



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

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

1. táblázat. A minták jelölése a vágási adatokkal

A táblázatban alkalmazott jelölések:

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

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

- Harmadik betű: G = gépi (külön hevítő- és vágóoxigén-adagolás, fejkeveréses égő), K=kézi (egy O<sub>2</sub>-betáplálás).
- Fúvóka = a fúvóka gyári jele, a visszakövethetőséghez.

Éghető gáz = az előmelegítő lánghoz használt gázok.

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

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

Az alkalmazott vágógázok fizikai tulajdonságai különböznek egymástól.

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

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

## 2.1. Mintadarabok vizsgálatra való előkészítése

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

– p<sub>O2v</sub> = a vágóoxigén nyomása.

p<sub>ég</sub> = az éghető gáz nyomása.

V<sub>02h</sub> = az előmelegítő láng oxigénjének térfogatárama.

– V<sub>02v</sub> = a vágóoxigén térfogatárama.

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

#### 2. táblázat. Az éghető gázok fizikai tulajdonságai

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



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

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

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

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

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

## 3. Vizsgálati eredmények

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

#### 3.1. Az XAR® 400 acél vágásakor bekövetkező szövetszerkezeti változások

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

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

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

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



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



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



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



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



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



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

összehasonlítva megállapítható, hogy a keménységi értékek a vágási él közvetlen közelében kedvezőbbek propán égőgáz használata esetén, bár a különbségek nem mondhatók drasztikusnak. A vágási éltől távolabb a keménység majdnem ugyanarra az értékre áll be. Az eltérő keménységi eredmények a vágási él közelében azzal magyarázhatók, hogy az acetilén (448 W/mm<sup>2</sup>) lángteljesítménye sokkal nagyobb, mint a propáné (104,5 W/mm<sup>2</sup>), így a vágási él közelében valószínűbb a szemcsék durvulása, ami a keménységi értékek romlásához vezet.

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

A vágási él közelében az eltérő keménységi eredmények feltehetőleg azzal magyarázhatók, hogy az acetilénnek (448 W/mm<sup>2</sup>) jóval nagyobb a lángteljesítménye a propánéhoz (104,5 W/mm<sup>2</sup>) képest, így a vágási él közelében nagyobb valószínűséggel jön létre szemcsedurvulás, ami a keménységi értékek romlását eredményezi.

#### 3.2. A különböző éghetőgázok hatása az S960Q acél szövetszerkezetére

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

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



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

# 4. Következtetések

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

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

#### Szakirodalmi hivatkozások

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

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

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

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

nttps://doi.org/10.3390/met9111226

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





# A felületmegmunkálás kialakításának hatása a lézeres felületedzés eredményességére

# The Effect of Surface Machining Design on the Efficiency of Laser Surface Treatment

Mészáros Béla,<sup>1</sup> Fábián Enikő Réka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola. Budapest, Magyarország, meszaros.bela@bgk.uni-obuda.hu

<sup>2</sup> Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyag- és Gyártástudományi Intézet, Anyag Technológiai Intézeti Tanszék. Budapest, Magyarország, fabian.reka@bgk.uni-obuda.hu

## Abstract

Laser surface treatment is increasingly used for surface hardening. In this series of experiments we studied the milling groove design effect on laser hardened surfaces at 42CrMo4 steel after corresponding laser parameters. Milled grooves of 0.25 mm, 0.50 mm and 0.75 mm depth were studied. The used diode laser and its set parameters had the same focus distance in all cases; however, the power and travel speed of the laser light were changed according to the previously developed experimental plan. Higher laser heat input resulted in a deeper hardened zone. The 45° V-profile milling, and hence the 45° angles of incidence of the laser beam increased the thickness of the hardened layer. The deepest hardened layers were formed at the highest specific heat input and at the deepest grooves.

Keywords: 42CrMo4 steel, diode laser, laser surface heat treatment, milling groove design.

# Összefoglalás

A lézeres felületkezeléseket egyre szélesebb körben alkalmazzák felületedzésekhez. A kísérletsorozatban három különböző, marással kialakított felület lézeres edzését végeztük 42CrMo4 acélon, diódalézerrel. 0,25 mm, 0,5 mm és 0,75 mm mélységű hornyok környezetét vizsgáltuk. A lézernyaláb fókusztávolsága állandó volt, azonban a lézerteljesítményt és a haladási sebességet az előzetesen kialakított kísérleti terv szerint változtattuk. A nagyobb lézerteljesítmény mélyebb edzett kérget eredményezett. A 45°-os V profil marások, és így a lézernyaláb 45°-os beesési szöge növelte az edződés mélységét. A legmélyebb hornyoknál és a legnagyobb fajlagos hőbevitel mellett alakult ki a legmélyebb edzett kéreg.

Kulcsszavak: 42CrMo4 acél, diódalézer, lézeres felületedzés, marással létrehozott horony.

# 1. Bevezetés

Napjainkban az iparban bevett szokásnak számít a szerkezeti anyagok, tengelyek felületi hőkezelése, a tartós, kopásálló felületek, élek kialakítása érdekében. Ezeknél a szerkezeteknél gyakori igény az olyan anyag alkalmazása, melynek szövetszerkezete magban szívóssá, felülete pedig keménnyé, kopásállóvá alakítható valamilyen felületkezelési eljárással. A nemesíthető acéloknál korábban, egyedi gyártásra a lángedzést alkalmazták, míg nagy sorozatoknál az indukciós edzés volt a járható út vastagabb, kopásálló kéreg kialakítására. A lángedzés nem feltétlen hoz egyenletes vastagságú, felületi edzett kérget. Indukciós edzésnél ismert, hogy a kéregvastagság kialakulása az alkalmazott frekvencia mellett a termék felülete és az induktor közti légréstől is függ. A marással kialakított hornyok jellemzően olyan jellegűek, amelyekre nehéz egyenletes légréssel kialakítani az induktort.

A lézeres felületkezelések alapelve, összehasonlítva bármely hőkezelő eljárással, ugyanaz, valamilyen hőbevitel hatására a szövetszerkezet megváltoztatása úgy, hogy ausztenites állapotba hevítjük a vasalapú fémet, majd gyors hűtés hatására a szövetszerkezet martenzites állapotba kerül [1, 2]. A lézeredzés hatására a felületben kialakuló átedzett réteg vastagsága függ a munkadarab alapanyagától (ötvözők hatása), a munkadarab felületi minőségétől, a felület kialakításától, a munkadarab méretétől (adott hőmenvnyiségre mekkora hőt képes elnyelni a darab), a felületre érkező nyaláb beesési szögétől, a haladási sebességtől, a lézerteljesítmény eloszlásától, a lézerfény hullámhosszától [3, 4]. A szakirodalomban előforduló példák alapján a 10600 nm hullámhosszú CO<sub>2</sub>-lézer reflexiója csiszolt, köszörült anyagoknál jellemzően meghaladja a 90%-ot, de a felület durvábbá tételével akár 20%-ra is csökkenthetiük [5, 6]. Szakirodalmi adatok szerint a felületi érdesség hatása a lézersugárzás abszorpciójára az egy nagyságrenddel kisebb hullámhoszszon működő szilárdtest- és diódalézereknél nem oly jelentős, mint a  $CO_2$ -lézereknél [6, 7], ahogy azt az 1. táblázatban is láthatjuk.

1.	táblázat. Az abszorpciós tényező változása külön-
	böző felületminőségek és lézerek alkal-
	mazásakor [6]

	Abszorpció, %			
Felület	CO <sub>2</sub> -lézer, 10600 nm	Nd:YAG-lézer, 1064 nm		
Polírozott	4	30		
Csiszolt	5–7	33–37		
Esztergált	6–8	36–43		
Homokszórt	21–23	46-51		
Oxidált	60–80	60–80		
Grafitozott	70–80	70–80		

Miközben azt látjuk, hogy az érdesebb felületnek jobb a sugárzásienergia-elnyelése, az olyan hagyományos érdességi értékek, mint Ra, Rq és Rz, nem alkalmasak egy fémfelület abszorpciós képességének közvetlen előrejelzésére. Szakirodalmi adatokból [8] ismerünk olyan példákat, amelyek hasonló érdességi értékek eltérő abszorpciós képességét mutatták. Bergström [9] a sugárzási energia elnyelését kifejező képesség leírására a felületi érdességi értékek helyett az ún. felületi profil átlagos meredekségének használatát javasolta.

Kügler [10] szerint a lézernyaláb energiája elnyelésének a felületi érdességtől való függése változik a különböző anyagminőségeknél. Kügler úgy találta, hogy az ún. hibrid érdességi érték – amely az átlagos négyzetes meredekség, és ezért közel áll Bergström javaslatához – nem alkalmas az abszorpciós képesség előrejelzésére az 1.4301 rozsdamentes acélnál, illetve az 1.2344 anyagminőségű szerszámacélnál, míg rugóacél (1.1248) esetében van némi függés.

Az MSZ EN ISO 683-2:2018 szabvány szerinti 42CrMo4 (1.7225) acélminőséget az iparban széles körben alkalmazzák, mivel kiválóan megmunkálható és jól hőkezelhető. Króm- és molibdéntartalma miatt nagyobb igénybevételű gépalkatrészek jellemző anyaga. Az 50% martenzittartalmú, ideális átedzhető átmérő meghatározásához használt Grossmann-formula szerint [12, 13] belátható, hogy ezen acélminőségnél relatíve jó az átedzhető szelvényátmérő. A 42CrMo4 acél mechanikai tulajdonságai hőkezeléssel széles határok között változtathatók [13]. Dewi és társai [14] hasonló nemesíthető acélokon (38MnSiVS5 és 44MnSiVS6) tanulmányozták a lézernyaláb beesési szögének (10°, 20°, 30°) hatását. Úgy találták, hogy állandó sebességgel, de nagyobb beesési szögekkel pásztázva a felületet, nagyobb az edződési mélység, de ez anyagminőség-függő.

Joggal merül fel a kérdés, hogy miként befolyásolják a marással kialakított hornyok a felületi edzést. Kísérleteinkben arra voltunk kíváncsiak, hogy a 0,25 mm; 0,50 mm; 0,75 mm mélységig elkészített bemunkálások hogyan befolyásolják 42CrMo4, előnemesített állapotú acélnál a lézeres edzést, az edzett réteg vastagságát.

#### 2. Kísérleti anyagok és módszerek

Az alapanyag  $Ø50\times200$  mm hosszú, melegen hengerelt, előnemesített állapotú, 305 HV<sub>2</sub> keménységű, 42CrMo4 minőségű acélrúd (C=0,41%, Si= 0,3%, Mn=0,7%, Cr=1,1%, Mo=0,2%) volt.

Célunk a kísérletek során az volt, hogy megvizsgáljuk a diódalézer által létrehozott edzett felület vastagságát különböző kialakítású felületeken. Előzetes irodalomkutatások alapján döntöttünk a V alakú hornyok kimunkálása mellett. Ezeknek a hornyoknak a kivitelezéséhez olyan szerszámra volt szükségünk, amely megfelelő pontossággal és megfelelő mélységben képes kimunkálni a hőkezelni kívánt felületeinket. A megmunkálást marással végeztük. Az alkalmazott maró egy tömör, 90° főélelhelyezési szögű keményfém szármaróval (MC326-12.0W4L050C-WK40TF) történt, amely a főorsó döntésével és a szerszám kialakításának köszönhetően 90°-os szöget bezáró, V alakú hornyokat hozott létre a felületen. A szerszám főbb paraméterei; z=4 fogszám,  $D=\emptyset 12$  mm. A szerszámon alkalmazott bevonat TiAlN volt. A megmunkálási hornyoknál nem elhanyagolható, hogy a szerszámnak R=0,5 mm sarokrádiusza van, így marás során a "völgyekben" ennek megfelelő rádiuszok alakultak ki. Palástmarás esetén nem elhanyagolható az 50°-os horonyemelkedés-szög sem, de mivel a legnagyobb merülés 0,75 mm, így ennek a paraméternek a forgácsolásra gyakorolt hatása elhanyagolható. Az alkalmazott forgácsolási paraméterek minden horony esetében azonos nagyságúak voltak, azonban meg kell jegyeznünk, hogy a szerszám tengelyvonala felé haladva a vágási sebesség közelít a nulla értékhez, de a hornyok maximálisan 0,75 mm mélysége miatt ebben az esetben elhanyagolható a forgácsolási sebesség változása. A vágósebességet Vc = 32 m/min és az előtolás értékét f = 74 mm/min sebességre választottuk. A forgácsolási paramétereket a katalógusadatok alapján határoztuk meg. A jelen kísérlet legfontosabb eleme a fogásmélység, amely minden esetben megegyezett a hornyok mélységével. Ezek a fogásmélységek és egyben horonymélységek a következők voltak: 0,25; 0,5; 0,75 mm (1. ábra). Fontos kiemelnünk, hogy a marási műveletek során minden esetben MOL Emolin 505 típusú hűtő-kenő folyadékot alkalmaztunk, ezzel is csökkentve a felületekbe bevitt hő mennyiségét és az ezáltal kialakulandó szövetszerkezeti változásokat.

A felületek lézeres hőkezelését a Budai Benefit Kft. lézertechnológiai üzemében hajtottuk végre, 4 kW-os diódalézer alkalmazásával. Kísérleteinket három különböző technológiaiadat-párosítással végeztük. Először 1200 W teljesítménnyel és 8 mm/s sebességgel, majd 1600 W teljesítményt alkalmaztunk, megőrizve a 8 mm/s haladási sebességet. A harmadik kísérletsorozatnál visszatértünk az 1200 W teljesítményhez, de csökkentettük a sebességet 5 mm/s-ra, azaz 150 Ws/mm, 200 Ws/mm és 240 Ws/mm egységnyi hosszra eső energiával hőkezeltük a mintafelületeket. A kísérletekhez 340 mm fókusztávolságot alkalmaztunk. Az egyes mintajelölésekhez tartozó technológiai adatok a 2. táblázatban láthatók.

A felületkezelt mintadarabot hőkezelt felületéhez közel, 10 mm vastagságban, hűtő-kenő folyadék alkalmazásával, szalagfűrésszel lefűrészeltük. Az így kapott lemezekből metallográfiai vizsgálatok érdekében, a hőkezelt pászmák középvonalában (2. ábra), 40 mm szélességű próbatesteket daraboltunk, úgy, hogy a minták tartalmazzanak a hornyolt részből és a sík felületből is értékelhető részt.



1. ábra. Az elkészített felületek vázlata és képe



 ábra. Hőkezelési pászmák a 0,75 mm mély hornyoknál. A nyilak mutatják a metallográfiai csiszolatok helyzetét

2. táblázat. Az egyes mintákhoz tartozó technológiai adatok

Beállított	Minta sorszáma és hozzá tarto- zó bemunkálási mélység				
parameterek	0,25 mm	0,5 mm	0,75 mm		
1,2 kW → 8 mm/s	1	2	3		
1,6 kW $\rightarrow$ 8 mm/s	4	5	6		
1,2 kW → 5 mm/s	7	8	9		

A mintákat hidegbeágyazás után több fokozatban csiszoltuk, políroztuk, majd Nital-2 marószerrel marattuk, hogy láthatóvá tegyük az edzettréteg-vastagságokat. A vizsgálatokat Olympus DSX1000 digitális fénymikroszkóp segítségével végeztük.

A minták keménységét, illetve keménységváltozását a felülettől a próbatest közepe felé Zwick 3212 típusú keménységmérő készüléken mértük, mind a sík felületre merőlegesen, mind a marással kialakított V alakú megmunkálási csúcsokból kiindulva. Ahhoz, hogy keménységváltozást tudjunk mérni, miközben betartjuk a lenyomatok közti előírt távolságokat [15], a terhelést 1,962 N-ra terveztük.

# 3. Vizsgálati eredmények

A metallográfiai csiszolatokon azt tapasztaltuk, hogy még a legkisebb fajlagos energia esetén is a kialakított 45°-os, V alakú marási tartományok mélyebben edződtek, mint a sík felületek. Már a legkisebb egységnyi hosszra eső energiabevitelnél is szembetűnő, hogy azon felületnél, ahol a lézernyaláb beesési szöge a felülettel 45°-os szöget zár be (már az első horonynál is), mélyebb a hőkezelődött réteg, mint a sík felületeknél, ahol a lézernyaláb beesési szöge merőleges a felületre (3. ábra).

A metallográfiai csiszolatokkal összhangban a keménységváltozási görbék azt mutatják, hogy a V hornyok mélységével nőtt az edződött mélység a megmunkált részeken. Vizsgálataink azt mutatták, hogy a fogak teljes mélységében a keménység meghaladta a 700 HV<sub>0.2</sub> keménységet (4. ábra).

Minél mélyebbek voltak a V bemetszésű hornyok, annál vastagabb az edződött réteg a marási csúcsoktól mérve.

Már a keménységek alapján is feltételezhető, hogy a kéreg martenzites, de a nagyobb felbontásban végzett vizsgálatok egyértelműen bizonyítják. A felület közelében, illetve a marással kialakí-



 ábra. 150 Ws/mm-es fajlagos energiával végzett felületi hőkezelés megjelenése metszeten;
 a) 1-es, b) 2-es, c) 3-as minta



 ábra. A keménység változása 150 Ws/mm hosszegységre eső energiával végzett hőkezelés után

tott csúcsoknál tűs martenzit alakult ki (5. ábra).

Növelve a lézernyaláb teljesítményét 1200 W-ról 1600 W-ra, és maradva a 8 mm/s haladási sebességnél, az edzettkéreg-vastagság jelentősen nőtt; ez különösen igaz a hornyok környezetében (6. ábra). Ebben az esetben, amikor a fajlagos energia 200 W s/mm volt, a sík felületnél martenzit 350 µm mélységig volt kimutatható. A marással kialakított hornyolt felületeknél jelentősen megnőtt az edződési mélység.



5. ábra. Az edződött kéreg szövetszerkezete: a) marással kialakított, 0,75 mm-es hornyok,
b) martenzit a megmunkálási csúcsoknál,
c) átmeneti zóna, d) felülettől távoli, edződött kéreg



 ábra. 1600 W-os teljesítménnyel és 8 mm/s sebességgel végzett lézeres hőkezelés hatása a hornyolt felületekre: a) 4-es minta, 0,25 mm-es hornyok, b) 5-ös minta, 0,5 mm-es hornyok, c) 6-os minta, 0,75 mm-es hornyok

A keménységmérési eredmények, összhangban a metallográfiai felvételekkel, azt mutatják, hogy az edződött kéreg vastagsága a 0,25 mm-es, illetve 0,5 mm-es hornyoknál nagyobb volt, mint 850 µm, míg a 0,75 mm mélységű horonynál meghaladta az 1000 µm-t (7. ábra).

Az első mintacsoporthoz viszonyítva, tartva az 1200 W-os lézersugár teljesítményt és csökkentve a haladási sebességet 5 mm/s-re (240 Ws/mm fajlagos energiabevitel), még sík felületnél is elérte a 700 HV<sub>0,2</sub> keménységűre edződött réteg vastagsága az 500  $\mu$ m-t. A hornyok környezetében a martenzitesre edződött kéreg vastagsága a sík felülethez képest nőtt (8. ábra).

A 240 Ws/mm fajlagos energia alkalmazásakor tapasztaltuk a legnagyobb martenzitesre edződött kéregvastagságot, de a marással kialakított hornyoknál ez mindenütt nőtt. 1200 W-os lézeres teljesítmény és 5 mm/s haladási sebesség mellett a 0,25 mm-es hornyoknál az edződött kéreg vastagsa még nem érte el az 1 mm-t, de a 0,5 mmmélységű hornyoknál a martenzites szövetszerkezet még 1100  $\mu$ m mélységben is kimutatható volt, míg a 0,75 mm-es hornyoknál a keménység 1200  $\mu$ m mélységben is meghaladta a 600 HV<sub>0,2</sub>-t (9. ábra).

## 4. Következtetések

A lézeres felületi hőkezelés során az egységnyi felületre bevitt energia növelése növeli az edződési mélységet az előnemesített állapotú 42CrMo4 minőségű acélnál.

A sík felületek lézeres edzésekor a legvékonyabb a 700  $HV_{0,2}$  keménységet meghaladó edződött réteg. A kísérletek során a legnagyobb (240 W s/mm) egységnyi hosszra eső energia mellett érte el a 0,5 mm-t.

A 45°-os megmunkálás, s vele a lézernyaláb 45°-os beesési szöge befolyásolja a pálya mentén bevitt energia értékét, és így az edződés mélységét. Azonos nyalábteljesítmény mellett minél mélyebb volt a horony, annál mélyebben edződött az acél a hornyok környezetében.

A 0,25 mm-es, a 0,5 mm-es és a 0,75 mm-es, marással kialakított, hornyolt felületek teljes mélységben edződtek már 150 W s/mm-es egységnyi hosszra eső energia alkalmazásakor is.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- Bagyinszky Gy., Bitay E.: Felületkezelés. Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2009. 41–45. https://doi.org/10.36242/mtf-05
- [2] Michał K., Jerzy M., Dominika P., Piotr W.: Laser heat treatment of gas-nitrided layer produced on



 ábra. Keménységváltozások 200 Ws/mm egységnyi felületre jutó energiával végzett hőkezelés után



8. ábra. 240 Ws/mm fajlagos energiabevitellel végzett felületi hőkezelés megjelenése metszeten,
a) 7-es minta, 0,25 mm-es hornyok, b) 8-as minta, 0,5 mm-es hornyok c) 9-es minta,
0,75 mm-es hornyok



 ábra. Keménységváltozás 240 Ws/mm fajlagos energiával végzett hőkezelés után

*42CrMo4 steel.* Inzyneria Materralowa, 2015. 301–305.

https://doi.org/10.15199/28.2015.5.21

- [3] Senthil Kumar P., Jegadheesan C., Somasundaram P., Praveen Kumar S., Vivek Anand A., Ajit Pal Singh, Jeyaprakash N.: *Review on laser surface hardening of alloy metals*. Materials Today: Proceedings, (2023) 1–5. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.259
- [4] Kádas G., Fábián E. R.: Komplex felületi hőkezelések hatása szerkezeti acélok tulajdonságaira. XXVI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia, Marosvásárhely, Románia, 2018.
- [5] Bitay E.: Lézeres felületkezelés és modellezés. Erdélyi Múzeum-Egyesület, 2007. https://doi.org/10.36242/mtf-04
- [6] Buza G.: *Lézersugaras technológiák I.* Kézirat. Edutus Főiskola, Tatabánya, 2012.
- [7] https://www.laserfocusworld.com/articles/ 2011/04/laser-marking-how-to-choose-thebest-laser-for-your-marking-application.html (letöltve: 2024. január 25.)
- [8] Seibold G.: Absorption technischer Oberflächen in der Lasermaterialbearbeitung. Herbert Utz Verlag, Munich, Germany, 2006; ISBN 3831606188.

- [9] Bergström D.: The Absorption of Laser Light by Rough Metal Surfaces. Ph.D. Thesis. Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, February 2008.
- [10] Kügler H.: Effects of Short-Term Laser Beam Heating on the Absorptivity of Steel Sheets. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 3/2. (2019) 41.

https://doi.org/10.3390/jmmp302004

- [11] Cserjésné Sutyák Á., Szilágyiné Biró A: Acélok edzhetőségének becslése kémiai összetétel alapján. Gép, 63/11. (2012).
- [12] Artinger I., Csikós G., Krállics Gy., Németh Á., Palotás B.: Fémek és kerámiák technológiája. Egyetemi jegyzet (45035). Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1997.
- [13] MSZ EN ISO 683-2:2018 Hőkezelhető acélok, ötvözött acélok és automataacélok. 2. rész: Ötvözött nemesíthető acélok, 2018.
- [14] Dewi H. S., Volp J., Kaplan A. FH.: Leaser beam absorbtion depending on the angle of incidence on groud surfaces. Laser in manufacturing conference, LIM, 2019. 1–6.
- [15] MSZ EN ISO 6507-1:2024 Fémek. Vickers-keménységmérés. Mérési eljárás, 2024.





# Acél és alumínium vékony lemezek hegesztőforrasztott kötéseinek vizsgálata

# Examination of the Weld Brazed Joints of Steel and Aluminium Thin Plates

Nagy Dániel,<sup>1</sup> Katula Levente Tamás<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék. Budapest, Magyarország, dnagy.shiftd@gmail.com
- <sup>2</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék. Budapest, Magyarország, katula.levente@gpk.bme.hu

# Abstract

In our research, overlapped thin sheets of hot-dip galvanized steel and aluminum alloy were bonded by braze welding, for which we used the CMT (Cold Metal Trasnfer) sub-versions of the welding manufacturer Fronius. The settings of the welding parameters were based on the smallest possible heat input and the thickness of the zinc layer. Cohesive bonds on the aluminum side and adhesive bonds on the coated steel side were subjected to metallographic test and the composition and distribution of the resulting intermetallic compounds were determined with the help of literature sources. Based on visual inspection, aesthetic and well reproduciable joints were formed, but large amounts and sizes of porosites were formed on the cross-sectional grinds due to the burning of the zinc layer. We also deduced the strength characteristics of the joints from the shear-tensile tests and the fracture surfaces. The fracture of the test specimens occurred at the junction of the weld metal and the alumnium base material.

Keywords: braze welding, CMT, mixed joint, intermetallic compound.

# Összefoglalás

Kutatásunkban tűzi horganyzott acél és alumíniumötvözet vékony lemezeket átlapolva kötöttünk össze hegesztőforrasztással, amihez a Fronius hegesztőgépgyártó CMT (Cold Metal Transfer) eljárásváltozatait használtuk. A hegesztési paraméterek beállításait a minél kisebb hőbevitel és a horganyréteg vastagsága mentén választottuk meg. A kötéseket metallográfiai vizsgálatoknak vetettük alá, és szakirodalmi források segítségével meghatároztuk a létrejött intermetallikus vegyületek összetételét és eloszlását. Szemrevételezés alapján esztétikus, jól reprodukálható varratok képződtek, de a keresztmetszeti csiszolatokon nagy mennyiségű és méretű porozitások tárultak fel a horganyréteg leégése miatt. Nyíró-szakító vizsgálatokból és a töretfelületekből a kötés szilárdsági jellemzőire is következtettünk. A próbatestek törése a varratfém és az alumínium alapanyag találkozásánál következett be.

Kulcsszavak: hegesztőforrasztás, CMT, vegyes kötés, intermetallikus vegyület.

# 1. Bevezetés

Az alumínium és acél közötti vegyes kötések megjelenését a járműipar szorgalmazta az ezredforduló után. A tömegcsökkentés és a szerkezeti elemek igénybevételekkel szembeni egyre nagyobb ellenállása olyan megoldásokat követel, amelyekben szükségessé válik különböző ötvözetek kötése. Az iparban leggyakrabban a ragasztást vagy hegesztést részesítik előnyben. Hegesztéskor az acél felülete nem olvad meg, és a hozaganyaggal adhéziós vagy kohéziós kötés létesül, míg az alumínium kis olvadáspontja miatt a hozaganyaggal varratfémet alkot.

Az acél szilárd állapotban is képes kismértékben alumíniumot oldani, ami intermetallikus vegyületek kiválását eredményezi **[1]**. A 6 stabil (FeAl<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, FeAl<sub>3</sub>, FeAl, Fe<sub>3</sub>Al) és a 3 metastabil (Fe<sub>2</sub>Al<sub>9</sub>, Fe<sub>2</sub>Al<sub>7</sub>, FeAl<sub>6</sub>) vegyület többsége rideg, és a korrózióval szembeni ellenállást rontja. A vasnak nagyobb a diffúziós tényezője az alumíniumban **[2]**, ezért nagyobb valószínűséggel alakulnak ki alumínium-túlsúlyos vegyületfázisok, amelyek ridegek. Hegesztéstechnikai szempontból a hozaganyag kémiai összetétele és az impulzusos eljárásváltozatok alkalmazása is befolyásolhatja a rideg fázisok megjelenését **[1, 2]**.

Mivel nem lehet megakadályozni a rideg vegyületfázisok létrejöttét, legtöbbször cinkbevonatos, tűzihorganyzott acéllemezt használnak, ami javítja a varrat korróziós tulajdonságait [1], és kötést képezve az alumíniummal, hátráltatja a vas-alumínium vegyületek kialakulását [1], továbbá hőelvonó hatást fejt ki, ami kedvezőbb, kis hőbevitelű varratot eredményez [3]. Ezzel szemben a kis forráspontja miatt párolgás esetén porozitást és vas-cink rideg vegyületeket képezhet a varratban [1, 3]. Jelen kutatásunkban a varratokban megjelenő intermetallikus vegyületek meghatározását, elhelyezkedését és alakját vizsgáltuk. Vékony lemezek összekötése általában átlapolással történik, ezért releváns a nyíró-szakító vizsgálatnak való alávetés és a töretfelületek vizsgálata. A kutatás részeként összefüggést kerestünk a szilárdsági jellemzők és az áramforrás beállításai között.

## 2. Anyagok és kísérleti módszerek

#### 2.1. Felhasznált anyagok

Az iparban gyakran alkalmazott AlSi1MgMn és tűzihorganyzott S355J2 lemezek 0,8 mm, 1 mm és 2 mm vastag próbadarabjaiból 23 varratot hegesztettünk, 100 mm hosszan, AlSi<sub>5</sub> hozaganyaggal, az 1. ábra szerinti összeállításban. Az acéllemezek három eltérő vastagságú horganybevonattal készültek – 24 µm (0,8 mm), 17 µm (1 mm), 123 µm (2 mm) –, melynek a kötésekre gyakorolt hatását szintén vizsgáltuk.

Alumínium és acél vegyes kötéséhez gyakran alkalmaznak nemvasfém hozaganyagokat, például CuSi<sub>3</sub>, AlSi<sub>5</sub>, AlSi<sub>12</sub> huzalt. A felsorolt hozaganyagok olvadáspontjának legalább az acél olvadáspontja alatt kell lennie, illetve jó nedvesítőképességűnek kell lennie.



1. ábra. Acél és alumínium átlapolt lemezek az égő pozíciójának felvétele közben

#### 2.2. A hegesztőforrasztás eljárásváltozatainak jellemzői

A kutatás megvalósításához a CMT Universal és CMT Cycle Step (CMT CS) eljárásváltozatokat használtuk, amelyeket a vegyes kötések, a vékony, bevont lemezek és a jó hővezető anyagok hegesztésére fejlesztettek ki. Ezeket az eljárásokat kis hőbevitel, stabil villamos ív és ezáltal kontrollált cseppleválás jellemzi. Egy hegesztési ciklusban a huzalelektróda előtolásával villamos ív gyullad, majd rövidre zárás jelensége lép fel, és a huzalt egy beépített rendszer visszahúzza. A huzal ellentétes irányú mozgása a villamos ív által megolvasztott huzalvéget leválasztja, és a megolvadt elektródavég az ömledékbe jutva megszilárdul, majd a folyamat ismétlődik. A rövidzárlat létrejöttekor ad a rendszer utasítást a huzal visszahúzására, tehát a vezérlés időben változó frekvenciával működteti az előretolást és a visszahúzást [4].

A rövidzárlatos anyagátviteli mód hagyományos cseppleválasztásával ellentétben ez az eljárásváltozat detektálja a rövidzárlatot, és megakadályozza a nagy áramfelvételt, ezáltal biztosítva a fröcskölésmentes anyagátvitelt és a nagy térfogatú varratfém kialakulását. A CMT CS az Universal bővítése, amely a hegesztési ciklusok száma és a köztük lévő üres ciklusok váltakozásával képes állandó haladási sebesség mellett "pikkelyezett" varratfelületet létrehozni. A felhasználó által megadott számú, a CMT Universal esetében bemutatott ciklust végez, majd adott idejű szünetet tartva újrakezdi a folyamatot, így a bevitt hőmennyiség a CMT Universalhoz képest még kisebb **[4, 5]**.

# 2.3. Metallográfia és próbatestek

## 2.3.1. Mikroszkópia

A metallográfiai kiértékelést Olympus PMG-3 fémmikroszkóppal és Zeiss EVO MA 10 pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) végeztük [6]. Emellett a hegesztés vonalában a kémiai összetétel meghatározásához vonal menti és pontbéli energiadiszperzív spektroszkópiát (EDS) is alkalmaztunk [7].

# 2.3.2. Szakítópróbatestek

Az átlapolt kötések szilárdságát szabványos nyíró-szakító próbatestek [8] vizsgálatával határoztuk meg MTS 810 szakítógépen. Az átlapolás és a lemezek kihézagolása nélküli erőbevezetés külpontos húzó-, nyíró- és hajlítófeszültségeket is okozott a lemezekben. A törés helye szerint bekövetkezhet a tönkremenetel a hőhatásövezetben, a varratfémben és az alapanyagban, vagy elválhat a varratfém és az acéllemez találkozásánál a varrat, ahogyan azt a 2. ábra mutatja. A kutatásban a szakítóvizsgálat összehasonlító vizsgálatként



 ábra. Húzó-nyíró próbatestek tönkremeneteli módjai átlapolt kötések esetén

szolgált.

# 3. Eredmények és értékelésük

A 23 darab kötésből 18-at értékeltünk a kutatásban. A haladási sebesség és a hőbevitel változtatásával 30 cm/min és 60 cm/min között találtuk meg azt a sebességtartományt, amelynél a horganyréteg leégése nem okoz túlságosan porózus varratot és fröcskölést. Az ívhosszkorrekció értékének méteres beállítása segítette az ívelhajlás minimalizálását, amit az alumínium jobb vezetőképessége okozott.

# 3.1. Általános varratjellemzők

Behatóbb véleményezéshez metallográfiai csiszolatokat készítettünk. A varratgyökök többségénél hiányos átolvadás jött létre a varrat teljes hossza mentén (**3. ábra**).

Ez a hézagmentesen összeszorított lemezek felé távozni akaró cinkgázokból eredhetett [9]. A nagyszámú és nagy méretű porozitás miatt az alumíniumra vonatkozó szabvány [10] D minőségi szintjén sem felelne meg egyik varrat sem, mert a különálló gázporozitások átmérője számos esetben nagyobb 600 μm-nél, és a porozitás százalékos aránya 2,5%-nál nagyobb felülethányadot tesz ki a varratokban.

# 3.2. Intermetallikus vegyületek

Általánosan elmondható, hogy a varratkeresztmetszetben a cinkréteg teljesen elégett vagy kis részben beépült a varratfémbe [11]. Az acél és a hozaganyag érintkezésénél képződtek intermetallikus vegyületek. A rétegekbe rendeződő vegyületfázisok minden esetben az alapanyag és a varratfém érintkezésének vonalában helyezkednek el. Szélességük 0–1,5 mm között változik.



3. ábra. Gázporozitások és hiányos összeolvadás a varratkeresztmetszetben

A varrat hossza mentén eltérő szélességben, foltszerűen is megjelennek a vegyületfázisok, amit az alapanyagok érintkezési vonalában lévő hőmérséklet-különbségek okozhattak. A varratokban képződött vegyületfázisok beazonosítására szakirodalmi kutatásokat vettünk alapul [2, 12]. Összefüggő réteget képez az  $Fe_2Al_5$  vegyületfázis, amely az acél oldaláról a felületre merőlegesen növekszik (4. ábra). Megjelenik továbbá az  $Fe_2Al_5$ réteg felett tűs formában az  $FeAl_3$  vegyületfázis is.

A CMT Universal eljárásváltozattal készült varratok esetén megfigyelhető egy hőbeviteli határérték – 0,72–0,80 kJ/cm között –, ahol az intermetallikus réteg vastagsága mérhetővé válik. Ennél kisebb hőbevitel esetén legfeljebb gyenge oxidréteg vagy néhány µm-es fázisok jelennek meg. 2 µm-nél nagyobb vastagságú, egybefüggő rétegeket lehet találni a varratfém és az acél érintkezésének középvonalában, ahol a legnagyobb a hőbevitel. A szakirodalmi kutatás alapján [13] 10 µm feletti vastagság esetén vannak jelentős hatással az intermetallikus vegyületek a kötés szilárdságára.

#### 3.3. Vonal menti összetétel-vizsgálat

Az intermetallikus zónákról vonal menti EDSanalíziseket készítettünk. Minden varrat esetében a varrat keresztmetszeti csiszolatán tetszőlegesen kiválasztott vonal mentén lévő vegyületeket vizsgáltuk, ahol egyértelműen kimutatható a cink jelenléte a varratfémben.

Az átlagosan 8% cinket tartalmazó eutektikum a vizsgált vonal mentén 100  $\mu$ m hosszan jelen van a varratban (5. ábra), tehát a cink egy része a hegesztőforrasztás során gőz-halmazállapotúvá válás helyett új eutektikus ötvözetet képez a varratfémben (6. ábra) [14, 15, 16].

#### 3.4. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálatokat 80×15 mm-es próbatesteken végeztük. A varratok 90%-ánál a szakadás az alumínium alapanyag és a varratfém kapcso-



 ábra. Intermetallikus vegyületfázisok az acél és a varratfém találkozásánál



6. ábra. Eutektikum a varratfémben [16]



5. ábra. Vonal menti összetétel az acél és a varratfém vonalában

latánál történt, ami a horganygőzök távozására és az alapanyag nem megfelelő megolvadására vezethető vissza. Összehasonlítva a próbatestek erő-elmozdulás görbéit (7. ábra), a vastag cinkréteggel bevont lemezek varratainak teherbírása és alakváltozási képessége messze kiemelkedik a többi kötésnél mérthez viszonyítva.

A töretfelületeken látható számtalan porozitás (8. ábra) nagy szerepet játszott a repedések gyors terjedésében. Több próbatesten előfordult, hogy a kötés csak bizonyos szélességig repedt el, a teljes keresztmetszet-szétválás időben később következett be. Ezt a felületről kiinduló porozitások repedésterjedések útján való összenövése okozta. Mindenhol rideg töréssel ment végbe a folyamat.

# 4. Következtetések

Összesítve megállapítható, hogy hegesztőforrasztással az alkalmazott hegesztési paraméterekkel jól reprodukálható, megfelelő varratalakú és esztétikus kötések alakíthatók ki acél és alumínium vékonylemezek között. A csiszolati képeken látszódó nagy mennyiségű és méretű porozitások jól mutatják a tűzihorganyréteg kedvezőtlen hatását, amit egyetlen varratnál sem sikerült érdemben csökkenteni. A képződött intermetallikus vegyületfázisok a szakirodalmak alapján jól beazonosíthatók voltak, meglétüket az összetétel-vizsgálatok is igazolták. Annak ellenére, hogy egyes



7. ábra. Szakítóvizsgálatokkal felvett erő-elmozdulás görbék



 ábra. A töretfelületen látható, nagy méretű porozitások, amelyek a repedés terjedését elősegítették

esetekben vastag vegyületrétegek is kialakultak a varratokban, a kötések törésének helye a szakítóvizsgálatok alkalmával szinte mindig a varratfém és az alumínium alapanyag találkozásánál következett be. A cinkréteg vastagságának a vegyeskötés mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását a legvastagabb cinkréteggel bevont acéllemez kötésének kiemelkedő szakítószilárdsága mutatja.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- Kobayashi S., Yakou T.: Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment. Materials Science and Engineering: A, 338/1–2. (2002) 44–53. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00053-9
- [2] Basak S., Das H., Pal T. K., Shome M.: Characterization of intermetallics in aluminum to zinc coated interstitial free steel joining by pulsed MIG brazing for automotive application. Materials Characterization, 112. (2016) 229–237. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.12.030
- [3] Dong H., Hu W., Duan Y., Wang X., Dong C.: Dissimilar metal joining of aluminum alloy to galvanized steel with Al–Si, Al–Cu, Al–Si–Cu and Zn–Al filler wires. Journal of Materials Processing Technology, 212/2. (2012) 458–464.

https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.10.009

- [4] Somoskői G.: A CMT eljárás elméleti alapjai és gyakorlati alkalmazási lehetőségei. In: 25. Jubileumi Hegesztési Konferencia, Budapest, 2010.
- [5] Peng M., Liu H., Liang Y., Xu W., Zhao Y., Chen Y., Weng J., Yang J.: *CMT welding-brazing of al/steel dissimilar materials using cycle-step mode*. Journal of Materials Research and Technology, 18. (2022) 1267–1280.

https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.043

- [6] Havancsák K., Dankházi Z.: Pásztázó elektronmikroszkópia. ELTE Anyagfizikai Tanszék, 2018. http://metal.elte.hu/oktatas/alkfizlab/meresleirasok/SEM3.pdf (letöltve: 2022. június 14.)
- [7] Gaston B., Protter C.: Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) Franklin & Marchall College Materials Characterization Fundamentals, CHM 412 Collaborative Text (2019) https://chem.libretexts.org/Courses/Franklin\_ and\_Marshall\_College/Introduction\_to\_Materials\_ Characterization\_CHM\_412\_Collaborative\_Text/ Spectroscopy/Energy-Dispersive\_X-ray\_Spectroscopy\_(EDS) (letöltve: 2022, június 17.)
- [8] ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, 2022.
- [9] Hoang S. M., Tashiro S., Bang H.-S., Tanaka M.: Numerical analysis of the effect of heat loss by zinc evaporation on aluminum alloy to hot-dip galvanized steel joints by electrode negative polarity ratio varied AC pulse gas metal arc welding. Journal of Manufacturing Processes, 69. (2021) 671-683. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.019

- [10] MSZ EN ISO10042: Hegeszés. Alumínium és ötvözetei ívhegesztéssel készített kötései. Az eltérések minőségi szintjei, 2018.
- [11] Yang J., Hu A., Li Y., Zhang P., Saha D. C., Yu Z.: Heat input, intermetallic compounds and mechanical properties of Al/steel cold metal transfer joints. Journal of Materials Processing Technology, 9/3. (2019) 40–46.

https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.004

- [12] Zhang G., Chen M. J., Huang J., Yang F.: Analysis and modeling of the growth of intermetallic compounds in aluminum-steel joints. Royal Society of Chemistry, 7/60. (2017) 37797–37805. https://doi.org/10.1039/C7RA06354G
- [13] Zhang W., Sun D., Han L., Gao W., Qiu X.: Characterization of Intermetallic Compounds in Dissimilar Material Resistance Spot Welded Joint of High Strength Steel and Aluminum Alloy. ISIJ International, 51/11. (2011) 1870–1877.

https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1870

[14] Kakitani R., Konno C., Garcia A. Cheung N.: The Effects of Solidification Cooling and Growth Rates on Microstructure and Hardness of Supersaturated Al-7%Si-x%Zn Alloys. Journal of Materials Engineering and Performance, 31. (2022) 1956– 1970.

https://doi.org/10.1007/s11665-021-06341-8

- [15] Ishaq M., Basariya R., Mukhopadhyay N. K.: Structural and Mechanical Behaviour of Al-Fe Intermetallics Intermetallic Compounds - Formation and Applications. IntechOpen, Irán, 2018. 226. https://doi.org/10.5772/intechopen.73944
- [16] Septimio R., Silva C. A. P., Costa T. A., Garcia A., Cheung N.: Hypereutectic Zn–Al Alloys: Microstructural Development under Unsteady-State Solidification Conditions, Eutectic Coupled Zone and Hardness. Metals, 12/7. (2022) 1076. https://doi.org/10.3390/met12071076





# Lézeres gravírozás CNC-marógépen

# Laser Engraving on a CNC Milling Machine

# Ráczi Viktor Gergely,<sup>1</sup> Mikó Balázs<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola. Budapest, Magyarország, raczi. viktor@bgk.uni-obuda.hu
- <sup>2</sup> Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Gépészeti és Technológiai Intézet, Gyártástechnológiai Intézeti Tanszék. Budapest, Magyarország, miko.balazs@bgk.uni-obuda.hu

## Abstract

This article details how a commercially available diode laser (VoidMicro LD4070HF Pro) can be integrated into a conventional 3-axis CNC milling machine (HAAS Mini Mill Edu). Thanks to this development, the CNC milling machine is now able to perform a new machining process. The laser module has a major impact on the development of the secondary time, in addition to the rapid execution of engraving operations, i.e. by reducing the production lead time. During the production of a part, the marking of the product, such as QR code and barcode, is also carried out on a single machine tool, thus reducing the production cost. An additional benefit of integrating a laser engraver is that the CNC milling machine can also be used for laser cutting thin plastic and wood panels.

Keywords: laser diode, CNC milling machine, engraving, Arduino.

# Összefoglalás

Jelen cikk részletesen bemutatja, hogy miként lehet egy hagyományos, háromtengelyes CNC-marógépbe (HAAS Mini Mill Edu) integrálni egy kereskedelmi forgalomban kapható diódalézert (VoidMicro LD4070HF Pro). A fejlesztésnek köszönhetően a CNC-marógép egy új megmunkálási eljárás végrehajtására lett képes. A lézermodul a gravírozási műveletek gyors kivitelezése mellett, azaz a gyártási főidő csökkentésével, a mellékidő alakulására is nagy hatással van. Egy adott termék gyártása során a termékre kerülő jelölések, pl. a QR-kód és a vonalkód kivitelezése is egyetlen szerszámgépen történik, így a gyártási költséget is csökkenti. További előnye a lézeres gravírozó integrálásának, hogy a CNC-marógép vékony műanyag és falemezek lézeres vágására is alkalmassá vált.

Kulcsszavak: diódalézer, CNC-marógép, gravírozás, Arduino.

# 1. Bevezetés

A kutatás célja, hogy az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karán található háromtengelyes CNC-marógép (HAAS Mini Mill Edu) egy új megmunkálási eljárás végrehajtására legyen alkalmas. Egy, a kereskedelmi forgalomban kapható lézeres gravírozófej (LD4070HF Pro) integrálásával lézeres gravírozási műveletek kivitelezése is a CNC-marógépen történik.

Ebből adódóan plusz egy megmunkálási eljárásra alkalmas a CNC-marógép, így a termékre helyezett jelölések vagy gravírozási feladatok egyetlen megmunkálógéppel elvégezhetők, ezáltal jelentős idő- és költségcsökkenés érhető el.

## 1.1. A lézeres gravírozás létjogosultsága napjainkban

Napjainkban a versenypiac dinamikus fejlődése arra készteti a megmunkálással foglalkozó cégeket, hogy az eddigieknél jobban használják ki a műszaki innovációkat. Sorozatgyártás esetén a hangsúly a gépi fő- és mellékidők lerövidítésén (a gyártási költség 62%-a [1]) és a termelőeszközök gazdaságos használatán van, aminek hatására a gyártással foglalkozó cégek optimalizálhatják a gyártási költségeiket. A gyártási fő- és mellékidők csökkentése elérhető az új megmunkálási eljárásokkal (például: trohoidális forgácsolás (TPC), nagy sebességű forgácsolás (HSC), nagy teljesítményű forgácsolás (HPC) [1]) és újgenerációs szerszámok (több feladatra alkalmas szerszám [MTC]) alkalmazásával. Emellett mellékidőt és költséget tudunk csökkenteni azáltal, hogy igyekszünk minél kevesebb megmunkáló- és gyártást támogató gép alkalmazásával elvégezni a termékek gyártását [2].

#### 1.2. Lézeres jelölés

A klasszikus gravírozás során különböző mélységben választunk le kis mennyiségű anyagot a munkadarab felületéről, aminek hatására a kívánt minta, kép, felirat vagy számsor olvashatóvá válik a munkadarabon. Napjainkban a termék azonosítása érdekében szinte minden terméket azonosító számmal, vonalkóddal vagy QR-kóddal (QR = quick response) látunk el, így a termelékenység fokozása érdekében e jelölésekre már jelölőberendezéseket, jelölőlézereket használunk. Lézeres jelölést leggyakrabban fém és műanyag alkatrészek esetén alkalmazunk [3].

#### 1.2.1. Fém alkatrészek lézeres jelölése

Fém alkatrészeknél háromfajta jelölési eljárást alkalmaz az ipar [3]. Az egyik a gravírozás, mely során a lézersugárzás teljesítménye olyan nagy, hogy az anyag a megmunkálás során megolvad és részben elgőzölög (elpárolog). Ennek hatására a munkadarabban 10-50 µm-es mélyedések keletkeznek [4]. Mélygravírozás esetén a torzulás elkerülése miatt többször kell végrehajtani a lézeres gravírozást különböző mélységekben. Jó beállítási paraméterek esetén a gravírozás keresztmetszeti formája U alakú. A gravírozás olvashatóságát az okozza, hogy az eljárást követően a gravírozott felület másképp veri vissza a fényt, ezáltal olvashatóvá válik a lézeres gravírozás mintája. eljárás során nagy teljesítményű lézer Az (P>50W) alkalmazása indokolt, így impulzusos üzemű szállézert, Nd: YAG (neodímium kristályba foglalt ittrium – alumíniam-gránát) vagy Nd: YVO<sub>4</sub> (neodímiummal dúsított ittrium-vanadát) lézert alkalmaz az ipar. A lézernyaláb fókuszfoltját a munkadarab felületére kell helyezni. Legtöbbször a szerszám- és formagyártásban vagy a járműazonosító számok gravírozásánál használják ezt az eljárást [3, 4].

A másik fémjelölési módszer a hőkezelés és színezés. Az eljárás során az anyag szerkezete változik meg, így nem történik olvadás. A lézernyaláb a munkadarab anyagát az olvadáspontnál kisebb hőmérsékletre hevíti, aminek hatására az anyag szövetszerkezete megváltozhat, a felületen pedig a levegő összetevőivel képzett korróziótermék alakul ki. A munkadarab felületén így különféle színek jelennek meg. A lézeres gravírozással ellentétben ennél az eljárásnál jóval kisebb energiájú impulzus alkalmazása is elegendő, így folyamatos üzemű lézerrel ellátott gépek is alkalmazhatók. A lézeres színezésre alkalmazott lézerek így a folyamatos vagy impulzusos üzemű szállézerek, impulzusos üzemű Nd: YAG vagy Nd: YVO lézerek. Lézerrel történő hőkezelésnél vagy színezésnél a fókusztávolságot a munkadarab felülete fölé kell beállítani, ezzel a lézernyaláb csak nagy mennyiségű hővel terheli a felületet, de nem olvasztja meg. Ezt a jelölési eljárást alkalmazza legtöbbször az ipar az orvosi eszközök jelölésére, mivel így nem keletkeznek baktériumok megtelepedésére alkalmas mélyedések. A mérőeszközök (pl.: tolómérce) és szerszámok jelölésénél is igen elterjedt jelölési eljárás. Az eljárás hátránya a lézeres gravírozással szemben a nagyobb megmunkálási idő, így tömeggyártás esetén a gravírozást részesíti előnyben az ipar [3].

A harmadik fémjelölési módszer a speciális paszta alkalmazásával történő lézeres jelölés. Az eljárás fő előnye, hogy kis teljesítményű lézerek (P < 50 W) esetén is alkalmazható. Ebből kifolyólag  $CO_2$ -lézerek esetén alkalmazzák a legtöbb esetben a "lézerpasztás" (szpré, ragasztószalag vagy hígított formában kapható) jelölést. Ez az eljárás csak bevonat nélküli fémek esetén alkalmazható [3].

#### 1.2.2. Műanyag alkatrészek lézeres jelölése

Műanyagok lézeres jelölésénél négy eljárást különböztetünk meg [5]. Az egyik jelölési folyamat során a felületet ért hőhatásra buborékok keletkeznek, így ezt az eljárást habosító jelölésnek nevezzük. Az eljárás során a munkadarab felülete és felületi érdessége megváltozik, aminek hatására válik láthatóvá a munkadarab felületére készített jelölés [3, 5].

A másik módszer a fémes munkadarabok jelölésénél is ismertetett hőszínezés. Ennél az eljárásnál a munkadarab felületéről anyagleválasztás nem történik, hanem csak a munkadarab felületén található anyagrészecskék szövetszerkezetét változtatja meg a lézersugárzás, ami történhet termikus vagy fotokémiai úton. Műanyagok hőszínezésénél is érvényes, hogy a hőszínezés jóval kisebb teljesítményű lézer (P<50W) alkalmazása mellett is végezhető. Mindkét eljárásnál használhatunk impulzusos üzemű szállézert, Nd:YAG, Nd:YVO<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> szilárdtestlézert és diódalézert [3, 6].

A harmadik módszer a fém alkatrészeknél bemutatott gravírozási eljárás, míg a negyedik jelölési változat a bevonateltávolítás a lézernyaláb segítségével [5].

# 2. Alkalmazott eszközök

A kivitelezés első részében meghatároztuk az alkalmazni kívánt főbb eszközöket. A lézermodul kiválasztásánál a fő szempont az ár-érték arány figyelembevétele és a könnyű beszerezhetőség volt. CNC-marógép esetén a gépválasztás fő szempontja a gépkihasználtság és a gépburkolat megbontásának lehetősége volt. Vezérlőelektronika esetén is törekedtünk a megbízhatóság és a kedvező bekerülési költség meglétére, emellett a könnyű programozhatóságot is figyelembe vettük.

#### 2.1. LD4070HF Pro gravírozófej

A használt gravírozófej esetén a hobbi jellegű gravírozógépeknél széles körben alkalmazott, Void-Micro cég által gyártott, LD4070HF Pro megnevezésű lézermodulra esett a választásunk (**1. ábra**). A lézermodul 450 nm hullámhosszú és állandó fókusztávolságú (a fókuszálólencsétől 15 mm) nyalábot állít elő. A bemeneti teljesítménye 40 W, míg a kimeneti teljesítménye 7,5 W. A rendszer 12 V-on működik, és teljesítménye PWM (pulse width modulation), azaz impulzusidőtartam-modulációs jellel szabályozható. A gravírozófej a teljesítményéből kifolyólag nemcsak gravírozni tud, de alkalmas akár 3–5 mm vastag falap és 3 mm vastag műanyag lap vágására is [7].

# 2.2. Haas Mini Mill EDU CNC-marógép

A lézermodul alkalmazását a Haas Mini Mill EDU CNC-marógépre terveztük (2. ábra).

A CNC-marógép maximális fordulatszáma 4000 1/min, míg a maximális teljesítménye 5,6 kW. A szerszámgépnek 406×305×254 mm-es a munkatere. A gépnek nincsen hűtőrendszere és automata szerszámcserélője [8].

A projekt tervezési szakaszában, a gép tulajdonságainak figyelembevételével (CT 40-es főorsóvégződés [8], hűtési és szerszámcserélő rendszer hiánya) határoztuk meg a projekt célkitűzéseit.

#### 2.3. Arduino Nano

A lézermodul vezérlésére alkalmas PWM-jeleket (impulzusidőtartam-modulációs jelek) az egyedi digitális vezérlőberendezések esetén Arduino mikrokontrollerrel vezéreljük.



1. ábra. LD4070HF Pro gravírozófej valós és virtuális ábrája



2. ábra. Haas Mini Mill EDU

Az Arduino egy gyűjtőnév, amely magába foglalja mind az egyszerű elektronikus áramkört (hardver), mind a szoftverfejlesztői környezeten alapuló, nyílt forráskódú platformot (szoftver). A hardver egy Atmel AVR mikrokontroller köré épített elektronikai áramkörből áll, míg a szoftveres része a C alapokon nyugvó, C++ programozási nyelvet használó, Arduino IDE néven készített program. Arduino segítségével interaktív tárgyakat tudunk létrehozni, mivel képes digitális jelet fogadni és küldeni, emellett analóg jelek feldolgozására is képes. Így akár motorok, szenzorok, lámpák vezérlése is megoldható vele. Az Arduino IDE szoftver segítségével megírt programot, a megfelelő nyelvre történő fordítást követően, USB segítségével tudjuk a mikrokontrollerre felprogramozni. A program két fő részből épül fel. A beállítás (setup) programrész az alapbeállításokat tartalmazza, míg a ténylegesen végrehajtani kívánt műveleteket a ciklus (loop) foglalja magába. Ebből kifolyólag a beállítási rész csak egyszer fut le, míg a ciklusos részben lévő utasítások végrehajtása végtelenített ciklusban ismétlődik [9].

A lézermodul vezérlését, a helytakarékosságból kifolyólag, az egyik legkisebb, a kereskedelmi forgalomban kapható Arduino Nano típusú mikrokontroller (**3. ábra**) segítségével oldottuk meg.

# 3. Egyedi gravírozófej építése és vezérlése

A tervezési fázist a gravírozólézer elemeinek visszamodellezésével kezdtük el, a Catia P3 V5R21 CAx szoftver alkalmazásával.

A gyári lézermodul 30 alkatrészből épült fel, tartalmazza a főbb építőelemeken kívül a csavarokat, távtartókat és a vezérlőáramkör nyáklapját is.

A visszamodellezést követően a főorsóba történő rögzítési lehetőségeket vizsgáltuk meg. Az első koncepció szerint az eredeti ventilátort lecseréljük két radiális, turbó ventilátorra, amelyeket a lézermodul oldalán helyeztünk volna el. Ennek következtében az eredeti 113,7 mm-es hossz rövidül, ezáltal robusztusabb lesz a lézermodul és a hűtés is intenzívebbé válik. A koncepció hátránya, hogy a kézzel történő szerszámcserélés során sérülhetnének a radiális ventilátorok, így a második koncepció alapján a radiális ventilátor helyett axiális ventilátor alkalmazása mellett döntöttünk. A hosszméret további csökkentése érdekében a lézermodul vezérlőjének áthelyezését láttuk indokoltnak.

A visszamodellezés során az eredeti gravírozó hűtőbordájában szerelési hibát tapasztaltunk (kéziszerszámmal történő furatbővítés). A lézerdióda átmérője és a hűtőborda furata között 0,3 mm-es eltérést mértünk. A lézerdióda rögzítését egy M3×8 mm-es belsőkulcsnyílású hernyócsavar (DIN 916 szabvány) valósította meg, ami radiális irányból a hűtőborda furatának falához nyomta a lézerdiódát (4. ábra, sárgával jelölt terület). Ebből adódóan a lézerdióda használatakor keletkezett jelentős hő egy él mentén adódott át a hűtőbordának, ezáltal a hűtés hatásfoka a maximális 40 W lézerteljesítmény esetén megkérdőjelezhető. Az előbb említett hibák miatt úgy döntöttünk, hogy az eredeti lézerdiódaház helyett egy egyedi hűtőbordát és hozzá tartozó egyedi rögzítőelemeket tervezünk és gyártunk le.

#### 3.1. Egyedi hűtőborda

Az egyedi hűtőborda tervezésénél a fő szempontok a lézerdióda hűtésének maximalizálása mellett a hosszméret csökkentése, az áramellátás, a fókuszálólencse szennyeződésének elkerülése és a lézerdióda hőmérsékletének mérése volt. A ház elemeit AW-6082 alumíniumból készítettük el. A választott anyagnak kedvező a szilárdsága, jó a forgácsolhatósága és a hővezető képessége.

A lézeres gravírozó hűtésintenzitásának növelését több módon is befolyásoltuk. A hűtésért felelős alkatrészben bordákat készítettünk, emellett a lézerdióda palástja körül 14 furatban sűrített levegő áramoltatásával növeltük a hőelvonást. A lézerdióda helyénél Ø20,7 mm H7-es furattal biztosítottuk a palástfelületek közötti illesztést. A hőátadás növelése érdekében a hűtőborda és a diódalézer között hővezető pasztát alkalmaztunk (5. ábra).

A diódalézer aktuális hőmérsékletének mérésére NTC 10K típusú hőmérőt alkalmaztunk, amelynek a jeleit az Arduino Nano dolgozza fel. A hőmérő mérési tartománya –30–120 °C, míg mérési pontossága 4–50 °C között ± 2%. A mérőeszköz DC 2,2–12 V-os elektromos rendszerekbe integrálható.

Az elektromos csatlakozást 6 érintkezős Pogo pines csatlakozóval oldottuk meg. A teljesítményből adódóan a Pogo pin érintkezők károsodásának elkerülése érdekében 2-2 érintkező valósítja meg a diódalézer és a vezérlője közötti kapcsolatot.



3. ábra. Arduino Nano mikrokontroller



4. ábra. Lézermodul gyári hűtőrendszerének hibája

A rendelkezésre álló hely szűkössége miatt a Pogo pines csatlakozóknál egyedi nyáklapot terveztünk. Az egyedi gravírozóház műanyag elemét 3D-s nyomtató segítségével (Creality Ender 3 v2), PLA (Polylactic acid) anyagból készítettük el.

Mivel a CNC-marógépnek nincsen főorsón kívüli vagy főorsón belüli hűtőrendszere, így ki kellett építeni a projekt keretein belül egy sűrített levegős hűtőrendszert. A sűrített levegő Ø6 mm-es csőspirálon (Aventics TU1-S-PUR 006-0105-NT-100) keresztül, pneumatikus csatlakozó segítségével (Aventics QR1-AAN G014-DA06) jut a hűtőbordába. A sűrített levegő a hűtőborda hűtése mellett megakadályozza a fókuszálólencse szennyeződését (korom felrakódását) azáltal, hogy a sűrített levegőt a lencse elé irányítva, a lézernyalábbal párhuzamosan áramlik ki a lézerdiódaházból.

Az általunk tervezett lézerdiódaház hosszmérete 85 mm, így 25%-kal lett kisebb, mint az eredeti 113,7 mm hosszméret. Az új lézerdiódaház rögzítése könnyen megoldható az iparban használt szerszámrögzítő készülékek segítségével (pl.: ER patronos szerszámbefogó). Az egyedi hűtőborda szimmetriatengelye 1 mm-es tartományban állítható 3 darab, 120°-ban elhelyezett hernyócsavar segítségével, így egytengelyűvé lehet tenni a hűtőbordát a főorsóhoz képest.

A végleges konstrukció 62 elemből épül fel, ami tartalmazza a főbb alkotóelemeken kívül a csavarokat, elektromos csatlakozókat és a tömítéseket. A **6. ábra** szemlélteti az egyedi hűtőborda virtuális modelljét, valamint a legyártott és összeszerelt lézerdiódaházat.

#### 3.2. A tápfeszültségmodul háza

A lézergravírozó használata során az elektronikai rendszerek 12 V-os és 5 V-os tápfeszültség mellett üzemelnek. A CNC-marógép elektromos rendszerét nem használhattuk a garanciaszerződés miatt, így a CNC-marógép oldalán található 115 V-os hálózati csatlakozóaljzat segítségével építettük ki az elektronikai rendszereinek tápfeszültség-ellátásait. Mivel az Arduino vezérlőelektronikai rendszer érzékeny a kis feszültségingadozásokra, ezért az elektronikai rendszereink tápfeszültségének előállítására egy AC/DC kapcsolóüzemű tápegységmodult (PXK-2412DC-12V) használtunk.

A tápegységmodul segítségével a CNC-marógép hálózati csatlakozóaljzatából kijövő 115 V-os (AC) feszültséget 12 V-os (DC) feszültségre átalakítottuk. Az így kapott feszültség már alkalmas a gravírozófej elektronikájának működtetésére, azonban az Arduino elektronika működtetésére még további transzformálás szükséges. Az Arduino rendszer feszültségének előállítását a 3.4. fejezetben részletezzük.

Az elektronikát védő burkolat esetén egy számítógéptáp házát használtuk fel. Az elektronika hűtésére az eredeti tápban található hűtőventilátort alkalmaztuk. A biztonságos üzemeltetés érdekében a bejövő 115 V-os feszültséget egy kétállású billenőkapcsoló segítségével (ST 1/BK [MRS-1]) tudjuk megszakítani, ezzel teljesen feszültségmentesíteni tudjuk az általunk vezérelni kívánt elektronikákat. Megmunkálás során a billenőkapcsoló elérése nem lehetséges a CNC-marógép ajtóburkolatából kifolyólag, így a CNC-gép vészleállító kapcsolóházának hála egy Eaton m22-k01-es nyitó érintkezőelem beépítésével a tápegységmodul által előállított 12 V-os feszültség megszakítható. Ezzel biztosítottuk, hogy a vészleállító gomb alkalmazásával nemcsak a CNC-gép mozgásai rögzülnek, de a lézermodul és a lézermodult vezérlő elektronikák is kikapcsolnak. Ezen kívül a 12 V-os tápfeszültségének ellenőrzésére digitális



5. ábra. Hűtőborda felülnézeti képe



 ábra. Az összeállított lézerdiódaház virtuális és valós képe

voltmérőt szereltünk be a tápegység áramkörébe. A lézerdióda teljesítményének mérése céljából ACS712 5A típusú, Hall-elemes áramérzékelő modult alkalmaztunk, amit szintén a tápegységmodul házán belül rögzítettünk (7. ábra).

#### 3.3. A lézerdióda elektronikájának háza

A LD4070HF Pro gravírozófej elektromos vezérlőjének különálló házat terveztünk, amit a CNC-marógép főorsójának oldalán kívántunk elhelyezni. A lézermodul elektromos áramkör vezérlőiének háza tervezésekor figvelembe vettük, hogy a gravírozófejet gyártó cég forgalmaz egy kiegészítő elektronikai nyákot (Interface and adapter board), amelynek segítségével több elektromos csatlakozási lehetőséget biztosítanak a lézermodul elektromos és vezérlőáram-ellátására. Az előbb említett nyáklap alkalmazásával a nyákon található sorkapcson keresztüli elektromos vezeték bekötése mellett döntöttünk a könnyű szerelhetőség miatt. Emellett a ház tervezésekor figyelembe vettük, hogy a lézermodul vezérlőelektronikáját nagy teljesítményfelvételnél hűteni kell a túlmelegedés ellen. Ennek érdekében az eredeti gravírozófejben található hűtőventilátor felhasználásával tudiuk biztosítani az elektronos egységek hűtését úgy, hogy a vezérlőelektronikába beleépített vezérlés kapcsolja be a ventilátort, ha a lézerfej felvett teljesítménye eléri a maximális teliesítmény 3%-át. A 8. ábra szemlélteti a lézervezérlő elektronika házának virtuális elemeit.

A ház burkolati elemeit 3D-s nyomtató segítségével, RAL 9016 színkódú PLA felhasználásával nyomtattuk ki (9. ábra).

# 3.4. A vezérlőelektronika háza

A 2.3. fejezetben bemutatott Arduino Nano alkalmazásával lehetőségünk nyílt nemcsak a gravírozófej vezérlésére, hanem egyéb ellenőrző elektronikák egyidejű működtetésére is. A tervezett Arduino programot a 4.1. fejezetben mutatjuk be, itt csak a beépített elektronikai eszközöket és a rögzítésükre tervezett házat részletezzük.

A könnyű szerelhetőségből kifolyólag az Arduino Nano nyáklaphoz egy szabványosított terminálcsatoló lapot illesztettünk. A 12 V-os feszültséget az egyedi burkolatban található nyomógombok (V19-11R-12G/R) LED diódái használják. Az Arduino Nano üzemi feszültsége 5 V, így a 12 V-os tápfeszültség letranszformálására (átalakítására) STDN-3A24-ADJ gyári számú, 3 A-es, állítható, step-down DC-DC kapcsolóüzemű tápegységmodult alkalmaztunk. Annak érdekében, hogy az Arduino vezérelni tudja a nyomógombokban található 12 V-os LED diódákat, egy LS-BIDI-4 jelzésű 4 csatornás Bi-directional logikai szintillesztőt (level-shift) használtunk, amelynek hatására az áramkör bármelyik 4 bemenetére kötött 5 V-os jel 12 V-os kimeneti jelet ad.

A gravírozófej vezérlésének tervezésekor figyelembe vettük a CNC-marógép működtetésének



 ábra. Lézervezérlő áramkör házának virtuális, 3D-s terve



7. ábra. Az összeállított tápfeszültségmodul háza



9. ábra. Az összeszerelt lézergravírozó vezérlésének háza

adottságait. A CNC-marógépen található "cycle start" (Eaton 216512 M22-D-G-X1/K10) és "feed hole" (Eaton 216510 M22-D-R-X0/K01) nyomógombok segítségével nemcsak a CNC-marógépen aktív megmunkáló program indítását és megállítását tudjuk vezérelni, de a lézerfej működési állapotát is befolyásolni tudjuk a nyomógombokba szerelhető Eaton 216376 M22-K10 jelzésű érintkezőelemek segítségével.

A PWM-jel előállítására és szabályzására egy 100 k $\Omega$ -os, analóg, 270°-ban forgó potenciométert alkalmaztunk, így megmunkálás közben tudjuk állítani a lézerdióda teljesítményét.

Az előbb felsorolt elektronikai egységeken kívül még a 3.1. fejezetben bemutatott NTC 10K típusú hőmérőhöz tartozó elektronika (lehúzó ellenállás) is ide épült be. A lézerdióda vezérlésének megkönnyítése érdekében egy 1602-es LCD-kijelző és a hozzá tartozó vezérlőelektronika segítségével adatok megjelenítését tettük lehetővé a lézerdióda működése közben.

Az egyedi burkolat tervezése során nemcsak az elektronikai alkatrészek méretét vettük figyelembe, hanem fontos szempont volt az ergonómiai és esztétikai megjelenés is. A burkolati elemek tervezésénél figyelembe kellett vennünk a gyártási körülményeket, így az alkalmazott 3D-s nyomtató (Creality Ender 3 v2) mozgástartományát (x-y irány) szem előtt kellett tartanunk. Emellett a jövőbeli bővítések megvalósíthatósága érdekében a burkolatot moduláris szemlélettel terveztük meg. Az általunk tervezett burkolatot a 10. ábra szemlélteti.

A burkolat kivitelezésénél szintén 3D-s nyomtatás segítségével készítettük el az általunk tervezett elemek jelentős részét RAL 9016 színkódú PLA felhasználásával. Az előlaplemez az esztétikai megjelenésből adódóan, lézervágás segítségével 2 mm vastagságú rozsdamentes acéllemezből (X5CrNi18-10) készült (11. ábra).

# 4. Diódalézer működtetése CNC-marógép vezérlőjének segítségével

A lézergravírozó működtetését a Haas Mini Mill EDU vezérlőelektronikáján található 5 darab, M kóddal vezérelhető relével (I/O PCB kimenet) oldottuk meg. A relék két módon tudnak üzemelni. Az első esetben a megfelelő M kód alkalmazásával a CNC-marógép áramköreitől elkülönített relék érintkezői akár 120 V-os váltakozó feszültség esetén (AC) 3 A-es áramerősséget is lehet vezérelni. A relék SPDT (Single Pole Doble Throw) kialakításúak, így egy relé akár két eszköz vezérlését is tudja végezni egy időben. A másik üzemelési



 ábra. A gravírozófej vezérléseit szolgáló elektronikák burkolata



11. ábra. Lézerfejvezérlő elektronikák burkolata

forma esetén egy másik M kód parancs meghívásával tudjuk üzembe helyezni a relét, amely addig üzemel, míg a vezérelt elektronika nem küld a CNC-marógép vezérlőjének M-fin jelet, ami átkapcsolja a relé állását a kiindulási pozícióba [10].

#### 4.1. Az Arduinón futó vezérlőprogram

Az Arduino Nano bemenetének 5 V-os tápfeszültséggel történő ellátását követően (STDN-3A24-ADJ) az Arduino Flash memóriájában található program futtatása folyamatosan zajlik. A 2.3. fejezetben említett Arduino IDE-program használatával készítettük el az elektronikai rendszerek vezérlését szolgáló programot. A program készítése során úgy határoztunk, hogy a gravírozófejet kétféleképpen szeretnénk működtetni, így ennek megfelelően terveztük meg és készítettük el az elektromos rendszereket.

Az Arduino rendszer bekapcsolását követően a program beállítási része lefut, majd a program ciklusos részében található "Teszt" üzemmód automatikusan elindul. Teszt üzemmódban manuálisan tudjuk üzemeltetni a gravírozófejet úgy, hogy az Arduino 2-es digitális lábára (be- és kimenet) kötött V19-11R-12G (zöld LED) típusú nyomógomb megnyomásával a gravírozófej üzembe helyezhető. A lézermodul üzemelése a nyomógomb nyomva tartásáig üzemel a programban rögzített 10%-os PWM jelszinten. Ezzel elértük, hogy a lézermodul üzemképességét tesztelni lehessen, emellett a főorsó közepének pontos helyzete is vizuálisan megjelenik a munkadarab felületén (tájolás esetén hasznosítható funkció). A nyomógombba szerelt zöld LED folyamatos világítása mellett az LCD-kijelzőn is feltüntettük, hogy a kezelőnek egyértelműen a tudtára adja a vezérlés ciklusának állapotát (**11. ábra**).

Az Arduinón futtatott program ciklusos részében található másik üzemmód a "Ciklus" (Cycle) üzemmód. Ciklus üzemmódban tudja vezérelni a Haas-vezérlő a lézermodult több feltétel teljesülését követően. A ciklus üzemmódba a V19-11R-12R-S (piros LED) jelölésű pozícióban maradó nyomógomb megnyomásával tudunk belépni, amit az Arduino 3-as digitális lábára kötöttünk. Ekkor a program folyamatosan vizsgálja, hogy a 4. fejezetben bemutatott, M-kóddal üzemeltethető relék közöl az M21-es relé használatával kap-e jelet az Arduino 7-es digitális lába. Emellett a CNC-marógép "ciklus indítása" (cycle start) és "előtolás szüneteltetése" (feed hole) (Eaton 216376 M22-K10 jelzésű érintkezőelemek) nyomógombjainak megnyomásával a lézerfej ki- és bekapcsolható a CNC-marógépen futtatott program esetén is. Ebből adódóan, a "feed hole" nyomógomb megnyomásának hatására a CNC-marógép mellékmozgásának szüneteltetésekor a gravírozófej is kikapcsolódik, míg a "cycle start" gomb megnyomásával a CNC-marógépen futó program futtatása folytatódik, és a gravírozó is ismét bekapcsolt állapotba kerül. A ciklus üzemmód jelölésére a V19-11R-12R-S jelölésű nyomógomb LED fénye pirosan világít, és az LCD-kijelzőn is megjelenítettük, hogy az Arduino jelenleg ciklus üzemmódban van (Current mode: CYCLE).

Jelen állapotában a lézer teljesítményét (PWMjel nagyságát) csak manuálisan lehet vezérelni a 3.4. fejezetben bemutatott, 100 (k $\Omega$ )-os, analóg, 270°-ban forgó potenciométer segítségével. A potenciométer középső kimenetét az Arduino A0-s lábára (analóg 0-s bemenet) kötöttük, így a potenciométer által befolyásolható ellenállás nagyságát arányosítjuk a PWM jelszintjének értékéhez.

A CNC-program futtatásának hatására az LCD-kijelzőn megjelenítjük a potenciométer állásának értékét százalékban, emellett a 3.2. fejezetben bemutatott, ACS712 5A típusú, Hall-elemes áramérzékelő modul által mért áramerősségi értékből számolt teljesítmény értéke mellett a 3.1. fejezetben ismertetett, NTC 10K típusú hőmérő által mért hőmérsékletet is megjelenítjük. Így megmunkálás közben ellenőrizhetjük a lézermodul által felvett teljesítmény értékét és a lézerdióda működésekor keletkezett veszteségekből származó hőfejlődés nagyságát.

Az Arduino program írása közben virtuális térben ellenőriztük a programrészek helyességét Autodesk Tinkercad szoftver segítségével. A Tinkercad szoftver áramkörtervező modulja képes a virtuális térben összerakott áramkörök vezérlésére, ezzel nagyban megkönnyítve az Arduino Nanon futó program készítését, hiszen a valóságban egy elektromos hiba (például: rövidzárlat) akár végzetes károsodást is tud okozni az Arduino áramkörében. A valóságban alkalmazott kapcsolók, ellenállások és egyéb elektronikai elemek egyszerűsített virtuális másolataival meg tudtuk tervezni a vezérlőelektronika bekötéseinek helyeit. Emellett a vezérlőprogram futtatásánál vizuálisan is megjeleníti a Tinkercad program az esetleges programhibákból adódó hibákat (például: LED helytelen működése).

Az Arduino IDE szoftverben megírt és a Tindercad szoftverben ellenőrzött vezérlőprogram hibátlan futtatása után, az általunk használt Arduino Nano mikroprocesszorra feltöltöttük a vezérlőprogramot. Kisebb átalakítást követően (lehúzó-ellenállások bekötése) a vezérlőprogram tökéletesen működött.

Catia P3 V5R21 CAx szoftver alkalmazásával készítettünk egy gravírozó maróciklust. A posztprocesszálást követően a rá- és leállási parancsokat kicseréltük a vezérelhető I/O PCB kimenet (relé) vezérlésére szolgáló M-kódokra. A tesztprogramfuttatás hibamentesen hajtódott végre (12. ábra).

# 5. A lézer biztonságos működtetése

Lézerfény alkalmazása esetén a gépkezelő bőrfelületének és szemének védelmét biztosítani kell. A közvetlen lézerfény besugárzása komoly sérüléseket okozhat az ember bőrfelületén vagy szemében. Azonban a szórt (visszaverődött) lézerfény esetén is meg kell akadályozni a bőr vagy a szem sérülését. A projekt tervezése során megállapítottuk, hogy a CNC-marógép burkolati elemei megakadályozzák a szórt lézerfény bőrt érő káros hatások létrejöttét. Az emberi szem védelme érdekében védőszemüveg alkalmazását írtuk elő, mert az alkalmazott lézerdióda teljesítményéből kifolyólag, az IEC 60825 szabvány szerint, a Class 4-es osztályba tartozik. Az előírt védőszemüveg tulajdonsága, hogy a 190 nm-től az 540 nm-es fényt meg tudja szűrni úgy, hogy az optikai szűrőképességi értéke (OD: optical density) 5.

#### 6. Következtetések

A cikk részletesen bemutatja, hogy miként lehet integrálni egy kereskedelmi forgalomban kapha-



12. ábra. Tesztprogram által készített lézergravírozás

tó lézeres gravírozófejben (LD4070HF Pro) található diódalézert egy ipari CNC-marógépbe.

A fejlesztési projektünk egyik sarkalatos pontja az eredeti LD4070HF Pro lézeres gravírozófej 113,7 mm-es hosszúságának csökkentése volt. A tervezés során törekedtünk a hosszméret csökkentésére, így az általunk tervezett lézeres gravírozómodul hűtőbordája és a hozzá tartozó elemek összegzett hossza 85 mm hosszúságú, ami 25%-kal kisebb az eredeti lézermodul hosszánál.

A diódalézer hűtésének intenzitása érdekében egyedi hűtőbordát készítettünk. A lézermodul hűtését több módon is biztosítottuk. A hűtőbordában található Ø20,7 mm-es H7-es illesztett furat biztosítja a diódalézer átmeneti illesztését. A lézerdióda működése közben keletkezett hő jelentős részét az egyedi hűtőbordában található 14 furatban áramoltatott sűrített levegő vezeti el. A hűtőbordából távozó sűrített levegőt a diódalézer fókuszálólencséjéhez áramoltatjuk, így megakadályozzuk a lencsére történő koromlerakódást.

A cikkben részletesen bemutatjuk a lézermodul működtetésénél használt, általunk tervezett elektronikai rendszereket és a hozzájuk tervezett egyedi burkolati elemeket.

Továbbá bemutattuk, hogyan lehet CNC-marógép vezérlőjének használatával működtetni a lézeres gravírozófejet. Az általunk tervezett lézeres gravírozófej (13. ábra) és a hozzá tartozó kiegészítő egységek képesek megmunkálás közben mérni és megjeleníteni a lézerdióda által felvett teljesítményt és a diódalézer aktuális hőmérsékletét.

A projekt anyagköltsége, ami magába foglalja az elektronikai berendezéseket, vezetékeket, kötőelemeket, hűtőház elemeihez használt alapanyagot és a diódalézert, 125 000 Ft.



13. ábra. Főorsóba helyezett lézergravírozó

# Szakirodalmi hivatkozások

- Perfor cég weboldala: Szerszámköltség és gazdaságos forgácsolás. https://perfor.hu/szerszamkoltseg-gazdasagos-forgacsolas (letöltve: 2024. március 19.)
- [2] Hoffmann GmbH: *Forgácsolási kézikönyv*. Hoffmann Groupe, München, 2016. 141–161.
- [3] Ábrahám Gy., Lőrincz E., Antal Á., Tamás P.: Lézertechnika (jegyzet). Budapesti Műszaki Egyetem, Budapest, 2015. ISBN 978-963-313-203-6
- [4] Trumpf cég weboldala: Mi a lézergravírozás? https://www.trumpf.com/hu\_HU/megoldasok/ alkalmazasok/lezeres-jeloeles/lezergravirozas (letöltve: 2024. március 5.)
- [5] Kovács I.: *Lézeres jelölés* (szakdolgozat). OE-BGK, Budapest, 2017. 6–9.
- [6] Dobránszky J., Bitay E.: Polimerek lézersugaras jelölhetősége. XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, Kolozsvár, 2016. 71–78. https://doi.org/10.33895/mtk-2017.06.07
- [7] LD4070HF Pro lézergravírozó fej gyártójának a weboldala:

http://voidmicro.com/Products/Laser/LD4070HF\_ Pro-en.html (letöltve: 2024. március 10.)

[8] Haas Automation cég weboldala: Haas Mini Mill EDU

https://www.haascnc.com/hu/machines/vertical-mills/mini-mills/models/minimill-edu.html (letöltve: 2023. árcius 10.)

[9] Starduino: Arduinóval foglalkozó weboldal kezdők számára:

https://starduino.hu (letöltve: 2024. március 10.)

[10] Haas Automation cég weboldala: Robot integrációs támogatása – NGC https://www.haascnc.com/service/troubleshooting-and-how-to/reference-documents/robot-integration-aid---ngc.html (letöltve: 2024. március 10.)





# Polipropilénlemezek ultrahangos hegesztésének optimalizálása

# **Optimization of Ultrasonic Welding of Polypropylene Sheets**

Schramkó Márton,<sup>1</sup> Stadler Róbert Gábor,<sup>1</sup> Pinke Péter,<sup>2</sup> Kovács Tünde Anna<sup>2</sup>

 <sup>1</sup> Óbudai Egyetem, Anyagok és Technológiák Doktori Iskola. Budapest, Magyarország, schramko.marton@bgk.uni-obuda.hu, stadler.robert@bgk.uni-obuda.hu
 <sup>2</sup> Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Budapest, Magyarország, pinke.peter@bgk.uni-obuda.hu, kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu

# Abstract

Nowadays, polymers have grown into a leading group of materials. Accordingly, many technical polymers are used in industry. As the ending knee absorption increases, the binding design is also being studied continuously. In addition to mechanical and glued joints, different welding processes stand out, such as laser welding, stirrer friction welding, and ultrasound welding. The research was carried out on polypropylene, the plastic called PP. The aim of the study is to examine the ultrasonic welding of polypropylene sheets. During welding processes, we examine the effect of parameters such as welding time, amplitude and main load on the strength of the welding seam. Based on the test results, it was possible to create high-quality joints. The highest seam strengths were obtained with a welding time of 1.2 s and an amplitude of 55 µm. The effect of the main load on the strength of the seams was minimal.

Keywords: ultrasonic welding, polypropylene, welding strength.

# Összefoglalás

Napjainkban a műanyagok vezető anyagcsoporttá nőtték ki magukat. Az iparban ennek megfelelően számos műszaki polimert alkalmaznak. Miután egyre nagyobb a térnyerésük, a kötés kialakítása is folyamatos kutatás tárgya. A mechanikai és ragasztott kötések mellett kiemelkednek a különböző hegesztési eljárások, mint a lézeres hegesztés, kavaró dörzshegesztés vagy az ultrahangos hegesztés. A kutatást a polipropilén műanyagra végeztük el, a tanulmány célja, hogy megvizsgáljuk a polipropilénlemezek ultrahangos hegesz tését. A hegesztési folyamatok során olyan paraméterek hatását vizsgáljuk a hegesztési varrat szilárdságára, mint a hegesztési idő, amplitúdó és főterhelés. A vizsgálati eredmények alapján jó minőségű kötéseket sikerült létrehozni. A legnagyobb varratszilárdságokat 1,2 s hegesztési idő, valamint 55 µm amplitúdó mellett kaptuk. A főterhelés hatása minimális volt a varratok szilárdságára.

Kulcsszavak: ultrahangos hegesztés, polipropilén, kötésszilárdság.

# 1. Bevezetés

A műanyagok az elmúlt évtizedekben vezető anyagcsoporttá váltak. Ennek következtében napjainkban nehezen találunk olyan iparágat, ahol ne találkoznánk valamilyen műanyaggal. Az elterjedés mellett meg kellett oldani az anyag jó minőségű, gazdaságos és termelékeny kötéstechnológiáját. Az ismert eljárásfajták közül kiemelkedik a ragasztás és a hegesztés. Mind a két típus népszerű kutatási területnek számít a mai napig, és folyamatosan jelennek meg velük kapcsolatban publikációk. A ragasztás esetén a különböző felületkezelési eljárások hatásának, valamint különböző ragasztóanyagok alkalmazásának a vizsgálatát lehet kiemelni **[1, 2]**.

A műanyagok hegesztésével kapcsolatban a lézeres hegesztés [3], a kavaró dörzshegesztés [4], valamint az ultrahangos hegesztés emelhető ki. Az ultrahangos hegesztés minden olyan előnyös tulajdonsággal bír – jó kötési minőség, gyors, gazdaságos és automatizálható –, ami elősegíti, hogy mind a fémek, mind pedig a műanyagok esetén széles körben alkalmazzák ipari szinten, például az autóiparban [5, 6].

A széles körű ipari elterjedés erős gyakorlati hátteret ad ahhoz, hogy évről évre több publikáció és tanulmány jelenjen meg az ultrahangos hegesztés technológiájának fejlesztése és optimalizálása kapcsán. A témával kapcsolatban népszerűek az eltérő anyagminőségek hegesztésével (például réz és alumínium [7], fém-polimer [8]), műanyagmátrixú kompozitok hegesztésével [9], illetve a paraméterek optimalizálásával [10] foglalkozó vizsgálatok. Végezetül, mind a polimer anyagok, mind pedig az ultrahangos hegesztés technológiájának széles körű elterjedése elősegítette a műanyagok ultrahangos hegesztésével kapcsolatos tanulmányok számának növekedését.

Kiss és társai [9] polipropilénmátrixú kompozitlemezek (APPC) ultrahangos hegesztését vizsgálták. A folyamatparaméter, amit a vizsgálatok során változtattak, a hegesztési idő volt. A hegesztési mintákat 0,1 és 1,0 mp időtartományban állították elő. A hegesztési folyamat után vizsgálták a varrat szilárdságát. A kapott eredmények alapján sikerült elérni az alapanyag kötési szilárdságát.

Kawasaki és társai **[10]** szénszál-erősítésű, polipropilénmátrixú kompozit (CF/PP) ultrahangos hegesztése során bekövetkező hőmérséklet-eloszlást vizsgálták. A vizsgálatok során 3-3 szinten változtatták a szonotróda amplitúdóját és a hegesztési időt. A hőmérséklet és annak eloszlásának mérésén kívül egylapos nyírási vizsgálatokat végeztek a hegesztett kötéseken. A vizsgálatok megerősítették, hogy a szonotróda amplitúdójának jelentős a hatása mind a hegesztés közbeni hőmérséklet-eloszlásra, mind a kötés minőségére, befolyásolva a meghibásodás módját.

Raza és társai [11] PP- és ABS-lapok ultrahangos hegesztését vizsgálták Taguchi-kísérletterv segítségével. A vizsgálatok során a két különböző, hőre lágyuló műanyag mellett kétféle energiairányító geometriát (háromszög és félkör alakú), a hegesztési időt, az amplitúdót és a nyomást is változtatták. A hegesztés után a varratok teherbírását nyíró-szakító vizsgálattal értékelték. Ezen kívül paraméterként tekintettek a hegesztési energiára is. A vizsgálati eredmények alapján a PP és az ABS hasonló tendenciát mutatott a paraméterek tekintetében, valamint mind a két anyag esetében a háromszög alakú energiairányító jobb kötést hozott létre. Rajput és társai **[12]** a hegesztési változók (például hegesztési idő, tartási idő, amplitúdó stb.) hatását vizsgálta H110MA polipropilén ultrahangos hegesztése során. A fentebb említett paramétereket 3-3 szinten változtatták a szerzők. A mérési pontok tervezésére Taguchi-, míg a kiértékelés során ANOVA-módszert alkalmaztak. A vizsgált kimeneti paraméter a leválasztási ellenállás volt. A mérési eredményeik alapján kimutatták, hogy az amplitúdó hatása a legnagyobb a szétválási ellenállásra.

Ahogyan az említett publikációkban látható, a polipropilén (PP) anyagok ultrahangos hegesztése népszerű kutatási téma. Érdemes kiemelni, hogy a PP a második legnagyobb mennyiségben gyártott polimer anyag, és olyan vezető iparágakban alkalmazzák nagy mennyiségben, mint a járművagy orvosi ipar [13].

Jelen tanulmány célja is a PP ultrahangos hegesztésének vizsgálata, a bemeneti paraméterek optimalizálása és azok hatása a hegesztési varrat szilárdságára.

#### 2. Anyag és módszertan

A vizsgálataink során 4 mm vastag DOCAP-RÉN-H polipropilénlemezeket hegesztettünk össze. A hegesztési kísérleteket BRANSON típusú ultrahangos hegesztőgéppel hajtottuk végre, a lemez 10 mm széles volt, az átlapolás szintén 10 mm, ezáltal a pontkötésünk 100 mm<sup>2</sup> területű, a lemezek hossza pedig 70 mm (lásd 1. ábra).

A szakirodalom áttekintése alapján két kísérletsorozatot hajtottunk végre. Az egyik kísérletsorozatban állandó értéken tartottuk az amplitúdót (55 μm), az előterhelést (0,2 MPa) és a főterhelést



1. ábra. A kísérletekhez alkalmazott hegesztőgép

(0,4 MPa); a diagramokon a terhelést PSI-ben adjuk meg, miként a gépen is. Eme állandó értékek mellett változtattuk a hegesztési időt 0,7 és 1,3 s között 0,1 s-os lépésközönként. Az itt kapott eredmények alapján terveztük meg a második kísérletsorozatot, ahol a főterhelést és az amplitúdót módosítottuk 3-3 szinten az 1. táblázat alapján.

1. táblázat. A hegesztési paraméterek értékei

Paraméterek		Szintek				
		-1	0	1		
<i>x</i> <sub>1</sub>	Főterhelés, psi-ben	45	50	55		
<i>x</i> <sub>2</sub>	Amplitúdó, µm	50	55	60		

A hegesztési varratok minőségét a szakításhoz szükséges terheléssel jellemeztük. A vizsgálatokat ELT – Schaltschrank típusú szakítógéppel vizsgáltuk, az elmozdulás sebessége 10 mm/perc volt.

# 3. Eredmények

#### 3.1. A hegesztési idő hatása

Az első kísérletsorozatban a hegesztési időt változtattuk. A kapott eredményeket grafikusan a 2. ábrán szemléltetjük.

Az ábrán jól megfigyelhető, hogy jelentős a befolyása a hegesztési időnek a varrat szilárdságára. A tesztek során minden vizsgált ponton 15 hegesztést végeztünk; az ábrán ezek átlaga látható A legrosszabb minőségű kötést 1 s-os hegesztési idő mellett kaptuk (18,5 MPa), míg a legnagyobb értéket 1,2 s mellett mértük, ekkor a varrat szilárdsága 28,2 MPa volt.

Az ábrán továbbá jól megfigyelhető az ultrahangos hegesztésre jellemző, a hegesztési idő hatására ingadozó hegesztési minőség, ami általában megfigyelhető a keménységparaméter változásában is a távolság függvényében [7].



 ábra. A varratok szilárdságának alakulása a hegesztési idő függvényében

#### 3.2. A főterhelés és az amplitúdó hatása

Az első kísérletsorozat alapján megállapítottuk, hogy a legnagyobb varratszilárdságot 1,2 mp mellett kapjuk. Ezért ezt a hegesztési időt állandó értéken tartva végrehajtottuk az 1. táblázatban feltüntetett bemeneti változók mellett a második kísérletsorozatot. Teljes kísérlettervet alkalmaztunk, így az összes paraméter-kombinációt vizsgáltuk (9 mérési pont).

Az eredményeket grafikusan a **3. ábrá**n szemléltetjük.

Az ábrán jól megfigyelhető, hogy a főterhelésnek jelentősen kisebb a hatása a varratszilárdságra, mint az amplitúdónak. Az amplitúdóváltoztatásnál viszont jól megfigyelhető, hogy a legnagyobb értékeket 55 μm-en kaptuk.

## 4. Következtetések

A kísérleti eredmények az eddigi szakirodalmi eredményeket alátámasztják. A jelenlegi kutatás alapjánál levont következtetések a következők:

- A legnagyobb szakadási szilárdságot 1,2 mp-es hegesztési idő mellett kaptuk.
- Az amplitúdó változtatása nagyobb befolyással volt a varratok szilárdságára, mint a főterhelés változtatása.
- A legnagyobb varratszilárdságot 55 µm amplitúdó mellett mértük.

#### Szakirodalmi hivatkozások

 Hamdi M., Saleh M. N., Poulis, J. A.: Improving the adhesion strength of polymers: Effect of surface treatments. Journal of Adhesion Science and Technology, 34/17. (2020) 1853–1870. https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1732750

[2] Cui C., Liu W.: Recent advances in wet adhesives: Adhesion mechanism, design principle and applications. Progress in Polymer Science, 116. (2021) 101388.

https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101388



3. ábra. A varratok szilárdsága az amplitúdó és a főterhelés függvényében

- [3] Acherjee B.: Laser transmission welding of polymers A review on process fundamentals, material attributes, weldability, and welding techniques. Journal of Manufacturing Processes, 60. (2020) 227–246.
  - https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.017
- [4] Stadler R. G., Horváth R.: Investigation of Welding Forces and Weld Strength for Friction Stir Welding of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Plates. Acta Materialia Transylvanica 6/1. (2023) 53–58. https://doi.org/10.33924/amt-2023-01-09
- [5] Kumar S., Wu C. S., Padhy G. K., Ding W.: Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review. Journal of Manufacturing Processes, 26. (2017) 295–322. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.027
- [6] Schramkó M., Nyikes Z., Pinke P., Tóth L., Kovács T. A.: Experimental Study of a Vehicle Component Ultrasonic Welding Failure. In: International Scientific Conference Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East, January 2023. Cham, Springer Nature Switzerland, 2023. 548–554. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36960-5\_62
- [7] Schramkó M., Nyikes Z., Jaber H., Kovács T. A.: Dissimilar Joining by Ultrasonic Welding. Journal of Hunan University Natural Sciences, 49/3. (2022).

https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.49.3.20

[8] Temesi T., Czigany T.: Integrated Structures from Dissimilar Materials: The Future Belongs to Alu*minum–Polymer Joints*. Advanced Engineering Materials, 22/8. (2020) 2000007. https://doi.org/10.1002/adem.202000007

 Kiss Z., Temesi T., Bitay E., Bárány T., Czigány T.: Ultrasonic welding of all-polypropylene composites. Journal of Applied Polymer Science, 137/24. (2020) 48799.

https://doi.org/10.1002/app.48799

[10] Kawasaki S., Naito K., Ishida O., Shirai T., Uzawa K.: Infrared-thermography measurement of temperature distribution in carbon fiber-reinforced polypropylene during ultrasonic welding. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 177. (2024) 107887.

https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107887

[11] Raza S. F., Khan S. A., Mughal M. P.: Optimizing the weld factors affecting ultrasonic welding of thermoplastics. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 103/5. (2019). 2053–2067.

https://doi.org/10.1007/s00170-019-03681-7

- [12] Rajput C., Kumari S., Prajapati V., Abhishek K.: Experimental investigation on peel strength during ultrasonic welding of polypropylene H110MA. Materials Today: Proceedings, 26. (2020). 1302–1305. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.259
- [13] Bárány T., Karger-Kocsis J. (eds.): Polypropylene Handbook: Morphology, Blends and Composites. Springer International Publishing, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12903-3





# Femtoszekundumos lézerrel végzett felületkezelés hatásai pultrúzióval gyártott üvegszállal erősített kompozitokon

# Effects of Femtosecond Laser Surface Treatment on Glass Fiber Reinforced Composites Produced by Pultrusion

Vaczkó Dániel,<sup>1</sup> Weltsch Zoltán,<sup>2</sup> Keresztes Róbert<sup>3</sup>

- <sup>1</sup> Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék. Kecskemét, Magyarország, vaczko.daniel@nje.hu
- <sup>2</sup> Széchenyi István Egyetem, Zalaegerszegi Innovációs Park, Közúti és Vasúti Járművek Tanszék. Győr, Magyarország, weltsch.zoltan@sze.hu
- <sup>3</sup> Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gépipari Technológiai Intézet. Gödöllő, Magyarország, keresztes.robert.zsolt@uni-mate.hu

## Abstract

In this study, we evaluated the effectiveness of laser surface treatment on flat, glass fiber-reinforced profiles produced by pultrusion. The experiments used a Coherent Monaco 1035-80-60 femtosecond laser, where the main parameter was laser power. The treated samples were examined with an Olympus OLS5000 confocal microscope, measuring the depth and area of the grooves created by the laser beam. The data were plotted as a function of power. Our results show that the increase in depth is not proportional to power, while there is a close correlation between changes in depth and area. These findings shed new light on the potential industrial applications of laser surface treatment for pultrusion-manufactured glass fiber-reinforced profiles, particularly concerning surfaces prepared for bonding.

**Keywords:** laser surface treatment, femtosecond laser, pultrusion, bonding technology, glass fiber.

# Összefoglalás

Ebben a tanulmányban a pultrúzióval előállított, üvegszálas, lapos profilokon a lézeres felületkezelés hatékonyságát értékeltük. A kísérletekben Coherent Monaco 1035-80-60 femtoszekundumos lézert használtunk, ahol a fő paraméter a lézer teljesítménye volt. Az így kezelt próbadarabokat Olympus OLS5000 konfokális mikroszkópon vizsgáltuk meg, ahol a lézernyaláb által kialakított árkok mélységét és területét mértük. Az adatokat a teljesítmény függvényében grafikonon ábrázoltuk. Eredményeink azt mutatják, hogy a mélység növekedése nem arányos a teljesítménnyel, míg a mélység és terület változása között szoros összefüggés figyelhető meg. Ezek az eredmények új megvilágításba helyezik a pultrúzióval előállított üvegszálas profilok lézeres felületkezelésének potenciális ipari alkalmazásait, különösen a ragasztásra előkészített felületek szempontjából.

Kulcsszavak: lézeres felületkezelés, femtoszekundumos lézer, pultrúzió, kötéstechnológia, üvegszál.

# 1. Bevezetés

A pultrúzió egy folyamatos gyártási folyamat, amelyet különösen az üvegszál-erősítésű műanyagok előállítására használnak. Ebben az eljárásban a szálerősítő anyagokat, mint például üvegszálakat, először gyantakádon vezetik át, majd ezeket egy hosszú, fűtött szerszámon keresztül húzzák, ahol a műgyanta polimerizálódik, így létrehozva a kívánt profilú, hosszú és merev kompozit elemeket. A pultrúzió lehetővé teszi a nagy szilárdságú és korrózióálló kompozit szerkezeti elemek gyors és költséghatékony előállítását **[1]**. A folyamat az **1. ábrá**n látható.

Az üvegszál-erősítésű műanyagok kiterjedt használata az iparban, különösen a járműgyártásban és az építőiparban, nagy szilárdságuk és korrózióállóságuk miatt előnyös. Azonban az üvegszál-erősítésű műanyagok gyenge felületi energiája korlátozza ragasztási tulajdonságaikat, ami kihívásokat jelent a kötéstechnológiák számára, különösen a ragasztás és laminálás területén [2].

A femtoszekundumos lézer rövid lézerimpulzusokat használ, és lehetővé teszi a felületek mikroszerkezetének módosítását anélkül, hogy az alapanyagot termikusan károsítaná. Ez a felületkezelési eljárás különösen előnyös a műanyagfelületek előkészítésére, mivel javítja a felületi feszültséget és ezáltal a kötések minőségét [3].

Banks és munkatársai kutatásukban bemutatják, hogy a femtoszekundumos lézerek segítségével különösen hatékonyan lehet komplex, nagy precizitású metszéseket és furatokat készíteni különböző anyagokban, anélkül, hogy a környező anyagban károsodást okoznának. Az ilyen jellegű munkálatok során a lézerimpulzusok olyan pontosan irányíthatók, hogy a maradék anyag strukturális integritása teljesen sértetlen marad, ami kritikus jelentőségű bizonyos ipari alkalmazásoknál [4].

A tanulmány célja a Coherent Monaco 1035-80-60 femtoszekundumos lézerrel végzett felületkezelések hatásának vizsgálata a pultrúzióval előállított profilokon, különösen a kötés anyagtulajdonságai, mint a kötésszilárdság és a felületi energia javítása szempontjából. Az eredmények rávilágítanak a femtoszekundumos lézerek ipari alkalmazásának lehetőségeire a kompozit anyagok felületkezelésében.

# 2. Kísérletek

#### 2.1. Felületkezelés és minta-előkészítés

A kutatás során pultrúzióval előállított, üvegszál-erősítésű műanyag lapos profilokat használtunk, melyek összetétele a következő volt: üvegtartalom 64%, Barcol keménység 48, alumínium-trihidrát (ATH) 21,8%, és az alapgyanta ISO NPG. A minták előkészítése magában foglalta a méretre vágást és a felületek tisztítását metanollal a kezelés előtt, hogy eltávolítsuk a felületi szenynyeződéseket. A felületkezelést Coherent Monaco 1035-80-60 femtoszekundumos lézerrel végeztük (2. ábra), ahol a változó a teljesítmény volt. A többi változó értékei: többi impulzusidő 277 fs, impulzusfrekvencia 750 kHz, haladási sebesség 1 m/s. A lézer teljesítménye 10%-tól 100%-ig 10%-os lépcsőkben volt állítva. A teljesítmény változtatásával különböző mintákat állítottunk elő. melyeket később konfokális mikroszkóppal vizsgáltunk.

#### 2.2. Mikroszkópos elemzés

A lézeres kezelés hatásainak vizsgálatára a minták felületi struktúráját Olympus OLS5000 konfokális mikroszkóppal elemeztük, 20×-os nagyítású objektívet használva a részletesebb felületi struktúra vizsgálatához (**3. ábra**). A mikroszkópos vizsgálatok klimatizált helyiségben történtek, hogy biztosítsuk a környezeti változások minimális hatását a mintákra és a mérések pontosságát.

Az adatgyűjtés és az elemzés a mikroszkóp saját szoftverével történt, ami lehetővé tette a mért adatok pontos és megbízható kiértékelését. A mérések során a lézernyaláb által létrehozott árok mélységét és területét mértük. A szoftver 3D-s topográfiát tud létrehozni (4. ábra). A képen minimális zajok is előfordulhatnak, melyek tüskék formájában jelennek meg; ezeket zajszűréssel



1. ábra. A pultrúzió folyamata [5]



2. ábra. Felületkezelés femtoszekundumos lézerrel



3. ábra. Olympus OLS5000 mikroszkóp



4. ábra. 3D-s topográfia, színekkel jelölve a mélységek



5. ábra. A mélység és terület változása a teljesítmény függvényében

csökkentettük. A mélység és terület méréséhez szükség volt az árok metszeti képének létrehozására, ehhez az árok egy 300 μm-es szakaszának átlagolt méreteit vettük figyelembe.

# 3. Eredmények

A vizsgálat során a Coherent Monaco 1035-80-60 femtoszekundumos lézerrel kezelt műanyag profilok mikroszkópos elemzése fontos információkat nyújtott a lézer teljesítményének felületi struktúrára gyakorolt hatásáról.

A grafikonon látható, hogy a mélység és a terület jelentős mértékben nő a lézer teljesítményének növekedésével. A lézer teljesítményének 10%-os szintjén az árok mélysége körülbelül 10  $\mu$ m volt, míg a terület körülbelül 1000  $\mu$ m<sup>2</sup>. Amint a teljesítmény 100%-ra nőtt, az árok mélysége megközelítette a 60  $\mu$ m-t, és a terület meghaladta a 2500  $\mu$ m<sup>2</sup>-t.

A 0–20% tartományban a lézer teljesítménye túl alacsony ahhoz, hogy jelentős változásokat hozzon létre, ezért a mélység és a terület alacsony marad. A 20–40% tartományban a teljesítmény növekedésével a mélység és a terület gyorsan növekszik, mivel a lézer elegendő energiát biztosít a felületi struktúrák módosításához. A 40–50% tartományban a növekedés üteme lelassul, jelezve, hogy a lézer teljesítménye közel van a maximális hatékonysághoz. Azonban a 80–100% tartományban a növekedés ismét lelassul, és enyhe csökkenés is megfigyelhető, valószínűleg a gyanta részleges megolvadása miatt, ami visszafolyik a mikroárkokba, csökkentve azok mélységét és területét.

A kapott adatok alapján grafikont készítettünk, amely ábrázolja az árok mélységének és területének változásait a lézer teljesítményének függvényében. Ez a grafikon egyértelműen mutatja a változást a teljesítmény növekedése és az árok mérete között (5. ábra).

# 4. Következtetések

A kutatás során elvégzett mikroszkópos elemzések és a kapott adatok alapos kiértékelése lehetővé tette, hogy átfogó képet kapjunk a femtoszekundumos lézer alkalmazásának hatásairól a pultrúzióval előállított, üvegszál-erősítésű műanyag profilok felületkezelésére. Az eredmények egyértelműen kimutatták, hogy a lézer teljesítményének növelése arányosan növeli a mikroárok mélységét és területét a GFRP-felületeken, ami jelentős befolyást gyakorol a felületi morfológiára.

A grafikon elemzése alapján a mélység és a terület változása a teljesítmény növekedésével nem egyszerű lineáris vagy exponenciális trendet követ, hanem különböző szakaszokban eltérő mintázatot mutat. Az alacsony teljesítményű tartományban a növekedés minimális, majd közepes teljesítménynél gyors növekedés figyelhető meg, míg a magas teljesítményű tartományban a növekedés lelassul, és néha csökkenés is előfordul. Ez az összefüggés alátámasztja a lézeres kezelés alkalmazhatóságát a műanyagfelületek tulajdonságainak célzott módosítására.

A mikroszkópos vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy a nagyobb teljesítménnyel végzett felületkezelés egyenletesebb mikrostruktúrát eredményez, ami kedvezőbb lehet a ragasztási folyamatok szempontjából. Az egyenletes mikrostruktúra növelheti az adhéziót, ami elősegítheti a jobb kötésszilárdság elérését.

A nagy teljesítményszinten létrejövő olvadék miatt a későbbiekben érdemes lesz megvizsgálni, hogy optimális beállítások esetén, de többszöri kezelésre hogyan reagál az alapanyag.

A tanulmány eredményei hozzájárulhatnak a műanyagok ipari feldolgozásának fejlesztéséhez, különösen olyan területeken, ahol a felületi tulajdonságok, mint a ragaszthatóság és a mechanikai tartósság, kulcsfontosságúak.

#### Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott kutatás a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00052 számú pályázat támogatásával jött létre. A projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által meghirdetett pályázat keretében valósult meg.

#### Szakirodalmi hivatkozások

 Fairuz A. M. et al.: Polymer composite manufacturing using a pultrusion process: A review. American Journal of Applied Sciences, 11/10. (2014) 1798–1810.

https://doi.org/10.3844/ajassp.2014.1798.1810.

- [2] Gattass R. R., Mazur E.: Femtosecond laser micromachining in transparent materials. Nature photonics, 2/4. (2008) 219–225. https://doi.org/10.1038/nphoton.2008.47
- [3] Sugioka K. et al.: Femtosecond laser 3D micromachining: a powerful tool for the fabrication of microfluidic, optofluidic, and electrofluidic devices based on glass. Lab on a Chip, 14/18. (2014) 3447– 3458.

https://doi.org/10.1039/C4LC00548A

[4] Banks Paul Stuart et al.: Femtosecond laser materials processing. Commercial and Biomedical Applications of Ultrafast Lasers II. Vol. 3934. SPIE, 2000.

https://doi.org/10.1117/12.386356

[5] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi kiadó, Budapest, 2000.