ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA

Anyagtudományi Közlemények

7. évfolyam, 2024. 1. 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-2024-01
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

BOGNÁR ADRIÁN, LEDNICZKY GYÖRGY, KUN KRISZTIÁN, ZSIDAI LÁSZLÓ1
Szálkisajtolással előállított, 1.4542 típusú korrózióálló acél próbatestek mikroszerkezeti vizsgálata
Microstructural Characterization of 1.4542 Type Stainless Steel Specimens Manufactured by Fused Filament Fabrication
BORBÉLY RICHÁRD, KÖLÜS MARTIN LÁSZLÓ, BÉRES GÁBOR JÓZSEF
Járműkarosszéria-lemezek alakítási tulajdonságainak vizsgálata
Examination of the Forming Properties of Vehicle Body Panels
BREZNAY CSABA, VARBAI BALÁZS14
Ausztenites korrózióálló acélok lézeres hegesztési varratainak korróziós vizsgálata
Corrosion Testing of Laser Welded Austenitic Stainless Steel Welds
JUHÁSZ ZSOMBOR, RENKÓ JÓZSEF BÁLINT18
Többtengelyű kovácsolással alakított rézminták mikrokeménységének vizsgálata
Investigation of Microhardness of Multiaxially Forged Copper Samples
KÖLÜS MARTIN LÁSZLÓ, BORBÉLY RICHÁRD, BÉRES GÁBOR JÓZSEF
A karcsúsági viszony hatása a síkbeli alakváltozásra halmaznyomó vizsgálatok során
Effect of the Slenderness Relation on in-plane Deformation in Stack Compression Tests
MÁRTON PÉTER
A 3PHV60 típusú műgyanta alkalmazása a faszerkezetek javítására
Application of 3PHV60 Type Epoxy Resin for the Repair of Timber Structures
OLÁH KLAUDIA, KORSÓS KRISZTIÁN, KOVÁCS DORINA
Eltérő nitridálási eljárásokkal kezelt melegalakító szerszámacél vizsgálata ciklikus hőterhelést követően
Examination of a Hot-Work Tool Steel Treated with Different Nitriding Processes after Cyclic Heating

SIMON VIRÁG, VARBAI BALÁZS, ABAFFY KÁROLY, GYURA LÁSZLÓ44
A teljesítmény és a haladási sebesség hatása a varratgeometriára kézi lézeres hegesztés esetén
The Effects of Laser Power and Travel Speed on Weld Geometry in the case of Manual Laser Welding
STADLER RÓBERT GÁBOR, HORVÁTH RICHÁRD48
Polikarbonátlemezek kavaródörzs-hegesztett kötésének vizsgálata Investigation of Friction Stir Welded Polycarbonate Plates
SZABÓ VALENTIN ENDRE, KUN KRISZTIÁN

Üvegszál-erősítésű, pultrudált műanyag profilok csavarkötésének roncsolásos vizsgálata Tensile Testing of Bolted Joints in Pultruded Glass Fibre Reinforced Plastic Profiles





Szálkisajtolással előállított, 1.4542 típusú korrózióálló acél próbatestek mikroszerkezeti vizsgálata

Microstructural Characterization of 1.4542 Type Stainless Steel Specimens Manufactured by Fused Filament Fabrication

Bognár Adrián,^{1*} Ledniczky György,¹ Kun Krisztián,¹ Zsidai László²

^{1*} Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország, bognar.adrian@nje.hu

² Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Szent István Campus, Gépészeti Technológiák Központ, Anyagtudományi és Gépipari Folyamatok Tanszék, Gödöllő, Magyarország

Abstract

The processes of design and manufacturing continue to expand with extraordinary opportunities due to the emergence and development of additive manufacturing technologies. Additive manufacturing processes radically differ from traditional manufacturing methods and require a completely new engineering approach. As a result, new possibilities emerge, allowing the creation of geometries that were previously difficult or impossible to produce using other technologies. Significant application opportunities exist in fields such as medicine and many sectors of industry due to this advancement. The range of materials used in additive manufacturing is constantly improving and expanding, although the most significant results are in the area of industrial applicability, which is the focus of this research. It is important to mention that besides Selective Laser Sintering / Selective Laser Melting (SLS / SLM), Fused Filament Fabrication (FFF) is worth considering for producing metal parts, due to lower costs and the possibility of manufacturing larger parts. The aim of the research is to examine the microstructural and macrostructural characteristics of finished components produced by FFF.

Keywords: additive manufacturing, material extrusion, stainless steel, microstructural characterization.

Összefoglalás

Az additív gyártási eljárások térnyerése és fejlődése további lehetőségeket nyit meg a gyártási folyamatokban. Az additív gyártási eljárások merőben eltérnek a hagyományos gyártási módszerektől és teljesen új mérnöki megközelítést igényelnek. Ennek eredményeként új lehetőségek nyílnak meg, és olyan alakú testek hozhatók létre, amelyeket korábban, más eljárásokkal nehezen vagy egyáltalán nem lehetett előállítani. Az orvostudomány és az ipar számos területén kiemelkedő alkalmazási lehetőségek rejlenek ebben a fejlődésben. Az additív gyártáshoz felhasznált anyagok palettája folyamatosan bővül, ezért jelen kutatás a fém próbatestek előállítására és vizsgálatára koncentrál. Fontos megemlíteni, hogy a fém alkatrészek előállításához érdemes figyelembe venni a szelektív lézeres szinterelés és a szelektív lézeres olvasztás mellett a szálkisajtolásos gyártást is. Ennek oka a kisebb költségek és a nagyobb méretű alkatrészek gyártásának lehetősége. A kutatás célja vizsgálni a szálkisajtolással előállított próbatestek szövetszerkezeti és mikroszerkezeti sajátosságait.

Kulcsszavak: additív gyártás, fémkisajtolás, korrózióálló acél, szövetszerkezet.

1. Bevezetés

A fémtermékek additív gyártása egyre jellemzőbb a járműipari alkatrészek és az orvosi protézisek előállítása területén, köszönhetően a széles körű eljárás- és alapanyag-palettának. Ezek az eljárások jelentős befektetést igényelnek és bonyolult felszerelést, annak érdekében, hogy biztonságosan, minimális egészségügyi kockázat mellett váljon kezelhetővé a fémpor. Az SLS® vagy DMLS márkanevű eljárásokban használt fémporok szemcsemérete 15–50 µm, ami hasonló egészségügyi kockázatot jelent egy gépkezelő számára, mint hegesztés esetén [1, 2]. Többek között ezen okokból, továbbá a jelentős beruházási költségek és a lézerrel kapcsolatos biztonsági kérdések tettek érdemlegessé több kutatási irányt, amelyek új módszereket alkalmaznak a fém alkatrészek additív gvártási előállítására [3].

1.1. Fémes anyagok additív gyártása

Az ISO 52900-1 terminológiai szabványban meghatározott, hétféle additív gyártási eljárás közül az anyagkisajtolás (angolul: material extrusion) egyik változata a huzalolvasztásos gyártás (angol kereskedelmi nevén: fused filament fabrication, FFF). A szálkisajtolásos fémnyomtatás első lépéseként zöld darabok előállítása történik. Ezek az alkatrészek még nem estek át a kötőanyag-eltávolítási és szinterelési folyamaton. Alak- és mérethűséget tekintve megfelelők, azonban felületi érdességük és sűrűségük nem olyan jól szabályozott, mint a lézeres eljárásoknál. A zöld darabok a kötőanyag-eltávolítási folyamat után igénylik a legnagyobb odafigyelést, ugyanis ebben a stádiumban jellegzetes színükből adódóan barna darabnak nevezzük őket. Ezek a darabok porózusak, törékenyek, nincs bennük az összetartást segítő kötőanyag. A megelőző szakirodalmi áttekintések alapján elmondható, hogy emiatt a folyamatnak vannak korlátai is, ugyanis a próbatestek szilárdsága miatt a belső részeknek van egy minimális kitöltési igénye [1, 3].

Az FFF egyszerűen végezhető folyamat, továbbá csekély befektetést igényel más additív gyártási eljárásokhoz képest. További előnye, hogy bonyolult darabok gyártása esetén nem szükséges elvezető csatornákat kialakítani, hogy a fel nem használt port elvezessük a munkatérből **[4, 5, 6]**.

Az 1. ábra a szálkisajtoláson alapuló fém alkatrészek előállításának folyamatát mutatja.



 ábra. A szálkisajtolás alapú fémnyomtatás folyamata

1.2. Utókezelési eljárások

Ahogyan a korábbi bekezdésben említettük, az így előállított zöld darabok további kezeléseket igényelnek, hogy a tömör anyagból készültekkel közel azonos tulajdonságú próbatesteket kapjunk [1, 3].

A kezelések során először a kötőanyag eltávolítása történik. Az így létrejött barna darabokat nagy hőmérsékleten kell szinterelni. Amennyiben indokolt a mechanikai tulajdonságok növelése, további eljárások, például hőkezelés vagy meleg izosztatikus sajtolás is végezhető a darabokon [4, 5].

A kötőanyag-eltávolítási eljárások között három fő eljárás ismeretes:

- oldószeres: triklór-etán vagy -heptán használata;
- termikus: 60–600 °C hőmérséklet-tartomány alkalmazása;
- katalitikus: salétromsav vagy oxálsav használata 110–150 °C között [7].

A kötőanyag-mentesítés után létrejött barna darabok a nagy hőmérsékletű szinterelés után elérik a kész állapotot, eközben a zöld darabhoz képest 10–20% zsugorodáson mennek keresztül. Ennek kompenzálására a tervezéskor nagy hangsúlyt kell fektetni a megfelelő skálázási beállításokra. X, Y, Z irányban különböző mértékben kell növelni a próbatestek méreteit. Az ehhez szükséges értékeket a hozaganyag gyártója határozza meg [8].

Szinterelés során hatféle anyagtranszport-mechanizmust különböztetünk meg:

- felületi diffúzió;
- rácsdiffúzió;

3

- szemcsehatári diffúzió;
- párolgás és kondenzáció;
- viszkózus áramlás;
- képlékeny alakváltozási áramlás [9].

A szinterelési folyamat után a munkadarabok porozitása 10–20% között várható az alkalmazott hőmérséklettől függően. Szinterelés során nitrogén, argon és hidrogén is alkalmazható védőgázként. A szinterelést több tényező befolyásolja:

- fűtési sebesség;
- szinterelési hőmérséklet;
- szinterelési folyamat ideje;
- kemence atmoszférája [10].

2. A kísérlet módszertana

A nyomtatás BASF Ultrafuse 17-4PH márkanevű szállal (angolul: filament) történt. Ez a hozaganyagféle a fémnyomtatással foglalkozó irodalmakban az egyik leggyakoribb hozaganyag, valójában nem más, mint 1.4542 típusú rozsdamentes acél anyagú porból és kötőanyagból kisajtolással előállított kompozit szál. A nyomtatási hozaganyag feldolgozási körülményeire vonatkozó legfontosabb jellemzők az **1. táblázat**ban láthatók.

1. táblázat. A BASF Ultarfuse 17-4PH hozaganyag adatlapja szerint ajánlott feldolgozási beállítások [8]

Ajánlott nyomta	atási beállítások
Fúvóka hőmérséklete	230–250 °C
Nyomtatótálca hőmér- séklete	90–100 °C
Fúvóka átmérője	≥0,4 mm
Nyomtatási sebesség	15–50 m/s
Hűtés	nem
Próbatestek skálázása	X és Y irányban: 119% Z irányban: 122%

A próbatestek előállításához CraftBot Flow Idex XL típusú, szálkisajtolással működő 3D-s nyomtatót használtunk.

2.1. A megváltoztatott gyártási paraméterek

A kísérlet során a fémfröccsöntésnél is alkalmazott próbatestek nyomtatása történt eltérő beállításokkal [11].

Minden darab 100% kitöltéssel, lapjára fektetve készült. Változóként három paramétert választottunk ki a CraftWare szeletelő szoftverben, amelyek a megelőző szakirodalmi eredmények alapján hatással lehetnek a mechanikai tulajdonságokra, illetve a nyomtatási időre:

- rétegvastagság (mm);

- nyomtatási sebesség (mm/s);
- kitöltési orientáció (°) [12, 13, 14].

A nyomtatási sebesség alapvetően a nyomtatófej mozgási sebességére, ezáltal a nyomtatás idejére van hatással. Lehetséges azonban, hogy a rétegek közti adhézió mértékét is befolyásolja, így akár a szakítószilárdság is változhat **[15, 16, 17]**.

Az előkísérletek során bebizonyosodott, hogy a nyomtatási sebességet csökkenteni kell, így ennek értékeit szűkebb tartományból választottuk ki.

2. ta	áblázat.	A próbatest	ek gyártásához	használt
		nyomtatási	paraméterek	

Kísérlet száma	Réteg-vas- tagság (mm)	Nyomtatási sebesség (mm/s)	Kitöltési orientáció (°)
#1	0,2	25	45
#2	0,3	15	45
#3	0,4	35	45

A legyártott zöld darabot a 2. ábra mutatja.	



2. ábra. A legyártott próbatest zöld darabja

2.2. Kötőanyag-eltávolítás és szinterelés

A különböző fémporból és kötőanyagrendszerből felépülő anyagok eltérő kötőanyag-eltávolítási és szinterelési módszereket és atmoszférát igényelnek. Jelen kísérletben ez a művelet a BASF hivatalos ajánlásának megfelelő és akkreditált tevékenységet folytató szervezet, az Elnik System GmbH ajánlásai szerint történt [18].

A kötőanyag-eltávolítás ciklusában először előfűtés történik 120 °C-ra kis hevítési sebességgel, kezdetben 5, majd 1 és 0,5 °C/perc sebességgel. Amint a berendezés eléri a 120 °C-ot, 45 perc hőn tartás következik. Ezután indul be a saváramlás, ami a falvastagságtól függően 1 óra/mm ideig tart. A sav áramlása 3,4 ml/perc. Amikor a sav áramlása befejeződik, 120 °C-on 90 percig történik a hőn tartás, hogy a kemence megtisztuljon, és előkészíthető legyen a nyitási folyamatra.

A kötőanyag-eltávolítási ciklust a **3. ábra** mutatja. A kötőanyag-eltávolítás CD 3045 típusú (**4. ábra**) kemencében történt, mely a BASF által szabadalmaztatott, Catamold kötőanyagrendszer eltávolításához igazodik.



3. ábra. A kötőanyag-eltávolítás diagramja



4. ábra. CD 3045 típusú kötőanyag-eltávolító kemence [18]



5. ábra. A szinterelés diagramja



6. ábra. MIM 3045 típusú szinterelőkemence [18]



7. ábra. Az elkészült kísérleti próbatest [11]

A kötőanyag eltávolítása után egy másik berendezésben zajlik a szinterelés. A szinterelési ciklus (5. ábra) először egy újbóli kötőanyag-eltávolítási szakasszal kezdődik. Először 450 °C-ra 5 °C/perc hevítéssel felfűtés történik, majd 150 percig hőn tartás következik. A következő lépcső 600 °C-on van, ennek eléréséhez 3°C/perc sebességgel hevítés, majd 60 percnyi hőn tartás következik. A szinterelési lépcső 1380 °C-on van, ezt 5 °C/perc hevítési sebességgel éri el a berendezés, majd a folyamat újabb 180 percnyi hőn tartással zárul. Végül a nyitást követően a kemence szabadon kihúl szobahőmérsékletig.

A **6. ábrá**n egy MIM3045 típusú szinterelőkemence a **7. ábrá**n látható. A kötőanyag-eltávolítás és szinterelési folyamat utáni kész próbatest.

3. Vizsgálati eredmények és kiértékelések

A következő képalkotási technikák különféle előnyöket kínálnak, lehetővé téve a próbatestek szerkezetének és összetételének részletes elemzését. Az elektronmikroszkóp nagy felbontású képeket készít, finom részleteket fedve fel közel nanométeres szinten. A konfokális mikroszkóp háromdimenziós szerkezetek vizualizálását teszi lehetővé optikai szakaszolási képességgel. A fénymikroszkóp átfogóbb képet ad a mintákról, lehetővé téve a nagyobb léptékű jellemzők és az általános morfológia megfigyelését. Ezek a képalkotási módszerek jó betekintést nyújtanak a minták mikroszerkezeti jellemzőibe. A felvételek szakítóvizsgálaton átesett próbatestekről készültek, ezekre a vizsgálatokra jelen kutatás nem tér ki.

3.1. Az elektronmikroszkópi képek kiértékelése

A mikroszerkezet-vizsgálati képek Zeiss Sigma 300 VP típusú pásztázó elektronmikroszkóppal készültek szekunderelektron- (SE-) detektorral, ami kis energiájú elektronokat is képes észlelni, így megállapítható vele a felület alakja, morfológiája. További segítséget nyújt a visszaszórt elektron- (BSD-) detektor, amely képes a periódusos rendszer különböző elemeit azonosítani rendszámérzékenyen. A 8–10. ábrán látható képek az elszakított próbatestek töretfelületéről készültek.



 ábra. Az #1-es kísérletben gyártott szakítópróbatest töretfelülete SE-detektorral készített képeken



9. ábra. #2-es kísérlet SEM-felvétele SE-detektorral

Mindegyik vizsgált kísérleti minta esetén jelentős porozitás figyelhető meg a töretfelületeken. A porozitás többek közt függ a szinterelés körülményeitől is. Érdekes jelenség, hogy a #3-as kísérlet mintáján kisebb nagyítás mellett a rétegek felülete erősen szemcsés, viszont 2000× nagyításnál kevésbé tűnik porózusnak, mint a másik két minta esetében. A felvételek alapján megállapítható, hogy az összeolvadás mértéke a rétegvastagság csökkentésével növelhető.

3.2. Polírozott csiszolatok vizsgálata fénymikroszkóppal

A kísérletekből beágyazott csiszolatok készültek. A mintákat polírozás után Zeiss Axio Imager M.2m típusú mikroszkóppal elemeztük. A mikroszkópi vizsgálattal összehasonlítható a csiszolat a töretfelülettel, különös tekintettel a SEM-felvételeken látható porozitásra és anyagfolytonossági hibákra.

A polírozás után felvételek készültek a mintákról. A **11–13. ábrá**k 25, 50 és 100× nagyítású képeken mutatják az egyes kísérletek mintáit.

Az #1-es kísérlet esetében az első rétegeknél figyelhetők meg nagyobb anyagfolytonossági hiányok, melyek a zöld termékre, ezáltal a nyomtatásra vezethetők vissza. A próbatest keresztmetszetének belső részében ugyan többnyire jól egyesültek a rétegek szinterelés után, a külső rétegen (héjon) továbbra is megfigyelhető a rétegződés.

A #2-es kísérlet mintájáról hasonló mondható el, annyi különbséggel, hogy a furat mentén a fejből vett minta keresztmetszetében jobban láthatók az egyes rétegek, illetve gyengébb a rétegek egyesülése.



10. ábra. #3-as kísérlet SEM-felvétele SE detektorral



11. ábra. Az #1-es próbatest mikroszerkezeti képe polírozott állapotban



12. ábra. A #2-es próbatest mikroszerkezeti képe polírozott állapotban



13. ábra. A #3-as próbatest mikroszerkezeti képe polírozott állapotban

A #3-as kísérletnél szintén látható az első rétegek hiányossága, és a furat mentén vett mintánál is láthatók a rétegek mellett nagyobb anyagfolytonossági hiányosságok.

Kisebb és nagyobb nagyítás mellett is jól látható, hogy minden próbatestben jelentős porozitás jellemző.

3.3. Maratott csiszolatok vizsgálata konfokális mikroszkóppal

A konfokális mikroszkóp optikai képalkotással virtuális síkot készít. Nagyon jó minőségű képek alkotására képes, finom részletekkel és nagyobb kontraszttal, mint a hagyományos mikroszkópok. Ezenkívül a képalkotó technika lehetővé teszi a vizsgált tárgy virtuális háromdimenziós képeinek



14. ábra. Az #1-es próbatest mikroszerkezeti képe maratott állapotban



15. ábra. A #2-es próbatest mikroszerkezeti képe maratott állapotban



16. ábra. A #3-as próbatest mikroszerkezeti képe maratott állapotban

rekonstrukcióját. A mikroszkópi képek Olympus OLS5000-SAF konfokális mikroszkóppal készültek. A konfokális mikroszkóppal készített felvételeket a 14–16. ábra mutatja.

A felvételeken látható sárgásbarna színárnyalatot a pórusokban visszamaradt marószer felületre kerülése okozza. A polírozott csiszolatok maratása (mivel a minta anyaga korrózióálló acél) királyvízzel történt, melynek összetétele:

- 10 ml salétromsav;
- 20 ml sósav;
- 30 ml desztillált víz.

A mintákra pipettával adagolva vihető fel a maratószer, amelyet 1 percig kell rajtuk hagyni, majd vizes öblítés után alkohollal tisztítható és szárítható a felület.

A fenti ábrákon látható szövetszerkezetek kisebb alaki eltérésekkel azonosak. Minden kísérleti minta esetében megfigyelhető a fénymikroszkóppal is észlelt porozitás.

4. Következtetések

A kutatásban bemutatott mikroszkópi csiszolatok egy kiterjedtebb kutatás részeredményeihez tartoznak. A felvételeken jól látható, hogy az előállított próbatesteknek jelentős a porozitása. Megfigyelhető továbbá, hogy a feldolgozási paraméterek jelentős hatást gyakorolnak a kialakuló mikro- és makroszerkezetre. Az elektronmikroszkópi felvételeken jól megfigyelhetők ezek az üregek és pórusok. A mikro- és makroszerkezeti hibák jelentősen csökkentik az additív gyártással előállított termék anyagának elérhető mechanikai tulajdonságait, ezért kiemelt fontosságú a minél jobb és homogénebb terméket eredményező nyomtatási stratégia és paraméterek meghatározása. A kutatás során feltárt hibák lehetőséget teremtenek további vizsgálatok folytatására, mint például a kötőanyag csökkentésének hatékonysága és a szinterelési paraméterek hatásának részletes elemzése.

Szakirodalmi hivatkozások

 Henry T. C., Morales M. A., Cole D. P., Shumeyko C. M., Riddick J. C.: *Mechanical behavior of 17-4 PH stainless steel processed by atomic diffusion additive manufacturing*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 114/7–8. (2021) 2103–2114. https://doi.org/10.1007/S00170-021-06785-1/FIG-

URES/13

- [2] Nurhudan A. I., Supriadi S., Whulanza Y., Saragih A. S.: Additive manufacturing of metallic based on extrusion process: A review. Journal of Manufacturing Processes, 66. (2021) 228–237. https://doi.org/10.1016/[.]MAPRO.2021.04.018
- [3] Zhang Y., Roch A.: Fused filament fabrication and sintering of 17-4PH stainless steel. Manufacturing Letters, 33. (2022) 29–32. https://doi.org/10.1016/[.MFGLET.2022.06.004
- [4] Kedziora S., Decker T., Museyibov E., Morbach J., Hohmann S., Huwer A., Wahl M.: Strength Properties of 316L and 17-4 PH Stainless Steel Produced with Additive Manufacturing. Materials, 15. 15/18. 6278.

https://doi.org/10.3390/MA15186278

- [5] Vaschetto S., Filipe J., Fernandes P., Selema A., Ibrahim M. N., Sergeant P.: Metal Additive Manufacturing for Electrical Machines: Technology Review and Latest Advancements. Energies 15/3. (2022) 1076.
 - https://doi.org/10.3390/EN15031076
- [6] Cho Y. H., Park S. Y., Kim J. Y., Lee K. A.: 17-4PH stainless steel with excellent strength elongation combination developed via material extrusion additive manufacturing. Journal of Materials Research and Technology, 24. (2023) 3284–3299.
- [7] Molaei R., Fatemi A., Phan N.: Multiaxial fatigue of LB-PBF additive manufactured 17–4 PH stainless steel including the effects of surface roughness and HIP treatment and comparisons with the wrought alloy. International Journal of Fatigue, 137. (2020) 105646.

https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2020.105646

- [8] Techinical Datasheet 17-4 PH https://forward-am.com/wp-content/uploads/2021/02/Ultrafuse_17-4PH_TDS_EN_ v1.1,pdf (letöltve: 2024. március 13.)
- [9] Pellegrini A., Lavecchia F., Guerra M. G., Galantucci L. M.: Influence of aging treatments on 17–4 PH stainless steel parts realized using material extrusion additive manufacturing technologies. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 126/1–2. (2023) 163–178. https://doi.org/10.1007/S00170-023-11136-3/TA-BLES/6
- [10] Nurhudan A. I., Supriadi S., Whulanza Y., Saragih A. S.: Additive manufacturing of metallic based on extrusion process: A review. Journal of Manufacturing Processes, 66. (2021) 228–237. https://doi.org/10.1016/[.]MAPRO.2021.04.018

[11] Sidambe A. T., Figueroa I. A., Hamilton H. G.,

Todd I.: *Taguchi optimization of MIM titanium sintering.* International Journal of Powder Metallurgy, 47/6. (2011)

https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A6%3A13675718/detailv2?sid=ebsco%3Aplink

- [12] Singh G., Missiaen J. M., Bouvard D., Chaix J. M.: Additive manufacturing of 17–4 PH steel using metal injection molding feedstock: Analysis of 3D extrusion printing, debinding and sintering. Additive Manufacturing, 47. (2021) 102287. https://doi.org/10.1016/[.ADDMA.2021.102287
- [13] Spiller S., Kolstad S. O., Razavi, N.: Fabrication and characterization of 316L stainless steel components printed with material extrusion additive manufacturing. Procedia Structural Integrity, 42. (2022) 1239–1248.

https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2022.12.158

- [14] Chemkhi M., Djouda J. M., Bouaziz M. A., Kauffmann J., Hild, F., Retraint, D.: Effects of Mechanical Post-Treatments on Additive Manufactured 17-4PH Stainless Steel Produced by Bound Powder Extrusion. Procedia CIRP, 104. (2021). 957–961. https://doi.org/10.1016/[.PROCIR.2021.11.161
- [15] Liu B., Wang Y., Lin Z., & Zhang T.: Creating metal parts by Fused Deposition Modeling and Sintering. Materials Letters, 263. (2020) 127252. https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2019.127252
- [16] Maj P., Adamczyk-Cieslak B., Lewczuk M., Mizera J., Kut S., Mrugala T.: Formability, Microstructure and Mechanical Properties of Flow-Formed 17-4 PH Stainless Steel. Journal of Materials Engineering and Performance, 27/12. (2018) 6435–6442. https://doi.org/10.1007/S11665-018-3724-9/TA-BLES/4
- [17] Sadaf M., Bragaglia M., Nanni, F.: A simple route for additive manufacturing of 316L stainless steel via Fused Filament Fabrication. Journal of Manufacturing Processes, 67. (2021) 141–150. https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2021.04.055

[18] https://elnik.com/products/ (letöltve: 2024.03.13.)





Járműkarosszéria-lemezek alakítási tulajdonságainak vizsgálata

Examination of the Forming Properties of Vehicle Body Panels

Borbély Richárd,¹ Kölüs Martin László,¹ Béres Gábor József¹

Neumann János Egyetem, GAMF, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország, borbely.richard@nje.hu

Abstract

During vehicle design, the mass of the components and their resistance to collision are important criteria, as they affect fuel consumption and make the vehicle safer. In this study, we examined the deformation of high-strength materials commonly used in the automotive industry in the form of tailored welded blanks. Tests were conducted both in an experimental environment and in a simulation environment, measuring the punch displacement associated with the specimens to characterize the deformation. In designing the specimens, the weld seam was placed perpendicular and parallel to the rolling direction, thus creating different deformation states.

Keywords: forming limit diagram, sheet metal forming, tailor welded blanks.

Összefoglalás

A járművek tervezése során az alkatrészek tömege és az ütközéssel szembeni ellenállása fontos kritériumok, befolyásolják az üzemanyag-fogyasztást és biztonságosabbá teszik a járművet. Jelen tanulmányban az autóiparban gyakran előforduló, növelt szilárdságú anyagok alakváltozását vizsgáltuk méretre vágott hegesztett lemezek formájában. A teszteket kísérleti környezetben és szimulációs környezetben egyaránt elvégeztük, mérve a próbadarabokhoz tartozó bélyegelmozdulást, ezáltal jellemezve az alakváltozást. A mintadarabok kialakításánál a varratot hengerlési irányra merőlegesen és azzal párhuzamosan helyeztük el, ezáltal különböző alakváltozási állapotokat teremtve.

Kulcsszavak: alakítási határdiagram, lemezalakítás, méretre szabott hegesztett lemezek.

1. Bevezetés

A járművek tervezése során a tömeg mint kritérium fontos szerepet játszik, csökkentésével javítani lehet a járművek üzemanyag-fogyasztását. Az üzemanyag-fogyasztás csökkentése nem csak gazdaságilag teszi hatékonyabbá a járművek üzemeltetését, ugyanis az egyre szigorúbb károsanyag-kibocsátási normák teljesítését is elősegíti. Fontos megjegyezni, hogy a károsanyag-kibocsátási követelmények mellett számos – legalább olyan fontos – egyéb követelményt is szem előtt kell tartani a járművek tervezése során, mint például a járműkarosszéria ütközéssel szembeni ellenállása, amit legfőképpen az anyag szilárdsága biztosít. Az iparban általánosan három különböző módszer terjedt el a tömeg csökkentésére. Az első a nagy szilárdságú, könnyű, ún. HSS (High Strenght Steel) anyagok, amelynek egy csoportja a kettős fázisú acélok használata. Ezek az anyagok speciális mikroszerkezetüknek köszönhetően kiváló szilárdsági tulajdonságokkal jellemezhetők, ezzel lehetővé téve, hogy adott alkalmazási területen kisebb lemezvastagságú anyaggal is biztosítani tudjuk az elvárt szilárdságot. Egy másik lehetőség, amely napjainkban egyre elterjedtebb, az optimalizálási módszerek alkalmazása a szerkezeti felépítésben. Ilyenek például az anyaghasználat vagy geometria optimalizálása terheléseloszlás alapján.

A harmadik lehetőség az olyan gyártástechnológiai eljárások, mint pl. a méretre szabott, hegesztett lemezek (angolul: tailor welded blanks) és különböző melegalakítási eljárások alkalmazása. Az ilven módszerek közül a méretre szabott, hegesztett lemezek jelentős potenciált kínálnak a járműbiztonság javítására és a tömeg csökkentésére, ami a gyártási költségeket is csökkentheti a kisebb szerszámozási költség vagy a gyártási idő csökkenése révén. A méretre vágott, hegesztett lemezterítékek egyes részei a beépítési hely céljától függően megfelelő méretűek, vastagságúak és anyagminőségűek [1, 2]. Továbbá alkalmazásuk az alkatrészek méretpontosságán is képes javítani azáltal, hogy az alkatrészek szerelése során ki tudja váltani a kötési eljárásokat. Ebben a tanulmányban a különböző tulajdonságú terítékrészek egymásra hatását elemeztük az alakíthatóságra vonatkozóan, végeselemes módszerrel az Auto-FormR7 szimulációs szoftver segítségével [3, 4].

2. Felhasznált anyagok

A méretre szabott lemezek gyártásához szükséges anyagok kiválasztásánál az autóiparban gyakorta előforduló hagyományos és növeltszilárdságú acélokra esett a választás.

2.1. Kis széntartalmú acélok

A hagyományos, kis széntartalmú acélok közül a HC340LA hidegen hengerelt alapanyagot választottam ki. A kis széntartalom lehetővé teszi a könnyű megmunkálhatóságot, alakíthatóságot, továbbá könnyen hegeszthető. A hideghengerlésnek köszönhetően pedig jó felületi minőség, alak- és méretpontosság jellemzi. Az ilyen anyag főként olyan célokra alkalmas, ahol a megmunkálhatóság nagyobb jelentőséggel bír, mint a kész alkatrész teherviselő képessége vagy szilárdsága.

2.2. Növelt szilárdságú acélok

A kettős fázisú acélok második generációs, növelt szilárdságú acélok, melyeket többnyire az autóiparban alkalmaznak. Az ilyen típusú acélokban a lágy ferrit és a kemény martenzit alkotóelemek kombinációja biztosítja a nagy szilárdságot és jó alakíthatóságot. Az anyag jellemzői a ferrit/ martenzit szövetaránytól és a martenzitszigetek eloszlásától függenek. A kettős fázisú acélok kiemelkedő szakítószilárdsággal bírnak, de nincs kifejezett folyáshatáruk. A martenzit általában 5–30%-ban van jelen a szövetszerkezetben, de kiemelten nagy szakítószilárdságú anyagoknál akár 40%-ot is elérhet. Ezek az anyagok lehetővé teszik a gépjárművek ütközésekor bekövetkező károsodás csökkentését, anélkül, hogy a jármű tömegét jelentősen növelnék. A mintadaraboknál minden esetben a HC340LA anyaghoz került a HCT600X, illetve a HCT980X anyag külön-külön hozzá hegesztésre.

3. Méretre szabott, hegesztett lemezek

A vizsgálatok elvégzéséhez előzetesen előállításra kerültek a mintadarabok, amelyek később a valóságban végzett mérésekhez szükségesek. A méretre szabott, hegesztett lemezek különböző tulajdonságú, méretre vágott lemezek, melyeket valamilyen hegesztési eljárással kapcsolnak öszsze. E lemezek esetében a képlékenyalakítás kihívást jelent, ami részben a hegesztési varrat jelenlétéből adódik. Több tanulmány is foglalkozott már a hegesztési varrat és környezetének vizsgálatával, különböző alakítási eljárások hatásának feltérképezése érdekében [5, 6].

A lemezterítékeket esetünkben lézeres hegesztéssel kapcsoltuk össze. A hegesztést hozaganyag nélkül végeztük, és a varrat védelme érdekében 4.6 tisztaságú Ar védőgázt (18 liter/perc áramlási sebességgel) alkalmaztunk, de csak a koronaoldalon biztosítottuk a gázvédelmet. A gázhozzávezetést külső fúvóka biztosította. A lézeres hegesztésnél a lézernyaláb alakját és teljesítményét számos paraméter befolyásolja, melyek részletes leírása az MSZ EN ISO 11145 szabványban található [7].

A hegesztés paramétereit korábbi tapasztalatainkra alapozva választottuk meg, amelyeket az **1. táblázat** mutat **[8]**. A cikknek nem célja a hegesztés minőségét tárgyalni, a hegesztés csupán azt a funkciót szolgálta, hogy szilárd kötést alakítsunk ki a két lemezanyag között. Továbbá a numerikus elemzés során a hegesztés paraméterei nem relevánsak, ugyanis a szoftver a kötéstechnológiát a valóságtól eltérően értelmezi.

4. Numerikus elemzés

A szimulációkat az AutoFormR7 végeselemes szoftver segítségével végeztük el, amely egyike a legmodernebb szoftvereknek a lemezalakítás területén.

4.1. Szerszámelrendezés

A szimulációs környezet felépítése során a bemenő adatokat a valóságnak megfelelő értékek alapján vittük be a szoftverbe. Ezek alapján a szerszámok méretének és helyzetének meghatározásánál Erichsen 142-40 típusú, univerzális lemezvizsgáló berendezésre szerelhető Naka-

1.1	táblázat. Hegesztési paraméterek HC340LA-
	HCT600X és HC340LA-HCT980X anyag-
	párosításokhoz

Párosítás	HC340LA- HCT600X	HC340LA- HCT980X
Hegesztési sebesség, V _h (m/min)	2,5	2,5
Folytonos teljesítmény, P (kW)	1,2	1,2
Fókuszpozíció (mm)	0	0
Fókuszfolt terület, A (mm²)	0,0394	0,0394
Hőteljesítmény, Q (J)	1200	1200
Teljesítménysűrűség, <i>Q/A</i> (W/cm²)	$3,05 \cdot 10^{6}$	$3,05 \cdot 10^{6}$
Fajlagos hőbevitel, <i>Q/v_{heg}</i> (J/cm²)	288	288

zima-teszt szerszámfelépítését vettük alapul. Az alakítószerszámok és a mintadarab elrendezését szimulációs környezetben az 1. és 2. ábra mutatja.

Az ábrázolásban a leszorítógyűrű nem látható, ugyanis ez nem mint geometria, hanem mint beállítási kényszer jelenik meg a szoftverben. A húzógyűrű átmérője 160 mm, vastagsága pedig 15 mm. A húzógyűrű helyzete a **3. ábrá**n látható.



1. ábra. Szerszámelrendezés AutoformR7 szoftverben (oldalnézet)



2. ábra. Szerszámelrendezés AutoformR7 szoftverben (felülnézet)



3. ábra. A húzógyűrű helyzete (kék vonal)

4.2. Bemeneti anyagparaméterek

A szimulációs környezetben végzett tesztek anyagra vonatkozó bemeneti paramétereit a felhasznált anyagok vizsgálatával határoztuk meg. Ezért az előzetesen legyártott mintadarabok anyagából szakítóvizsgálathoz lemez próbatesteket munkáltunk ki, melyeken szakítóvizsgálatot végeztünk, és ezek eredményeit bemeneti paraméterekké alakítottuk.

Az anyagok folyásgörbéjét a kombinált Swift– Hockett–Sherby-egyenlettel írtuk le [9]. A bemeneti értékeket a 2. táblázat foglalja össze.

A táblázatban szereplő paraméterek a következők: s lemezvastagság, m keményedési kitevő, C keménységi konstans, σ_i valódi feszültség, σ_{sat} telítési feszültség, a és p súlyozási paraméterek, σ_0 kezdeti folyáshatár, R_m pedig a szakítószilárdság.

2. 1	t <mark>áblázat</mark> .	Folyásgörbe	bemeneti	adatok
------	--------------------------	-------------	----------	--------

		Anyag	HC 340LA	НСТ 600Х	НСТ 980Х
		s (mm)	1	1	1
	Ļ	ε_0	0,02	0,04	0,01
fek	wif	т	0,22	0,16	0,098
S		C (MPa)	578	1044	1578
ram		σ _i (MPa)	229	448	788
e pa irby		σ_{sat} (MPa)	456	780	1160
örb	-She	а	8,6	21	102
yásg	kett-	р	0,81	0,812	0,785
Foly	Hocl	σ_0 (MPa)	235	443	798,4
		R _m (MPa)	343	668,9	1122

A lemezalakítási folyamatok megfelelő modellezéséhez szükség van továbbá a folyási feltétel meghatározására is. Az ezt leíró egyenletet ugyancsak szakítóvizsgálatból határoztuk meg úgy, hogy a próbatesteket a hengerlési irányra merőlegesen, azzal párhuzamosan és arra 45°-os szögben munkáltuk ki. Az alakítási határdiagram meghatározásánál pedig az F. Cayssials által megalkotott Arcelor V9 modell [10, 11] szerinti anyagparamétereket adtuk meg. A tanulmánynak nem célja, hogy a különböző anyagok alakítási határdiagramját felvegyük, kiszerkesszük. Hanem az, hogy azonos körülmények között vizsgáljuk, a különböző anyagpárosítások hogyan hatnak egymásra. Az említett adatokat a 3. táblázat foglalja össze.

	Anyag	HC340LA	HCT600X	HCT980X
lell	r_0	1,82	0,865	0,73
pom	r ₄₅	1,31	0,929	0,894
68 68	r ₉₀	2,38	0,941	0,828
rlať	М	6	6	6
Ba	r_m	1,71	0,916	0,837
or V9 dell	A _{G,90} (%)	20,5	12,5	6,3
Arcel	<i>R_{m,90}</i> (MPa)	325	669	1111

3. táblázat. Alakítási határdiagram bemeneti adatok

A táblázatban szereplő paraméterek a következők: r_0 képlékeny alakváltozási arány 0°-ban, r_{45} képlékeny alakváltozási arány 45°-ban, r_{90} képlékeny alakváltozási arány 90°-ban, M súlyozási paraméter, r_m átlagos képlékeny alakváltozási arány, $A_{G,90}$, $R_{m,90}$.

4.3. A szimulációban vizsgált próbadarabok

A próbadarabok geometriájának kiválasztásakor, a szerszámgeometriákkal összhangban, ugyancsak a Nakazima-vizsgálatnál használatos, különböző hídszélességekkel bíró, négyzet alakú próbatest-kialakításokat alkalmaztuk (20– 200 mm). A próbatest-geometriák kiválasztásának hátterében az állt, hogy teljeskörűen lefedjük az alakítási határdiagram (FLD) lehetséges főalakváltozási tartományait. Az eltérő próbatest-kialakítások által létrehozott különböző feszültségállapotok eredményeként a szakadási hely nem állandó; bizonyos mértékben változó helyeken lesz tapasztalható a tönkremenetel. A használt próbatest-geometriákat a **4. ábra** szemlélteti.

Ahogyan arról már korábban szó esett, a különböző anyagpárosítások kialakítása lézerhe-



 ábra. A Nakazima-próbatestek méretezett műszaki rajza

gesztéssel történt. Azonban a valóságban és a szimulációs szoftverben is a hegesztési varrat irányultsága eltérő volt. A hegesztési varrat helyzete alapján két esetet különböztettünk meg, ezek pedig az "A" eset, amikor a hegesztési varrat (piros vonal) a hengerlési irányra merőleges (színes vonal), illetve a "B" eset, amikor a hegesztési varrat a hengerlési iránnyal párhuzamos. A két típust egy tetszőlegesen kiválasztott próbadarabon az 5. és 6. ábra szemlélteti.



5. ábra. "A" típusú hegesztésivarrat-elhelyezés



6. ábra. "B" típusú hegesztésivarrat-elhelyezés

5. A szimuláció eredményei

Az eredmények kiértékelése során az összehasonlítási alapot a különböző anyagpárosításokkal és hegesztésivarrat-orientációkkal rendelkező mintadarabok tönkremeneteléig elért bélyegelmozdulás-értékek adták. Az 5–8. táblázatokban feltüntetett értékek tehát az anyagok tönkremeneteléig történő alakítóbélyeg-elmozdulást szemléltetik.

5.1. Az "A" típusú mintadarabok

"A" típusú mintadarabok esetében a hegesztési varrat a hengerlési irányra merőleges.

Az eredmények kiértékelése során az alakítási folyamat addig tartott, amíg valamely alkotóanyag el nem érte a saját alakítási határdiagramját. A HC340LA-HCT600X anyagpárosításra a 4. táblázat, míg a HC340LA-HCT980X anyagpárosítású próbadarabra nézve az eredményeket az 5. táblázat foglalja össze. A táblázatokban a hídszélesség alatt a próbatestek legkisebb szélességi értékét értjük.

4.	táblázat. HC340LA-HCT600X anyagpárosítás
	"A" típusú hegesztési varrattal

"A" típus HC340LA-HCT600X							
Hídszélesség (mm)	Bélyegelmoz- dulás HC340LA (mm)	Bélyegelmoz- dulás HCT600X (mm)					
20	35,2	28,7					
40	38,2	32,2					
80	41,5	35,2					
125	44,2	36,7					
200	47,7	43,2					

5. táblázat. HC340LA-HCT980X anyagpárosítás "A" típusú hegesztési varrattal

"A" típus HC340LA-HCT980X							
Hídszélesség (mm)	Bélyegelmoz- dulás HC340LA (mm)	Bélyegelmoz- dulás HCT980X (mm)					
20	31,7	22,7					
40	35,7	26,2					
80	44,1	29,2					
125	41,3	30,7					
200	41,2	30,2					

Ennél a varratelrendezésnél a 200-as hídszélességű próbatestet kivéve minden esetben a nagyobb szilárdságú és egyben kisebb alakíthatóságú anyag érte el először az (ezáltal lejjebb elhelyezkedő) alakítási határdiagramját. Tehát a globális alakíthatóságot kizárólag a nagyobb szilárdságú anyag alakíthatósága határozta meg.

5.2. A "B" típusú mintadarabok

A "B" típusú mintadarabok esetében a hegesztési varrat a hengerlési iránnyal párhuzamos. Az eredmények kiértékelése során az alakítási folyamat addig tartott, amíg valamely anyag el nem érte az alakítási határdiagramját. Ezek eredményeit a 6–7. táblázat foglalja össze.

6.	táblázat. H	C340LA-HCT600X anyagpáros	ítás
	"1	3" típusú hegesztési varrattal	

"B" típus HC340LA-HCT600X						
Hídszélesség (mm)	Bélyegelmoz- dulás HC340LA (mm)	Bélyegelmoz- dulás HCT600X (mm)				
20	31,2	-				
40	34,7	-				
80	31,7	_				
125	30,2	_				
200	34,7	38,2				

7. táblázat. HC340LA-HCT980X anyagpárosítás "B" típusú hegesztési varrattal

"B" típus HC340LA-HCT980X						
Hídszélesség (mm)	Bélyegelmoz- dulás HC340LA (mm)	Bélyegelmoz- dulás HCT980X (mm)				
20	31,2	-				
40	33,7	_				
80	31,2	_				
125	32,7	_				
200	30,2	32,2				

Az eredmények szempontjából fontos még ismernünk, hogy "B" esetben egy HC340LA-HC-340LA párosítás milyen értékű bélyegelmozdulást eredményez azonos körülmények között. Ennek eredményeit a 8. táblázat szemlélteti.

8.	táblázat. HC340LA-HC340LA anyagpárosítá:	s
	"B" típusú hegesztési varrattal	

"B" típus HC340LA-HC340LA							
Hídszélesség (mm)	Bélyegelmozdu- lás HCT340LA (mm)						
20	36,7	36,7					
40	39,6	39,6					
80	44,8	44,8					
125	45,8	45,8					
200	54,1	54,1					

Ebből az látható, hogy a nagyobb szilárdságú terítékrésznek az alakváltozást akadályozó hatása erőteljesen megjelenik a kis szilárdságú oldalon, mely a "B" esetekben mindig a tönkremeneteli oldal. A globális alakváltozás a nagy hídszélességgel rendelkező próbatesteknél romlik erőteljesebben, amelynek magyarázata, hogy a háromtengelyű alakváltozási állapot ezeknél a próbatesteknél a sík alakváltozási állapotra redukálódik.

6. Következtetések

Cikkünkben a méretre szabott, hegesztett lemezek globális alakíthatóságát és az egyes terítékrészek egymásra hatását vizsgáltuk. A próbatestek fizikai tesztelése jelenleg is zajlik, itt elsősorban szimulációs eredményeket mutattunk be. Két esetet vizsgáltunk a hegesztésivarrat-orientáció szempontjából, két különböző, eltérő komponensekből összeállított próbadarab esetén, öt-öt különböző alakváltozási állapotban. A kapott eredmények alapján két megállapítást tehetünk:

- "A" esetben a mintadarabokat alkotó lemezek közösen deformálódtak, ebből kifolyólag annak az anyagnak a tönkremenetele következett be hamarabb, amelynek az alakítási határgörbéje lejjebb helyezkedik el (nagyobb szilárdságú), kivétel a 200×200 mm-es esetben:
- "B" esetben mindig a kisebb szilárdságú (HC340LA) anyag megy hamarabb tönkre, továbbá az is megállapítható, hogy a tönkremenetel értékét az eltérő szilárdságú anyagok (HCT600X-HCT980X) nem befolvásolják számottevően ebben a szilárdságtartományban.

A kutatás során további célunk olyan anyagpárosítások vizsgálata, ahol a HC340LA anyagot egyéb, kisebb-nagyobb mértékben eltérő szilárdságú anyaggal párosítjuk, annak érdekében, hogy megfigyeljük a szilárdságkülönbség hatását a globális alakváltozási képességre. Továbbá a meglévő mintadarabokon valós környezetben is elvégezzük a teszteket a szimulációs környezetben

ismertetett metódus alapján, és ezek eredményeit összehasonlítiuk a szimulációs eredményekkel.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kinsey B., Wu X. (szerk.): Tailor welded blanks for advanced manufacturing. Elsevier, Cambridge, 2011.95-115.
- [2] Safdarian R.: Forming limit diagram prediction of tailor welded blank by modified M-K model. Mech. Res. Commun., 67. (2015) 47-57. https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2015.05.004
- [3] Korouyeh R. S., Naeini H. M., Liaghat G. H., Kasaei M. M.: Investigation of weld line movement in tailor welded blank forming. In: Advanced Materials Research, Trans Tech Publications Ltd., 2012. 39-44.

https://doi.org/10.4028/scientific5/AMR.445.39

- [4] Safdarian R.: The effects of strength ratio on the forming limit diagram of tailor-welded blanks. Ironmaking Steelmaking, 45/1. (2018) 17-24. https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1235371
- [5] Merklein M., Johannes M., Lechner M., Kuppert A.: A review on tailored blanks – Production, applications and evaluation. Journal of Material Processing Technology, 214/2. (2014) 151-164. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.08.015
- [6] Ahmetoglu M. A., Brouwres D., Shulkin L., Taupin L., Kinzel G. L., Altan T.: Deep drawing of round cups from tailor-welded blanks. Journal of Material Processing Technology, 53/3-4. (1995) 684-696. https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01767-U
- [7] Béres G. J., Danyi J. Végvári F., Tisza M.: The present body in white materials. Gradus, 2/2. (2015) 209-224.
- [8] Kovács Zs. F., Béres G., Weltsch Z.: The Investigation of DC and DP steels weldability by laser beam. Gradus, 4/2. (2017) 311-317.
- [9] Barlat F., Lian K.: Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions. International Journal of Plasticity, 5/1. (1989) 51-66. https://doi.org/10.1016/0749-6419(89)90019-3
- [10] Cayssials F.: Sheet Metal Forming Beyond 2000. Proc. of the 20th Biennial [IDDRG] Congress, Brussels, Belgium (Liege: CRM), 1998. 443-54.
- [11] Cayssials F., Lemoine X.: Proc. of the 24th IDDRG Congress. Besancon, France, 2005. 1–8.





Ausztenites korrózióálló acélok lézeres hegesztési varratainak korróziós vizsgálata

Corrosion Testing of Laser Welded Austenitic Stainless Steel Welds

Breznay Csaba,¹ Varbai Balázs²

- ¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék. Budapest, Magyarország, breznay.csaba@edu.bme.hu
- ² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék. Budapest, Magyarország, varbai.balazs@gpk.bme.hu

Abstract

Laser welding is becoming increasingly common in industrial applications for welding stainless steels. To reduce costs, hot-rolled stainless steel beams can be replaced by laser-welded structures. In our research, the corrosion resistance of laser-welded T-joints made of 1.4301/304 austenitic stainless steel were investigated. The joints were welded one or both sides, with different combinations of travel speed and laser power. Electrochemical corrosion measurements were performed in 3.5% NaCl solution in a standard three-electrode corrosion cell.

Keywords: laser welding, stainless steel, electrochemical corrosion.

Összefoglalás

Rozsdamentes acélok hegesztésekor az ipari alkalmazásokban egyre elterjedtebb a lézeres hegesztés. Költségcsökkentés érdekében a hengerelt rozsdamentes idomacélokat ki lehet váltani lézerhegesztett szerkezetekkel. Kutatásunkban 1.4301 ausztenites korrózióálló acélból lézeresen hegesztett T kötések korróziós tulajdonságait vizsgáltuk. A hegesztett kötések egy-, illetve kétoldali sarokvarratokkal készültek, eltérő haladási sebesség- és teljesítménykombinációkkal. Az elektrokémiai korróziós méréseket 3,5%-os NaCl-oldatban végeztük, sztenderd, háromelektródos korróziós cellában.

Kulcsszavak: lézeres hegesztés, korrózióálló acél, elektrokémiai korrózió.

1. Bevezetés

A lézeres hegesztés (MSZ EN ISO 4063:2023 szerinti 52-es eljárás) egyre elterjedtebb az ipari alkalmazásokban. A nagy energiasűrűségnek köszönhetően kisebb hőbevitellel, kis hőhatásövezettel, valamint nagyobb termelékenységgel (haladási sebességgel) végezhető a hegesztés [1, 2]. A rozsdamentes acélok kis hővezetési tényezője miatt jelentős vetemedéssel számolhatunk hegesztésük során, amely a lézeres hegesztés kis hőbevitelének köszönhetően csökkenthető. Lézeres hegesztésből megkülönböztetünk szilárdtestlézeres, gázlézeres és diódalézeres hegesztést. A technológia rohamos fejlődésének köszönhetően, akár 15 mm beolvadási mélység is elérhető rozsdamentes acélok hegesztésekor **[3, 4]**.

Rozsdamentes acéloknak nevezzük azokat az acélokat, amelyek legalább 10,5% krómot és legfeljebb 1,2% szenet tartalmaznak [5]. A krómötvözésnek köszönhetően felületükön kialakul egy passzív réteg, amely megvédi őket a környezeti hatásoktól. A szerkezetépítésben egyre inkább elterjednek a rozsdamentes anyagminőségű hengerelt, illetve hegesztett idomacélok. A korrózióállóságuknak köszönhetően csökkenthetők a karbantartási és állapot-ellenőrzési feladatok. A leggyakrabban alkalmazott anyagminőségek az 1.4301, valamint 1.4404 ausztenites rozsdamentes acélok **[6, 7]**.

A korrózió a fém és a környezete közötti fizikai-kémiai kölcsönhatás, amelynek következtében a fém tulajdonságai megváltoznak, és gyakran bekövetkezik a fém, a környezet, illetve az ezekből álló műszaki rendszer funkcionális jellemzőinek a romlása [8]. A rozsdamentes acélokra jellemző károsodási mód valamilyen helyi korróziós károsodás. A helyi korrózió leggyakoribb formája a lyukkorrózió. A korrózió ezen formája kis területre összpontosító, helyi anódos feloldódás, amelynek sebessége rendkívül gyors lehet. A felületen kialakuló gödrök, lyukak formájában jelentkezik változatos morfológiával és mélységekkel.

A nikkelötvözetek és rozsdamentes acélok korrózióállóságát összetételük alapján a lyukkorróziós ellenállási tényezővel (PRE) lehet meghatározni. A leggyakrabban alkalmazott összefüggés ausztenites és duplex acélok esetében a következő:

 $PREN = Cr + 3.3 \cdot Mo + 16 \cdot N$

Elektrokémiai korróziós mérésekkel meghatározható passzív réteggel rendelkező anyagok lyukkorróziós potenciál értéke, amely feszültség esetében a felületi passzív réteg lokálisan megsérül, a fém pedig oldatba megy.

2. Kísérleti anyagok és berendezések

A kutatásunkban 1.4301 anyagminőségű ausztenites korrózióálló acél alapanyagot használtunk 4 mm-es vastagságban, amelynek összetétele az 1. táblázatban látható.

A T kötések leélezés és illesztési hézag nélkül voltak illesztve, fűzővarratokkal.

1. táblázat. A felhasznált 1.4301 anyagminőség kémiai összetétele

Jel	С	Mn	Si	Cr	Ni
1.4301	0,08	2	0,75	18	8

A hegesztést két darab, 6600 W névleges teljesítményű Raycus RFL-6600S lézerforrásról üzemeltetett WSX ND60 hegesztőfejjel végeztük. A két oldalról készített T kötések két sarokvarrata egyidejűleg, a két egymással szembefordított hegesztőfejjel készült.

A varratok három különböző paraméterkombinációval készültek: a két oldalról hegesztett minták (lásd **1., 2. ábra**) 1,5 m/min sebességgel, 3630 W teljesítménnyel, valamint 2 m/min sebességgel és 4620 W teljesítménnyel.



1. ábra. Két oldalról hegesztett minta keresztmetszeti csiszolata, a marószer: Adler



2. ábra. Két oldalról hegesztett minta keresztmetszeti csiszolata, a marószer: Adler



3. ábra. Egy oldalról hegesztett minta keresztmetszeti csiszolata, a marószer: Adler

Az egy oldalról hegesztett minta (lásd **3. ábra**) 1 m/min sebességgel és 3960 W teljesítménnyel készült. A nyaláb lengetése minden minta esetében egyenes vonal mentén, 0,2 mm szélességben történt. A hegesztés során alkalmazott védőgáz 4.6 tisztaságú nitrogén volt.

Az elektrokémiai korróziós méréseket sztenderd, háromelektródos korróziós cella, valamint Biologic SP-150 típusú potenciosztát segítségével hajtottuk végre. A vizsgálati elrendezés a 4. ábrán látható: ellenelektródaként platinahálót, referenciaelektródként túltelített AgCl-elektródot, munkaektródként pedig a hegesztett mintát használtuk. Az elektrolit 3,5%-os NaCl-oldat volt, nagy tisztaságú NaCl-ból és desztillált vízből elkészítve.

A korróziós cella összeállítását követően a rendszert 45 percig, a nyitott áramköri potenciál (OCP) stabilizálódása érdekében pihentettük. A pihentetést követően a feszültséget az OCP= -0,2 V-tól OCP = +1,5 V-ig pásztáztuk 1 mV/s sebességgel.

3. Eredmények és kiértékelésük

Az egyes kötések korróziós tulajdonságainak összehasonlításához a potenciosztát által rögzített áramsűrűség–feszültség görbéket vettük alapul. Az 5. ábrán látható a három próbatest mérési eredménye.

A minták nyitott áramköri potenciálja a 2. táblázatban látható. A hengerelt lemez nyitott áramköri potenciálja -0.07 ± 0.02 V. A három hegesztett minta nyitott áramköri potenciálja közel azonos, számottevő különbség nem mérhető a minták között.

Az 5. ábrán látható görbék három, jól elkülöníthető részre oszthatók: a kezdeti redukciós szakaszra, majd a nyitott áramköri potenciál értékétől pozitívabb feszültségek pásztázása során végbemenő oxidációs szakaszra és az azt követő passzív szakaszra. A passzív szakasz során a feszültség növelésének hatására az áramsűrűség nem vagy csak nagyon kis mértékben növekszik. A feszültség egy bizonyos ponton túl való növelésének hatására az áramsűrűség rohamosan megnő, ezt a feszültséget nevezzük lyukkorróziós potenciálnak.

A legnagyobb lyukkorróziós potenciál értéket a 1,5 m/min sebességgel, két oldalról hegesztett T kötés mutatja. Az egyes minták lyukkorróziós potenciálja a **6. ábrá**n látható.

Minél negatívabb egy adott minta lyukkorróziós potenciálja az adott közegben, annál hamarabb következik be a lyukkorrózió jelensége. A pozitívabb lyukkorróziós potenciál nemesebb viselkedést, jobb korróziós tulajdonságokat mutat az adott közegben.

2. táblázat. Az egyes minták nyitott áramköri potenciál értékei 3,5%-os NaCl-oldatban

Minta jele	Nyíltkörű potenciál
3630 W + 1,5 m/min	-0,11 \pm 0,02 V
4620 W + 2 m/min	-0,11 \pm 0,03 V
3960 W + 1 m/min	$-0,10 \pm 0,03$ V



 ábra. Háromelektródos korróziós cella mérési elrendezése; WE = munkaelektród, RE = referenciaelektród, CE = ellenelektród



 ábra. Az elektrokémiai korróziós mérések eredményei 3,5%-os NaCl-oldatban



6. ábra. Az egyes minták lyukkorróziós potenciál értékei 3,5%-os NaCl-oldatban

4. Következtetések

Kutatásunkban eltérő teljesítménnyel és eltérő haladási sebességgel, lézeres hegesztéssel készített egy- és kétoldali T kötések korróziós tulajdonságait vizsgáltuk 3,5%-os NaCl-oldatban. A kapott áramsűrűség–feszültség görbék alapján a legnagyobb lyukkorróziós potenciált a 1,5 m/ min sebességgel és 3630 W teljesítménnyel hegesztett minta mutatta. A 2 m/min sebességgel, 4620 W teljesítménnyel készült, szintén kétoldalról hegesztett minta lyukkorróziós potenciálja ettől jelentős mértékben elmaradt, feltehetően a szélkiégés túlzott mértéke következtében. A hipotézis ellenőrzéséhez szükséges megvizsgálni a lyukkorrózió kialakulásának helyét.

Az egy oldalról, 3960 W teljesítménnyel és 1 m/min haladási sebességgel készült T kötés gyöke nincs áthegesztve, emiatt az ott jelen lévő hézagban réskorrózió alakulhatott ki, aminek következtében megnőtt az áramsűrűség, rontva a mérési eredményeket.

Köszönetnyilvánítás

A projekt a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal – NKFIH támogatásával valósult meg (OTKA PD 138729).

Szakirodalmi hivatkozások

 Landowski M., Świerczyńska A., Rogalski G., Fydrych D.: Autogenous Fiber Laser Welding of 316L Austenitic and 2304 Lean Duplex Stainless Steels. Materials, 13/13. (2020) 2930.

https://doi.org/10.3390/ma13132930

 [2] Landowski M.: Influence of Parameters of Laser Beam Welding on Structure of 2205 Duplex Stainless Steel. Advances in Materials Science, 19/1. (2019) 21–31. https://doi.org/10.2478/adms-2019-0002

 [3] Alcock, J. A., Baufeld, B.: Diode laser welding of stainless steel 304L. Journal of Materials Processing Technology, 240. (2017) 138–144.

- https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.09.019
- [4] Hafez K. M., Katayama S.: Fiber laser welding of AISI 304 stainless steel plates. Quarterly journal of the japan welding society, 27/2. (2009) 69s–73s.
- [5] MSZ EN ISO 10088-1: Korrózióálló acélok. 1. rész: A korrózióálló acélok jegyzéke. 2015.
- [6] Outokumpu: Handbook of Stainless Steel. 2014.
- [7] Ran H., Chen Z., Ma Y., OBrien E., Sun Y.: Experimental and numerical study of laser-welded stainless steel slender I-section beam-columns. Engineering Structures, 286. (2023) 116–128. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116128
- [8] MSZ EN ISO 8044:2003 Fémek és ötvözetek korróziója. Alapvető szakkifejezések és fogalommeghatározások (ISO 8044:1999).





Többtengelyű kovácsolással alakított rézminták mikrokeménységének vizsgálata

Investigation of Microhardness of Multiaxially Forged Copper Samples

Juhász Zsombor,¹ Renkó József Bálint²

- ¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék. Budapest, Magyarország, zsombor.juhasz@edu.bme.hu
- ² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék. Budapest, Magyarország, renko.jozsef@edu.bme.hu

Abstract

In engineering practice, high strength materials attract extraordinary attention. Such materials can be produced by many different methods, from which, multiaxial forging was selected. In this work a sum of four samples were compressed by two-directional multiaxial forging. The achieved logarithmic deformation in each step was 0.8 while the accumulative plastic strain of the workpieces were 0.8, 1.6, 2.4, and 3.2. The hardness of the samples was examined in 200 points of measurement on the surface of the mid-section of each to investigate hardening patterns.

Keywords: severe plastic deformation, multiaxial forging, microstructural analysis.

Összefoglalás

Mérnöki alkalmazásban kiemelt figyelmet kapnak a nagy szilárdságú anyagok. Ultrafinomszemcsés anyagok alkalmazásakor a nagy szilárdság kiegészül a durva szemcsés állapotot megközelítő szívóssággal. Ilyen anyagok előállítására több módszer is ismert, jelen munka az intenzív képlékenyalakítást megvalósító eljárások egyikét, az ún. többtengelyű kovácsolást tárgyalja. Kutatásunk során összesen négy próbatest alakítását végeztük el kétutas többtengelyű kovácsolással. Az egy lépésben megvalósított logaritmikus alakváltozás mértéke 0,8 volt, ezáltal a munkadarabok kumulált képlékeny alakváltozása rendre 0,8, 1,6, 2,4, és 3,2. Az ennek hatására fellépő keménységváltozásokat minden minta középső keresztmetszetén 200 mérési pontos keménységtérképekkel vizsgáltuk.

Kulcsszavak: intenzív képlékenyalakítás, többtengelyű kovácsolás, keménységvizsgálat.

1. Bevezetés

Az intenzív képlékenyalakítás (IKA) eljárásai a szerkezeti anyagok mechanikai tulajdonságainak, mint a szilárdság, szívósság és a kifáradás elleni ellenállás javítására kiemelten alkalmasak [1, 2]. Az IKA során a tömbi anyagban a nagymértékű képlékeny alakváltozás hatására a diszlokációsűrűség megnövekedésével a diszlokációk feltorlódása következik be, ezáltal nemegyensúlyi szemcsehatárok által körülvett tartományok alakulnak ki, amelyeket diszlokációs celláknak nevezünk. Az így kialakuló szerkezet lehet nanoszerkezetű, illetve ultrafinomszemcsés (UFSZ) is. A kettő közötti egyik fő különbség, hogy előbbi esetén az egyes diszlokációs cellák között jelentkező orientációkülönbség legfeljebb néhány fokot ér el [3, 4]. UFSZ-szerkezet esetén már nagyszögű egyensúlyi szemcsehatárok által határolt szemcsékről beszélhetünk. Ezek kialakulása a diszlokációsűrűség növekedésével, a szemcsehatáron található diszlokációk egymást történő kioltása után következik be. Ezen túl méretbeli különbség is megfigyelhető, hiszen a nanoszerkezetű tartományt 10–100 nm-en, míg az UFSZ-tartományt néhány száz nm nagyságtól 1 μm nagyságig értelmezzük [3, 5].

Az IKA eljárásaival célunk jellemzően az UFSZ-szerkezet kialakítása. Korábbi tanulmányok rámutattak, hogy az ilyen szerkezettel rendelkező anyagok a szemcseméret csökkenése által előidézett szilárdságnövekedés mellett az egyszerű, hidegen hengerelt alapanyaghoz képest jóval nagyobb alakváltozásra képesek [6, 7]. Azonos anyagminőség esetén ez akár meg is közelítheti a durva szemcsés állapot alakváltozó képességét, miközben szilárdsága akár többszörösen is meghaladhatja a hidegen hengerelt állapotét [7].

Az IKA több eljárást foglal magába, melyek közül jelen tanulmány a többtengelyű kovácsolással foglalkozik [8].

Korábbi munkák eredményeként egy többtengelyű kovácsolás megvalósítására, illetve UFSZ-szerkezet kialakítására alkalmas szerszám készült el [9]. E szerszámmal alakított próbatestek kisebbik keresztmetszetén mikroszerkezeti vizsgálatok valósultak meg, melyek az UFSZ-szerkezet kialakulása mellett egy minden mintára jellemző karakterisztikát mutattak ki, miszerint a minta közepén egy vonalban (a nagyobb alakváltozás hatására) nagyobb keménység volt megfigyelhető, majd ettől a minták széle felé haladva a keménységnövekedés mértéke folyamatosan csökkent. Ez az eltérés a szerszám kialakítása miatt jelentkezett, ugyanis a kisebb alakváltozást szenvedett oldalak mentén a próbatest érintkezett a szerszámlapokkal, így a jó kenés ellenére is fellépő súrlódás gátolta az azonos mértékű alakváltozást [10].

Jelen kutatás során ugyanezen szerszám segítségével alakított próbatestek hosszmetszetének vizsgálatát tűztük ki célul azonos alakváltozási spektrumon.

2. Kísérletterv

2.1. Vizsgált anyag és előkészítése

A kutatás során felhasznált anyag Cu99,9 anyagminőségű, ipari tisztaságú réz volt. Az anyag kiválasztása során szempont volt, hogy a vizsgálandó anyag korábbi kutatások miatt már rendelkezésre állt, valamint a szerszám méretezése is erre az anyagra történt, ezáltal a mérések során a szerszámot az alakítási keményedés okozta, egyre növekvő ellenerő nem fogja túlterhelni.

A választott anyagból 4 darab, hasáb alakú próbatestet készítettünk. Ezek befoglaló méretei 10×10×20 mm. Gyártásuk után a munkadarabok lágyító hőkezelésen estek át, amely során 950 °Cra történő hevítést és 15 perc hőn tartást követően vízben edzettük.

2.2. Alakítószerszám

A kísérletekhez felhasznált zárt üregű, többtengelyű kovácsszerszám elvi vázlatát az **1. ábra** mutatja. Az eszköz alapvetően három fő részre bontható. Ezek a középső blokk, a szerszámház és a lineáris mozgatóelemek. Az első a próbatest, illetve a bélyegek pozicionálásáért felelős, továbbá egy közdarabon keresztül kapcsolódik a szerszámházhoz. Utóbbi feladata, hogy stabil keretet képezzen a szerszám körül, valamint a szerszám mozgatásában játszik elengedhetetlen szerepet. A lineáris mozgatóelemek fő feladata a bélyegek mozgatása és a terhelőerő átvitele.

A szerszámmal történő alakítás a 2. ábrán látható módon valósul meg. Fontos már az elején meg-



 ábra. Az alakítószerszám vázlata. Piros színnel a középső blokk, zöld színnel a szerszámház, kék színnel pedig a kilökő tüskék vannak jelölve. A színezetlen alkatrészek (a csavarok kivételével) a lineáris mozgatóelemek csoportját képezik



2. ábra. Egy alakítási ciklus bemutatása. A pirossal jelölt alkatrészek pozicionálják a bélyegeket, kék színnel az aktív, míg zöld színnel a paszszív bélyegek vannak jelölve. A türkiz színű darab a próbatestet mutatja

jegyezni, hogy a két bélyegpárból mindig csak egy végez alakítást, a másik a reteszelhető kialakítás miatt helyhez rögzítve biztosítja a zárt szerszámüreget (2a. ábra). A lépés lezárásával (2b. ábra) a szerszám 90°-os elforgatását követően a kilökő ékek beütése következik (2c. ábra). Az ékek behelyezése után egy újabb alakítási lépés valósítható meg. Páros számú alakítási lépés zár egy alakítási ciklust (2d. ábra).

2.3. Alakítás és minta-előkészítés

Az elkészült próbatestek alakítása a szerszámon keresztül egy MTS 810 típusú anyagvizsgáló berendezés segítségével történt. Ennek során összesen 4 darab próbatest többtengelyű kovácsolása valósult meg. Az egyes munkadarabok rendre 0,5, 1, 1,5, illetve 2 alakítási cikluson estek át. A munkadarab geometriájából, valamint a szerszám kialakításából adódóan minden alakítási lépés 0,8 logaritmikus képlékeny alakváltozást realizált, így a kumulált képlékeny alakváltozás mértéke 0,8, 1,6, 2,4, illetve 3,2 volt.

Az alakított próbatestek metallográfiai vizsgálatokra való előkészítéseként először 10×20 mm-es keresztmetszetben, a zárólappal érintkező felületükkel párhuzamosan, középvonaluk mentén elvágtuk. A vágást követően csiszolásuk, illetve polírozásuk Struers Tegramin-30 típusú automata polírozógép segítségével valósult meg. Az utolsó polírozási lépés 1 μm-es gyémánt szuszpenzióval történt 10 N terhelőerő mellett 8 percig.

2.4. Mikrokeménység-mérés

Az alakított próbatestek előkészítését követően azok felületén 200 mérési pontban mikrokeménységmérést végeztünk: Vickers-keménységmérést 4,905 N terheléssel. A vizsgálatot kiegészítettük egy alakítatlan referenciamintával is, amelyen az izotrop szerkezet feltételezése miatt csak 40 mérési pontot vettünk fel. A mért pontok által kirajzolt mátrixot a **3. ábra** mutatja. A mátrixok szélső pontjai a minták oldalától 0,5 mm-re helyezkednek el. Az ábra alapján megkülönböztethető az alakítatlan (a) és az alakított (b) mintákra felhelyezett mátrix. Utóbbi esetben a gyantában megvalósult mérések hibát jelentettek, azonban ezek keménységértékük miatt jól kivehetők, a kiértékelésből pedig kizárhatók voltak.

A mérések MCT típusú, programozható keménységmérő műszeren valósultak meg. A műszer az Oliver & Pharr (O&P) módszerrel [11] számolja a keménységértékeket a szúrószerszám bemélyedése és a terhelés alapján.



3. ábra. A mérési pontok elhelyezése alakítatlan (a) és alakított (b) mintákon

3. Eredmények

A kovácsolt próbatestekből képzett minták keménységtérképeit a **4–8. ábrá**k mutatják. Ezeken a hiányos pontoknál a mérést feldolgozó program nem tudta kiszámolni a keménységértéket, vagy a mérési pont a gyantába került. A keménységtérképek összehasonlíthatósága végett a skálák tartományát globálisan határoztuk meg, míg az adott keménységtérképhez tartozó mérési pontok által lefedett tartomány legkisebb, ill. legnagyobb értékét a skála bal oldalán jelzett két szám mutatja.

Ahogy a **4. ábrá**n is látható, a referenciamintán mért keménységtérkép homogén, a keménységértékek pedig ezen a mintán 32–65 HV0,5 közé esnek (átlag 52,6±8,3 HV0,5). A kapott keménységértékek az ipari gyakorlatban is bevett, kellően szűk tartományon mozognak, így kijelenthető, hogy a csökkentett számú, 40 mérési pont kielégítő, és reprezentatívan képes szemléltetni a minta keménységét. Továbbá, mivel minden minta azonos előkészítésen esett át, azok kiindulási állapota izotropnak tekinthető.

A keménységértékekben a legjelentősebb ugrás az első alakítási lépést követően jelentkezik (5. ábra). Alig láthatóan ugyan, de már ekkor is megmutatkozik a teljes folyamatra később jellemző mintázat: az átlók mentén számottevően na-



4. ábra. A referenciaminta keménységtérképe



 ábra. Az egy alakítási lépésen átesett minta keménységtérképe



 ábra. Az egy alakítási cikluson átesett minta keménységtérképe

gyobb keménység figyelhető meg, mint az oldalélek mentén [12]. A mikorkeménység ezen a mintán 102,3 és 177,3 HV0,5 közötti értékeket vesz fel.

Az első alakítási ciklus végére a keménységértékek tartománya (**6. ábra**) szélességét megőrizve feljebb mozdul el a skálán, ezen a mintán 115,2 és 189,7 HV0,5 között alakulnak a keménységértékek. Jelentkeznek továbbá üres pontok is, amelyek a korábbiakhoz hasonlóan és a későbbiekben is mérési hibát jelentenek.



7. ábra. A három alakítási lépésen átesett minta keménységtérképe



8. ábra. A két alakítási cikluson átesett minta keménységtérképe

A harmadik alakítási lépésben az intervallum, amelyen a keménységértékek jelentkeznek (7. ábra), szűkül (124,4–189,6 HV0,5), vagyis az oldalélek mentén már érzékelhető keménységnövekedés indul be. Ezzel párhuzamosan a nagyobb keménységű középső tartomány fokozatos kiszélesedése is megfigyelhető. Utóbbi jelenség arra vezethető vissza, hogy az alakítási keményedés miatt a nagyobb alakváltozást elszenvedő részek ellenálló-képessége nőni fog, így a korábban kisebb alakváltozáson áteső külső tartományok elkezdenek felzárkózni ehhez.

A második alakítási ciklus végére a keménységtartomány eltolódik és szűkül (8. ábra), így a keménységértékek 129,5 és 207,3 HV0,5 között jelentkeznek. Ez a harmadik alakítási lépéshez képest az átlók mentén is tapasztalható, illetve az ábrák színátmenetein jól látható, hogy a keménység jóval homogénebb, mint eddig. A minta szélein az előző lépéshez hasonlóan elkülönül egy alacsonyabb keménységű zóna.

A 9–12. ábrák az egyes alakítási lépések jelentkező keménységek eloszlását mutatják. A harmadik alakítási lépésig a hisztogramok folyamatosan



9. ábra. Az első alakítási lépés keménységértékeinek hisztogramja



10. ábra. Az első alakítási ciklus keménységértékeinek hisztogramja

a nagyobb keménység irányába tolódnak el. A negyedik alakítási ciklusnál a csúcs 170 és 180 HV0,5 között marad, azonban a többi értéket mutató tartomány beszűkül, és nem terül el olyan szélesen, mint a harmadik alakítási lépés esetén.

4. Következtetések

Az O&P módszer alkalmazásával egyértelműen több hiba kerül az eredményekbe, mint manuális keménységmérő műszer alkalmazása esetén. A hibák számáért kárpótol, hogy a programozható keménységmérő műszerrel a manuális módszerekkel folytatott mérésekhez szükséges idő alatt az úgy megvalósítható mérések többszöröse mehet végbe.

A jellegzetes kereszt alakú mintázat a jó kenés ellenére a munkadarab szerszámlapokhoz történő letapadása miatt alakul ki. A súrlódás hatására a munkadarab szerszámlapokkal érintkező részein jóval kisebb lesz az alakváltozás, így itt kialakulnak a "letapadt" zónák, míg az átlók mentén jóval nagyobb deformáció jelentkezik.

A 9–12. ábrák alapján kijelenthetjük, hogy az alakváltozás növekedésével a második alakítási



11. ábra. A harmadik alakítási lépés keménységértékeinek hisztogramja



12. ábra. A második alakítási ciklus keménységértékeinek hisztogramja

ciklusig bezárólag folyamatosan növekszik a keménység. Ezt szemlélteti a hisztogramok nagyobb keménységértékek felé történő eltolódása is.

Köszönetnyilvánítás

Jelen munka a Kulturális és Innovációs és Minisztérium ÚNKP-23-2-I-BME-372 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Külön köszönet illeti a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszékét, illetve Gépjárműtechnológia Tanszékét a szükséges laborfelszerelés biztosításáért, valamint a Miskolci Egyetem Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézetét a többtengelyű kovácsszerszám működtetéséhez szükséges hely és eszköz biztosításáért.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Langdon T. G.: The principles of grain refinement in equal-channel angular pressing. Materials Science and Engineerig A, 462/1–2. (2007) 3–11. https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.02.473

- [2] Huang Y., Langdon T. G.: Advances in ultrafinegrained materials. Materials Today, 16/3. (2013) 85-93. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.03.004
- [3] Siegel R. W.: Nanophase Materials. 11. kiadás. VCH Publishers, 1994.
- [4] Mughrabi H.: Dislocation wall and cell structures and long-range internal stresses in deformed metal crystals. Acta Metallurgica, 31/9. (1983) 1367-1379. https://doi.org/10.1016/0001-6160(83)90007-X
- [5] Chang C. P., Sun P. L., Kao P. W.: Deformation induced grain boundaries in comercially pure aluminium. Acta Materialia, 48/13. (2000) 3377-3385.
- https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00138-5 [6] Bereczki P. et al: Production of ultrafine grained aluminum by cyclic severe plastic deformation at ambient temperature. In: Institute of Physics, Franciaország, Conf. Ser.: 6th International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation. (2014) 1-11.

https://10.1088/1757-899X/63/1/012140 [7] ValievR. Z.: Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. Progress in Materials Science, 45/2. (2000) 103-189.

https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00007-9

[8] Sakai T., et al.: Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions. Progress in Materials Science, 60. (2014) 130-207.

https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.09.002

- [9] Juhász Zs, Bíró T., Renkó J. B.: Design and Manufacture of closed die multiaxial forging tool. In: Institute of Physics, Magvarország, Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1246. (2022) 1-7. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1246/1/012009
- [10] Juhász Zs.: Zárt üregű többtengelvű kovácsolással alakított réz próbatestek mikroszerkezeti vizsgálata. Szakdolgozat. BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék 2022.
- [11] Oliver W. C., Pharr G. M.: Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. Journal of Materials Research, 19. (2003) 3–20.

https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3

[12] Juhász Zs.: A többtengelyű kovácsolás mikroszerkezeti hatásainak vizsgálata. TDK-dolgozat. BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 2022.





A karcsúsági viszony hatása a síkbeli alakváltozásra halmaznyomó vizsgálatok során

Effect of the Slenderness Relation on in-plane Deformation in Stack Compression Tests

Kölüs Martin László,¹ Borbély Richárd,² Béres Gábor József³

- ¹ Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék. Kecskemét, Magyarország, kolus.martin@nje.hu
- ² Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék. Kecskemét, Magyarország, borbely.richard@nje.hu
- ³ Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék. Kecskemét, Magyarország, beres.gabor@nje.hu

Abstract

In forming technologies and their simulation, knowing the flow curve characteristic of the material is an essential parameter. Acquiring this knowledge is particularly challenging for sheet materials in high strain ranges. It is well-known that friction and geometric relationships have a distorting effect on the flow curves, thus compensation is necessary. However, the geometric ratio can not only influence the formation of the flow curve, if our material shows anisotropic behaviour. In our research, using compression tests, we examined the deformation relations of deformed specimens through digital imaging methods. The stack compression test is widely used to determine the flow curve in a broad range of large deformation. During the test, several disk specimens with the same geometric characteristics were stacked on top of each other to form a final test piece, and then compression tests were conducted on these assemblies. We found that at low values of the geometric ratio (0.1 in our study), the proportion of plastic, planar principal strains indicating anisotropic behaviour is greater than at higher geometric ratios (0.5 and 1.0 in our study).

Keywords: disk compression test, stack compression test, anisotropy.

Összefoglalás

A képlékenyalakítási eljárásokban és azok szimulációja során elengedhetetlen paraméter az anyagra jellemző folyásgörbe ismerete. Megszerzése különösen nagy kihívás, lemezanyagok esetén a nagy alakváltozási tartományokban. Köztudott, hogy a súrlódás és a geometriai viszony torzító hatással van a folyásgörbékre, ezért kompenzáció alkalmazása szükséges. Ugyanakkor a geometriai viszony nem csak a folyásgörbék alakulását befolyásolhatja, ha anizotrop viselkedésű a lemezanyag. Kutatásunkban a halmazzömítő vizsgálatok segítségével deformált próbatestek alakváltozási viszonyait vizsgáltuk a digitális képalkotás módszerével. A halmazzömítő vizsgálat széles körben alkalmazott nagyalakváltozási tartományban történő folyásgörbe meghatározása. A vizsgálat során több, ugyanazon geometriai jellemzőkkel felruházott lemezpróbatestet helyeztünk egymásra úgy, hogy azok egy végső próbadarabot formáljanak, majd az így keletkezett halmazokon nyomóvizsgálatokat végeztünk. Azt tapasztaltuk, hogy a geometriai viszonyszám kis értékeinél (kutatásunkban 0,1) az anizotrop viselkedésre utaló képlékeny, síkbeli főalakváltozások aránya nagyobb, mint nagyobb (kutatásunkban 0,5 és 1,0) geometriai viszonyszámoknál.

Kulcsszavak: korongzömítő próba, halmazzömítő próba, anizotrópia.

1. Bevezetés

A halmazzömítő vizsgálatokat az első szakirodalmak azzal a céllal említik, hogy a szakítóvizsgálatkor lefedhető alakváltozás-tartományoknál nagyobb alakváltozásokra is mérhetővé tegyék az anyag viselkedését. Emellett Barlat et al. [1] a lemezek normál irányú nyomásával javasolta a kéttengelyű anyagviselkedés leírását is.

A folyásgörbék pontos ismerete elengedhetetlen az egyes lemezalakító eljárások szempontjából. Különösen nagy nehézséget jelent a nagyobb alakváltozási tartományok megismerése, melyek gyakran előfordulnak lemezalakítás során. Annak érdekében, hogy képet kapjunk ezen tartományokról, számos eljárás áll rendelkezésünkre, mint az egytengelyű zömítő vizsgálat, a hidraulikus mélyítő vizsgálat, a Watts–Ford-próba vagy a halmazzömítő vizsgálat [2]. Merklein és Kuppert [3] az elsők között volt, akik halmazzömítő vizsgálatot hajtottak végre, cikkünkben mi is ezt az eljárást alkalmaztuk.

Ugyan minden módszer rejt magában előnyöket és hátrányokat egyaránt, ugyanakkor a zömítés technológiáját alkalmazó módszerek esetén zavaró tényező a súrlódás és a geometriai viszony kérdésköre. A súrlódás tekintetében szokás azt feltételezni, hogy állandó a vizsgálat során. Ezt a feltételezést kifogásolta Coppieters et al. [4], Kraus et al. [5] és Gil et al. [6], akik a nyomás függvényében változónak feltételezték a súrlódási együtthatót a vizsgálatok során. A Siebel és Christiansen et al. [7]-féle folyásgörbe egyenletkompenzációt alkalmaz a geometriai viszonyra zömítővizsgálatok esetén. Watts-Ford-próba során Graf et al. [8], Chermette et al. [9] és Banabic et al. [10] is tett ajánlásokat a próbatest különböző geometriai méreteinek viszonyára.

A geometriai korrekció azonban nem csak a folyásgörbék megfelelő közelítésekor lehet fontos, hanem az anizotrop képlékeny viselkedés leírásánál is, amikor egyik és másik irányban nem egységesen deformálódik a próbatest. Az anizotrop viselkedés ismert a szakítóvizsgálatokból, amely során a lemez próbatest kereszt- és vastagságirányú alakváltozásainak hányadosát értjük anizotrópia tényező alatt. Ugyanakkor, az egytengelyű zömítéssel mechanikailag egyenértékű kéttengelyű húzó feszültségi állapotban a lemez másképp viselkedhet. A szakirodalomban, az ilven feszültségi állapotban végzett kísérletek során mérhető síkbeli alakváltozások arányát nevezik biaxiális, vagyis kéttengelyű anizotrópia tényezőnek [1]. Szükséges azonban megvizsgálni ennek a mérőszámnak is az azoktól a tényezőktől való függését, amelyek ismert módon, zömítéskor a folyásgörbék alakulását is befolyásolják. Ezek a súrlódás és a hossz-átmérő viszonyszám. Cikkünkben most a második tényező hatására fókuszálunk.

A vizsgálatok előkészítése és végrehajtása

Az egytengelyű nyomóvizsgálatokat DC04 jelű lemezanyagon hajtottuk végre, melynek ferrites szövetszerkezete jó alakíthatósági tulajdonságokkal ruházza fel azt, ennek köszönhetően előszeretettel alkalmazzák az ipar számos területén.

2.1. A próbatest bemutatása

A próbatesteket táblalemezből munkáltuk ki.

A vágás a Trumpf TruLaser Cell 7020 berendezésen valósult meg, mely egy 4 kW teljesítményű dióda sugár forrású lézerberendezés. A készülék vágási pontossága $\pm 0,02$ mm. A vágás nitrogéngáz felhasználásával történt.

A választott próbatest keresztmetszetét tekintve kör, melynek névleges átmérője 10 mm, névleges vastagsága 1 mm. A pontos átmérő és vastagság méreteket ötven próbatest geometriájának átlagából határoztuk meg. A lemez hengerlési irányát minden esetben jelöltük.

2.2. A vizsgálati eszközök bemutatása

A vizsgálatokat az INSTRON 4482 elektromechanikus univerzális anyagvizsgáló berendezésen hajtottuk végre, mely alkalmas húzó, hajlító, nyíró és kompressziós igénybevételek kifejtésére és a szilárdsági és képlékenységi jellemzők meghatározására. Az INSTRON 4482 anyagvizsgáló berendezés az **1. ábrá**n látható.



 ábra. Instron4482 univerzális anyagvizsgáló berendezés

A berendezést hengeres nyomólapokkal láttuk el, melyek átmérője 40 mm, vastagsága 20 mm volt. A nyomólapok anyagául a K110 jelű erősen ötvözött szerszámacélt választottuk, mely a hőkezelést követően 57 HRC átlagos keménységgel rendelkezett. A nyomófelületeket políroztuk, melynek eredménye a 2. ábrán látható. Erre azért volt szükség, hogy csökkentsük a munkadarab és a szerszám között fellépő súrlódás mértékét.

2.3. Pozicionálás és kenőanyag

A kísérlet során kiemelkedően fontos, hogy biztosítsuk a darabok egytengelyűségét. A pozicionálás szabadkézi úton nem elégséges, így létrehoztunk egy pozicionáló egységet, mely additív eljárással készült a Craftbot flow idex xl nevű berendezésen, anyagát tekintve BASF gyártmányú PLA, és két félből tevődik össze. Zárt állapotban a próbatestek palástfelületei és a pozicionáló készülék belső falai között pontszerű érintkezés jön létre, így csökkentve az egytengelyűségi hiba mértékét. A pozicionáló készülék és az általa összerendezett koronghalmaz egységnyi hossz-átmérő (l/d) viszonya a **3. ábrá**n tekinthető meg.

A próbatestek nyomólapokkal érintkező felületeit Luba 21 nagynyomású kenőfolyadékkal kezeltük. A próbatestek egymással érintkező felületein azonban nem alkalmaztunk kenést, ezzel segítve elő a tömbi anyagviselkedést.

2.4. Nyomóvizsgálatok végrehajtása

A kísérleteket három különböző esetre hajtottuk végre. Az első esetben egy darab korongot (hossz-átmérő viszony: 0,1), a második esetben öt darab korongot (hossz-átmérő viszony: 0,5), míg a harmadik esetben tíz darab korongot (hossz-átmérő viszony: 1,0) helyeztünk egymásra és hajtottuk végre a zömítővizsgálatokat állandó alakváltozási sebességgel, háromszoros mérési ismétlési gyakorisággal. Egy próbatest a nyomólapok között a **4. ábrá**n tekinthető meg.

A keresztfej elmozdulása 3 mm/perc gyorsjárati sebességgel valósult meg, míg az előterhelés mértéke el nem érte a 250 N-t. Ez az érték 3–10 MPa nyomófeszültséget jelent, amely kisebb, mint a folyáshatár 5%-a, viszont ahhoz elegendő, hogy stabilizálja a halmazt a főterhelés megindulása előtt. Ezt követően a keresztfej a halmazok magasságának függvényében haladt tovább úgy, hogy az alábbi összefüggés teljesüljön.

$$v = h/10, \tag{1}$$

ahol v a keresztfej elmozdulási sebessége, h pedig az aktuálisan zömített halmaz kiinduló magassága.



2. ábra. A polírozott nyomópogácsák



3. ábra. Pozicionáló készülék és korong halmaz



4. ábra. A zömítővizsgálat végrehajtása



5. ábra. A halmazok a zömítést követően

Az 5. ábrán a halmazok láthatóak zömítés után. Minden halmaz összenyomása addig tartott, míg megközelítőleg el nem értük a kiinduló magasság felét.

2.5. Próbatestek szkennelése és mérése

Ezt követően a zömített próbatestek szkennelését hajtottuk végre a Vinyl Open Air berendezés segítségével. A berendezés egy darab 1,3 MP felbontású kamerával rendelkezik és 6 µm pontosságra képes. A próbatesteket a gép mágneses asztalához rögzítettük. A szkennelés során létrejött pontfelhő a **6. ábrá**n látható. A pontfelhők a teljes halmazok zömítés utáni koordinátapontjait tartalmazzák.

A szkennelt pontfelhő elemszámát csökkentettük, ezzel elősegítve a gyorsabb modellalkotást. Az egyszerűsített pontfelhő alapján elkészített modell a 7. ábrán látható.

3. Eredmények

A szkennelés szükségessége a nyomóvizsgálatok során bekövetkező alakváltozások mérésében játszik szerepet. A vizsgálatokkor a próbatestek vastagságirányú alakváltozását (ε_v) ugyan tudjuk közvetlenül számolni a keresztfejelmozdulások értékeiből (figyelembe véve a gép merevségét is), de a síkbeli alakváltozások a nyomólapok között rejtve maradnak. (A vastagságirányú alakváltozások számolásánál a statisztikai lemezvastagságot vettük kiinduló méretnek.)

A síkbeli alakváltozások mérésével a próbatestek anizotróp viselkedésére tudunk következtetni. Erre látunk példát a **8. ábrá**n, ahol a hengerlési iránnyal párhuzamos (ε_0) és arra merőleges logaritmikus deformációk (ε_{g0}) jól láthatóan eltérnek. A próbatest egyes méretei között közel egy milliméter eltérés tapasztalható 0,5 l/d viszonynál.

1.	tábl	ázat.	Mért	és	számol	t al	lał	kvá	ilto	ozáso	эk
----	------	-------	------	----	--------	------	-----	-----	------	-------	----

l/d	$\boldsymbol{\varepsilon}_{v}$	$\boldsymbol{\varepsilon}_{0}$	$\boldsymbol{\varepsilon}_{90}$	ε	β
0,1	-0,355	0,241	0,167	0,476	0,69
0,5	-0,633	0,356	0,286	0,748	0,80
1,0	-0,675	0,370	0,303	0,784	0,82

Az effektív, valódi képlékeny alakváltozások (ε_ρ) számítását a folyási feltétel ismeretében (feltételezésével) lehetséges megtenni, amelyhez mi ebben a kutatásban a Hill'48 elméletet **[11]** alkalmaztuk. Ehhez egyedül a síkbeli főalakváltozásokat és a szakítóvizsgálattal felvehető átlagos, normál anizotrópia tényezőt (R értéket) szükséges ismerni, amely korábbi méréseink alapján a DC04 anyagra vonatkozóan 1,706 értékkel vehető fel. Az **1. táblázat**ban a β a síkbeli főalakváltozások arányát fejezi ki, amely egyben megegyezik a kéttengelyű nyúláshoz tartozó anizotrópia tényező (r_p) értékével is:



6. ábra. A szkennelt próbatest



7. ábra. Az egyszerűsített pontfelhő alapján létrehozott testmodell



 ábra. A hengerlési irány és az arra merőleges irány átmérőkülönbsége

$$r_b \equiv \beta = \frac{\varepsilon_{90}}{\varepsilon_0} \tag{2}$$

A szakítóvizsgálattal mérhető és a kéttengelyű nyúlás anizotrópia tényező értékeit a 9. ábra és a 10. ábra szemlélteti.

A szakítóvizsgálatok során a normál anizotrópia tényező kismértékben változik az alakváltozások előrehaladtával, ahogyan az a 9. ábrán látható. Lineáris függvénnyel közelítve, három mérés átlagát adtuk meg a szövegben.



9. ábra. Szakítóvizsgálatból meghatározott anizotrópia (R) érték



10. ábra. A kéttengelyű anizotrópia (R) érték változása az l/d viszony függvényében

A **10. ábra** alapján a kéttengelyű nyúláshoz tartozó anizotrópia értéke is változónak tekinthető a geometriai viszony vagy az effektív alakváltozás függvényében.

4. Következtetések

A nagy alakváltozási tartományokban történő folyásgörbe-felvétel egyik kézenfekvő módja a halmazzömítő vizsgálat, azonban végrehajtása során geometriai és súrlódási korrekció szükséges.

Cikkünkben azt vizsgáltuk, hogy szükséges-e a geometriai viszonyszámot figyelembe venni a kéttengelyű anizotrópia tényező meghatározásakor is, avagy az csak a folyásgörbék alakjára van torzító hatással. A vizsgálatainkat 0,1, 0,5 és 1,0 l/d viszonyszámú próbatesteken hajtottuk végre. Az alakváltozásokat digitális képkorreláció segítségével, a középátmérő-változásból származtattuk.

Eredményeink azt mutatják, hogy a vizsgált geometriai viszony és alakváltozás tartományban kismértékben torzul a kéttengelyű anizotrópia mérőszám mért értéke, ha kicsi (esetünkben 0,1) a hossz-átmérő viszonyszám. Ugyanakkor, 0,5 és a feletti hossz-átmérő viszonyszámoknál már nem látható számottevő eltérés.

Szakirodalmi hivatkozások

 Barlat F., Brem J. C., Yoon J. W., Chung K., Dick R. E., Lege D. J., Pourboghrat F., Choi S.-H., Chu E.: Plane stress yield function for aluminim alloy sheets – Part 1: theory. Int. J. Plast., (2003) 1297– 1319.

https://doi.org/10.1016/S0749-6419(02)00019-0

[2] Coppieters S., Traphöner H., Stiebert F., Balan T., Kuwabara T., Tekkaya A. E.: Large strain flow curve identification for sheet metal. J. Mat. Pro. Tec., 308. (2022) 117725.

https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117725

[3] Merklein M., Kuppert A.: A method for the layer compression test considering the anisotropic material behavior. Int. J. Mater. Form., 2. (2009) 483–486.

https://doi.org/10.1007/s12289-009-0592-8

[4] Coppieters S., Lava P., Sol H., Van Bael A., Van Houtte P., Debruyne D.: Determination of the flow stress and contact friction of sheet metal in a multi-layered upsetting test. J. Mat. Pro. Tec., 210. (2010) 1290–1296.

https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.03.017

[5] Kraus M., Lenzen M., Merklein M.: Contact pressure-dependent friction characterization by using a single sheet metal compression test. Wear, 476. (2021) 203679.

https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203679

[6] Gil I., Mendiguren J., Galdos L., Magurra E., Argandona E. S. de: *Influence of the pressure dependent coefficient of friction on deep drawing springback prediction*. Tribology International, 103. (2016) 266–273.

https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.07.004

[7] Christiansen P., Martins P. A. F., Bay N.: Friction Compensation in the Upsetting of Cylindrical Test Specimens. Experimental Mechanics, 56. (2016) 1271–1279.

https://doi.org/10.1007/s11340-016-0164-z

[8] Graf M., Fritsch S., Awiszus B.: Determination of Forming Behaviour of EN AW-6060 by Different Testing Methods under Cold Bulking Forming Conditions. Procedia Manufacturing, 47 (2020) 1512–1519.

https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.339

- [9] Chermette C., Unruh K., Peshekhodov I., Chottin J., Balan T.: A new analytical method for determination of the flow curve for high-strength sheet steels using the plane strain compression test. Int. J. Mater. Form., 13. (2020) 269–292. https://doi.org/10.1007/s12289-019-01485-4
- [10] Banabic D., Bunge H.-J., Pöhlandt K., Tekkaya A. E.: Formability of Metallic Materials. Springer-Verlag, 2000.

https://doi.org/10.1007/978-3-662-04013-3

[11] Hill R.: A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Royal Society, 193. (1948) 1033.

https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045





A 3PHV60 típusú műgyanta alkalmazása a faszerkezetek javítására

Application of 3PHV60 Type Epoxy Resin for the Repair of Timber Structures

Márton Péter

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Doktori Iskola, Kolozsvár, Románia, marton.peter17@gmail.com

Abstract

This article deals with the issue of repairing wooden structures with 3PHV60 type resin. The first step of the research was to understand the material properties of 3PHV60 resin. The information provided by the resin manufacturer and the tests based on fracture tests have greatly contributed to the proper study of the behaviour of this material. The use of resin for the repair of timber structures is discussed in relation to the type of internal forces.

Keywords: structural timber, epoxy resin, timber repair, reconstruction, restoration.

Összefoglalás

A jelen cikk a fa tartószerkezetek 3PHV60 típusú műgyantával történő javításának kérdéskörével foglalkozik. A kutatás első lépése a 3PHV60 típusú műgyanta anyagjellemzőinek megismerése volt. A műgyanta gyártójától szolgáltatott információk, illetve a törésteszteken alapuló vizsgálatok nagyban hozzájárultak ezen anyag viselkedésének megfelelő tanulmányozásához. A műgyanta alkalmazását a faszerkezetek javítására az igénybevételek típusának függvényében tárgyalom.

Kulcsszavak: tartószerkezeti fa, műgyanta, fa javítása, rekonstrukció, helyreállítás.

1. Bevezetés

Egy meglévő épület felújítása során számos alkalommal felmerül a fa tartószerkezetek megerősítésének kérdése. E célból számos megoldást alkalmaznak a gyakorlatban, ami az anyaghasználatot vagy a beavatkozás mértékét illeti.

A kutatás központi kérdése, hogy a 3PHV60 típusú műgyanta alkalmas lehet-e a fa tartószerkezetek lokális megerősítésére/javítására.

A tanulmányban bemutatom a 3PHV60 típusú műgyantákon végzett kísérleteket. Ezt követően a fa műgyantával történő megerősítései kerülnek előtérbe, melyeket az igénybevételek típusa szerint csoportosítok. A vizsgálatok alapjául a töréstesztek szolgáltak.

2. A 3P típusú műgyanta általános ismertetése

A 3P gyanták kétkomponensű rendszerek, melyek poliizocianát/vízüveg összetételű kopolimerek. A 3P gyanták a nevüket az összetevőik idegen nyelvű szavak kezdőbetűiből kapták: Polysilicic acid, Poliisocyanates, Phosphoric acid esters [1].

A kemény 3P gyanták "A" komponense minden esetben Na-vízüveg, a "B" komponense pedig MDI (metilén-difeniliziocianát és származékai) [1].

A 3P gyanta előállítása az "A" és "B" komponensek egyszerű, de gondos összekeverésével kezdődik. A két komponenst 1:2 térfogatarányban homogenizáljuk (1. ábra).



1. ábra. A 3P műgyanta "A" és "B" komponensei

A gyanta akkor tekinthető homogénnek, ha a teljes mennyiség egységes tejeskávészínűvé vált.

3. A 3PHV60 típusú műgyanta anyagjellemzőinek vizsgálata

A 3PHV60 típusú kemény műgyanta a 3P típusú gyanták egyik altípusa. Az anyagjellemzők meghatározására törésteszteket végeztem. A vizsgálatok egy részét a gyáli székhelyű POLINVENT Kft.-nél, a vizsgálatok másik részét a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Czakó Adolf Szilárdságtani Laboratóriumában végeztem el. Minden műgyanta próbatestet a gyártásától számított minimum hetedik napon vizsgáltam.

3.1. A 3PHV60 típusú műgyanta húzószilárdságának meghatározása

A műgyanta húzószilárdságának meghatározásánál alkalmazott próbatestek előállításához öntőformát használtam. A folyékony halmazállapotú műgyantát a 2. ábrán látható öntőformába töltöttük, majd 7 nap elteltével a BME Szilárdságtani Laborjában található Zwick Roell Z150 (3. ábra) típusú berendezéssel eltörtem, elszakítottam.

A műgyanta húzószilárdságának meghatározásánál alkalmazott próbatestek geometriáját a 4. ábra szemlélteti. Erre a célra 6 darab próbatest készült, melyek jellemzően rideg módon mentek tönkre.

Az 1. táblázat összegzi a törésnél mért erőt (F_{max}), amelyből a keresztmetszet (S) ismeretéből meghatározható a törés pillanatában kialakult normálfeszültség (σ_t).

A törésnél mért normálfeszültségek átlaga 19,46 N/mm², melynek szórása: 1,92 N/mm².



 ábra. A műgyanta húzószilárdságának meghatározásánál alkalmazott próbatestek



3. ábra. A műgyanta húzási teherbírásának mérése



4. ábra. A húzásra vizsgált műgyanta próbatestek

#	F _{max} (N)	S (mm²)	σ _t (N/mm²)					
1	719,58	42,36	16,99					
2	826,58	41,12	20,10					
3	846,67	46,59	18,17					
4	861,33	48,29	17,83					
5	1063,34	49,08	21,67					
6	1102,94	50,14	22,00					

1. táblázat. A húzásra vizsgált műgyanta próbatestek törésnél mért eredményei

3.2. A 3PHV60 típusú műgyanta nyírási teherbírásának meghatározása

A 3PHV60 típusú műgyanta nyírási teherbírásának meghatározásához 5 darab 20×20×120 mm méretű próbatestet készítettem. A törésteszt az öntéstől számított hetedik napon történt.

A 2. táblázat összegzi a törésnél mért erőt (F_{max}), melyből kiszámítható a maximális nyíróerő (V_{max}), és ismerve a nyírt felületet (S), a nyírófeszültség (τ) értéke is megállapítható.

2. táblázat. A nyírásra vizsgált műgyanta próbatestek törésnél mért eredményei

#	F _{max} (N)	V _{max} (N)	S (mm²)	τ (N/mm²)
1	12 884	6442	400	16,11
2	12 114	6057	400	15,14
3	11 935	5967	400	14,92
4	10 882	5441	400	13,60
5	12 272	6136	400	15,34

A törésnél mért nyírófeszültségek átlaga 15,02 N/mm², melynek szórása: 0,81 N/mm².



5. ábra. A nyírásra vizsgálandó műgyanta próbatestek a szilárdulási fázis elején



6. ábra. Műgyanta próbatest nyírási vizsgálata



7. **ábra**. A nyírásra vizsgált műgyanta próbatestek jellegzetes törésképe

3.3. A 3PHV60 típusú műgyanta hajlítási teherbírásának meghatározása

A 3PHV60 típusú műgyanta hajlítási teherbírásának meghatározásához az MSZ EN 13892-2:2003 szabványt vettük alapul, mely útmutatást ad a próbatestek geometriájára és a töréstesztek véghezvitelére vonatkozóan.

A törésteszteket a gyáli székhelyű műgyantagyártó, a POLINVENT Kft. Instron berendezésével végeztem.

5 darab 20×20×120 mm méretű próbatest készült, melyet a fesztávolság felénél terheltünk koncentrált erővel.

A **3. táblázat** összegzi a törésnél mért erőt (F_{max}), melyből kiszámítható a maximális hajlítónyomaték (M_{max}), és ismerve a keresztmetszeti modulust (W), a hajlítófeszültség (σ_m) értéke is kiszámítható.

A műgyanta hajlítási teherbírásának átlagértéke 45,63 N/mm², szórása 1,76 N/mm².

Az erő-elmozdulás diagramból itt is megállapíthatjuk, hogy ezúttal is ridegtörés ment végbe.

#	F _{max} (N)	M _{max} (Nmm)	W (mm ³)	σ _m (N/mm ²)
1	2228	55 710	1,333	41,78
2	2433	60 825	1,333	45,63
3	2496	62 400	1,333	46,82
4	2420	60 500	1,333	45,39
5	2467	61 675	1,333	46,26

3. táblázat. A hajlításra vizsgált műgyanta próbatestek törési eredményei



8. ábra. A hajlításra vizsgált műgyanta próbatest



9. ábra. A műgyanta hajlítási teherbírás-vizsgálatának vázlata

3.4. A 3PHV60 típusú műgyanta helyi nyomási teherbírásának meghatározása

A műgyanta helyi nyomási teherbírásának meghatározására a hajlítási teherbírási kísérleteknél használt próbatesteket vizsgáltam. Itt is 5 db próbatest viselkedését mértem, a próbatesteket 20×20 mm-es felületen terhelve.

A **4. táblázat**ban összegeztem a maximum erőnél keletkezett összenyomódást (dH), illetve a nyomásból származó normálfeszültség értékét (σ_{pecset}).



 ábra. A műgyanta helyi nyomási teherbírásvizsgálatának vázlata

4.	. <mark>táblázat.</mark> A helyi nyomásra vizsgált műgyanta p	əró-
	batestek vizsgálatának eredményei	

#	F _{max} (kN)	S (mm)	dH (mm)	σ _{pecset} (N/mm²)
1	2228	400	1,333	73
2	2433	400	1,333	75
3	2496	400	1,333	76
4	2420	400	1,333	74
5	2467	400	1,333	76

A pecsétnyomásból származó feszültségek átlagértéke 75 N/mm², melyhez 1,16 N/mm² szórás tartozik.

A 3PHV60 típusú műgyanta alkalmazása puhafa tartószerkezeti elemeken

A műgyanta fán történő alkalmazhatóságának megállapítása céljából a következő kísérleteket hajtottam végre:

- műgyanta és fa közti tapadásvizsgálatok (a ragasztott fafelület: bütüs, szálirányú és rostirányra merőleges);
- nyírási teherbírások vizsgálata;
- hajlítási teherbírási vizsgálatok.

A tanulmány írása pillanatában még egy nyomási teherbírási kísérlet van előkészítés alatt, jelenleg a műgyanta szilárdulási folyamata megy végbe.

A kísérleteknél 12% relatív nedvességtartalom alatti, közönséges lucfenyőből (Picea abies) készült próbatesteket használtam.

4.1. A 3PHV60 típusú műgyanta és bütüs fa tapadásvizsgálata

A műgyanta és a bütüs fa tapadásvizsgálatához a **11. ábrá**n szemléltetett próbatesteket alkalmaztuk. A 2 db, 20×40 mm méretű, bütüs oldalakat kentük be műgyantával, majd összeillesztettük a két próbatestet, így 1600 mm² tapadási felület keletkezett. A 7 napos műgyanta-szilárdulási időszak letelte után elvégeztük a törésteszteket.

A műgyanta állaga szempontjából ezt a vizsgálatot két részre bontottuk. Az első sorozatban nagyon folyékony, a szilárdulási fázis legelején levő műgyantát kentünk a bütüs oldalra. A második sorozatban már viszkózusabb, a szilárdulási fázis szempontjából előrehaladottabb állapotú műgyanta került a fa próbatestek bütüs oldalaira.



11. ábra. Műgyanta és bütüs fa tapadásvizsgálatának vázlata



12. ábra. Műgyanta és bütüs fa tapadásvizsgálata a Zwick Roell Z 150 berendezésen

5. táblázat.	Műgyanta és bütüs fa tapadásvizsgála-
	a, az 1. sorozat eredményei

#	F _{max} (N)	S (mm)	Bütüs tapadás (N/mm²)	Átlag (N/mm²)
1	2756	1600	1,72	
2	4286	1600	2,67	
3	5263	1600	3,28	2,70
4	5056	1600	3,16	
5	3850	1600	2,40	
6	4909	1600	3,06	
7	3367	1600	2,10	
8	5172	1600	3,23	

<mark>6. táblázat.</mark> Műgyanta és bütüs fa tapadásvizsgálata,	
2. sorozat eredményei	

#	F _{max} (N)	S (mm)	Bütüs tapadás (N/mm²)	Átlag (N/mm²)
9	6977	1600	4,36	
10	6102	1600	3,81	
11	7988	1600	4,99	5,04
13	10248	1600	6,40	
14	9070	1600	5,66	

A második sorozatban kapott bütüs tapadás átlagértéke 86%-kal nagyobb, mint az első sorozatban kapott átlagérték.

4.2. A 3PHV60 típusú műgyanta és szálirányú fa tapadásvizsgálata

A műgyanta és a szálirányú fa tapadásvizsgálatához a bütüs vizsgálathoz hasonló próbatesteket alkalmaztunk, annyi különbséggel, hogy ezúttal a fa próbatestek száliránnyal párhuzamos oldalát kentük be műgyantával (13. ábra). Megvárva a 7 nap szilárdulási időt, a szakítógép segítségével a próbatesteket a műgyanta-fa kapcsolat tönkremeneteléig terheltük.

A szálirányú tapadásvizsgálat esetében 8 darab próbatest készült, melyek törési eredményeit a **7. táblázat** összegzi.

A bütüs fa tapadásvizsgálata második sorozatának eredményei a szálirányú fa tapadásvizsgálata eredményeihez hasonlóak.



13. ábra. Műgyanta és szálirányú fa közötti tapadásvizsgálat próbatestei

#	F _{max} (N)	S (mm)	Szál- irányú tapadás (N/mm²)	Átlag (N/mm²)
1	7865	1600	4,91	
2	7049	1600	4,40	
3	7753	1600	4,84	
4	4631	1600	2,89	4.00
5	7529	1600	4,70	4,80
6	10692	1600	6,68	
7	7488	1600	4,68	
8	8494	1600	5,30	

7. táblázat. Műgyanta és szálirányú fa tapadásvizsgálatának eredményei

4.3. A 3PHV60 típusú műgyanta és rostirányra merőleges fa tapadásvizsgálata

Ennél a kísérletnél is 8 darab próbatest készült, azonos tapadási felülettel (S), mint az előző két tapadásvizsgálat esetében. Az összeragasztott próbatestek tapadási felülete 40×40 mm².



14. ábra. Műgyanta és rostirányra merőleges fa tapadásvizsgálatának vázlata



15. ábra. Műgyanta és szálirányú fa tapadásvizsgálatának mérése

#	F _{max} (N)	A (mm)	Rostirányra merőleges tapadás (N/mm ²)	Átlag (N/mm²)
1	5379	1600	3,36	
2	4705	1600	2,94	
3	5054	1600	3,15	
4	6941	1600	4,33	0.00
5	4449	1600	2,78	3,20
6	4912	1600	3,07	
7	4437	1600	2,77	
8	5032	1600	3,14	

8. táblázat. Műgyanta és rostirányra merőleges fa tapadásvizsgálatának eredményei

A rostirányra merőleges fa tapadásvizsgálata esetében a fa próbatestek rostirányra merőleges húzásra vannak igénybe véve. Ennél a vizsgálatnál jellemzően a tönkremenetel a fában keletkezett, és nem a műgyanta és a fa határfelületén. Ez nem meglepő, hiszen a fa szilárdsági tulajdonságai közül a rostirányra merőleges húzási teherbírás a legkisebb.

4.4. Nyírási teherbírások vizsgálata

A műgyantával megerősített fa nyírási teherbírásának vizsgálatához 3 sorozat mérés készült, melyeket a mérések után összehasonlítottam.

4.4.1. Teljes keresztmetszetű fa próbatest nyírási teherbírásának vizsgálata

Ennél a sorozatnál az volt a célom, hogy adatot szerezzek a vizsgált faanyag átlag nyírási teherbírásáról. Majd a következő sorozatokban ezt a faanyagot felhasználva, a próbatesteken gyengítést, ezt követően pedig a gyengítés javítását modellezzük a gyakorlatban.

8 darab 40×40×120 mm teli keresztmetszetű fa próbatest készült, a vizsgálatot a 17. ábra szemlélteti.



16. ábra. A teli keresztmetszetű nyírt fa próbatestek kísérletének vázlata



17. ábra. A teli keresztmetszetű nyírt fa próbatest

A 9. táblázatban összegzem a mért nyírási teherbírás értékeket. A tönkremenetel pillanatában mért átlag nyírófeszültség értéke 5,03 N/mm², melynek szórása: 0,45 N/mm².

A maximum nyíróerő értéke (V_{max}) egyenlő a törés pillanatában alkalmazott P_{max} erő felével.

9. táblázat. A teljes keresztmetszetű fa próbatestek nyírási teherbírása

#	V _{max} (N)	A (mm)	Nyírási teherbí- rás (N/mm²)	Átlag (N/mm²)
1	8693	1600	5,43	
2	7664	1600	4,79	
3	8148	1600	5,09	
4	9187	1600	5,74	5.00
5	7518	1600	4,70	5,03
6	6817	1600	4,26	
7	7743	1600	4,84	
8	8623	1600	5,39	

Az itt mért törési erők átlagértéke 16 098 N.

4.4.2. Gyengített keresztmetszetű fa próbatestek nyírási teherbírásának vizsgálata

A méréshez 7 darab, az előző alpontban is alkalmazott 40×40×120 mm próbatest készült, melyeken a nyíróerőre igénybe vett szakaszon egy szabályos geometriájú keresztmetszet-csökkentést hajtottam végre. A terhelt résznél a fából eltávolítottam egy 20×20×40 mm részt.

Ebben az esetben a nyírásnak ellenálló fa keresztmetszete 800 mm²-re csökkent.



18. ábra. A gyengítéssel ellátott próbatest nyírási teherbírásának vizsgálata



19. ábra. A gyengítéssel ellátott próbatest nyírási teherbírásának vizsgálata

10. táblázat. A gyengített keresztmetszetű	i fa próba-
testek nyírási teherbírása	

#	P _{max} (N)	V _{max} (N)	A (mm)	Nyírási teherbí- rás (N/mm²)	Átlag (N/mm²)
1	13 378	6689	800	8,36	
2	15 329	7664	800	9,58	
3	16 570	8285	800	10,35	
4	17 110	8555	800	10,69	8,53
5	11 542	5771	800	7,21	
6	11 747	5873	800	7,34	
7	9 861	4930	800	6,16	

Az itt mért törési erők átlaga 13648 N.

4.4.3. Műgyantával kiegészített, gyengített fa próbatestek nyírási teherbírásának vizsgálata

A 4.4.2. pontban bemutatott próbatesteken kialakított szabályos "gyengítéseket" 3PHV60 műgyantával töltöttük ki, majd a műgyanta megszilárdulási idejét kivárva ezeket a próbatesteket is eltörtük.



20. ábra. A műgyantával kiegészített nyírásvizsgálati próbatestek



21. ábra. Műgyantával kiegészített, gyengített keresztmetszetű próbatest nyírási teherbírásának vizsgálata

11. táblázat. A gyengített keresztmetszetű, műgyantával erősített fa próbatestek nyírási teherbírása

#	P _{max} (N)	V _{max} (N)	Átlagos nyíróerő (N)	Átlagos törési erő (N)
1	20 531	10 265		
2	18 096	9 048		
3	21 734	10 867		
4	17 129	8 564	0.010	40.000
5	15 327	7 663	9313	18 626
6	18 014	9 007		
7	18 204	9 102		
8	19 983	9 991		

A törési erők értékeinek átlaga a műgyantával kitöltött gyengített próbatestek esetében 18626 N, míg a teli keresztmetszetű, ép fa próbatestek esetében ez az érték 16098 N volt.

4.5. Hajlítási teherbírások vizsgálata

A hajlítási teherbírások vizsgálatához az [4] MSZ EN 408:2010+A1:2012 szabványt vettem alapul. Az említett szabvány előírja a hajlítási teherbírás vizsgálatához szükséges geometriai és terhelési paramétereket. Több sorozat készült ennél a vizsgálatnál is, akárcsak a nyírási teherbírások meghatározásánál. A sorozatok összehasonlítása révén próbálok következtetéseket levonni a módszerek hatásosságáról. Ezeknél a méréseknél a törés pillanatában mért erőket hasonlítom össze, nem a hajlítófeszültségek meghatározása történik.

4.5.1. Alsó övben gyengített próbatestek hajlítási teherbírása

5 darab $40 \times 40 \times 800$ mm geometriájú próbatestet mértem, melyeknek támaszköze 720 mm. A fesztávolság harmadolópontjaiban terheltem a próbatesteket. A fesztávolság felénél egy szabályos keresztmetszet-gyengítést hajtottam végre, a próbatestek alsó övéből $40 \times 20 \times 20$ mm téglatestet vágtunk ki.



22. ábra. Az alsó övben gyengített próbatestek hajlítási teherbírásának vizsgálata

12. táblázat. Alsó övben gyengített próbatestek töré- si erőinek összegzése			
#	P _{max}	Törési erők átlaga	

# P _{max} (N)		átlaga (N)
1	1395	
2	411	
3	658	801,30
4	549	
5	991	

4.5.2. Alsó övben gyengített, műgyantával kitöltött próbatestek hajlítási teherbírása

A 4.5.1-es pontban alkalmazott próbatesteket vettük alapul. A gyengített részt töltöttem ki műgyantával, majd a 7 napos szilárdulási idő után mértem a törés pillanatában az erőket.



23. ábra. Az alsó övben gyengített, műgyantával kitöltött próbatestek hajlítási teherbírásának vizsgálata

13. táblázat.	Alsó övben gyengített, műgyantával
	erősített próbatestek törési erőinek
	összegzése

#	P _{max} (N)	Törési erők átlaga (N)
1	1730	
2	1064	
3	1650	1040 17
4	1285	1243,17
5	1032	
6	696	

4.5.3. A felső övben gyengített próbatestek hajlítási teherbírása

A 4.5.1. ponthoz hasonlóan itt is 5 darab próbatestet készítettünk, annyi különbséggel, hogy ezúttal a gyengítést a felső övben alkalmaztuk.



24. ábra. A felső övben gyengített próbatestek hajlítási teherbírásának vizsgálata

14. táblá	zat. A felső övben gyengített próbatestek
	törési erőinek összegzése

#	P _{max} (N)	Törési erők átlaga (N)
1	942	
2	1024	
3	1581	1304
4	1578	
5	1386	

4.5.4. A felső övben gyengített, műgyantával kitöltött próbatestek hajlítási teherbírása

7 darab, a 4.5.3. ponthoz hasonló próbatestet készítettünk, melyek keresztmetszeti gyengítéseit műgyantával töltöttük ki. *A Régi fa tartószerkezeti elemek állapotfelmérése roncsolásmentes, illetve töréseken alapuló vizsgálatokkal* című tanulmányomban [5], amelyet 2019-ben a Nemzetközi Építéstudományi Konferencián mutattam be, a gyengítés nélküli próbatestek (32 db) törési erőinek átlagértéke 4566 N volt.



25. ábra. A gyengített részek műgyantával való kitöltése



26. ábra. A felső övben gyengített, műgyantával erősített próbatestek hajlítási teherbírásának vizsgálata

15. táblázat. A felső övben gyengített, műgyantával kitöltött próbatestek törési erőinek öszszegzése

#	P _{max} (N)	Törési erők átlaga (N)
1	4009	
2	4092	
3	4860	
4	4446	4387
5	3413	
6	4194	
7	5693	

5. Következtetések

A tanulmányban bemutatott mérések révén betekintést nyertem a 3PHV60 típusú műgyanta károsodott fa tartószerkezetek helyreállításakor való alkalmazásának lehetőségeibe.

A tapadásvizsgálatok mérése során a húzott fa tartószerkezeti elemek, csomópontok műgyantával történő javításának vizsgálata volt az elsődleges cél.

A gyengített vagy a gyakorlatban a mechanikailag sérült, nyírásnak kitett faelemek erősítésére az általam vizsgált 3PHV60 típusú műgyanta alkalmazása jó alternatíva lehet. A csökkentett fa keresztmetszet műgyantával történő kiegészítése során nagyobb nyírási teherbírások születettek, mint a teljes keresztmetszettel rendelkező fa próbatestek esetében.

A hajlításnak kitett fa tartószerkezeti elemeknél nagyon fontos kérdés, hogy a sérülés a fa húzott vagy nyomott oldalán helyezkedik el. Amennyiben a sérülés a fa nyomott oldalán helyezkedik el, a műgyantával történő kitöltéssel a fa eredeti hajlítási teherbírása visszanyerhető. Amennyiben a sérülés a fa húzott oldalán helyezkedik el, akkor a mechanikailag sérült terület műgyantával való kitöltése révén javítható a hajlítási teherbírása, de az eredeti teherbírás helyreállításához egyéb, később vizsgálandó (pl. beragasztott acél- vagy kompozit lemez) alkalmazására lehet szükség.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom Armuth Miklós címzetes egyetemi tanárnak (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem), Sebestyén Ottó technikusnak (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem), Karádi Dániel építészmérnök doktorandusznak (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem), Baróthy Miklós vegyészmérnöknek (POLINVENT Kft.) és Köllő Gábor professzornak (Kolozsvári Műszaki Egyetem), akik a tanulmányom megfelelő fázisaiban segítettek, támogattak.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Nagy G. F.: A Polinvent Kft. direkt és indirekt polikarbamind (PU) rendszerei. Gyál, 2012.
- [2] MSZ EN 13892-2:2003 Esztrichek és padozati anyagok vizsgálati módszerei, 2. rész: A hajlítóhúzó és a nyomószilárdság meghatározása
- [3] MSZ EN 13892-1:2003 Esztrichek és padozati anyagok vizsgálati módszerei, 1. rész: Mintavétel, vizsgálati próbatestek készítése és tárolása
- [4] MSZ EN 408:2010+A1:2012 Faszerkezetek. Szerkezeti fa és rétegelt-ragasztott fa. Egyes fizikai és mechanikai tulajdonságok meghatározása
- [5] Márton P.: Régi fa tartószerkezeti elemek állapotfelmérése roncsolásmentes, illetve töréseken alapuló vizsgálatokkal. XXIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, Erdélyi Magyar Műszaki Társaság, Csíksomlyó, 100–102.





Eltérő nitridálási eljárásokkal kezelt melegalakító szerszámacél vizsgálata ciklikus hőterhelést követően

Examination of a Hot-Work Tool Steel Treated with Different Nitriding Processes after Cyclic Heating

Oláh Klaudia,¹ Korsós Krisztián,² Kovács Dorina³

- ¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, olah.klaudia@edu.bme.hu
- ² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, krisztian.korsos@edu.bme.hu
- ³ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, kovacs.dorina@gpk.bme.hu

Abstract

This research examines the effect of salt bath, and nitriding processes on hot forming tool steel. The chosen steel is BÖHLER W350 ISOBLOCK hot forming tool steel, which is widely used in the industry for pressure casting. After surface treatment, some samples were exposed to cyclic heat and corrosion effects in a molten aluminium medium, thus simulating the conditions experienced during pressure casting. Microhardness measurements were performed on the samples treated with different procedures. The results were compared using a scanning electron microscope and energy-dispersive X-ray spectrometry.

Keywords: plasma nitriding, salt bath nitriding, hot work tool steel.

Összefoglalás

Kutatásunk során a nitridálás két fő technológiai változatának, a sófürdős és plazmanitridáló eljárásnak melegalakító szerszámacélra gyakorolt hatását hasonlítjuk össze. A választott acél a BÖHLER W350 ISOBLOCK melegalakító szerszámacélja, melyet az iparban széles körben alkalmaznak nyomásos öntészetnél. A minták egy részét a felületkezelést követően olvadt alumínium közegben ciklikus hő- és korróziós hatásoknak tettük ki, ezzel szimulálva a nyomásos öntés során tapasztalható körülményeket. A különböző eljárásokkal kezelt mintákon ezt követően mikrokeménység-mérést végeztünk, majd a pásztázó elektronmikroszkóppal, valamint az energiadiszperzív röntgenspektrometriával végzett vizsgálatok eredményei alapján hasonlítottuk össze az eljárásokat.

Kulcsszavak: plazmanitridálás, sófürdős nitridálás, melegalakító szerszámacél.

1. Bevezetés

Manapság a gépjármű-alkatrészek jelentős hányadát teszik ki az alumíniumöntvények. Az alumínium könnyűfém, melynek alkalmazása lehetővé teszi a könnyű gépalkatrészek gyártását azok szilárdsági jellemzőinek romlása nélkül.

Ezen alkatrészek gyártásakor az öntőszerszám kiemelkedő szerepet játszik: nagy hőmérsékleten történő alkalmazása során is nagy ellenállóságot kell mutasson mind mechanikai, mind korróziós hatásokkal szemben. Az ipar melegalakító szerszámacélt alkalmaz az öntőszerszám alapanyagaként, mely az alumínium olvadáspontján is megőrzi hőállóságát. A szerszám minőségének hosszú távú megőrzése érdekében elengedhetetlen annak felületkezelése.

A nitridálás termokémiai felületkezelés, mely során diffúziós úton nitrogént juttatunk a munkadarab felületébe kemény, kopásálló, nitrideket tartalmazó réteg létrehozásának céljából [1, 2]. A nitridálásnak számos változata terjedt el, melyek az iparban, eltérő alkalmazásokban használatosak az adott felhasználási terület követelményeinek megfelelően.

Korábbi kutatások 1.2343 és 1.2344 számjelű acélok termikus kifáradási élettartamának javulásáról számoltak be különböző nitridálási kezelések után [3, 4]. Yucel Birol [5], 1.2365 jelzésű acélnál vizsgálta a plazmanitridálás hatását a hőfáradással szemben. A 450 °C és 750 °C között végzett, 500 cikluson át tartó hőfáradási vizsgálat során a felületkezelt acél eredeti 1084 HV0.02 felületi keménysége 250 HV0.02 értékre csökkent. A jelenséget a szerzők a felületi vegyületi réteg termikus károsodásának, a nitrogén tartalomcsökkenésének, illetve a szubsztrát mikroszerkezeti átalakulásának tulajdonították. Egy másik kutatás során Guang Chen és társai [6] eltérő hőmérsékleteken (430, 450 és 470 °C) és kezelési ideig (4, 6 és 8 óra) történő sófürdős nitridálással felületkezelt, 1.2344 számjelű acélon végeztek hasonló kísérletet. A próbatesteket 30 percen keresztül 750 °C-on tartották olvadt alumíniumban. Kutatásuk eredményeként megállapítható, hogy a minták keménységi értékei 1050-1317 HV0.1 közötti értékekről 855–891 HV0.1 értékekre csökkentek.

Nem áll azonban rendelkezésünkre szakirodalmi adat, mely a két nitridálási eljárást azonos körülmények mellett végzett hőfáradási kísérletek eredményei alapján hasonlítaná össze. Kutatásunk során plazmanitridálással, valamint sófürdős nitridálással kezelt próbatesteken végeztünk ciklikus hőfárasztó vizsgálatot, majd a kezelési eljárásokat a keménységértékek csökkenési mértékében, a nitrogénkoncentráció változásában hasonlítottuk össze.

2. Vizsgálati módszertan

2.1. A vizsgált acél és kezelései

A kutatás során vizsgált anyag BÖHLER W350 ISOBLOCK jelzésű melegalakító szerszámacél, melynek vegyi összetétele az **1. táblázat**ban látható.

Az alapanyagot 20×20 mm keresztmetszetű acélrúd formájában szereztük be, majd vízhűtéses abrazív vágótárcsás vágógéppel 5 mm vastagságú próbatestekre vágtuk. A melegalakító szerszámacél kiválásosan keményíthető, így hőkezelési ciklusában három megeresztés jelenik meg. Tekintettel arra, hogy a harmadik megeresztési hőmérséklet egybeesik a nitridálás hőmérsékletével, így a két folyamatot egy lépésben végeztük el. A próbatestek előzetes hőkezelése az 1. ábrán látható.

A sófürdős kezelést kis cianidtartalmú, karbonitridáló közegben végezték 580 °C-on, 2,5 órán keresztül. A plazmanitridálás 520 °C-on, 1:3 arányú nitrogén és hidrogén gázkeverékében 25 órán keresztül történt. Mindkét technológia során 10 μm vastagságú vegyületi és 100 μm vastagságú diffúziós réteg létrehozása volt a cél.

Az alumíniumnyomásos öntés során 650–700 °Con olvadt alumíniumot fecskendeznek az öntőszerszám üregeibe, mely gyakran a 30 m/s sebességet is meghaladja, akár 1300 bar nyomáson [6]. A szerszám felülete ezáltal erős mechanikai terhelésnek, súlyos korróziós hatásoknak van kitéve. Az összetett romlási mechanizmusok okozta károsodások a hőfáradás, a kopás és a korrózió.

A kutatás során a mintákat olvadt alumínium közegben végzett ciklikus hő- és korróziós hatások érték. A próbatesteket 5 percre 700 °C-os alumíniumközegbe merítettük, majd 5 percen keresztül hűtöttük levegőn, összesen 10 cikluson keresztül. A mintákat a felületkezelés és korróziós vizsgálat után a felületre merőlegesen elvágtuk. Ezt követően beágyaztuk azokat, majd a vágott felületüket csiszoltuk, políroztuk. A minták a hivatkozás megkönnyítése érdekében kódnevet kaptak, a 2. táblázatban látható módon.

1. táblázat. Az ötvözők tömegaránya (%)

с	Si	Mn	Cr	Мо	v
0,38	0,20	0,55	5,00	1,80	0,55

2. táblázat. A minták jelölései

Minta	Név
Referencia	R1
Referencia, hőterhelt	R2
Sófürdősen nitridált	S1
Sófürdősen nitridált, hőterhelt	S2
Plazmanitridált	P1
Plazmanitridált, hőterhelt	P2



1. ábra. A minták előzetes hőkezelése

2.2. A vizsgálati módszerek

A mintákon Vickers-keménységmérést végeztünk az ISO 18203:2016, felületkezelt kéregvastagságának meghatározására vonatkozó szabvány szerint. Először a magkeménységet mértük a minták közepén végzett három mérés átlagából. Ezután a további mérési pontokat a minta felületéről befelé haladva 0,05 mm-enként vettük fel, két mérési sorban, egymástól 0,025 mm-rel eltolva. Egy mintán összesen 20 mérés készült.

A polírozott mintákon Nital-2 marószerrel 60–90 másodpercig tartó kémiai maratást végeztünk, mely a szövetszerkezetet tette láthatóvá.

A Zeiss EVO MA 10 típusú pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) végzett vizsgálatokat megelőzően a gyantába ágyazott minta felületét aranyoztuk, majd ezt követően a mintákat kétoldalú ragasztós vezető szalaggal erősítettük a mintatartóra. Az elektronmikroszkópos vizsgálatok során energiadiszperzív röntgenspektrometriával (EDS) határoztuk meg a minták kémiai összetételét. E vizsgálatok során az egyes mintákon és a rajtuk található kiválásokon elemanalízist végeztünk, valamint megállapításra került az esetlegesen kialakult vegyületi rétegek anyagi minősége.

3. A vizsgálatok eredményei

3.1. A mikrokeménység-mérés eredményei

A mikrokeménység-mérés eredményeit a 2. és 3. ábra diagramjai foglalják össze.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy bár a sófürdősen nitridált mintának vastagabb a diffúziós zónája, keménysége kisebb a plazmanitridált mintáénál. Az olvadt alumíniumban kezelt minták esetében a keménységértékek jelentős csökkenését tapasztaltuk. Ez a referenciaminta esetében átlagosan 10%, a sófürdősen kezelt mintánál 0,1 mm rétegmélységig átlagosan 6,3%, a plazmanitridált minta esetében 17,8% csökkenést jelentett.

3.2. A pásztázó elektronmikroszkóppal végzett vizsgálatok eredményei

A 4. ábrán megfigyelhető a nitridált minták esetében kialakult hálós szerkezet, ami a sófürdőben kezelt mintáknál erőteljesebben jelenik meg. A minták felületén látható fehér sáv feltehetően a vegyületi réteg, erről azonban csak az elemanalízis után lehet megbizonyosodni. A minták sarkainál a hálók még sűrűbben tűntek fel (5. ábra).



 ábra. Az egyes eljárások eredményeinek összevetése alumíniumos kezelés előtt



3. ábra. Az egyes eljárások eredményeinek összevetése alumíniumos kezelés után



ábra. Az S1 minta metszeti képe



5. ábra. Az S2 mintán kialakult hálós szerkezet

3.3. Az energiadiszperzív röntgenspektrometria eredményei

A mintákon látható hálók nagy nitrogéntartalmukból adódóan nitridhálók, melyek a szemcsehatár mentén váltak ki. A sarkok mentén a nitrogén nagyobb tömegszázalékban volt jelen. Ez a jelenség annak tudható be, hogy a minták sarkain a nitrogénnek több irányból adódik lehetősége az alapanyagba diffundálni, az így fellépő helyi túltelítettség hatására a szemcsehatárok mentén kiválások formájában jelenik meg a többlet nitrogénmennyiség [7]. Ez az úgynevezett élhatás elsősorban a plazmanitridálás során figyelhető meg. A nitridált minták mindegyikén nagyobb nitrogéntartalom mutatható ki. Az EDS-vizsgálat eredményei alapján a plazmanitridált minták esetében ez a mennyiség közel kétszerese a sófürdőben kezelt minták nitrogéntartalmának.

A nitridált minták sarkai az élhatás következtében feltehetően keményebbek, azonban ridegebbek. A jelenség nem minden esetben kívánatos, mivel dinamikus igénybevételű szerszámoknál könnyen lepattoghat az elridegedett anyag. A kemény élek azonban jó tribológiai tulajdonságaiknak köszönhetően kopással szemben jó ellenálló képességgel rendelkeznek. A nitridált minták sík felületeinek vizsgálata során megállapíthattuk, hogy azok nitrogéntartalma közel azonos. Ennek lehetséges oka, hogy bár a két eljárás különböző gyártási paraméterekkel történt, mindkét esetben azonos diffúziós és vegyületiréteg-vastagság elérése volt a cél. A 2-es indexű nitridált mintáknál a nitrogéntartalom jelentős csökkenése tapasztalható. A különböző mintákon és területeken mért értékeket a 3. táblázat szemlélteti.

3. táblázat. Az egyes minták nitrogénkoncentrációjának változása

	Nitrogéntartalom (%)			
Minta	1	2	Δ (%)	
S (síkfelületen)	4,6	2,8	39,1	
S (sarkon)	5,7	3,5	38,6	
P (síkfelületen)	5,8	1,9	67,2	
P (sarkon)	10,5	3,6	65,7	

A táblázatba foglalt eredmények alapján megállapítható, hogy ameddig a sófürdős minták nitrogéntartalma mindössze közel 40%-ot csökkent, a plazmanitridált minták ennél sokkal jelentősebb mennyiségű nitrogént vesztettek, 66–67%-ban csökkent a nitrogéntartalmuk.

Ez a jelenség azzal a ténnyel magyarázható, hogy a sófürdős nitridálás során képződő e-nitridek feltehetően termodinamikailag stabilabbak, jobb a hőállóságuk [8]. Az állítást a keménységmérés során nyert eredmények is alátámasztják, ahol a sófürdőben kezelt minta esetében sokkal kisebb mértékben csökkent a keménységmérték a hőfárasztás hatására. A bomlás során diffúziós folyamatok indulnak meg a nitrogénben szegényebb területek felé, amely ebben az esetben a próbatesteket körülvevő környezet volt. A folyamat hatására a nitridált kéreg nitrogénben elszegényedetté vált. A referenciamintával ellentétben sem a plazma-, sem a sófürdős nitridáláson átesett próbatest felületén nem fedeztük fel az alapanyag vagy a nitridált réteg teljes feloldódását.

4. Az eredmények összefoglalása

A mikrokeménység-mérési vizsgálatok során megállapítottuk az egyes nitridálási eljárásokkal elért eltérő keménységeket és rétegmélységeket. Megállapítható, hogy a plazmanitridált mintának ugyan nagyobb a felületi keménysége, de a kialakult réteg vastagsága valamivel kisebb, mint a sófürdős eljárással előállított minták esetén.

Az alumíniumfürdőben végzett ciklikus kezelést követően az elektronmikroszkópos vizsgálat megmutatta, hogy a nitridált réteg megvédte mind a két nitridált mintát az intermetallikus vegyületek kialakulásától. Ugyanakkor mindkét kezelés esetén jelentős változás figyelhető meg a minták keménységében és a nitridált réteg vastagságában. E tekintetben megállapítható, hogy a kezelést követően a sófürdőben nitridált minta mind keménységi, mind rétegvastagsági tekintetben kisebb károsodást szenvedett el a ciklikus hőterhelés alatt.

Az elemanalízis alátámasztotta a korábbi méréseknél tett feltételezéseket, valamint további megállapításokat tehettünk a minták összetételét illetően. A nitridált minták hálós szövetszerkezetének nagy nitrogénkoncentrációjából megállapíthattuk, hogy az élhatás miatt fellépő nitridhálósságról beszélhetünk.

Az olvadt alumíniumban korróziót szenvedő nitridált minták esetében azt a kijelentést tehettük, miszerint a sófürdősen kezelt minta kisebb mértékben veszít nitrogéntartalmából a plazmanitridált darabhoz képest. Ezt a különböző nitridek különböző termodinamikai stabilitásával, valamint a bomlást követő diffúziós folyamatokkal magyaráztuk.

Köszönetnyilvánítás

Jelen munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatta az OTKA-PD_21 142307 támogatási szerződés keretében.

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

[1] Conci M. D., Bozzi A. C., Franco A. R.: Effect of plasma nitriding potential on tribological behaviour of AISI D2 cold-worked tool steel. Wear, 317/1–2. (2014) 188–193.

https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.05.012

[2] Dai M., Li C., Chai Y.: *Rapid Salt Bath Nitriding of Steel AISI 1045*. Metal Science and Heat Treatment, 60. (2018), 454–456. https://doi.org/10.1007/s11041-018-0300-8

[3] Hawryluk M., Dolny A., Mrozmski S.: Low cycle fatigue studies of WCLV steel (1.2344) used for forging tools to work at higher temperatures. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 18. (2018) 465–478.

https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.08.002

- [4] Kohli A. H., Hanief M., Jagota, V.: A retrospection of the effect of nitriding processes on the AISI H13 tool steel. Advances in Materials and Processing Technologies, 9/2. (2022) 425–440. https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2093012
- [5] Yucel B.: Response to thermal cycling of plasma nitrided hot work tool steel at elevated temperatures. Surface and Coatings Technology, 205/2. (2010) 597–602.,

https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.07.035

[6] Guang C., Jun W., Hongyuan F., Danqi W., Xiaoying L., Hanshan.: Combat molten aluminum corrosion of AISI H13 steel by low-temperature liquid nitrocarburizing. Journal of Alloys and Compounds, 776. (2019) 702–711.

https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.298

- [7] Pye D.: Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing. ASM International, 2003. https://doi.org/10.31399/asm.tb.pnfn.9781627083508
- [8] Fang C., van Huis M., Zandbergen H.: Stability and structures of the ε-phases of iron nitrides and iron carbides from first principles. Scripta Materialia, 64. (2011) 296–299.

https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.08.048





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

The Effects of Laser Power and Travel Speed on Weld Geometry in the case of Manual Laser Welding

Simon Virág,¹ Varbai Balázs,² Abaffy Károly,³ Gyura László⁴

- ¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék. Budapest, Magyarország, simon.virag240@gmail.com
- ² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék. Budapest, Magyarország, varbai.balazs@gpk.bme.hu
- ³ Linde Gáz Magyarország Zrt. Budapest, Magyarország, karoly.abaffy@linde.com
- ⁴ Linde Gáz Magyarország Zrt. Budapest, Magyarország, laszlo.gyura@linde.com

Abstract

In our research, we investigated the effects of laser power and travel speed on the weld geometry in case of manual laser welding. Our experiments revealed that a characteristic two-part weld geometry is obtained under our experimental parameters. It was also found that increasing the laser power leads to a nearly linear increase in the weld width, while increasing the travel speed leads to a decrease in the weld width. The penetration depth does not increase further above a certain power level. A decrease in travel speed results in an increase in penetration depth. At the travel speeds tested, a narrow and deep weld geometry was obtained at the 70-80 % power level and a wider but shallower weld at the 90-100 % laser power level.

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

Összefoglalás

Kutatómunkánk során a lézerteljesítmény és a haladási sebesség varratgeometriára gyakorolt hatását vizsgáltuk kézi lézeres hegesztés esetén. Kísérleteink alapján kiderült, hogy kísérleti paramétereink mellett jellegzetes, két részből álló varrat keletkezik. Eredményül kaptuk továbbá, hogy a lézerteljesítmény növelésével közel lineárisan nő a varratszélesség, a haladási sebesség növelése pedig a varratszélesség csökkenéséhez vezet. A varratmélység bizonyos teljesítményszint felett nem nő tovább. A haladási sebesség csökkenése a varratmélység növekedését eredményezi. A vizsgált haladási sebességek mellett a 70–80%-os teljesítményszinten keskeny és mély beolvadású varrat, a 90–100%-os lézerteljesítménynél pedig ennél szélesebb, de kisebb beolvadású varrat keletkezett.

Kulcsszavak: kézi lézeres hegesztés, lézerteljesítmény, haladási sebesség, varratgeometria.

1. Bevezetés

A lézeres hegesztés a lézeres vágást követően a legelterjedtebben használt lézeres anyagmegmunkálási eljárás, gépesített változatát számos előnyének köszönhetően széleskörűen alkalmazzák az iparban [1]. A lézeres hegesztés mellett szól a kis területre fókuszált, erősen koncentrált lézernyaláb által létrehozott igen csekély hőhatásövezet és a hagyományos ömlesztőhegesztési eljárásoknál jóval kisebb hőbevitel, ami minimálisra csökkenti a munkadarab belső feszültségek általi deformációját [2, 3]. Költséghatékonysága szintén kedveltté teszi az ipari alkalmazásokban, hiszen kezdeti jelentős beruházási költsége gyorsan megtérül nagy feldolgozási sebességének és ezáltal nagy termelékenységének köszönhetően **[4]**. Az elmúlt évek során megjelentek a piacon a kézi lézeres hegesztőberendezések is, melyek felhasználóbarát kezelhetőséget kínálnak könnyű hegesztőpisztollyal és munkakábellel, valamint kis méretű, könnyen mozgatható sugárforrással **[5]**. Egyre több cég forgalmaz és használ Magyarországon is ilyen berendezéseket, ám – újszerű volta miatt – jelenleg nagyon kevés tapasztalat áll rendelkezésre ezzel az eljárásváltozattal kapcsolatban.

Jelen kutatásunkban a lézerteljesítmény és a haladási sebesség varratgeometriára gyakorolt hatását vizsgáltuk ausztenites rozsdamentes acél kézi lézeres hegesztése esetén.

2. Hegesztési kísérletek és értékelésük

Kutatásunk során két, egyenként 10 db hernyóvarratból álló kísérletsorozatot készítettünk 2,7 mm falvastagságú, 42 mm külső átmérőjű, 1.4301 anyagminőségű ausztenites rozsdamentes acél csövekre kézi lézeres hegesztéssel, hozaganyag hozzáadása nélkül.

Általánosságban a felhasznált acél százalékos kémiai összetétele az **1. táblázat**ban látható.

1. táblázat. Az 1.4301 anyagminőségű ausztenites rozsdamentes acél százalékos kémiai összetétele [6]

с	Si	Mn	Р	S	
≤0,07	≤1,00	≤2,00	≤0,045	≤0,03	
Ν	Cr	Ni	Fe		
≤0,10	17,5–19,5	8,0-10,5	mar.		

Kiemelendő, hogy a varratok reprodukálhatóságának biztosítása érdekében a kísérletek elvégzése során a kézi lézeres hegesztőpisztolyt a stabilitását biztosítandó készülékbe fogtuk be, ezzel kiküszöbölve az emberi kéz bizonytalanságából eredő hibákat. Az egyenletes haladási sebesség biztosítását úgy tudtuk megoldani, hogy a munkadarabot forgatóberendezéssel forgattuk.

A varratok hegesztését a kínai Jinan Xintian Technology Co. nevű cég által gyártott XTW-1000 típusú optikai szálas kézi lézeres hegesztőgéppel végeztük. A berendezés 1080 nm hullámhosszú lézersugárzást állít elő, melynek maximális teljesítménye 1000 W. A gép kezelőfelületén a leadott lézerteljesítményt százalékos formában lehet beállítani. Az első kísérletsorozatot 24 cm/min, a második kísérletsorozatot 40 cm/min haladási sebesség mellett hegesztettük, a lézerteljesítményt mindkét esetben 100%-tól 20%-ig 10%-onként változtattuk. Az előkísérleteink tapasztalatai alapján 10%-os lézerteljesítmény esetén nem jön létre varrat, így jelen kutatásunkból a 10%-os teljesítményszintet kihagytuk. A leadott teljesítményen kívül lehetőség van különböző lézernyaláb-lengetési módok (pl. vonal, kör) kiválasztására, továbbá a lengetés frekvenciájának és amplitúdójának beállítására. A lézernyaláb lengetése a hegesztőpisztolyon belül történik, a lézernyaláb optikai úton történő irányításával [7]. Varrataink elkészítését a lézernyaláb lengetése nélkül végeztük. A felhasznált védőgáz 2,5 bar nyomású, 4.6 tisztaságú nitrogén volt.

Annak érdekében, hogy a vizsgált keresztmetszetek pozíciója minden hernyóvarrat esetén megegyezzen, a próbatesteket hossztengelyük mentén Struers Discotom-10 típusú, vízzel hűthető tárcsás vágógéppel ugyanott vágtuk el. Ezután a mintákat beágyaztuk, és elkészítettük a metallográfiai csiszolatokat. P600-as csiszolópapírral kezdve és egyre finomabb szemcseméretű papírra váltva értünk el a P2500-as finomságú csiszolópapírig. A finom csiszolási karcok eltüntetése érdekében 3 µm-es gyémántszemcséket tartalmazó szuszpenzió alkalmazásával políroztuk a mintákat. A varratgeometriát maratás segítségével tettük láthatóvá. A csiszolatok megmaratásához a következő összetételű, Adler megnevezésű marószert használtuk:

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

A marószer segítségével – a mintákat 2-3 másodpercig szobahőmérsékleten maratva – sikeresen előhívtuk a varratok alakját, amit Olympus SZX 16 típusú sztereomikroszkóppal vizsgáltunk. A varratokról végül a Stream Essentials nevű program segítségével fényképeket készítettünk, melyeken lemértük a kiértékeléshez szükséges varratszélesség- és varratmélységértékeket. Ezen értékekből diagramokat készítettünk, melyeken néhány mikroszkópi képet példaként feltüntettünk a kialakult varratalakok szemléltetésére.

3. Eredmények és kiértékelésük

Az 1–2. ábra mikroszkópi képeit megfigyelve megállapítható, hogy a lézernyaláb lengetése nélkül érdekes, két részből – egy szélesebb és sekélyebb részből, valamint egy keskenyebb és mélyebb részből – álló varratalak alakul ki a hővezetéses varratképzési módban.

Az 1. ábrán látható a kialakuló varrat szélességének alakulása a lézerteljesítmény és a hala-



1. ábra. Varratszélesség a lézerteljesítmény és a haladási sebesség függvényében



2. ábra. Varratmélység a lézerteljesítmény és a haladási sebesség függvényében

dási sebesség függvényében. A diagram alapján megállapítható, hogy a teljesítmény növelésével mindkét haladási sebesség esetén nő a varratszélesség, de eltérő mértékben, a 24 cm/min haladási sebesség mellett meredekebb lesz az értékekre illeszthető – közel lineáris – görbe, míg a 40 cm/min haladási sebesség esetén laposabb.

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

A beillesztett mikroszkópi képeken jól látszik, hogy ugyanazon a teljesítményszinten nagyobb haladási sebesség kisebb szélességű varrat keletkezéséhez vezet.

A 2. ábrán a varratmélység alakulása látható a lézerteljesítmény és a haladási sebesség függvényében. Megfigyelhető, hogy a varratmélység bizonyos teljesítményszint felett nem nő tovább. Érdekes megfigyelni, hogy a varratmélységértéknek a 24 cm/min haladási sebesség mellett 70%-os teljesítményszinten, a 40 cm/min haladási sebesség mellett pedig 80%-os teljesítményszinten van a maximuma. A beillesztett mikroszkópi képeket és a diagramok adatait szemügyre véve azt a megállapítást lehet tenni, hogy a vizsgált haladási sebességek esetén a varratalak 70–80% esetén karcsú és mély, 90–100% esetén pedig szélesebb és kisebb beolvadású.

4. Következtetések

Jelen kutatásunk során hernyóvarratokat készítettünk kézi lézeres hegesztéssel ausztenites rozsdamentes acél csövekre a lézerteljesítmény és a haladási sebesség varratgeometriára gyakorolt hatásának vizsgálata céljából. Eredményeink alapján a következő megállapítások tehetők:

- a lézernyaláb lengetése nélkül két részből
 egy szélesebb és sekélyebb, valamint egy keskenyebb és mélyebb részből – álló varrat keletkezik;
- a lézerteljesítmény növelésével közel lineárisan nő a varratszélesség;
- a haladási sebesség növelése a varratszélesség csökkenéséhez vezet;
- a varratmélység bizonyos teljesítményszint felett nem nő tovább;
- a haladási sebesség csökkenése a varratmélység növekedését eredményezi;
- a vizsgált haladási sebességek mellett 70–80%-os teljesítményszinten karcsú és mély beolvadású, 90–100%-os teljesítményszinten pedig szélesebb és kisebb beolvadású varratgeometria alakul ki.

Köszönetnyilvánítás

A kísérletek elvégzéséhez szükséges alapanyagot és eszközöket a Linde Gáz Magyarország Zrt. bocsátotta rendelkezésünkre, melyet ezúton is szeretnénk megköszönni. A projekt a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal – NKFIH támogatásával valósult meg (OTKA PD 138729).

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Buza G.: *Lézersugaras technológiák I.* Edutus Főiskola, Tatabánya, 2012. 75.
- [2] Bitay E.: *Hegesztési alapismeretek*. Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2021. 58. https://doi.org/10.36242/mtf-16
- [3] M. Reis, E. Şerifağaoğlu: A Smart Handheld Welding Torch Device for Manual Spot Laser Welding. Smart Manufacturing and Materials, II. (2022) 1.
- [4] ESAB Kft., Lézersugaras hegesztés. https://esab.com/hu/eur_hu/esab-university/ blogs/what-is-laser-welding-and-how-does-thetechnique-work/ (letöltve: 2024. február 26.).
- [5] V. Gapontsev, F. Stukalin, A. Pinard, O. Shkurikhin, Y. Grapov, I. Markushov: Handheld laser welding and cleaning system for typical metal fabrication using 1.5 kW fiber laser source. Proceedings Volume 11981, Fiber Lasers XIX: Technology and Systems (2022) 1. https://doi.org/10.1117/12.2616585
- [6] AGST Draht & Biegetechnik GmbH., Rozsdamentes acél 1.4301 adatlap. (letöltve: 2024. febr. 26.). https://www.agst.de/4301?lang=hu
- [7] C. Yuce: The Effect of Laser Beam Wobbling Mode on Weld Bead Geometry of Tailor Welded Blanks. Published in 8th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, (2020) 2.





Polikarbonátlemezek kavaródörzs-hegesztett kötésének vizsgálata

Investigation of Friction Stir Welded Polycarbonate Plates

Stadler Róbert Gábor,¹ Horváth Richárd²

- ¹ Óbudai Egyetem, Anyagok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest, Magyarország, stadler.robert@bgk.uni-obuda.hu
- ² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, horvath.richard@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

This study investigates how different input parameters (speed and feed rate) affect the force components during welding and weld strength. In addition, we used microscopic imaging to observe the welding defects that occurred and their effects on failure. The measurement results show that welding forces decrease with increasing tool speed. The highest weld strength (28.5 MPa) was obtained at 1000 rpm and a feed rate of 8 mm/min.

Keywords: friction Stir Welding, polycarbonate, welding force, joint efficiency.

Összefoglalás

Jelen tanulmány célja annak vizsgálata, hogy különböző bemeneti paraméterek mellett (fordulatszám és előtolási sebesség) hogyan alakulnak a hegesztés közben fellépő erőkomponensek, valamint a varratok szilárdsága. Emellett mikroszkópos vizsgálattal figyeltük a fellépő hegesztési hibákat és azoknak a hatásait a tönkremenetelre. A mérési eredmények alapján a szerszám fordulatszámát növelve csökkennek a hegesztési erők. A legnagyobb varratszilárdságot (28,5 MPa) 1000 1/min fordulatszámon és 8 mm/min előtolási sebesség mellett kaptuk.

Kulcsszavak: kavaró dörzshegesztés, polikarbonát, varratszilárdság, hegesztési hibák.

1. Bevezetés

Napjainkban a polimereket széles körben alkalmazzák a különböző iparágakban. Az elterjedéssel párhuzamosan meg kellett oldani az anyagcsoport jó minőségű és gazdaságos kötéstechnológiáját. Ahogyan a fémeknél, úgy itt is a leggyakrabban alkalmazott kötéstechnológia a hegesztés. Az erős ipari alkalmazás miatt a mai napig népszerű kutatási területnek számít a polimerek ultrahangos hegesztése [1], lézeres hegesztése [2], valamint kavaró dörzshegesztése [3].

Utóbbi eljárás egy, a mechanikai súrlódás elvén alapuló hegesztési eljárás, amelyet az 1990-es évek elején szabadalmaztattak [4]. A folyamat során az összeilleszteni kívánt lemezek éle mentén végigyezetnek egy forgó szerszámot. A szerszám és a lemezek között súrlódás lép fel, ami biztosítani fogja a hegesztéshez szükséges hőmérsékletet és a varrat létrejöttét. Az eljárással jó minőségű kötés hozható létre, emellett gazdaságos, környezetbarát és energiahatékony [5].

Bár ipari szinten napjainkban főként alumíniumra alkalmazzák, a polimereken történő alkalmazás lehetőségét már a 2000-es évek eleje óta kutatják [6]. A fentebb említett előnyök mellett érdemes kiemelni, hogy az eddigi vizsgálatok alapján az eljárás alkalmas vastagabb polimer lemezek hegesztésére, valamint hőre lágyuló polimer mátrixú kompozitok hegesztésére [7].

A kavaró dörzshegesztés sematikus ábráját, valamint az eljárás során fellépő és mért erőkomponenseket az **1. ábra** ismerteti.



1. ábra. A kavaró dörzshegesztés sematikus ábrája [8]

A polikarbonátot olyan iparágakban alkalmazzák előszeretettel, mint az autóipar, építőipar vagy éppen az egészségügyi ipar [9]. Remek mechanikai és termikus tulajdonságokkal bír, továbbá azon kevés polimerhez tartozik, amelyeket víztisztán, tehát optikai minőségben lehet gyártani.

A széles körű alkalmazási terület és a víztiszta tulajdonság miatt az elmúlt években számos publikáció foglalkozott a polikarbonát kavaró dörzshegesztésének vizsgálataival.

Derazkola és társai [10] polikarbonát (PC-) lemezek kavaró dörzshegesztési kísérleteit végezték el. A céljuk az volt, hogy összefüggést keressenek a hegesztési paraméterek és a varrat mechanikai tulajdonságai között. A vizsgálataikhoz 4 mm vastag PC-lemezeket hegesztettek. A hegesztési kísérletek során a bemenő paraméterek közül változtatták a szerszámfordulatszámot, az előtolási sebességet, a bemerülési mélységet és a szerszámdőlésszöget is. Vizsgálták a szakítószilárdságot, a keménységet és a fajlagos ütőmunkát. A legjobb szakítószilárdságot (55 MPa) és hajlítószilárdságot (61 MPa) 2200 1/perc fordulatszám, 105 mm/perc előtolási sebesség, 2,5°-os szerszámdőlésszög és 1,2 mm bemerülési mélység mellett kapták.

Ahmed és társai **[11]** szintén PC-lemezek kavaró dörzshegesztési vizsgálatát végezték el. A fordulatszámot 3 szinten (1000, 1500, 2000 1/), míg az előtolási sebességét 4 szinten (25, 50, 75, 100 mm/min) változtatták. A legtöbb vizsgált paraméternél hibamentes kötéseket tudtak létrehozni. A két legjobb szakítószilárdságot (66 MPa) 1500 1/perc fordulatszámon és 50 mm/min előtolási sebességen, illetve 1000 1/min fordulatszámon és 50 mm/min előtolási sebességen érték el.

Lambiase és társai [12] PC-lemezek kavaró dörzs-ponthegesztését végezték el. Vizsgálataik során a fordulatszámot 3 szinten (2000, 4000, 6000 1/min). míg az előtolási sebességet 5 szinten (20, 40, 60, 80, 100 mm/min) változtatták. A mérési eredményeik alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a nagy előtolási sebesség elvékonyítja a varratot. A legnagyobb szakítószilárdságot (32 MPa) 60 mm/min előtolási sebesség mellett kapták.

Vidakis és társai **[13]** 4 mm PC-lemezek kavaró dörzshegesztését vizsgálták. A hegesztési folyamat során mérték a fellépő erőkomponenseket. A hegesztési paraméterek mellett a szerszám csap- és vállátmérőit is változtatták. Az elkészített varratok morfológiai jellemzőit optikai mikroszkóppal, míg a varratok porozitását mikrotomográfiával vizsgálták. Mérési eredményeik alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a kis előtolási sebesség csökkenti a hegesztési varrat porozitását és befolyásolja a méretpontosságát. Továbbá a kis előtolási sebesség és a nagy fordulatszám csökkenti a folyamatban fellépő erőket.

Kumar és társai **[14]** polikarbonát (PC) és akrilnitril-butadién-sztirol (ABS) eltérő polimerek hegeszthetőségét vizsgálta kavaró dörzshegesztéssel. A vizsgálataik során 6 mm vastag PC- és ABS-lemezeket alkalmaztak. A vizsgálatok során a bemeneti paramétereket három szinten változtatták. A paraméterek között volt a fordulatszám (800, 1200, 1600 1/perc), az előtolási sebesség (6, 12 és 18 mm/perc), illetve a szerszám dőlésszöge (0, 1, 2°) is. Az alkalmazott szerszám menetes volt. A mért eredmények alapján megállapították, hogy a fordulatszám és a szerszám dőlésszögnövelésével nő a szakítószilárdság, valamint 12 mm/perc előtolási sebesség mellett érték el a legnagyobb szakítószilárdságot (22,42 MPa).

Jelen tanulmányban 4 mm vastag PC-lemezek kavaró dörzshegesztését tanulmányozzuk. A bemeneti paraméterek függvényében vizsgáljuk a hegesztési folyamat során fellépő erőkomponenseket, illetve a varratok szilárdságát. Továbbá vizsgáljuk a fellépő hegesztési hibákat.

2. Anyag és módszertan

A vizsgálatok során 4 mm vastag optikai minőségű DOCANAT clear 099 (Quattroplast Kft., Budapest, Magyarország) lemezeket hegesztettünk össze. A próbadarabokat 90×110 mm-es befoglaló méretre vágtuk, így a hegesztés után ki tudtuk munkálni a szabványos lapos szakítópróbatesteket. A próbatestek kivágását és számozását a 2. ábra szemlélteti.

A hegesztési kísérleteket MAZAK Nexus VCN



2. ábra. Hegesztési próbatestek kivágása és számozása



3. ábra. Vizsgálatok során használt hegesztőszerszám

	De ver ver ét en els	Szintek			
	Parameterek	-1	0	1	
<i>x</i> ₁	fordulatszám – n, 1/perc	600	800	1000	
<i>x</i> ₂	előtolási sebesség – v _ر mm/perc	6	8	10	

1. laplazat. A negesztest pur untelerek erte	teкe	értél	ek	etere	paramé	iegesztési	. A	ázat.	tábl	1.
--	------	-------	----	-------	--------	------------	------------	-------	------	----



 ábra. Az erőkomponensek alakulása a hegesztés során

410A-II típusú marógépen végeztük el. A hegesztési folyamat során fellépő erőkomponenseket (F_x , F_y , F_z **1. ábra**) a gépsatu alá befogott Kistler9257B típusú piezoelektromos elven működő erőmérővel mértük. Az erőmérő mérési tartománya $F_x = F_y = -5-5$ kN és $F_z = -5-10$ kN [15].

A három mért erőkomponens segítségével a hegesztéskor fellépő eredő erőt az alábbi módon számoltuk:

$$F_{e} = \sqrt{F_{x}^{2} + F_{y}^{2} + F_{z}^{2}}$$
(1)

A varratonként 3 darab szakítópróbatest szakítóvizsgálatát Zwick Z005 szakítógépen hajtottuk végre, 10 mm/perc vizsgálati sebesség mellett. A hegesztési varratokról egy Dino-lite AM3113T típusú mikroszkóppal készítettünk felvételeket.

A hegesztési vizsgálatok során alkalmazott szerszámot a szakirodalom alapján választottuk **[13]**. Az alkalmazott csapgeometria hengeres volt. A csap átmérője 4 mm, míg a váll átmérője 10 mm, a szerszám anyaga pedig C45 acél. Az alkalmazott hegesztőszerszám a **3. ábrá**n látható.

A hegesztési paraméterek közül a szerszámfordulatszámot és az előtolási sebességet változtattuk 3-3 szinten. Az alkalmazott paramétereket előkísérletek és szakirodalom alapján határoztuk meg, melyek az **1. táblázat**ban láthatóak.

A vizsgálatok során teljes kísérlettervet alkalmaztunk, így az összes paraméter-kombinációt végrehajtottuk.

3. Eredmények

3.1. Erőregisztrátumok elemzése

A 4. ábrán a folyamatra jellemző erőkép látható. A 3 mért erőkomponens mellett (F_y , F_y , és F_z) feltüntettük az eredő hegesztési erőt (F_{a}) is. Jól megfigyelhető, hogy a hegesztés során nem lép fel jelentős oldalirányú (F_{x}) és előtolás-irányú (F_{y}) erő. Az axiális irányú erő (F_{r}) jelentkezik a leginkább a hegesztés során, és ez az erő az, ami nagyban meghatározza az eredő hegesztési erőt is (F_a). Mind a három erőkomponensnél három szakaszra lehet az erőregisztrátumot feloszlatni a hegesztési folyamat során: egy felfutási szakaszra, ahol a szerszám a hegesztési zónába történő belépése következtében megugrik az erő, az ezt követő, közel állandósult egyenletes hegesztési szakaszra, valamint a szerszám kilépése során tapasztalható lefutási szakaszra.

Az erőértékek kiértékelése során mindig az állandósult szakaszon mért átlag erőértéket értékeltük ki, ugyanis ez jellemzi a legjobban a hegesztési folyamatot.

3.2. Erőtani vizsgálatok eredményei

Az oldalirányú (F_x) és előtolás-irányú (F_y) erő minimálisan jelentkezik a hegesztési folyamat során. Ezért az erőtani elemzések során az axiális irányú (F_z) erőkomponens, valamint az eredő hegesztési erő (F_e) vizsgálatát végeztük el.

Az 5. ábra az F_z irányú erő hatását mutatja a hegesztési paraméterek függvényében. Az ábrán jól látszik, hogy a fordulatszám növelésével a folyamatra jellemző erőértékek csökkennek. Ez a jelenség megfigyelhető más polimer anyagok kavaró dörzshegesztése során is [8, 13, 16]. A fordulatszám növelésével a hegesztési zónában megnő a hegesztési hőmérséklet, a polimer anyag ezáltal kisebb ellenállást fejt ki a hegesztőszerszámra. Az előtolási sebesség kisebb hatással van a fellépő axiális irányú erőre (F_z), mint a szerszám fordulatszáma.

A **6. ábrá**n láthatóak az F_e irányú erőhöz tartozó főhatás-ábrák, a hegesztési paraméterek függvényében. Annak köszönhetően, hogy a hegesztési folyamat során az axiális irányú erő (F_z) dominál, így hasonló tendenciák figyelhetőek meg ebben az esetben is. A fordulatszám növelésével csökken az erőkomponens értéke.

3.3. Szilárdsági vizsgálatok eredményei

A hegesztési folyamatok során a varratokat szakítóvizsgálattal jellemeztük. Mindegyik hegesztési vizsgálatból 3-3 darab szakítópróbatestet munkáltunk ki és szakítottunk el. A mérések után pedig a 3 mérés átlagát vettük alapul. Az egyes mérési pontokhoz tartozó átlag szakítószilárdság és a 3 mérési eredmény szórása a 7. ábrán látható.

Megfigyelhető, hogy a legnagyobb varratszilárdságot 1000 1/perc szerszám fordulatszámon és 8 mm/perc előtolási sebesség mellett kaptuk. Ekkor az átlag szakítószilárdság elérte a 28,5 MPa-t. A legkisebb varratszilárdságot pedig 1000 1/perc előtolási sebességen és 6 mm/perc előtolási sebesség mellett kaptuk (4,2 MPa).

Jól megfigyelhető az ábráról, hogy az egyes fordulatszámok mellett a 8 mm/perc előtolási sebességnél kaptuk a legnagyobb szilárdsággal bíró varratokat. Ezen kívül az is látható, hogy egyes mérési pontokban a szakítóvizsgálat eredményeinél jelentős szórás tapasztalható, ami a varratban fellépő hegesztési hibára vezethető vissza.

3.4. Hegesztési hibák elemzése

A 8. ábrán látható egy tipikus varratkép felülnézetből. Megfigyelhető, hogy a csap mellett a vállrész is jelentős szerepet játszik a hegesztési varratkép alakulásában.



 ábra. A hegesztési paraméterek hatása az axiális irányú erőre (F_v)



6. ábra. A hegesztési paraméterek hatása az eredő hegesztési erőre (F.)



 ábra. A hegesztési paraméterek hatása a varrat szilárdságára



8. ábra. Jellemző varratkép felülnézetből



9. ábra. Alagúthiba a 7. mérési pontnál



10. ábra. 7. mérési pont, szakítás utáni próbatest



11. ábra. Varratelvékonyodás

A varrat az alapanyaggal ellentétben már nem optikai minőségű. A vállrész határánál minden mérési pontnál tapasztalható volt sorjaképződés.

A hegesztési hibák és azok hatásainak vizsgálata miatt a szakítópróbatestek keresztmetszeti képéről készítettünk mikroszkópfelvételeket szakítás előtt és után is. A legkisebb szakítószilárdságot eredményező mérési pont (n = 1000 1/perc és v_f = 6 mm/perc) keresztmetszeti varratképében jól megfigyelhető volt az alagúthiba, amely a 9. ábrán látható. Az alagúthiba egy jelentős anyaghiányos rész, amely végighúzódik a varratban [17]. A hiba az ellenirányú oldalon jelentkezett és nagy hatással lehetett arra, hogy drasztikusan csökkentette a varrat szilárdságát. A 10. ábrán a próbatest szakítás utáni mikroszkópi felvétele látható, ahol jól megfigyelhető, hogy a tönkremenetel az alagúthiba mentén következett be.

Nagyobb fordulatszámokon megfigyelhető volt a varrat elvékonyodása, ami szintén tipikus kavaró dörzshegesztési hibának számít [17]. Ilyenkor a lemez vastagsága az eredeti vastagság alá csökken. A 11. ábrán látható a varratelvékonyodás.

4. Következtetések

Jelen cikkben 4 mm vastag polikarbonát (PC) lemezek kavaró dörzshegesztési vizsgálatát végeztük el. A hegesztési folyamat során 3 irányban mértük a fellépő erőket, amelyekből eredő hegesztési erőt számoltunk, valamint vizsgáltuk az erőregisztrátumok alakulását is a hegesztési folyamat során. A varratok minőségét szakítóvizsgálattal jellemeztük. A hegesztési hibákat mikroszkóppal vizsgáltuk. A mérési eredmények alapján az alábbi következtetéseket vontuk le:

- A hegesztési folyamatot jellemző erőképet három szakaszra tudjuk bontani: felfutási szakasz, egyenletes szakasz és lefutási szakasz.
- A hegesztés során fellépő erők közül az axiális irányú erő (F_z) dominál, és ez befolyásolja a legjobban az eredő hegesztési erőt is.
- A fordulatszám növelésével csökken az axiális irányú erő (F_z) és az eredő hegesztési erő (F_e) is.
- A legnagyobb szakítószilárdságot 1000 1/perc fordulatszámon és 8 mm/perc előtolási sebesség mellett kaptuk (28,5 MPa), míg a legkisebbet (4,2 MPa) 1000 1/perc fordulatszámon és 6 mm/perc előtolási sebességen.
- A mikroszkópos képek alapján több mérési pontban megfigyeltünk alagúthibákat és varratelvékonyodást.

Köszönetnyilvánítás

Jelen publikáció a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Szakirodalmi hivatkozások

 Kiss Z., Temesi T., Bitay E., Bárány T., Czigány, T.: Ultrasonic welding of allpolypropylene composites. Journal of Applied Polymer Science, 137/24. (2020) 48799. https://doi.org/10.1002/app.48799

- Temesi T., Czigany T.: The effect of surface treatment on the shear properties of aluminium-poly-propylene joints manufactured by laser beam. Polymer Testing, 117. (2023) 107882. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022. 107882
- [3] Tiwari S. K., Sharma H., Rao A. U.: A comprehensive review of the recent developments in friction stir welding of metals, alloys, and polymers: a review of process parameters and properties. Journal of Adhesion Science and Technology, (2024) 1–24.

https://doi.org/10.1080/01694243.2024.2334271

- [4] Thomas W. M., Nicholas E. D., Needhan J. C., Murch M. G., Temple-Smith P., Dawes C. J.: International patent application PCT/GB92/02203 and GB patent application 9125978.8. UK Patent Office, London 6, 1991.
- [5] Majeed T., Wahid M. A., Alam M. N., Mehta Y., Siddiquee A. N.: Friction stir welding: A sustainable manufacturing process. Materials Today: Proceedings, 46. (2021). 6558–6563. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.025
- [6] Nelson T. W., Sorenson C. D., Johns C. J.: Friction stir welding of polymeric materials. Brigham Young University, Provo, UT, USA, US 6, 811,632 B2, 2004.
- [7] Czigány T., Kiss Z.: Friction stir welding of fiber reinforced polymer composites. In Proceedings of the 18th International Conference on Composite Materials. Jeju, South Korea, ICCM, 2011, August. 21–26.
- [8] 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
- [9] Gohil M., Joshi, G.: Perspective of polycarbonate composites and blends properties, applications, and future development: A review. Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science, (2022) 393–424. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99643-3.00012-7
- [10] Derazkola Hamed Aghajani, Simchi Abdolreza,

Lambiase Francesco: Friction stir welding of polycarbonate lap joints: Relationship between processing parameters and mechanical properties. Polymer Testing, 79, 105999, 2019, Elsevier.

https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019. 105999

[11] Ahmed M. M. Z., Elnaml A., Shazly, M, El-Sayed Seleman M. M.: The effect of top surface lubrication on the friction stir welding of polycarbonate sheets. International Polymer Processing, 36/1. (2021) 94–102, , De Gruyter

https://doi.org/10.1515/ipp-2020-3991

[12] Lambiase F., Grossi V., Paoletti A.: Advanced mechanical characterization of friction stir welds made on polycarbonate. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104. (2019) 2089–2102, , Springer

https://doi.org/10.1007/s00170-019-04006-4

- [13] Vidakis N., Petousis M., David C., Sagris D., Mountakis N., Moutsopoulou A.: The impact of process parameters and pin-to-shoulder ratio in FSW of polycarbonate: welding forces and critical quality indicators. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2024) 1–21. https://doi.org/10.1007/s00170-024-13033-9
- [14] Kumar Sudhir, Roy Barnik Saha: Novel study of joining of acrylonitrile butadiene styrene and polycarbonate plate by using friction stir welding with double-step shoulder. Journal of Manufacturing Processes, 45. (2019) 322–330.

https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.013

- [15] KISTLER Multicomponent Dynamometer 9257b datasheet, 2009, Kistler Group
- [16] Stadler G. R., Szebényi G., Horváth R.: Investigation of weld forces and strength of friction stir welded polypropylene. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 67/3. (2023) 183–189. https://doi.org/10.3311/PPme.21899
- [17] Huang Y., Meng X., Xie Y., Wan L., Lv Z., Cao J., Feng J.: Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 105. (2018) 235–257.

https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.12.005





Üvegszál-erősítésű, pultrudált műanyag profilok csavarkötésének roncsolásos vizsgálata

Tensile Testing of Bolted Joints in Pultruded Glass Fibre Reinforced Plastic Profiles

Szabó Valentin Endre,¹ Kun Krisztián²

¹ Neumann János Egyetem, GAMF Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék. Kecskemét, Magyarország, szabo.valentin@nje.hu

² Neumann János Egyetem, GAMF Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék. Kecskemét, Magyarország,

Abstract

Machine manufacturing and the automotive industry are often faced with supply chain problems for the raw materials used in the largest proportion (steel and aluminium) and the resulting large price changes. One solution to the lack of raw materials could be the introduction of new materials. Glass-fibre-reinforced plastic (GRP) profiles produced by pultrusion can be suitable for replacing metallic materials in many applications. However, one of the reasons for their limited distribution is the lack of well-established joining processes. The aim of the research is to test the tensile strength of the bolted connection of GRP sheet materials of different thickness according to an experimental design. Based on the experimental results, bolted joint recommendations can be provided for the examined GRP sections.

Keywords: GRP, pultrusion, bolted joint, failure.

Összefoglalás

A gépgyártás és az autóipar gyakran szembesül a legnagyobb részarányban felhasznált nyersanyagok (acél és alumínium) ellátási láncának problémáival és ebből következő, nagymértékű árváltozással. A nyersanyaghiány egyik megoldása az új anyagok bevezetése lehet. A pultrúziós eljárással előállított, üvegszál-erősítésű műanyag profilok (GRP) számos területen alkalmasak lehetnek a fémes anyagok kiváltására. Korlátozott elterjedésük egyik oka azonban a kiforrott kötéstechnológia hiánya. A kutatás célja kísérleti terv szerint eltérő vastagságú GFRP-lemezanyagok csavarozott kötésének szilárdsági vizsgálata szakítással. A kísérleti eredmények alapján csavarkötési ajánlások biztosíthatók a vizsgált GFRP-szelvényekhez.

Kulcsszavak: GRP, pultrúzió, csavarkötés, tönkremenetel.

1. Bevezetés

A pultrúzió olyan gyártási eljárás, amely hoszszanti elrendezésű folytonos szálakkal erősített kompozit profilokat állít elő. Az erősítőszál leggyakrabban üveg- vagy szénszál, bár léteznek természetes szálas erősítések is. A mátrixanyag általában poliészter- vagy epoxigyanta. A kompozit profilok mechanikai tulajdonságai az erősítőszálak térfogatarányától függ. A pultrúziós eljárás során az erősítőszálakat először műgyantafürdőbe húzzák. Ezután a szálakat és a gyantát irányítva vezetik egy fűtött formán (szerszám) keresztül, amelyet úgy terveztek, hogy létrehozza a kívánt alakot. A mátrixanyag a szerszámban fokozatosan térhálósodik. Az így kapott kompozit termék a szerszámból kilépve a kívánt hosszra darabolható. Az **1. ábra** a gyártási folyamatot szemlélteti.

A pultrudálásnak számos előnye van: egyedi keresztmetszetek, pontos méretek, nagy szilárdság/tömeg arány és testre szabott mechanikai tulajdonságok jellemzik. Ezenkívül az eljárás nagymértékben automatizált és nagy volumenű, költséghatékony gyártáshoz illeszthető [1].



1. ábra. A pultrúziós gyártási folyamat [1]

A pultrúzió lehetővé teszi olyan egyedi keresztmetszetű profilok költséghatékony előállítását, amelyek egyébként hagyományos anyagokkal nem vagy nehezen gyárthatók. Az eljárás egyre népszerűbbé vált az építőiparban, azonban a gyors elterjedésének egyetlen akadálya a kiforrott kötéstechnológia hiánya.

Kétféle kötést alkalmaznak: a ragasztott és a csavarkötést. A profilgyártás során a formaadó szerszámot formaleválasztó folyadékkal kezelik, hogy elkerüljék a szerszámfal és az alapanyag közötti adhéziót. A formaleválasztó réteg a gyártás során a súrlódás következtében kopik, így a profilra kerül. A profilok felületén megjelenő formaleválasztó alacsony felületi energiát eredményez, ami nem kedvez a nagy szilárdságú ragasztott kötések kialakításához. A jelenség mérsékelhető a ragasztás előtti felületkezeléssel (tisztítással). Ipari mértékű felhasználásban a termelékenység növelése érdekében előnyben részesítik az előkészületek nélküli kötést, ebből következően az üvegszál-erősítésű műanyag profilok általános felhasználásánál jellemzőbb a csavarozás [2, 3].

Az üvegszál-erősítésű műanyag (GPR) profilok mechanikai tulajdonságai szálirányban megközelítik a szerkezeti acélok teherbírását (terheléssel megegyező orientáció esetén), de a keresztirányú teherbírásuk nagyságrenddel kisebb lehet. Fúrást követően a csavarozáshoz kialakított furatok elszakítják a szálakat. Ennek következményeként a furatok pozíciójának és egymástól való távolságának hatását vizsgálni kell annak érdekében, hogy a húzó- és hajlítófeszültségekkel szembeni ellenállást számszerűsíteni lehessen. E tényezők alapvetően befolyásolják a tönkremenetel módját. Jelen kutatás célja a különböző vastagságú GPR-profilok csavarkötés-minőségének és meghibásodási módjainak vizsgálata [4, 5].

Csavarozott kötések meghibásodása GPR-profilokban

A vizsgálatokat megelőzően a szakirodalom áttekintése alapján összefoglaltuk a GPR-profilok csavarkötéseiben előforduló lehetséges hibákat. A lehetséges meghibásodási módokat a 2. ábra



 ábra. A tönkremeneteli módok csavarozott GPRlemezek esetén: a) csapágydeformáció b) tiszta húzás, c) nyírás, d) kiszakadás [4]

mutatja. A profilvizsgálat során többféle meghibásodástípus is előfordulhat, amelyeket elsősorban a furatok elhelyezése befolyásol.

A csavarkötéskor a csap-furat illesztés eredményezhet úgynevezett csapágy típusú deformációt, amely a palástfelületek (terheléstől bekövetkező) részleges érintkezésére vezethető vissza. Az illesztés a kötőelemek és a profilok eltérő hővezetéséből adódóan tovább változhat (1. ábra). Az alkalmazás hőmérsékleti viszonyai, valamint a kötőelem-anyag párosítás függvényében választott illesztéssel a hiba előfordulása mérsékelhető. A tiszta húzásos tönkremenetel akkor következik be, ha a furat átmérője és a kötőelem túl nagy az alapanyag szélességéhez képest, ami a lemezek keresztirányú repedését okozza, az alapanyag szakadásával. A nvírásos tönkremenetel a fő terhelési irányokban, a kötőelem által okozott furat határán következik be, akkor, amikor a furat sugárnyi távolságnál közelebb van a profil széléhez, vagy a kötőelem átmérője túl kicsi. Ez utóbbi általában a kötőelem törésével jár. A kiszakadásos tönkremenetelt jellemzően az előző típusok együttese okozza, amikor lapos szelvényekben a furat pozíciója nem megfelelő [6, 7].

3. Kísérleti körülmények

Ebben a fejezetben ismertetjük a próbatestek geometriai kialakítását és a kísérlethez szükséges összeállítását. Ezen kívül bemutatjuk az összeállított kísérlettervet.

3.1. A próbatestek kialakítása, kísérlettervezés

A szakítási kísérletek során az átlapolt GRPlemezeket csavarkötéssel rögzítettük egymáshoz. Az **3. ábrá**n a GRP-lemezek geometriai paraméterei láthatók. A kísérletsorozat alatt a próbatestek hosszát (*L*) és szélességét (*W*) nem változtattuk. Változó paraméter volt az alapanyag vastagsága (*t*), a kötőelemek és a furat átmérője (d_0), a furatok közötti távolság (*b*) és az alapanyag szélétől mért távolság (*a*) [6, 8, 9].

A szakítóvizsgálat során biztosítani kellett az egytengelyű húzó igénybevételt, hogy a szakítógép által kifejtett terhelőerő (*F*) a kötés középsíkján hasson. Ezt átlapolt kötések esetén, az alapanyaggal azonos vastagságú hézagoló alátéttel lehet biztosítani (4. ábra).

A kísérlethez szükséges kísérleti változókat a kutatási témához kapcsolódó aktuális nemzetközi szakirodalom áttekintése alapián határoztuk meg. A kísérletek összefoglalása az 1. táblázatban látható [6, 10]. Kísérletsoronként három szakítópróbát végeztünk. A vizsgálatokhoz MSZ EN ISO 4014 szabványnak megfelelő 8.8-as szilárdsági osztályú csavarokat használtunk. A csavaranyák MSZ EN ISO 4034 szabványnak megfelelő 8-as szilárdsági osztályúak voltak. Alátétnek MSZ EN ISO 7094 szabvány szerinti lapos alátéteket használtunk. A GRP-profilok csavarkötését kedvezően befolyásolja a nagy felületű alátétek alkalmazása. Ez azzal magyarázható, hogy a nagy felület hatására a csavar meghúzása által kifejtett összeszorító erő eloszlik a felületen, ezáltal nem sérti meg a külső üvegszál fátyol szálszerkezetét, illetve nem okoz koncentrált feszültséget a belső szerkezetben. A csavarok meghúzási nyomatékát a szakirodalmi áttekintés alapján határoztuk meg. G. J. Turvey kutatásai során megfigyelte, hogy a kötés minőségét befolyásolja a csavarok meghúzási nyomatéka. Ezért a vizsgálatok során alkalmazott csavar meghúzási nyomatékot kézi erővel meghúzott állapotnak nevezte el, az értékeit az 1. táblázat tartalmazza [4, 6, 7].

3.2. Az alapanyag mechanikai vizsgálata

Az átlapolt próbadarabok kötésének a szilárdságát INSTRON 5800R 4482 univerzális anyagvizsgáló gépen vizsgáltuk meg a vonatkozó szabvá-

3. ábra. A vizsgált GRP-lemezek geometriája



 ábra. Szakítóvizsgálat elvégzéséhez alkalmas öszszeállítás

1.	táblázat. A	kísérletterv	[,] összefogla	lása, a	kísérleti
	ál	landók és v	áltozók meg	ghatáro	ozása

	Pr	Próbatest mérete Furat mérete			Kötőelem				
Kísérlet	Vastagság	t (mm)	Szélesség W (mm)	Hossz L (mm)	Alap távolsága a (mm)	Középtávolság b (mm)	Átmérő d ₀ (mm)	Csavarméret	Meghúzási nyomaték (Nm)
1	t ₁	4	50	500	25	37,5	4.1	M4	3
2	t ₂	6							
3	t ₃	10							
4	t ₁	4							
5	t ₂	6	50	500	50	75	5,2	M5	6
6	t ₃	10							
7	t ₁	4							
8	t ₂	6	50	500	100	150	6,4	M6	10
9	t,	10							

nyok szerint. Referenciamérésként elvégeztük az alapanyag szakítását is. Az alapanyagok szakítóvizsgálata során az alábbi eredményeket mértük: a 4 mm vastag GRP-lemez 50 kN, a 6 mm vastag 75 kN, a 10 mm vastag lemez 95 kN húzóerőnél szakadt el. A referenciaértékek alapján minősíthetjük a kötések jósági fokát, vagy egyszerű összehasonlító vizsgálatokat is végezhetünk.

3.3. Az átlapolt próbatestek mechanikai vizsgálata

A kísérletterv alapján, kísérletsoronként három szakítópróbát végeztünk. Az átlapolt kötések szakítópróbája elsősorban csapágy típusú tönkremenetelt okozott. A 6 mm-es és a 10 mm-es lemezvastagságok esetén gyengének bizonyultak a kötőelemek, ugyanis szinte azonos értékeket mértünk a kísérletek során. A tönkremeneteli módok is megegyeztek, minden esetben az alkalmazott kötőelemek nyíródtak el. A 10 mm-es lemezvastagság esetén a furat károsodása csak M6-os csavar alkalmazásakor jelentkezett, de alig észrevehetően. A 6 mm-es lemezvastagság esetén M6-os csavar alkalmazása érzékelhető furatdeformációt, tehát csapágy típusú tönkremenetelt okozott, de a szakítóerő a csavar elnyíródását igazolja, ugyanis szinte teljesen megegyezik a vastagabb lemez esetén mért értékkel. M5-ös és M4-es csavarok alkalmazása esetén egyértelműen a csavarok elnvíródását mértük.

A 4 mm-es lemezvastagság esetén eltérő eredményeket kaptunk. Ezek kísérletszáma az 1. táblázat alapján az 1., 4. és 7. kísérlet. E kísérletsorok alkalmával minden esetben hármat mértünk, ezek eredményeit tartalmazza az 5. ábra. Az ábrán látható az egyes kísérletsorok alatt mért szakítóerő-értékek, a mérések átlaga és szórása. Az ábra alapján kijelenthető, hogy az M4-es csavarhoz képest átlagban az M5-ös 218%-kal nagyobb, az M6-os pedig 260%-kal nagyobb terhelést képes elviselni. Az M5-ös csavarhoz képest az M6-os 119%-kal nagyobb terhelést volt képes elviselni. Ez az eredmény egybevág a szakirodalmi állítással, ami a csapágy típusú tönkremenetelhez kapcsolja a legnagyobb kötési szilárdságot. A 4 mm-es GRP-lemez esetén az M4-es csavar nyírási, az M5-ös és M6-os csavar vegyes, de egyre inkább csapágy típusú tönkremenetelt szenve-



5. ábra. A GRP-lemezek szakítóvizsgálatának eredményei

dett. A csavarok átmérőjének a növelésével egyre nagyobb kötési szilárdságot tudtunk létrehozni, de ennek van egy felső határértéke, amikor a kötőelem átmérőjéhez szükséges furat már túl sok üvegszálat szakít meg, és a tönkremeneteli mód a 2. ábra szerinti (b és d) tiszta húzási vagy kiszakadásos lesz. Ekkor a kötési szilárdság újra csökkenő tendenciát mutatna.

A kísérlet során két jellegzetes tönkremenetelt figyeltünk meg (6. ábra). A gyakoribb a csapágy típusú (6a. ábra), amely minden esetben nyírt kötőelemmel párosult, az alapanyag azonban változó mértékben károsodott. A másik, a nyírás típusú tönkremenetel a 4 mm-es lemezvastagság esetén jelentkezett (6b. ábra). E meghibásodás során az alapanyagból kiszakadt a kötőelem (a kötőelem károsodása nélkül).

4. Következtetések

A kísérletek alatt két jellegzetes tönkremeneteli típust figyeltünk meg, ezek alapján kijelölhetők a jövőbeli kutatási irányok és értékelhetők a kötések szilárdsági paraméterei. A szakirodalom-kutatás alapján a csapágy típusú tönkremenetel okozza a legnagyobb erőátvitelt. A 10 mm vastagságú GRP-lemezek esetén a felhasznált kötőelemek nem bizonyultak megfelelőnek, ugyanis a kötés meghibásodását minden esetben a kötőelem elnyíródása okozta, a furat jelentősen nem deformálódott. Ezért ennél a vastagságnál további kutatásokra van szükség nagyobb kötőelem-átmérővel. A 6 mm vastagságú lemezek esetén az M4-es és M5-ös csavarok szintén elnyíródtak, a furatot jelentősen nem károsították. M6-os csavar esetén a 6a. ábrán látható, envhe furatdeformáció jelentkezett, a mérési eredmények azonban egyértelmű kötőelem-elnyíródást igazolnak. Ezek alapján a 6mm-es lemezvastagság esetén is további vizsgálatok szükségesek M6-os és nagyobb kötőelemek alkalmazásával. A 4 mm-es GFRPlemezek vizsgálata során eltérő eredményeket kaptunk. M4-es kötőelem alkalmazása adta a legkisebb kötésszilárdságot, tisztán nyírás típu-



6. ábra. a) Csapágy típusú tönkremenetel nyírt kötőelemmel (t = 6, M6-os csavar) b) Nyírás típusú tönkremenetel (t = 4 mm, M5-ös csavar)

sú tönkremenetel mellett (6b. ábra). A kötőelem szinte sértetlen maradt és kiszakadt az anvagból. Az M5-ös és M6-os csavarok a nyírási és a csapágy típusú meghibásodás vegyes képét mutatták, de végül kiszakadtak az alapanyagból, a kötőelem jelentős károsodása nélkül. A szakítóvizsgálat eredményei alapján (5. ábra) a 4 mm vastag GRPlemez esetén M4-es vagy annál kisebb csavart nem ajánlott alkalmazni, mert nyírás típusú tönkremenetelt okoz, és a kötési szilárdság kedvezőtlenebb, mint M5-ös és M6-os csavar alkalmazása esetén, M5-ös csavar alkalmazása esetén 218%-os. M6-os csavar alkalmazása esetén 260%-os kötésiszilárdság-növekedést mértünk az M4-es csavarhoz képest. Látható, hogy a nagyobb kötőelem-átmérő kedvezőbb kötési erőt eredményez, de ennek van egy felső határértéke, amelynél már túl sok erősítőszálat szakít meg a furat, és új tönkremeneteli mód jelentkezik, várhatóan kisebb kötési erő.

Összességében az eredményeink felhasználhatók egy jövőbeni kutatás kiindulási adataiként. Célszerű lenne minden lemezvastagság esetén új kísérletsorozatot végezni nagyobb átmérőjű kötőelemek felhasználásával, részletesen feltérképezni a tönkremeneteli módokat, meghatározni az optimális kötőelemméretet és -elhelyezést. Így ki lehetne dolgozni egy technológiai ajánlást az adott anyagvastagságokhoz.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00052. számú, az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által kiírt pályázat keretében valósult meg.

Szakirodalmi hivatkozások

 Barkanov E., Akishin P., Emmerich R., Graf. M.: Numerical simulation of advanced pultrusion processes with microwave heating. In Proceedings of the VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. 2016, vol. 4. 7720–7738). https://doi.org/10.7712/100016.2368.5953

- [2] Gallegos C., Marco F.: Theoretical and Experimental Performance Analysis of a Cellular GFRP Vehicular Bridge Deck. 2016. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1737.6887
- [3] Coelho A. M. G., Mottram J. T.: A review of the behaviour and analysis of bolted connections and joints in pultruded fibre reinforced polymers. Materials & Design, 74. (2015) 86–107. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.02.011
- [4] Bank L. C.: Composites for construction: structural design with FRP materials. John Wiley & Sons, 2006. ISBN-13: 978-0471-68126-7.
- [5] Ramful R.: Failure Analysis of Bamboo Bolt Connection in Uniaxial Tension by FEM by Considering Fiber Direction. Forest Products Journal, 71/1. (2021) 58–64.

https://doi.org/10.13073/FPJ-D-20-00066

[6] Turvey G. J.: Single-bolt tension joint tests on pultruded GRP plate – effects of tension direction relative to pultrusion direction. Composite structures, 42/4. (1998) 341–351.

https://doi.org/10.1016/S0263-8223(98)00079-8

[7] Turvey G. J., Sana A.: Pultruded GFRP double-lap single-bolt tension joints – temperature effects on mean and characteristic failure stresses and knock-down factors. Composite Structures 153. (2016) 624–631.

https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.06.016

[8] Tajeuna T. A., Légeron F., Langlois S., Labossiere P., Demers M.: Effect of geometric parameters on the behavior of bolted GFRP pultruded plates. Journal of Composite Materials, 50/26. (2016) 3731–3749.

https://doi.org/10.1177/0021998315625101

[9] Wang Y.: Bearing behavior of joints in pultruded composites. Journal of composite materials, 36/18. (2002) 2199–2216. https://doi.org/10.1177/0021908202026018525

https://doi.org/10.1177/0021998302036018535

[10] Mottram J. T., Zheng Y.: State-of-the-art review on the design of beam-to-column connections for pultruded frames. Composite structures, 35/4. (1996) 387–401.

https://doi.org/10.1016/S0263-8223(96)00052-9