



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLOGIA TANSZÉK

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

NYÁRY VILMOS, RICZINGER ANDRÁS JÁNOS

(GÉPÉSZMÉRNÖKI SZAK MSC, 3. FÉLÉV, IPARI TERMÉK- ÉS FORMATERVEZŐI SZAK BSC  
3.FÉLÉV)

# Alumínium süllyesztékes kovácsolása

Konzulensek:

*Dr. Katula Levente Tamás*

egyetemi docens

*Dr. Szlancsik Attila*

adjunktus

Budapest, 2023

## NYILATKOZATOK

### *Elfogadási nyilatkozat*

Ezen dolgozat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Tudományos Diákköri Konferenciára előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a célkitűzésekben megfogalmazottaknak maradéktalanul eleget tesz. Ezen dolgozatot a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2023. 11. 05.

.....

*konzulens*

### *Nyilatkozat az önálló munkáról*

Alulírott, *Nyáry Vilmos* (DCITLP), *Riczinger András János* (A1TSGO), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatói, büntetőjogi és fegyelmi felelősségünk tudatában kijelentjük és sajátkezű aláírással igazoljuk, hogy ezt a dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magunk készítettük, és dolgozatunkban csak a megadott forrásokat használtuk fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettünk, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltünk.

Budapest, 2023. 11. 05.

.....

*hallgató*

# TARTALOMJEGYZÉK

Előszó .....	3
1. Összefoglalás .....	4
1.1. Summary .....	5
2. Bevezetés .....	6
2.1. Célkitűzések .....	6
3. Szakirodalmi áttekintés .....	7
3.1. Alumínium és ötvözetei .....	7
3.2. Alumínium süllyesztékes kovácsolása .....	8
4. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK .....	11
4.1. Végeselem módszer .....	11
4.2. Kísérleti munka .....	11
4.3. Az üregtöltés és sorja vizsgálata .....	13
4.4. A szálszerkezet vizsgálata .....	16
4.5. Keménység eloszlás .....	20
5. EREDMÉNYEK .....	27
6. Eredmények értékelése/KÖVETKEZTETÉSEK .....	29
6.1. Jövőbeli tervek .....	30
7. Felhasznált források .....	31
7.1. Irodalomjegyzék .....	31
7.2. Ábrajegyzék .....	31

## ELŐSZÓ

*Tanulmányaim során az alakítástechnika nyerte el leginkább a tetszésemet és már több dolgozatot írtam a témában, így idén alumínium süllyesztékes kovácsolásából írtunk egy a téma iránt szintén érdeklődő kollégámmal dolgozatot.*

\* \* \*

### **Köszönetnyilvánítás**

Ezúton szeretnénk megköszönni konzulenseinknek, Dr. Katula Leventének és Dr. Szlancsik Attilának a rengeteg segítséget és a mérésekben való aktív részvételt.

Ezen kívül köszönjük az Anyagtudomány és Technológia Tanszéknek a rendelkezésünkre bocsátott eszközöket és a kollégáknak a segítséget.

*Budapest, 2023.11.05.*

*Nyáry Vilmos, Riczinger András János*

## 1. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatunkban alumínium süllyesztékes kovácsolásával foglalkoztunk. A szakirodalom áttekintése kísérleteket tettünk nyílhegyek gyártására. A gyártási folyamatot vége-selemes szoftverrel is szimuláltuk. Az elkészült próbatesteken az alakítási hőmérséklet hatását vizsgáltuk. A munkadarabokon vizsgáltuk a üregtöltést, amire az alakítási hőmérséklet emelése kedvezőtlenül hatott. Minden munkadarabon két jellemző keresztmetszetben csiszolatokat készítettünk és ezeken metallográfiai vizsgálatokat végeztük. Vizsgáltuk a kovácsolás hatására kialakult szálszerkezetet, ami az alakítási hőmérséklet növekedésének megfelelően finomodott.

Egy keresztmetszetben vizsgáltuk az alakítási hőmérséklet hatását a mechanikai tulajdonságokra. Ezek jellemzésére keménységtérképet vettünk fel. A keménységmérés eredményei igazolták, hogy a nagyobb mértékben alakított részeken nagyobb szilárdságú lett a munkadarab, mint a kevésbé alakított részeken. A vége-selemes szimulációból kiderült, hogy a szerszám nagy hőelvonása miatt 500°C -nál kisebb hőmérsékleten gyakorlatilag félmelegen alakítottuk a munkadarabokat, így keménységükben szerepet játszott a hidegalakításakor fellépő szemcsetorzulásból fakadó szilárdságnövekedés. Az adott keresztmetszeten belüli keménységeloszlást a vége-selemes szoftver által számított alakváltozási értékek is alátámasztották. A vége-selemes modell az üregtöltésen kívül minden megfigyelésünket alátámasztotta, így sikerült validálnunk. A kísérletek igazolták azt is, hogy az alumínium kovácsolásakor fontos a szerszám előmelegítése a megfelelő hőmérséklet fenntartására. Azt is sikerült bizonyítani, hogy valóban akkor éri el leglágabb állapotát a munkadarab, ha a kovácsolási folyamat végére a hőmérséklete a rekrisztallizációs hőmérséklet felett van, mert ekkor alakul ki homogén finomszemcsés szerkezet.

*Kulcsszavak: alumínium, kovácsolás, vége-selem módszer, melegalakítás ...*

## 1.1. Summary

In our thesis, we deal with aluminum drop forging. Review of the literature We made experiments on the production of arrowheads. The production process was also simulated with finite element software. The effect of the forming temperature on the completed test specimens was investigated. We examined cavity filling on the workpieces, which was adversely affected by raising the forming temperature. Grindings were made in two typical cross-sections of each workpiece and metallographic examinations were performed on them. We examined the fiber structure formed as a result of forging, which refined as the forming temperature increased.

We investigated the effect of the forming temperature on the mechanical properties in a cross-section. We used a hardness map to characterize them. The results of the hardness measurement proved that the workpiece had a higher strength on the larger shaped parts than on the smaller shaped parts. The finite element simulation reveals that due to the high heat dissipation of the tool, we semi-hot formed the workpieces at a temperature lower than 500°C, so the increase in strength resulting from grain distortion during cold forming played a role in their hardness. The hardness distribution within the given cross-section was also supported by the deformation values given by the finite element software. The finite element model supported all our observations except for cavity filling, so we succeeded in validating it. The experiments also proved that when forging aluminum it is important to preheat the tool to maintain the right temperature. It was also proven that the workpiece really reaches its softest state when its temperature is above the recrystallization temperature at the end of the forging process, because then a homogeneous fine-grained structure is formed.

Keywords: aluminum, forging, finite element method, hot forming...

## 2. BEVEZETÉS

Korábban terveztem egy kovácsszerszámot nyílhegyek süllyesztékes kovácsolásához. Ez számos alakítástechnikai vizsgáltra biztosított lehetőséget. Ezek közül idei TDK dolgozatunk témájának, alumínium süllyesztékes kovácsolását választottuk.

### 2.1. Célkifűzések

Napjainkban az alumíniumot az ipar számos területén alkalmazzák és számos alkatrészt gyártanak belőle süllyesztékes kovácsolással elsősorban az autóipar számára, ahol az újrahasznosíthatóság és a tömegcsökkentés nagy jelentőséggel bír. Dolgozatunkban az alakítási hőmérsékletnek a termék mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását vizsgáljuk.

Céljaink:

1. Az alumíniumnak és süllyesztékes kovácsolásának megismerése érdekében a szakirodalom és tudományos cikkek áttekintése.
2. Alumínium alapanyagból nyílhegyek gyártása a melegalakítás hőmérséklettartományának lefedésével különböző hőmérsékleteken,
3. Az elkészült munkadarabok értékelése gyártási szempontból,
4. A gyártott próbatestek két jellemző keresztmetszetének metallográfiai vizsgálata. Az alakítási hőmérséklet hatásának vizsgálata a kialakult szálszerkezetre és mechanikai tulajdonságokra.
5. Végeselemes szimuláció készítése és validálása.
6. Az eredmények értékelése és összefoglalása.

### 3. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A szakirodalmi áttekintésben szerepel az alumínium, mint alapanyag bemutatása, a süllyesztékes kovácsolás technológiájának ismertetése, valamint a melegalakításának az áttekintése.

#### 3.1. Alumínium és ötvözetei

A dolgozatunkban a vizsgált alapanyagunk az alumínium. Az alumíniumot az építőiparban először az 1920-as években alkalmazták, viszont jelentős áttörés 1930-ban történt, amikor az Empire State Building szerkezetébe alumíniumot építettek be. Az ablakkeretek a külső burkolat és a timpanon paneljei készültek belőle (URL1)

Az alumínium az ipar számos területén hasznosított alapanyag. Sűrűsége mindössze  $2,7\text{g/cm}^3$ , jelentősen kisebb, mint az acélé. Húzó rugalmassági modulusza  $70\text{ MPa}$ , szakítószilárdsága  $70 - 450\text{ MPa}$  lágy, vagy kemény állapotától és ötvözöttségétől függően, egyezményes folyáshatára  $20-60\text{ MPa}$  között változik. Felületen középpontos köbös kristályrácsának köszönhetően kiválóan alakítható hidegen és melegen is. Szakítóvizsgálattal akár  $90\%$ -os kontrakció is elérhető. A tiszta alumínium olvadáspontja  $660^\circ\text{C}$ . Kis sűrűsége kiváló alapanyaggá teszi például gépjárművek és repülőgépek gyártására, mivel használatával számottevő energia spórolható meg. Emellett jól hegeszthető anyag, mely tulajdonsága szintén kedvelt anyaggá teszi az ipar számos területén. Fontos tulajdonsága, hogy oxigén hatására a felületén egy védő oxidréteg képződik, aminek köszönhetően erősen korrózióálló. Villamos vezetőképessége kiváló, a réz vezetőképességének körülbelül kétharmada, viszont jelentősen könnyebb, ezért átviteli hálózatokban rendszeresen használják. Napjainkban fontos tulajdonsága továbbá, hogy rendkívül költséghatékonyan teljes mértékben újrahasznosítható. Az elsődleges előállításához szükséges energia mindössze  $5\%$ -a szükséges az újrahasznosításához. (URL<sub>1</sub>), (URL<sub>2</sub>)

Az alumínium kis szilárdságú, ezért törekedni kell ennek növelésére. A szilárdságnövekedést több módszerrel lehet elérni. Ezek közül az egyik lehetőség az ötvözés, ami tulajdonképpen a többi módszert is befolyásolja. A kohóalumínium nagy tisztaságú, így már kis ötvözőmennyiség is nagymértékben befolyásolja a tulajdonságait. A szilárdságot növelő ötvözők, a réz, a magnézium, a cink, a mangán és a szilícium. A titán és a króm szemcseméretet csökkent. A mangán és az antimon a korrózióállóságot növeli, míg nikkel hozzáadásával a melegszilárdságot javíthatjuk. A kobalt, a vas és a bizmut a forgácsolást könnyítik. Az alumínium legfontosabb szennyezői a vas és a szilícium. Az ötvözők szubsztitúciósan épülnek



be a kristályrácsba és ideális esetben homogén szilárd oldatot alkotnak az alumíniummal, de a valóságban kiválások formájában vannak jelen. Az egyes ötvözők atomméret különbségükből fakadóan különböző mértékben növelik a szilárdságot. A jellemző szilárd oldatos ötvözetek, az Al-Cu, az Al-Mg és az Al-Si ötvözetek. Feldolgozhatóság szerint megkülönböztetünk alakítható ötvözeteket, kiválásosan keményíthető ötvözeteket, és önthető ötvözeteket. (URL<sub>2</sub>)

Az ötvözés mellett a másik szilárdságnövelő eljárás a képlékeny hidegalakítás. Hidegalakításkor a szemcseszerkezet torzulását, ezáltal a diszlokációsűrűség növekedését használjuk ki. A szilárdság növekedésével viszont az alakváltozási képesség csökken, így ez korlátozott mértékben alkalmazható. A kiválásosan keményíthető ötvözetekben a homogén szilárdoldatból alakuló kiválások akadályozzák a diszlokáció mozgást, ezzel növelve a szilárdságot. A kiválásos keményedés nyugalmi állapotban is végbe megy, ezt nevezzük öregedésnek, de meghatározott ideig meghatározott hőmérsékleten való hőntartással és utána szabályozott lehűtéssel, vagyis hőkezeléssel gyorsítható. (URL<sub>2</sub>)

Az ötvözeteket a jellemző fő ötvözőik szerint csoportokba sorolták be:

1xxx a tiszta alumínium (99% fölötti tisztaság)

2xxx fő ötvözője a Cu

3xxx fő ötvözője a Mn

4xxx fő ötvözője a Si

5xxx fő ötvözője a Mg

6xxx fő ötvözői a Mg és a Si

7xxx fő ötvözője a Zn és a Mg

8xxx fő ötvözője a Li

9xxx egyéb

Ezek közül az ötvözetek közül az 5-ös, a 6-os és 7-es csoportba tartozó ötvözeteket használják leggyakrabban süllyesztékben kovácsolt gyártmányok alapanyagaként. Ezeknek fontos tulajdonsága, hogy jól alakíthatók és többnyire kiválásosan keményíthető ötvözetek, amiknek melegalakításával és utólagos hőkezelésével nagyon jó szilárdság és szívósság érhető el. Ezeket az ötvözeteket jellemzően a járműgyártásban, építőiparban és a gépiparban alkalmazzák. (URL<sub>2</sub>)

### 3.2. Alumínium süllyesztékes kovácsolása

A süllyesztékes kovácsolás olyan melegalakítási eljárás, ahol a kovácsolási hőmérsékletre hevített munkadarabot előre elkészített üregbe kovácsoljuk, vagy sajtoljuk. (LATINÁK, 1977)

A süllyesztékes kovácsolás lényege, hogy nagysorozatban, illetve tömegyártásban gyárthatunk vele azonosan jó szilárdsági tulajdonságokkal rendelkező bonyolult geometriájú alkatrészeket. Az alakítás történhet egy üregben egy lépésben, egy üregben több lépésben vagy több üregben több lépésben, ezt a rendelkezésre álló géppark, a munkadarab geometriája és a gazdasági tényezők határozzák meg. (LATINÁK, 1977)

Kovácsoláskor általában öntött, sajtolt vagy hengerelt alapanyagok használatosak. Ezeket darabolják, legtöbb esetben gyorsjáratú keményfémlapkás automata körfűrészszel vagy ollóval. Minden esetben szükséges a sorja eltávolítása, emellett az ollóval történő vágás esetében figyelembe kell venni, hogy az anyagban deformáció lép fel. (URL<sub>6</sub>)

Az alumínium alakítása relatíve szűk hőmérséklettartományban történik. Jól előmelegített szerszám segítségével elkerülhető az anyag hűlése, ám ilyenkor fontos a hőmérsékletnövekedésre figyelni, mivel a disszipált energia által az alapanyag megolvadhat a szerszámban. (URL<sub>5</sub>)

Annak érdekében, hogy homogén, egyenletes szemcseszerkezetet kapjunk, nagy mértékű átkovácsolás szükséges, melynek mértéke legalább 50%. Ennek oka, hogy másképp durvaszemcsés újrakristályosodást kockáztatunk. (URL<sub>5</sub>)

Alumínium termékek süllyesztékének tervezésekor fontos néhány, az eljárásra jellemző tulajdonságot figyelembe venni. Az anyagáramlás alapvetően eltér az acélok által mutatottól. Mivel az acélnál lágyabb, tehát könnyebben alakul, előmelegített süllyesztékben kedvezőtlenebb az üregtöltés, a sorjacsatornába történő áramlás kis ellenállást mutat. Ezeket kompenzálhatjuk a sorjacsatorna méreteinek pontos megválasztásával. Emellett a tervezési folyamatot jelentősen rövidíthetjük és könnyíthetjük végeselemes szimuláció alkalmazásával. Fontos továbbá odafigyelni az anyagáramlásra. A szálfutásnak egybe kell esnie a fő igénybevételi iránnyal, és nem léphet ki a felületre. (URL<sub>5</sub>)

Alumínium kovácsolására gyakran alkalmazott módszer az úgynevezett thixokovácsolás. Az eljárás lényege, hogy az adott kovácsdarabot a vegyi összetételének megfelelő hőmérsékleten, a likvidusz és szolidusz közötti tartományban, hidraulikus sajtón, kifejezetten erre a célra kialakított zárt süllyesztékben alakítják. Alakítás során a folyékony fázis mennyisége ötvözettől függően 10% és 60% közé esik. Ilyen állapotban, ha az anyagot nyíró igénybevételnek tesszük ki, jelentősen lecsökken a folyáshatár. Ennek következménye egy extra folyási képesség, illetve homogén, egységes szilárd részecskéket kapunk homogén folyékony fázisban. (URL<sub>5</sub>)

Az alumínium szilárd állapotban való melegalakításának hőmérséklettartománya 350 °C és 500 °C között van. Melegalakítás hatására a fémek dinamikusan újrakristályosodnak, aminek

hatására bennük finomszemcsés szerkezet jön létre ezzel egyidőben a szennyezők és ötvözők szálakba rendeződnek, ami a szilárdsági tulajdonságokra nézve anizotrópiát okoz. Ezt a technológia tervezésénél figyelembe kell venni és arra kell törekedni, hogy a szálszerkezet a későbbi üzemszerű igénybevételekkel szembeni ellenállást biztosítsa. A szilárdsági tulajdonságokat döntően befolyásolja az alakváltozás mértéke és a hevítés hőmérséklete. Minél nagyobb az alakváltozás mértéke és minél kisebb a hevítés hőmérséklete, annál jobbak lesznek a szilárdsági tulajdonságok, mert annál finomabb szemcseszerkezet jön létre. Ehhez a minél rövidebb hevítési idő is hozzájárul, hiszen a hevítés ideje befolyásolja az átlagos szemcsenagyságot. (URL<sub>4</sub>) Ezt alátámasztja az a kutatás, amelyben AlMgSi1 ötvözetben a melegalakítás mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását vizsgálták a hőmérséklet és hőkezeltégi állapot függvényében. Az ötvözet kovácsolási folyamata eredetileg a következő módon zajlik: 450 °C-os kiindulóhőmérsékletre kovácsolás; majd oldó hőkezelés 535 °C-on 1,5 órán keresztül; mesterséges öregítés 180 °C-on 8 órán keresztül. Kísérleteket végeztek a felhasznált energia csökkentése és a termelés hatékonyabbá tétele érdekében; a konklúzió szerint az alakítás utáni oldó hőkezelés kihagyásával jobb hatékonyság érhető el. Ezáltal egy új kovácsolási folyamatot állítottak elő: alapanyag oldó hőkezelése; előalakítás; öregítés; további előalakító lépések, majd készre alakítás. A kísérletek során megállapították, hogy a vizsgált alapanyag esetében a legnagyobb Vickers-keménységet az említett új technológiai sorrenddel lehet elérni. A 120 °C-on 4-6 órás öregítés után alakított, majd 200 °C-on 10 percig hűtött mintadarab mutatta a legjobb mechanikai tulajdonságokat. Fontos megemlíteni, hogy a nagyobb alakítási hőmérséklet rosszabb tulajdonságokat eredményezett. A 200 °C-on alakított minta Vickers-keménysége nagyobb, mint a 250 °C-on alakított darabé. Ezzel a módszerrel a minta keménysége 130 HV, tehát 20 HV-vel nagyobb keménységet értek el a módosított folyamattal az eredetihez képest. Ebből is látszik, hogy alumínium képlékenyalakításánál mennyire fontos szerepet játszik a folyamat egészére nézve a megfelelő hőmérséklet megválasztása és kiinduló darab hőkezeltégi állapota. (URL<sub>3</sub>)

## 4. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

### 4.1. Végeelem módszer

A tudomány fejlődésének köszönhetően napjainkra az iparban elterjedten használnak a technológia tervezésben is számítógépes szoftvereket, amikkel egyrészt a konkrét termékek geometriáját tudjuk modellezni (CAD szoftverek) másrészt egyes gyártási folyamatokat, illetve az adott gyártmány üzemi körülmények között való viselkedését tudjuk előre jelezni, ezek a végeelemes szimulációs szoftverek.

A végeelem módszer lényege, hogy az egyébként kontinuumnak tekinthető testeket kellően sok, véges számú elemből álló hálóval helyettesíti, amivel az elemek számától és alakjától függő pontossággal szimulálható egy adott terhelés hatására az anyag viselkedése.

Képlékenyalakítás modellezésénél a módszer nagy előnye, hogy az anyag viselkedését leíró komplikált és hosszadalmas analitikus számításokat gyorsabban végezhetjük a számítógéppel, ami pontosabb várható eredménnyel is szolgál. További előnye, hogy a folyamat közben bármikor betekintést nyerhetünk a munkadarab belsejében lejátszódó folyamatokba. Olyan folyamatok, hatások vizsgálatára is lehetőséget ad, amire egyébként nem lenne lehetőség. Ilyen például a hőmérséklet-, alakváltozás-, feszültség eloszlása a munkadarabban. Vizsgálhatók a munkadarabban keletkező hibák, begyűrődések átlapolódások és az üregtöltés is. A szerszámban ébredő feszültségeket, kopást, fáradást, hőterhelést szintén lehet vizsgálni és az eredmények alapján tökéletesíteni a technológiát. A háló finomságának állításával a kritikus helyeken könnyen pontosíthatjuk a számításainkat. A végeelemes szimuláció futtatásakor mindig szem előtt kell tartani, hogy mi a várható eredmény és ehhez mérten kell a kapott eredményeket kiértékelni és kezelni. A fejlesztésre használt modelleket validálni szükséges, ami azt jelenti, hogy a gyártás során néhány munkadarabon végzett vizsgálattal igazolni kell, hogy valóban jól modelleztük-e a folyamatot.

### 4.2. Kísérleti munka

Az alumínium süllyesztékes kovácsolási kísérleteit nyílhegyek gyártásán keresztül végeztük. Két különböző geometriájú nyílhegy előgyártmányt kovácsoltunk az *1. ábrán* látható szerszámmal.



1. ábra: Kovácsszerszám

Az 1. ábrán látható szerszám vízszintes üregében egy laposabb (a továbbiakban Lapos), a függőleges üregében pedig egy hegyesebb (a továbbiakban Hegyes) nyílhegy előgyártmányát lehet elkészíteni. A kísérletben mind a két geometriájú nyílhegyet készítettünk 96% Al és 4% Si összetételű alapanyagból. Ez az ötvözet nem keményedik kiválásosan és nem nemesíthető, így nem volt szükség lágyításra az alakítás előtt.

A gyártás paramétereit:

A kiinduló darab: Ø10x100 mm alumínium henger

Hévítsi hőmérséklet: 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C

Szerszám hőmérséklete: 20 °C

Környezeti hőmérséklet: 20 °C

Alakítási sebesség 10 mm/s

Alakító berendezés: DSH 200 hidraulikus prés (maximális terhelés 2000 kN)

Kenőanyag: grafitpor olajos-vizes emulziója (fekecs)

Az elkészült próbatesteken az alábbi jellemzők változását vizsgáltuk az alakítási hőmérséklet változásának függvényében:

- szemrevételezéssel vizsgáltuk az üregtöltést és a felületi minőséget,
- tolómérővel mértük a kialakult sorjahíd vastagságát, valamint a sorja szélességét,
- két különböző keresztmetszetben metszeteket és csiszolatokat készítettünk, majd ezeket megmarattuk és sztereomikroszkóppal vizsgáltuk az alakítás hatására kialakult szálak szerkezetét,

- a maratott mintákon keménységtérképet vettünk fel, mivel ez a legegyszerűbb vizsgálati módja a képlékeny alakítás mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálatára.

Elvégeztük az alakítási folyamat vége-selemes szimulációját is mindkét formára és 350 °C-tól 500 °C-ig minden hevítési hőmérsékletre QFormban. A szerszám szimmetriája miatt a számítási kapacitás csökkentésére negyedmodellt alkalmaztunk.

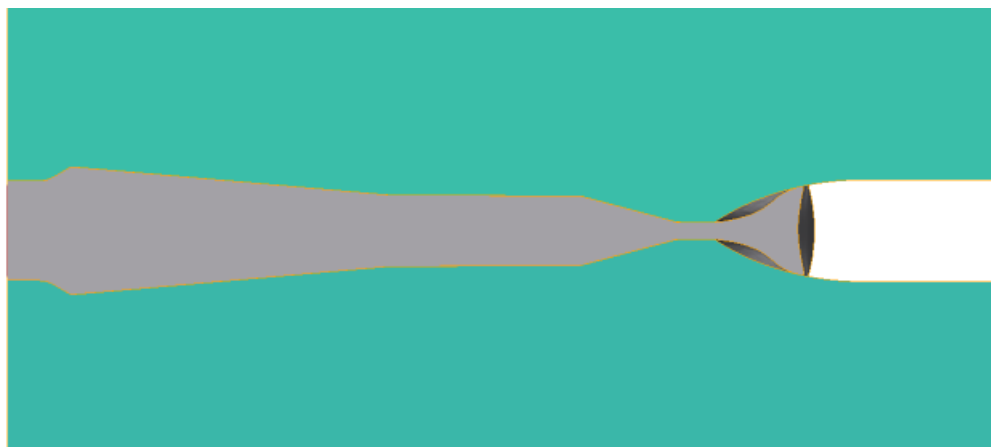
A szimuláció kiértékelésekor a következőket vizsgáltuk:

- az üregtöltést, a sorjahíd vastagságát,
- az anyag áramlását a szerszámban,
- a keménységet.
- az alakváltozás mértékét,
- az alakítás során a munkadarab hőmérsékletének változását.

Ezt követően a szimulációs eredményeket összevetettük a vizsgálatok megfigyeléseivel.

### 4.3. Az üregtöltés és sorja vizsgálata

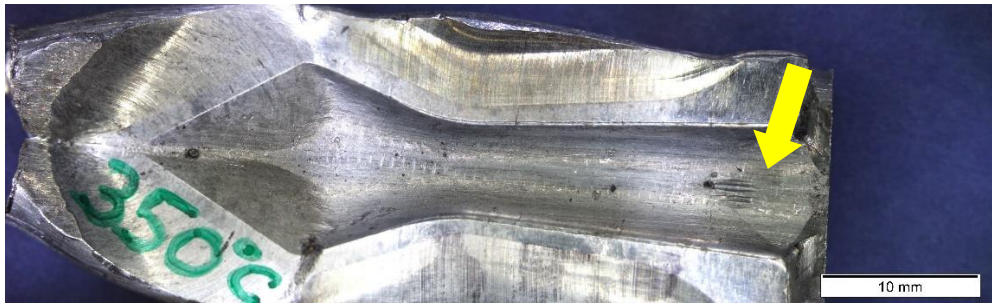
A vége-selemes szimuláció szerint a munkadarab tökéletesen kitöltötte az üreget. Az látható az *2. ábrán*.



*2. ábra:* Üregtöltés Qform szerint

Ezzel szemben az elkészült próbatestek képein, - amelyek az *3.-7. ábrákon* láthatók -, megfigyelhető, hogy a darabok középső részén a sárga nyilakkal jelölt részeken nem teljesült az üregtöltés.





a) Hegyes forma



b) Lapos forma

3. ábra: 350 °C-on készült nyílhegyek



a) Hegyes forma



b) Lapos forma

4. ábra: 400 °C-on készült nyílhegyek



a) Hegyes forma





b) Lapos forma

5. ábra: 450 °C-on készült nyílhegyek



a) Hegyes forma



b) Lapos forma

6. ábra: 500 °C-on készült nyílhegyek



a) Hegyes forma



b) Lapos forma

7. ábra: 550 °C-on készült nyílhegyek



A 3-7. ábrákon megfigyelhető, hogy minél nagyobb volt az alakítás hőmérséklete, annál kevésbé töltötte ki a munkadarab az üreget. Ennek oka, hogy a szerszám, acél nyílhegyek gyártására készült, így a sorjacsatorna kialakítása nem kedvező alumínium kovácsolásához. Mert a szerszámüregben nem tudott kialakulni a megfelelő nyomás, ami bekényszerítette volna az üreg nehezen kitölthető részeibe az alapanyagot, ehelyett a kisebb ellenállás felé áramlott

Az elkészült próbatesteken tolómérővel mértük a sorjahíd vastagságát, ami 1,52 mm lett. A gép programozásakor beállított sorjahíd vastagság 1,5 mm volt így ezt sikerült kellőképpen megközelíteni.

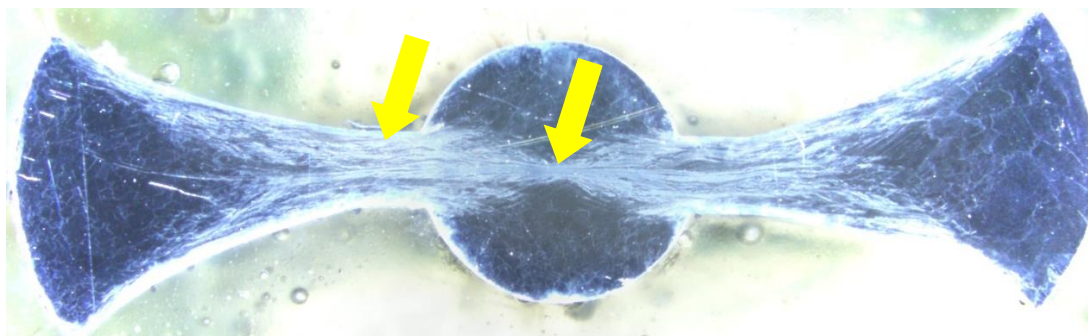
Ezen kívül az elkészült próbatestek legnagyobb szélességét is mértük tolómérővel. Itt azt figyeltük meg, hogy az alakítás hőmérsékletének növelésével nőtt a sorja szélessége. Ez összhangban van az üregtöltés romlásával. A szimuláció ezt nem mutatta ki.

#### 4.4. A szálszerkezet vizsgálata

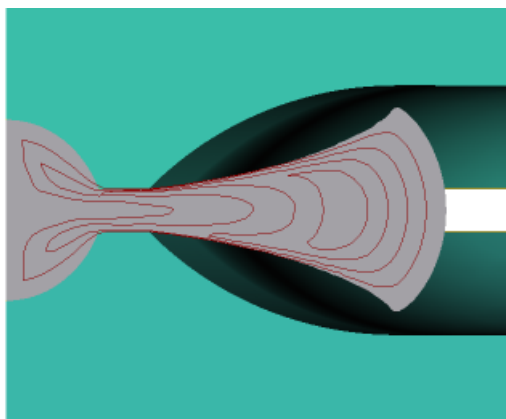
A vizsgálatok további részét a Lapos nyílhegyeken végeztük.

Az elkészült próbatesteken két keresztmetszetben, a nyaknál és a fej legszélesebb részén metszeteket készítettünk, ezeket csiszolás és polírozás után megmarattuk, majd sztereomikroszkóppal vizsgáltuk a kialakult szálszerkezetet.

A szálas szerkezet kirajzolására vége-selemes szimulációban is van lehetőség, így össze is tudtuk hasonlítani. Az 8. ábrán látható a nyaknál készített metszetben kialakult szerkezet és a szimulációval kirajzolt szerkezet.



a) A próbatesteken kialakult szálszerkezet a nyaknál, 400°C hevítési hőmérséklet

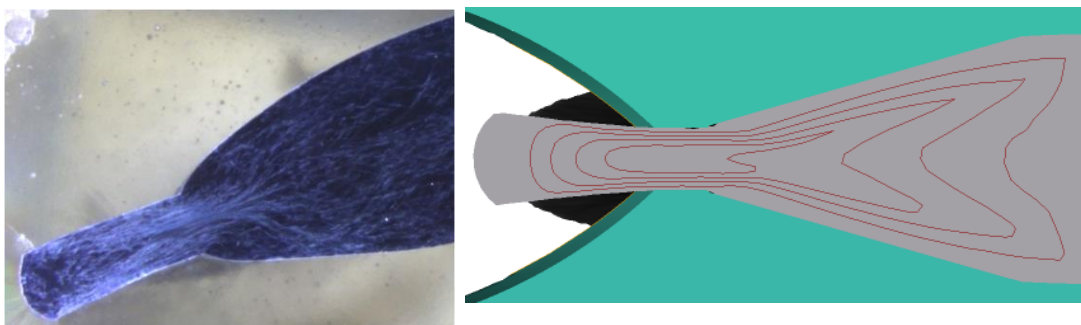


b) a QFormmal kirajzolt szerkezet a nyaknál

8. ábra: A nyaknál kialakult szálszerkezet

Az 8. ábrán látható, hogy a QFormmal kirajzolt szálszerkezet jól modellezi a valóságban kialakult szerkezetet. Megfigyelhető, hogy a munkadarab az osztósíkban, a szerszámtól távolabbi helyeken szenvedett nagyobb mértékű alakváltozást, ahogy a sárga nyilak mutatják. A szálak az osztósíkban és a sorjahídban helyezkednek el a legsűrűbben és a szerszámfelekhez közeledve ritkúlnak. Ez várható volt, hiszen középen nem akadályozza a szerszám az anyagáramlást. A nagy keresztmetszetváltozás miatt ebben a keresztmetszetben az anyag jelentős részéből lett nagymértékű alakváltozás nélkül sorja, így a munkadarab széle felé közeledve szintén kevésbé alakult ki szálas szerkezet.

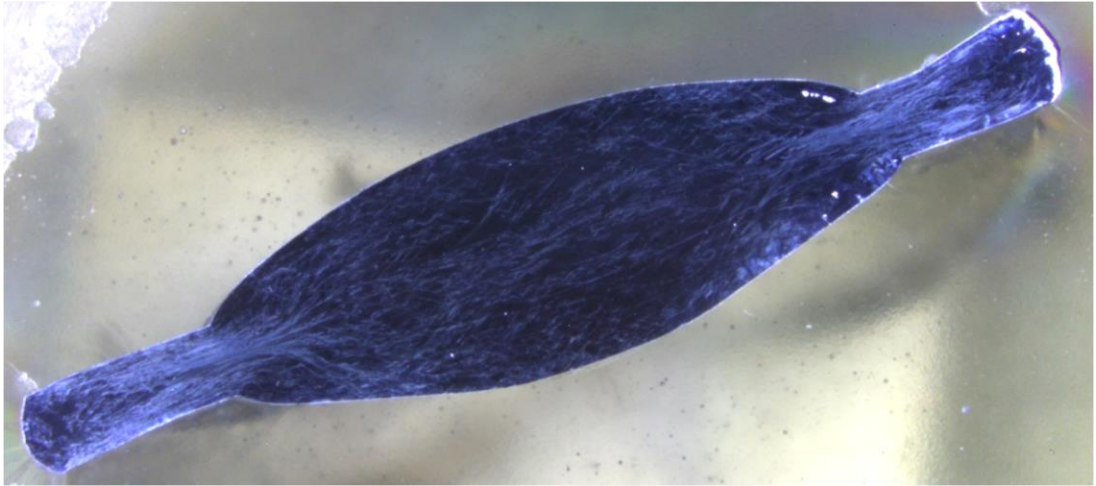
A széles keresztmetszetben kialakult szerkezet látható az 9. ábrán.



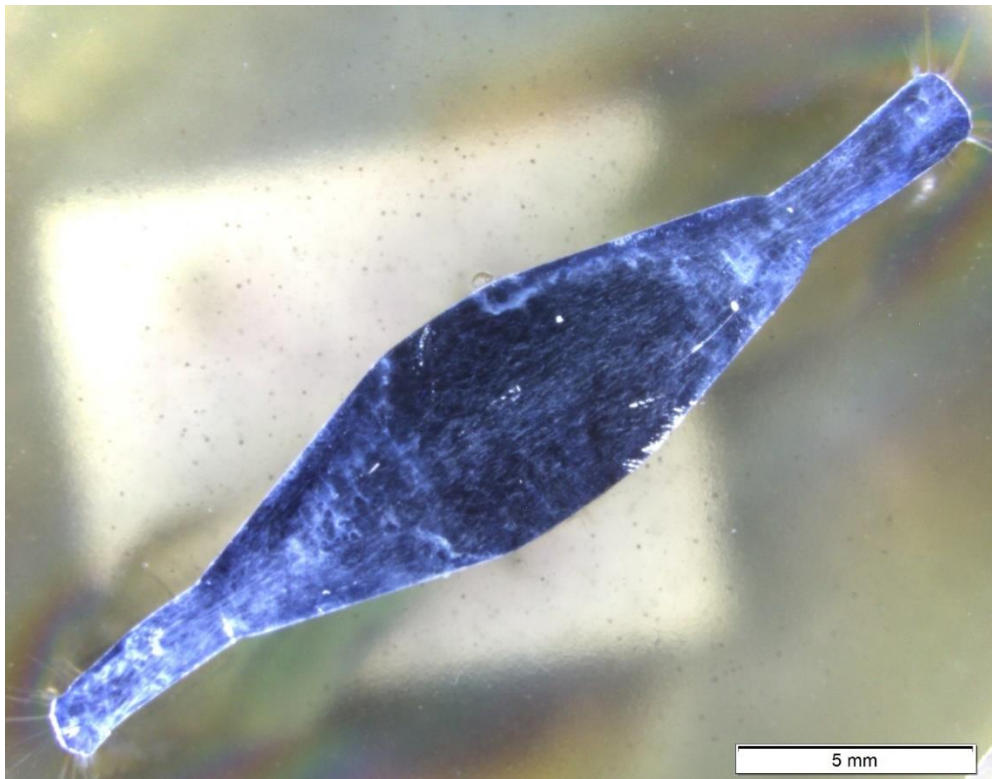
9. ábra: A széles keresztmetszetben kialakult szálszerkezet,

A 9. ábrán megfigyelhető, hogy a szimulációval számított szálszerkezet jól modellezi a valóságban kialakult szerkezetet. A sorjahídban és az osztósíkban helyezkednek el legsűrűbben a szálak. A szimuláció korlátja, hogy a negyedmodell miatt csak zárt görbét tud rajzolni köztés keresztmetszetben.

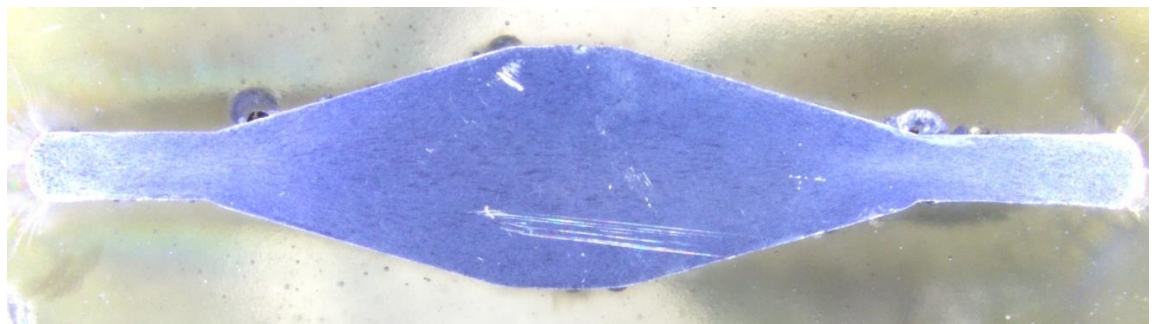
Az alakítási hőmérséklet szálszerkezetre gyakorolt hatása figyelhető meg a 10. ábrán, amelyen a széles keresztmetszetben kialakult szerkezet változása látható.



*a) 400 °C hevítési hőmérséklet*



*b) 450 °C hevítési hőmérséklet*



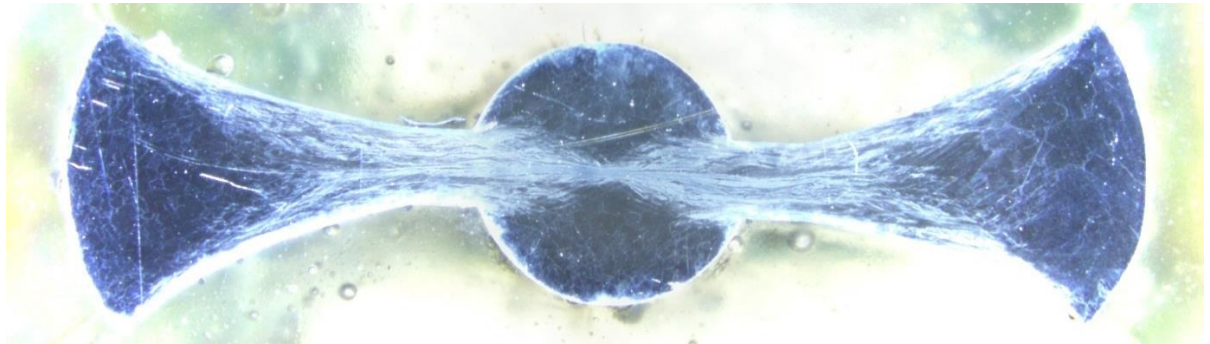
*c) 550 °C hevítési hőmérséklet*



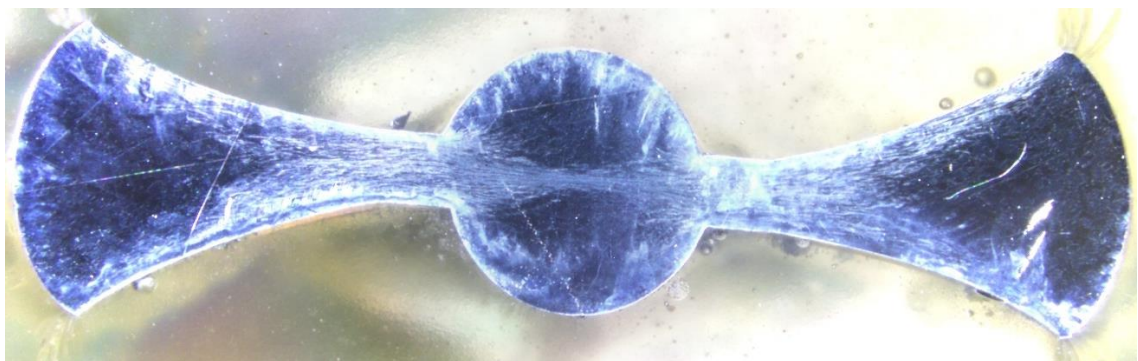
10. ábra: A szálszerkezet változása a széles keresztmetszetben a különböző alakítási hőmérsékleteken (400-450-550 °C)

A 10. ábrán megfigyelhető, hogy minél nagyobb volt a hevítési hőmérséklet, annál sűrűbb lett a szálas szerkezet és a hőmérséklet emelkedésével egyre kevésbé látszódik. Ennek lehetséges oka, hogy nagyobb hőmérsékletről kevésbé hűlt le a munkadarab a szerszámmal való érintkezéskor így homogénebb lett a szövetszerkezet.

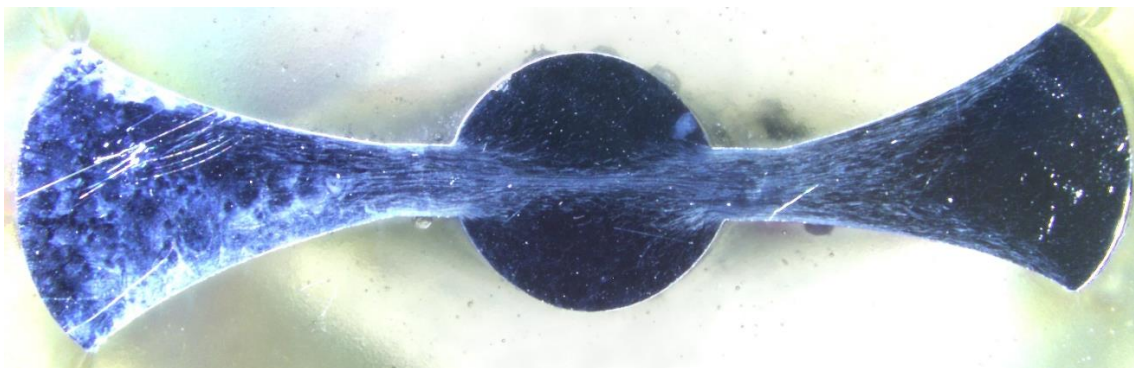
A szálszerkezet finomodását figyeltük meg a 11. ábrán látható másik keresztmetszetenél is.



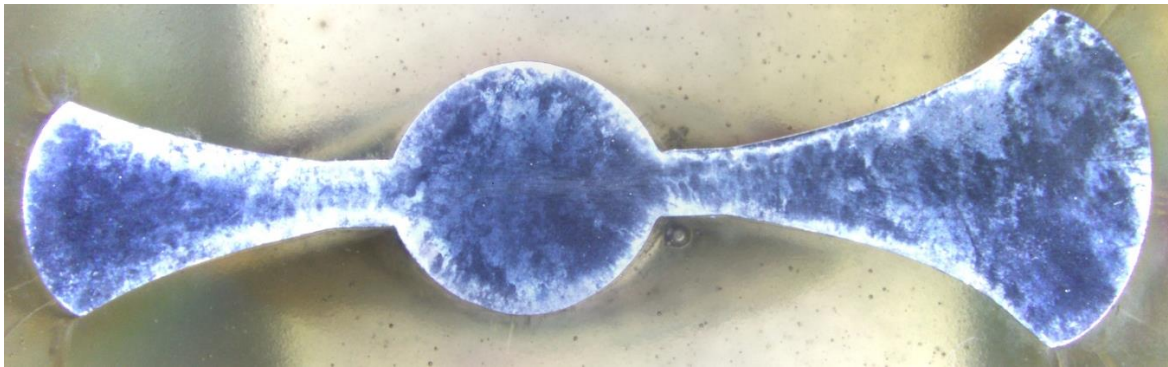
a) 400 °C



b) 450 °C



c) 500 °C



d) 550 °C

11. ábra: Szálszerkezet változása a nyaknál (400-450-550-550 °C)

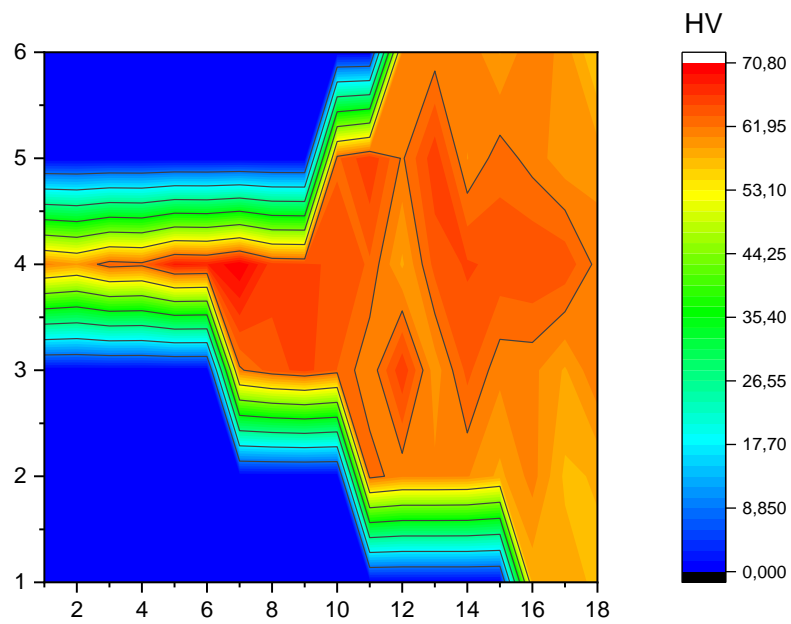
A 11. ábrán látható, hogy a nyaknál lévő keresztmetszetben is hasonlóan változik a szálszerkezet. Itt láthatjuk, hogy a sorjában, ahol kisebb volt az alakváltozás szintén ritkábban futnak – széttartóak – a szálak.

#### 4.5. Keménység eloszlás

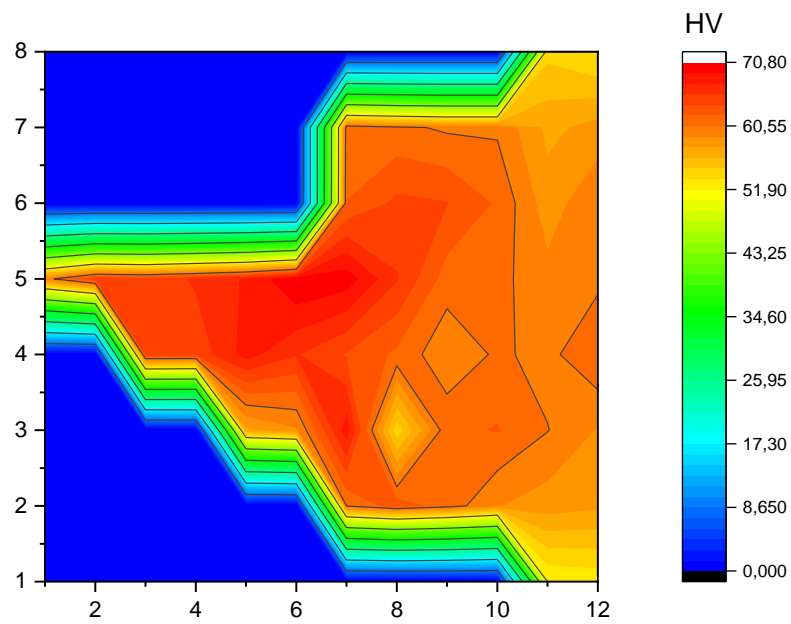
A mechanikai tulajdonságok változásának legegyszerűbb vizsgálati módja a keménységmérés. Az Anyagtudomány és Technológia tanszék metallográfiai laboratóriumában található mikrokeménység mérő berendezéssel a 400 °C, 450 °C és 500 °C hevítési hőmérsékletről alakított mintákon keménységtérképeket vettünk fel. A munkadarab szimmetriája miatt, csak a keresztmetszetek felén mértünk Vickers keménységet 1 kg terheléssel 5 s terhelési idővel. A pontokat a keménységmérési irányelveknek megfelelően vettünk fel, tehát a lenyomatok közepének a minta szélétől vett távolsága legalább a nagyobbik átló hosszának 2,5 szerese, illetve ez a minimum távolság két lenyomat középpontja között is. A mérési pontokat úgy vettük fel, hogy az osztósíkban a minta szélétől indulva a közepéig vettük fel az első sort. Innen a minta széléig mind a két oldalra további pontok felvételével jelöltük ki a sorokat, amiket a minta közepétől a széle felé haladva mértünk fel. A sor utolsó pontját a minta szélétől való távolság határozta meg.

A keménységmérést a széles keresztmetszetben végeztük és a 450 °C-os mintával kezdtük. Első mérés lévén a lehető legsűrűbben vettük fel a mérési pontokat, így elég részletes térképet kaptunk. A többi mintán ennek a mintának az alapján kevesebb pontot vettünk fel.

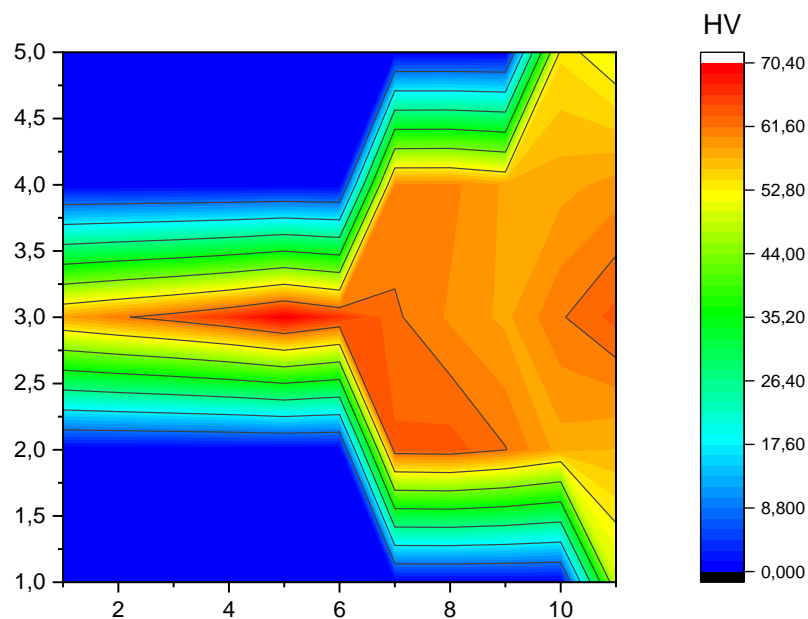
A keménységtérképek láthatók a 12. ábrán. A 12.a ábrán 77 pontot vettünk fel. Ezeket Origin szoftver segítségével ábrázoltuk. mivel az Originba az adatokat mátrixban lehet felvinni a mintán kívül eső cellákba 0 értékeket vettünk fel, így az eloszlás közelítőleg kirajzolja a keresztmetszetet. A 12.b ábrán 55 pontot vettünk fel, majd a 12. c ábrán 24 pontot.



a) Keménységtérkép a 400 °C-os munkadarab széles metszetében



b) Keménységtérkép a 450 °C-os munkadarab széles metszetében



c) Keménységtérkép az 500 °C-os munkadarab széles metszetében

12. ábra: A széles keresztmetszetben felvett keménységtérképek különböző hevítési hőmérsékleteken

A mérési eredmények valamennyi munkadarab hőmérsékleten azt mutatják, hogy az osztósíkból a sorjától a munkadarab közepe felé, - a 12. ábrán balról jobbra - haladva a keménység az üreg széléig növekszik, majd onnan a munkadarab közepéig kismértékben csökken, vagy stagnál, majd a munkadarab közepén megint kissé nagyobb lesz. Az osztósíktól a szerszámok felé közeledve mindkét irányban csökken a keménység, viszont az osztósíktól távolabbi sorokban az üreg széle felé haladva az alakítási vonalaknak megfelelően növekszik. A 12. a) és b) ábrákon azért aszimmetrikus kissé a keménységeloszlás, mert nem sikerült teljesen középre felvenni az első sort, így a felső és alsó részen kis mértékben "elcsúszott" a mérés.

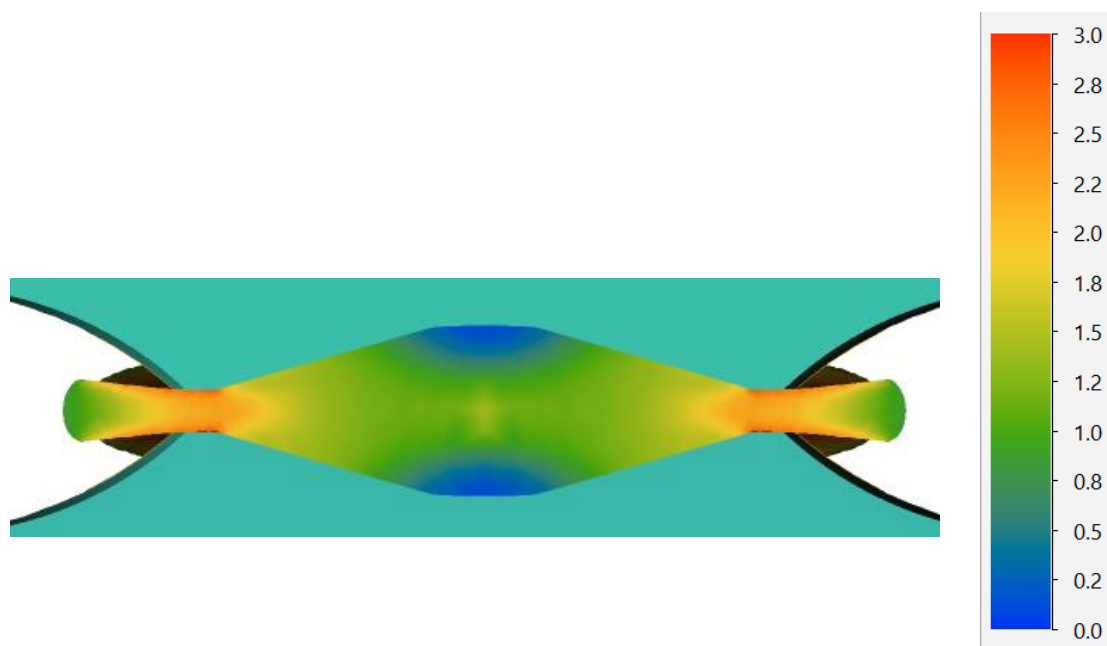
Az átlagkeménység értékeit az 1-es táblázatban foglaltam össze

1. Táblázat: Az egyes minták átlagos keménysége

Hevítési hőmérséklet (°C)	Átlagkeménység (HV)	Szórás
400	62	3,61
450	61,2	3,04
500	57,5	12,02

A keménység változásának magyarázatához a végesesemes szimulációból kaphatunk információt.

Az egyes hőmérsékleteken alakított munkadarabok keresztmetszetében a hőmérséklet eloszlást és az alakváltozást össze tudjuk hasonlítani. Az alakváltozást mutatja a *13. ábra*.

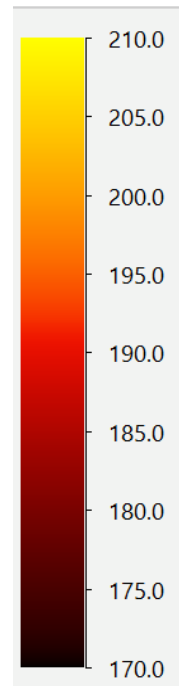
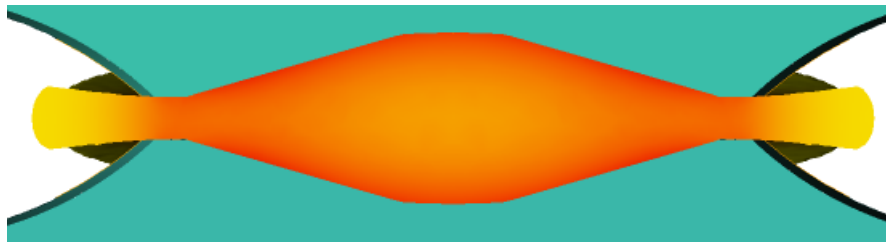


*13. ábra:* Az alakváltozás a vizsgált keresztmetszetben

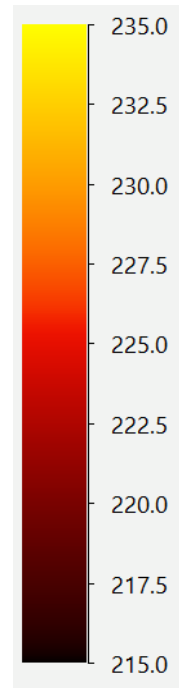
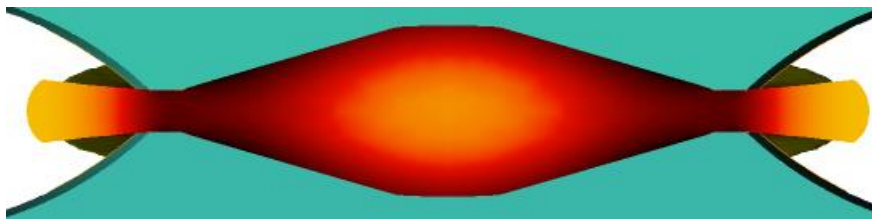
A *13 ábrán* látszik, hogy a középső részen, ahol a szerszámmal először érintkezett a munkadarab, szinte semmilyen alakváltozást nem szenvedett és hogy a sorjahídban volt a legnagyobb az alakváltozás mértéke. Ez összhangban van a kialakult szálszerkezettel és azzal is, hogy a minták ezen részein kisebb keménységet mértünk. Az alakváltozás minden hőmérsékleten ekkora volt.

A hőmérséklet eloszlását az egyes munkadarabokon a *14. ábra* mutatja

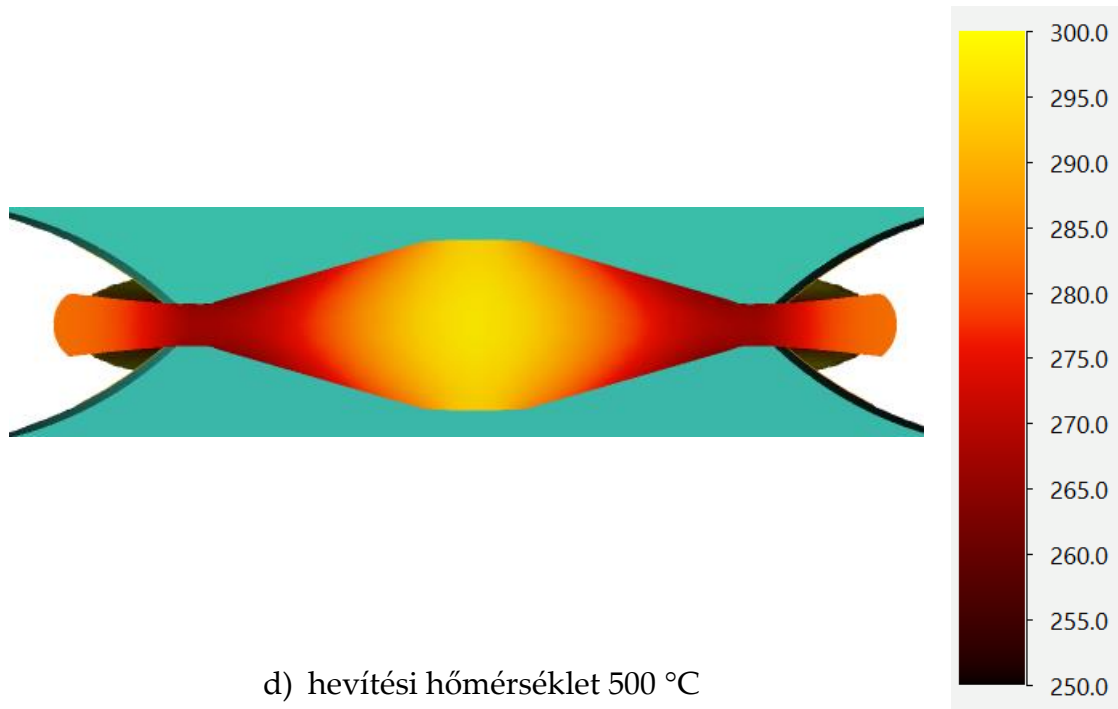
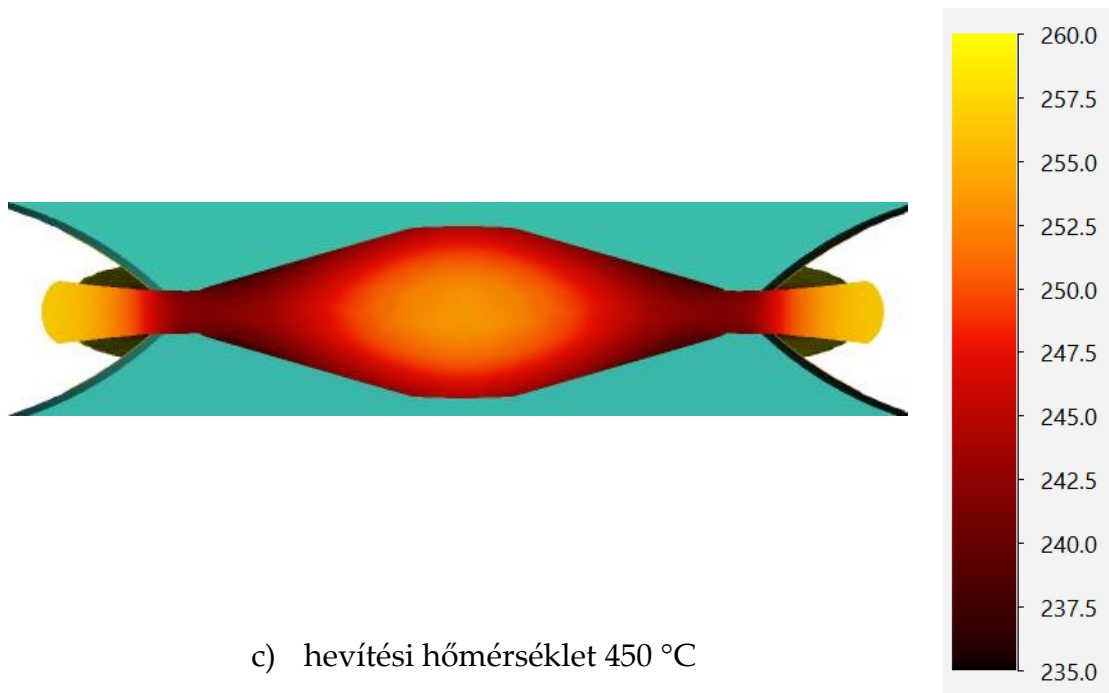




a) hevítési hőmérséklet 350 °C



b) hevítési hőmérséklet 400 °C



14. ábra A hőmérséklet eloszlás az egyes munkadarabok keresztmetszetében

A 14. ábrán láthatjuk, hogy minél kisebb hőmérsékletre hevítettük a munkadarabot, annál jobban lehült alakítás végére. A szimuláció ideális viszonyokat feltételez, ami azt jelenti, hogy mindig ugyanannyi idő alatt sikerült elhelyezni a munkadarabot az üregben. A valóságban ez még befolyásolja az eredményt. Az alapanyag olvadáspontja 650 °C. Ez 923,15 Kelvint jelent, aminek ökölszabály szerint a 60 %-a az újra kristályosodási hőmérséklet. Ez esetünkben

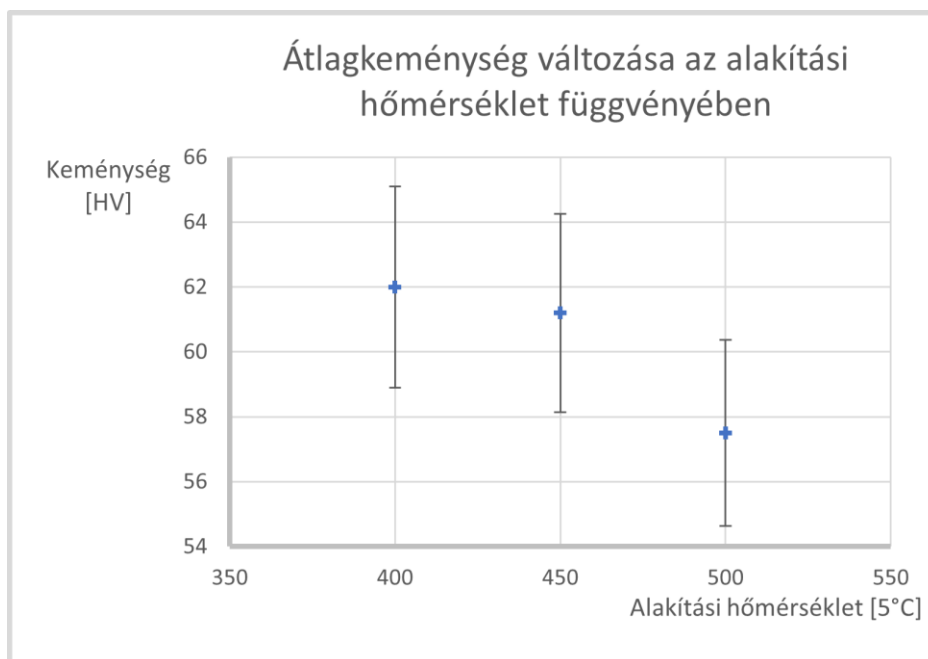
553,89 K, ami 280,74 °C-nak felel meg. A szerszám hőmérséklete 20 °C volt. Az 550 °C-on elkészített munkadarab alakítását nem tudtuk leszimulálni, mert a QFormban a fizikai tulajdonságok 500 °C-ig vannak értelmezve. Ha az ábráról leolvasható trendet követjük, miszerint az 50 °C-os hevítési hőmérséklet különbség körülbelül 30-40 °C-os hőmérsékletkülönbséget eredményez az alakítás végére, akkor megállja a helyét az állítás, hogy az 550 °C-os munkadarab belsejében ~340 °C-nak kellett lennie a legnagyobb hőmérsékletnek, a legkisebbnek pedig ~280 °C-nak, ami azt jelenti, hogy ez a munkadarab volt az egyetlen, ami a teljes alakítás alatt a melegalakítás hőmérséklettartományában maradt. Ami a *14. d) ábrán* is látható, hogy az 500 °C-os munkadarabnak a középső része még rekrisztallizációs hőmérséklet felett volt, de az alakítás egy része inkább a félmeleg tartományban zajlott. A többi munkadarab alakításának a nagy része már félmeleg tartományban zajlott, így a keménységmérés eredményeit részben befolyásolnia kellett a hidegalakításra jellemző szilárdságnövekedésnek. Ez az 1. táblázatban az átlagkeménységekből is látható. Az 550 °C-os mintának csak az osztósíkjában mértünk keménységet ennek átlaga 43,61 HV, ami azt jelenti, hogy ebben a mintában a melegalakítás hatására valóban lágy finomszemcsés szerkezet jött létre és a többi munkadarab valóban félmelegalakításon esett át.

## 5. EREDMÉNYEK

Az üregtöltés a végeleemes szimulációs előrejelzéssel ellentétben nem teljesült és a hevítési hőmérséklet növekedésével romlott. Ennek oka, hogy az alumínium sokkal könnyebben alakul, mint az acél és az acél nyílhegyek gyártására tervezett süllyeszték sorjakialakítása nem biztosít megfelelő nyomást az anyag üregben tartásához.

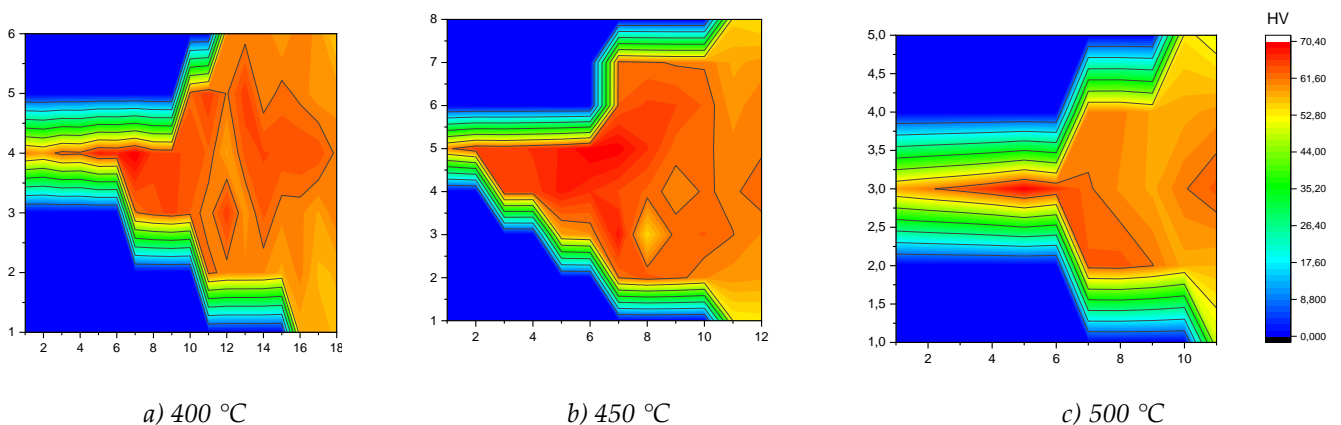
A kovácsolás hatására kialakult szálszerkezetet a szimuláció jól mutatta, azaz összhangban volt a maratás során megmutatkozó szálszerkezettel. Az alakítási hőmérséklet emelésével sűrűbb szálszerkezet alakult ki és igazolódott, hogy a nagyobb mértékben alakított részekben futnak sűrűbben a szálak és a kisebb mértékben alakult részekben ritkábban.

Az alakítási hőmérséklet hatását a keménységre az 15. ábra mutatja



15. ábra: Átlagkeménység változása az alakítási hőmérséklet függvényben

Az egyes mintákon mért keménységtérképeket láthatjuk a 16. ábrán.



16. ábra: A széles keresztmetszetben felvett keménységtérképek különböző hevítési hőmérsékleteken

A keménységmérések igazolták, hogy a nagyobb alakváltozást szenvedő részeknek nagyobb mértékben növekszik a szilárdsága, mint a kisebb alakváltozást szenvedő részeké. Ennek oka a szemcseszerkezet finomodása a dinamikus újrakristályosodás során. A mérések kimutatták, hogy az alakítási hőmérséklet növelésével az újrakristályosodás miatt a keménység csökken. Azt is megállapíthatjuk az eredményekből, hogy a félmeleg alakításnál már tapasztalható a hidegalakításra jellemző szilárdságnövekedés. Az alakítás végén számított hőmérsékleteloszlás és az alakváltozás mértékének eloszlása is alátámasztja a keménységértékek eloszlását, ezáltal a darabban a szilárdsági tulajdonságok inhomogenitását.

Az 550 °C-os munkadarabon mért keménységek igazolják, hogy ha az alakítás végéig a rekrisztallizációs hőmérséklet felett van a munkadarab hőmérséklete, akkor valóban lágyabb lesz a munkadarab, mint a félmelegen és hidegen alakított darabok.

## 6. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE/KÖVETKEZTETÉSEK

Dolgozatunkban alumínium süllyesztékes kovácsolásával foglalkoztunk.

Először áttekintettük a témához kapcsolódó szakirodalmat, majd kovácsolási kísérleteket folytattunk. Az alumínium melegalakítási hőmérséklettartományán a hevítési hőmérséklet hatását vizsgáltuk a szilárdsági tulajdonságokra. A folyamatot végeeselemes szoftverrel szimuláltuk és a vizsgálati eredményeket összehasonlítottuk a szimulációs eredményekkel.

350, 400, 450, 500 és 550 °C-ra hevített 10 mm átmérőjű 100 mm hosszú próbatestekből a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék Ziaja György Képlékenyalakító laboratóriumában található DSH 200 hidraulikus préssel kovácsoltunk nyílhegyeket, amiknek a szerszámát egy korábbi dolgozatomban terveztem és jelenleg az Alakítástechnika c. tárgyban használjuk oktatási célra.

Az elkészült próbatesteken megfigyeltük, hogy az üregtöltés nem teljesült, mert a szerszám elsősorban acél nyílhegyek gyártására készült, alumíniumhoz pedig a könnyebb alakíthatósága miatt másfajta kialakítású szerszámra van szükség.

A próbatesteken két jellemző keresztmetszetben csiszolatokat készítettünk és a kovácsolásra jellegzetes szálszerkezetet vizsgáltuk, ami a munkadarab hőmérséklet növekedésével egyre sűrűbbé vált. Ezután a Lapos nyílhegy széles keresztmetszetében 3 mintán keménységtérképeket vettünk fel, amelyek összehasonlításával igazoltuk, hogy az alakítási hőmérséklet növekedésével a keménység csökken. Az adott keresztmetszeten belül a nagyobb mértékben alakváltozott részekben a keménység nagyobb lett, a kisebb mértékben alakváltozott részekben pedig kisebb. Ezt az összefüggést a szimuláció eredményei megerősítették. A szimulációkból kiderült, hogy 500 °C alatt alakítás közben a nagy hőelvonás miatt a munkadarab hőmérséklete a félmelegalakítás tartományába kerül, így már érvényesül a szemcsék torzulásából fakadó szilárdságnövekedés. Ezzel megerősítést nyert, hogy miért fontos alumínium kovácsolásakor a szerszámot kellőképpen előmelegíteni. Az 550 °C-on készült munkadarab osztósíkjában mért keménység elmaradt a többi munkadarabon mért keménységektől. Az eltérés alátámasztja, hogy ha a munkadarab hőmérséklete a kovácsolás teljes ideje alatt a rekristallizációs hőmérséklet felett van, akkor alakul ki a leglágyabb szerkezet. Az alapanyagunk nem nemesíthető ötvözet volt ez hozzájárult ahhoz, hogy a kiváló keményedés hatásával nem kellett számoljunk, hanem az alakítás hatásait tudtuk vizsgálni.

## 6.1. Jövőbeli tervek

A kísérletek és a szakirodalom kutatás során láthattuk, hogy az alumínium képlékenyalakításával érdemes foglalkozni. A téma napjainkban aktuális, hiszen a járművek tömegcsökkentése és az újrahasznosíthatóság szempontjából egy nagyon jó alapanyag, arról nem beszélve, hogy szilárdsági tulajdonságai ötvözéssel és hőkezeléssel széles tartományban befolyásolhatók.

A kísérletek során sikerül jobban megértenünk az alumínium tulajdonságait és viselkedését. Kísérleteinkkel igazoltuk, hogy az alakítási hőmérséklet megválasztása jelentős mértékben befolyásolja a gyártmány tulajdonságait. Láthattuk a technológiai paraméterek precíz beállításának fontosságát és a folyamat vége-selemes modelljét, - ami nagymértékben segített megérteni a tapasztalatainkat -, is sikerült validálnunk a mérési eredményeinkkel.

Jövőbeni tervek:

1. A vizsgálatok elvégzése a másik süllyesztékben is.
2. A kialakult szemcseszerkezet vizsgálata.
3. A kísérlet megismétlése kiválóan keményíthető ötvözetrel, ahol lehetőség nyílik az öregedés mechanikai tulajdonságra gyakorolt hatásának vizsgálatára is.
4. A kísérlet elvégzése más technológiai paraméter, például az alakítási sebesség változtatásával.

## 7. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

Az irodalomjegyzékben a felhasznált írott források találhatóak, míg az ábrajegyzékben az összes ábra pontos hivatkozása található.

### 7.1. Irodalomjegyzék

(LATINÁK, 1977) LATINÁK ISTVÁN (1977): Kovácsolás. Műszaki Könyvkiadó, Budapest. ISBN 963 10 1827 X

(URL<sub>1</sub>) [https://www.aluzartszelveny.hu/cikk/az\\_aluminium\\_tulajdonsagai\\_es\\_elonyei](https://www.aluzartszelveny.hu/cikk/az_aluminium_tulajdonsagai_es_elonyei)  
[2023. 10. 24. 23:50]

(URL<sub>2</sub>) <https://att.bme.hu/neptuncode/BMEGEMTBGF1/eloadasok/06-Sz%C3%ADnes%20%C3%A9s%20k%C3%B6nyv%C5%B1f%C3%A9mek.pdf> [2023.11.05. 0:27]

(URL<sub>3</sub>) [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632622658333?fbclid=IwAR213QsK9G2e\\_mLjqSnQgw\\_jLk6dyQ-OLaup9NkOoQOUXgrefqOJFwW6eyo](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632622658333?fbclid=IwAR213QsK9G2e_mLjqSnQgw_jLk6dyQ-OLaup9NkOoQOUXgrefqOJFwW6eyo) [2023. 10. 24. 23:50]

(URL<sub>4</sub>) <https://docplayer.hu/232495728-Sullyesztekben-kovacsolt-otvozott-aluminium-probatestek-szakitoszilardsaga.html#> [2023.11.05. 0:32]

(URL<sub>5</sub>) [https://www.att.bme.hu/neptuncode/BMEGEMTBGL1/eloadasok/kovacsolas%20II\\_sullyesztek%20kovacsolas.pdf](https://www.att.bme.hu/neptuncode/BMEGEMTBGL1/eloadasok/kovacsolas%20II_sullyesztek%20kovacsolas.pdf) [2022.09.03.]

(URL<sub>6</sub>) [https://www.att.bme.hu/neptuncode/BMEGEMTBGL1/eloadasok/13\\_kovacsolas%20I\\_szabadalkito%20kovacsolas.pdf](https://www.att.bme.hu/neptuncode/BMEGEMTBGL1/eloadasok/13_kovacsolas%20I_szabadalkito%20kovacsolas.pdf)

### 7.2. Ábrajegyzék

1. *ábra*: Kovácsszerszám Saját ábra
2. *ábra*: Üregtöltés Qform szerint Saját ábra
3. *ábra*: 350 °C-on készült nyílhegyek Saját ábra
4. *ábra*: 400 °C-on készült nyílhegyek Saját ábra
5. *ábra*: 450 °C-on készült nyílhegyek Saját ábra
6. *ábra*: 500 °C-on készült nyílhegyek Saját ábra



7. *ábra*: 550 °C-on készült nyílhegyek Saját ábra
8. *ábra*: A nyaknál kialakult szálszerkezet Saját ábra
9. *ábra*: A széles keresztmetszetben kialakult szálszerkezet Saját ábra
10. *ábra*: A szálszerkezet változása a széles keresztmetszetben a különböző alakítási hőmérsékleteken (400-450-550 °C) Saját ábra
11. *ábra*: Szálszerkezet változása a nyaknál (400-450-550-550 °C) Saját ábra
12. *ábra*: A széles keresztmetszetben felvett keménységtérképek különböző hevítési hőmérsékleteken Saját ábra
13. *ábra*: Az alakváltozás a vizsgált keresztmetszetben Saját ábra
14. *ábra*: A hőmérséklet eloszlás az egyes munkadarabok keresztmetszetében Saját ábra
15. *ábra*: Átlagkeménység változása az alakítási hőmérséklet függvényben Saját ábra
16. *ábra*: A széles keresztmetszetben felvett keménységtérképek különböző hevítési hőmérsékleteken Saját ábra

