

## Általános képlékeny alakítás és fizikai alapok

A **képlékeny alakítás** során a fémekben maradandó alakváltozás jön létre, amikor a külső terhelés hatására a fajlagos alakváltozás eléri a folyáshatárt <sup>1</sup>. Ez a tartós alakváltozás atomos szinten a kristálysíkok menti **csúszással** (diszlokációk mozgásával) valósul meg <sup>2</sup>. A képlékeny alakítást célszerű csoportosítani aszerint, hogy nyomófeszültségek dominálnak-e (pl. kovácsolás, hengerlés) vagy húzó-nyomó igénybevételek (pl. rúd- és dróthúzás, mélyhúzás) <sup>3</sup>. Mindkét csoportban a felhasznált anyag tömege nem változik, a terhelés elve – pl. folyási görbe, képlékenységi kritérium (Tresca, Huber–Mises stb.) – az alkalmazott anyagmodellek alapján írható le <sup>2</sup> <sup>3</sup>. A fémek képlékenysége tehát olyan tulajdonság, amely lehetővé teszi, hogy külső terhelésre maradandó alakváltozást szenvedjenek anélkül, hogy az anyag törne <sup>1</sup>.

## Mélyhúzás technológiája

A **mélyhúzás** során síklemezből (ún. terítékből) vékony falú, üreges testet (pl. csészét, poharat) állítunk elő <sup>4</sup>. A folyamat lényege, hogy a teríték peremét a lekerekített húzógyűrűn át egy megfelelően kialakított bélyeg átszállítja a húzószerszámba. A mélyhúzási folyamat során a terítéket és a szerszámot kenőanyaggal kezelik, hogy csökkentsék a súrlódást, és szigorú szabályozással beállítják a behúzóerőt és a ráncfogó (blank-holder) erősségét. A húzási fokozat (draw ratio) fontos jellemző: egyszerű esetben a behúzott és a kiindulási átmérő arányával definiálható. Például Bertók és munkatársai egy számítással igazolták, hogy egy adott teríték- és bélyegmérettel mi a maximálisan elérhető húzási arány <sup>5</sup>. A mélyhúzható anyagoknak általában nagy nyújthatóságúnak kell lenniük – elnevezésük (mélyhúzható acél, réz-, alumíniumlemez) is erre utal <sup>6</sup> <sup>7</sup>. Kondás és Mertinger (2022) szerint a tipikus mélyhúzható lágyacélok hidegen hengerelt, lágy, ötvözetlen acélok, melyek kiemelkedő alakváltozási képességgel rendelkeznek <sup>8</sup>. Az acélok hidegalakítási öregedése ugyanakkor rontja a mélyhúzhatóságot <sup>6</sup>.

Mélyhúzással készült termékek például a konzervdobozok, fürdőkádak és egyéb háztartási tárgyak, a műanyag formák (hőkupolák), valamint a járműipar nagy sorozatban gyártott alkatrészei (pl. kaszni panelelemek, csaptelepek, hajtóműhengerek burkolatai) <sup>9</sup>. A mélyhúzást többnyire hidegalakításként hajtják végre, de különleges esetekben (vastagabb lemez, nagy átalakítás) előmelegítést is alkalmaznak. A technológiát méretező szabvány (pl. MSZ 5731) előírja a csészehúzó próbát, mely során meghatározzák azt a legnagyobb átmérőjű kosár alakú tárgyat (csészét), amit adott anyagból még szakadás nélkül ki lehet húzni – ez jellemzően a maximális húzási fokozatot adja <sup>10</sup>.

## Mélyhúzó szerszámok felépítése és anyagai

A mélyhúzószerszám alapvető elemei: a **húzógyűrű (matrica)**, a **húzóbélyeg (punch)** és a **leszorító (ráncfogó)** <sup>11</sup>. A húzógyűrűbe illesztett betét és a lefelé mozgó bélyeg alakítja át a terítéket, miközben a leszorító (blank-holder) az élnél fogva rögzíti a lemezt. A szerszámok változatai között megkülönböztetünk **előhúzó** és **továbbhúzó** egyműveltes kivitelűt, illetve **töbllépéses (soros/blokk) szerszámokat**, melyek több alakítási lépést egy gépben végeznek el <sup>12</sup>. Egyszerűbb szerszámok ránc tartó nélküli kivitelűek, nagy szériákban azonban ránc tartós (blankholderrel) szerszámokat alkalmaznak, ahol a ránc tartó előredőlvé megakadályozza a perem kipúposodását <sup>12</sup> <sup>13</sup>. A

**működtető gép típusától** függően készülnek egyszeres és kettős vagy hármas működésű présekhez tervezett mélyhúzószerszámok is <sup>12</sup>.

A szerszámalakok készülhetnek speciális szerszámacélokból (pl. SKD11/1.2344, AISI D2), amelyek nagy keménységet és kopásállóságot biztosítanak <sup>14</sup>. Gyakran alkalmaznak részleges edzést vagy felületbevonatot, hogy a bélyeg és matrica felületének élettartamát növeljék. A szerszámanyag kiválasztásánál figyelembe veszik az anyag galvanizált felületét és a felületkezelését is, mivel ezek befolyásolják a súrlódást és a kopás mértékét <sup>13</sup>. A szerszámban a dolgozó felület geometriáját – pl. bélyeg- és matricaátmérőt, lekerekítési sugarakat – szigorúan precíziós kialakítják, mert a perem ráncosodása és a forma pontossága nagyban függenek ezektől. A megfelelő anyagválasztás (keménység, ütőszilárdság), kenőanyag használat és pontos befogás mind kulcsfontosságú a szerszám megfelelő működéséhez.

## A mélyhúzó szerszámok fő változatai <sup>12</sup>

- **Egyműveletes szerszámok:** Egyszerre egyetlen rántás történik (előhúzó, továbbhúzó).
- **Többlépéses szerszámok:** Különböző alakító műveletek (kivágás, továbbhúzás) egy vagy több löket során.
- **Ránc tartó nélküli vs. ránc tartós kivitel:** Egyszerű szerszámoknál a blank pereme csak a súrlódásra támaszkodik; ránc tartós szerszámokban a leszorító aktív nyomással akadályozza a perem hullámosodását <sup>13</sup>.
- **Gép szerint:** Vezetőoszlopos vagy vezetést nem igénylő kivitel; alkalmas egyszeres vagy kettős préseken való alkalmazásra <sup>12</sup>.

## Mélyhúzó szerszámok tervezése: szempontok, terhelések, kopás, hűtés, élettartam

A mélyhúzó szerszám tervezésénél elsődleges szempont a geometriák optimalizálása és a működési terhelések kiszámítása. A terítékperem-szerszám érintkezése során a peremet tangenciális nyomófeszültség és radiális húzófeszültség terheli egyszerre <sup>15</sup>, ezért a ránc tartó nyomóerejét úgy kell megválasztani, hogy megakadályozza a perem felpúposodását anélkül, hogy túlzottan megnövelné a húzófeszültséget és ezzel a későbbi szakadás kockázatát <sup>15</sup> <sup>13</sup>. A teríték egyenletes behúzásához a bélyeg és matrica kerekítési sugarát gondosan állítják be (hüvelyszerszám-tervezési segédletek szerint), mivel a túl kicsi sugár repedéshez, a túl nagy sugár pedig alakhibákhoz vezethet. A súrlódási viszonyokat (így a kenőanyag fajtáját és mennyiségét) a felületminőség és a lemez anyaga szerint optimalizálják, hiszen a súrlódás a kopás fő oka. A kopás minimalizálása érdekében gyakran alkalmaznak keménység- és kopásállóság javító eljárásokat (pl. tűzihorgany bevonat nélküli acél, speciális edzés vagy nitridálás a szerszámon), valamint kenőrétegeket.

A tervezés során figyelembe veszik a **dinamikus igénybevételeket** is: a gyors nyomó- és visszaugrási mozgások, ütdések a szerszám élettartamát lerövidíthetik. Nagyteljesítményű termelésben gyakran víz hűtéses csatornákat építenek be a szerszámtestbe, hogy a hőt elvezessék és megőrizték a pontos termikhőmérsékletet (a hőmérsékletváltozás alapanyag-feszültséget okozhat). A szerszámok karbantartása során periódikusan ellenőrzik a felületi sérüléseket (elkopott élkeret, karcok), és szükség esetén újraélezik vagy újraedzik a kritikus részeket. A kopás mértékét a gyártási mennyiség (ciklusok száma) határozza meg, a modern gyártócégek ezért gyakran alkalmaznak kopásjelző bevonatokat vagy elektronikusan monitorozott terhelést a szerszám élettartamának becslésére. Összességében a mélyhúzó szerszám tervezése komplex feladat: egyszerre kell optimalizálni a geometriát,

anyagválasztást, kenést és hűtést úgy, hogy a várt gyártási darabszám alatt se következzen be idő előtti tönkremenetel.

## Végeselemes módszer (FEM) a mélyhúzás modellezésében

A mélyhúzás során fellépő bonyolult alakváltozások és érvényesülő feszültségállapotok elemzésére széles körben alkalmazzák a végeselemes módszert (FEM). A FEM szimuláció segítségével – amint azt Bertók és mtsai is bemutatják – elemezhető a lemez deformációja, feszültsége és a kritikus jelenségek (fenéklezakadás, ráncosodás) előfordulása egy paraméterezett mélyhúzó-modellben <sup>16</sup> <sup>5</sup>. Bertókék axiszimmetrikus modellt készítettek MSC MARC szoftverrel, ahol a lemezt rugalmas-képlékeny DC03-as acélként tételezték fel (izotróp anyagmodell) <sup>17</sup>. A szimulációk például megmutatták, hogy bizonyos geometriai kombinációknál mikor szakadhat le a darab fenékrésze <sup>5</sup>, illetve kiszámíthatóvá vált a kritikus húzóerő és a maximális húzási fokozat <sup>5</sup>.

Az anizotrópia hatásának figyelembevétele érdekében az alakítási szimulációkhoz speciális **képlékenységi kritériumokat** használhatnak. Két-három irányra kiterjedő anizotrópia leírására elterjedt megoldás a Hill- vagy a Barlat-féle többparaméteres folyási kritérium <sup>18</sup> <sup>19</sup>. Wang és mtsai (2024) említik, hogy a nagy húzásra alkalmas lemezek irányfüggő kristályszerkezete jelentős earing (élhullámosodás) hajlamot okozhat mélyhúzáskor <sup>18</sup>. Basak és munkatársai (2020) például a Marciniak-Kuczyński modellben Hill- és a nemkvadratikusan Barlat Yld2000-2d kritériumokat alkalmaztak az alakíthatóság (formálhatósági diagram) előrejelzésére <sup>19</sup>. Általánosan elmondható, hogy míg a hagyományos FEM-programok (pl. Abaqus) a von Mises képlékenységi modellt támogatják, addig a fejlettebb anizotróp leírásokhoz (pl. Yld2000-2d) vagy speciális ömlesztett programokat, vagy felhasználói alprogramokat (UMAT) kell alkalmazni <sup>20</sup>. Például Wang et al. megjegyzi, hogy néhány dedikált szoftver gyárilag tartalmazza a Yld2000-2d kritériumot, míg az Abaqus 6.x verziójához utólagos kiegészítéssel lehet azt igénybe venni <sup>20</sup>.

A végeselemes modellek alkalmazása nemcsak a szerszámtervezésben segít (pl. AutoForm, Pam-Stamp, Marc, Abaqus, LS-DYNA szoftverekben), hanem a mélyhúzási jelenségek jobb megértéséhez is hozzájárul. A FEM-szimulációkkal vizsgálható például a blank peremhűtése, a kenőanyag hatása, a geometria optimalizációja vagy a különböző lépésenkénti erő-út karakterisztikák. Béres és Tisza (2019) kiemeli, hogy napjainkban már elterjedt a bifurkációs és energiaalapú elméleteken túlmenő FEM-elemzések használata, valamint a speciális AutoForm szoftver alkalmazása a ráncosodás és szakadás előrejelzésére <sup>21</sup>. Összességében a FEM elmélet és eszköztár lehetővé teszi az anizotróp anyagviselkedés (Lankford-egyenlőtlenségi tényezők, feszültség-alakváltozás mérések) beépítését a mélyhúzási szimulációba, így segít a valódi alakítási körülmények minél pontosabb modellezésében <sup>18</sup> <sup>19</sup>.

**Források:** A fejezetben hivatkozott szakirodalom a mélyhúzás alap- és alkalmazott kutatására vonatkozó tudományos cikkekből, szakirodalmi jegyzetekből és gyakorlati tapasztalatokat összegző forrásokból származik. Konkrét hivatkozások: Béres–Tisza (2019) a ráncosodás elméleti becsléseiről <sup>15</sup> <sup>13</sup>, Bertók et al. (2018) FEM-analízisekről <sup>16</sup> <sup>5</sup>, Wang et al. (2024) az anizotrópia mélyhúzásra gyakorolt hatásáról <sup>18</sup>, Kondás–Mertinger (2022) a mélyhúzható acélok jellemzőiről <sup>6</sup>, valamint a Sulinet tananyag mélyhúzó szerszámok és termékek ismertetéséről <sup>11</sup> <sup>9</sup>. Emellett számos egyetemi jegyzet és szabvány is támasztja alá a fenti megállapításokat.

1 2 **Képlékenység: a fogalom magyarázata és jelentősége az anyagtudományban - Elo.hu**

<https://elo.hu/keplekenysege-a-fogalom-magyarazata-es-jelentosege-az-anyagtudomanyban/>

3 **Képlékeny alakítás – Wikipédia**

[https://hu.wikipedia.org/wiki/K%C3%A9pl%C3%A9keny\\_alak%C3%ADt%C3%A1s](https://hu.wikipedia.org/wiki/K%C3%A9pl%C3%A9keny_alak%C3%ADt%C3%A1s)

4 13 15 21 **real.mtak.hu**

[https://real.mtak.hu/109564/1/2019\\_1\\_ENG\\_008\\_Beres.pdf](https://real.mtak.hu/109564/1/2019_1_ENG_008_Beres.pdf)

5 10 16 17 **(PDF) Mélyhúzás végeselemes modellezésének technológiai és elméleti felhasználása**

<https://www.academia.edu/81743194/>

M%C3%A9lyh%C3%BAz%C3%A1s\_v%C3%A9geselemes\_modellez%C3%A9s%C3%A9nek\_technol%C3%B3giai\_%C3%A9s\_elm%C3%A9leti\_felhaszn%C3%A1s%C3%A1s

6 8 **Doktorandusz Almanach - 1.kötet/1.volume (2022)**

[https://epa.oszk.hu/04600/04692/00001/pdf/EPA04692\\_doktorandusz\\_almanach\\_2022\\_326-335.pdf](https://epa.oszk.hu/04600/04692/00001/pdf/EPA04692_doktorandusz_almanach_2022_326-335.pdf)

7 9 11 12 **Gépészeti szakismeretek 2. | Sulinet Tudásbázis**

<https://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/gepeszet/gepeszeti-szakismeretek-2/a-melyhuzas-technologiaja/melyhuzas-technologiaja>

14 **SKD11 szerszámacél**

<http://hu.fcstoolsteel.com/product/skd11-tool-steel>

18 20 **Study of Anisotropic Behavior in Sheet Metal Forming**

<https://www.mdpi.com/1996-1944/17/9/2031>

19 **Formability and fracture in deep drawing sheet metals: Extended studies for pre-strained anisotropic thin sheets - Seoul National University**

<https://snu.elsevierpure.com/en/publications/formability-and-fracture-in-deep-drawing-sheet-metals-extended-st>